



Universiteit
Leiden
The Netherlands

From electrons to stars : modelling and mitigation of radiation damage effects on astronomical CCDs

Prod'homme, T.

Citation

Prod'homme, T. (2011, November 22). *From electrons to stars : modelling and mitigation of radiation damage effects on astronomical CCDs*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/18136>

Version: Corrected Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/18136>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Résumé en français

En remplaçant les navires par des satellites et nos yeux par leurs extensions modernes et numériques — les capteurs CCDs — les scientifiques qui conçoivent, construisent et utilisent les missions spatiales marchent dans la trace directe des explorateurs de la Renaissance. Comme eux, ils révèlent les contours de nouveaux continents et remettent en question le monde tel que nous le connaissons. Depuis l'espace, les astronomes peuvent observer le ciel dans son entièreté, dans toutes les longueurs d'onde de la lumière et sans les effets perturbateurs de l'atmosphère terrestre. L'absence de gravité leur offre aussi un meilleur contrôle et une plus grande stabilité de leurs instruments. Il n'est donc pas surprenant qu'un nombre important d'avancées récentes dans notre compréhension de l'univers aient été permises par l'utilisation de télescopes spatiaux tels que le télescope spatial international Hubble. Cependant l'espace ne comporte pas uniquement des avantages ; le vide, des gradients de température élevés, et surtout les radiations en font l'environnement le plus hostile que l'Homme n'ait jamais conquis. Des particules énergétiques, telles que les protons émis par le soleil, peuvent dégrader lentement les performances d'instruments embarqués à bord de satellites ou subitement interrompre leur fonctionnement. Protéger les satellites avec des matériaux résistants aux radiations ou utiliser des composants électroniques "durcis" ne suffit pas pour obtenir des mesures précises depuis l'espace ; bien souvent les effets des radiations sur ces mesures doivent être pris en compte dans leur analyse sur Terre. Les capteurs de type CCD sont aujourd'hui si performants en termes d'imagerie et de détection de la lumière qu'ils sont devenus le cœur de nombreux instruments à bord des satellites. Ces capteurs sont similaires aux capteurs présents dans les appareils photographiques numériques haut de gamme. Ils permettent l'observation de la Terre, du ciel et des corps du système solaire dans des longueurs d'ondes qui vont du proche infrarouge jusqu'aux rayons X et surtout dans le visible. Cette thèse s'inscrit dans un effort en cours de la communauté scientifique qui vise à comprendre et atténuer les effets des dommages dus aux radiations dans les CCDs à applications astronomiques. Ma recherche s'est déroulée dans le contexte de Gaia, mission astrométrique de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Les dommages dus aux radiations ont été identifiés comme une menace pour les performances scientifiques de Gaia. Dans ce résumé, je présente tout d'abord la mission et comment elle vise à accomplir son but premier : la cartographie de la position exacte des étoiles dans notre galaxie, la Voie Lactée. Ensuite j'explique brièvement ce qu'est un capteur CCD et quels sont les effets des radiations sur son fonctionnement. Enfin je résume le contenu de cette thèse et les résultats de mes recherches.

Cartographier la Voie Lactée avec Gaia

Pourquoi Gaia ?

Gaia est un satellite qui vise à créer la plus grande et la plus précise des cartes de la Voie Lactée (voir Figure 8.1) en mesurant pour un milliard d'étoiles leur distance par rapport au soleil, leur position dans le ciel et leur mouvement propre. Cette carte s'étendra jusqu'à des régions que nous pouvons seulement rêver d'atteindre physiquement un jour. Si elle n'est pas destinée à de futurs voyageurs de l'espace, son but est bien la découverte (scientifique). La distribution des étoiles dans la Voie Lactée est à présent peu connue et sa structure exacte ainsi que les éléments qui la composent reste à découvrir. Par exemple nous savons que notre galaxie se présente sous la forme d'une spirale comme de nombreuses autres, mais nous ignorons le nombre exact de bras qui la composent. Une carte stéréoscopique et dynamique de la Voie Lactée permettra aux astronomes non seulement de décrire son état actuel mais aussi d'expliquer sa formation et son évolution. De plus elle nous permettra de préciser notre compréhension des nombreuses classes d'étoiles, de découvrir des milliers de nouvelles exoplanètes à (c.-à-d. à l'extérieure du système solaire), d'établir une carte des astéroïdes dans notre système solaire et d'identifier celles qui pourraient croiser la trajectoire de la Terre. Enfin Gaia nous permettra de tester la théorie de la relativité générale d'Einstein.

Calculer la distance d'une étoile par rapport au soleil

Dans cette quête d'une meilleure compréhension de notre Univers, il est essentiel de connaître la distance qui nous sépare des objets célestes que nous observons. Par exemple, il est impossible de connaître la luminosité intrinsèque d'un objet sans en connaître la distance car plus un objet est éloigné plus sa luminosité apparente est faible. Cependant mesurer la distance entre nous et un objet inatteignable est une tâche complexe. La technique la plus fiable à notre disposition est celle dite de la parallaxe trigonométrique. Cette technique est la plus fiable car elle repose sur des principes géométriques et non sur des hypothèses relatives à notre compréhension de l'univers. La parallaxe correspond au mouvement apparent d'un objet situé au premier plan par rapport aux objets d'arrière-plan induit par le changement de position de l'observateur. Il vous est possible d'observer l'effet de parallaxe facilement grâce à une petite expérience : (a) dans un premier temps, placez un doigt en face de votre nez à quelques centimètres, (b) fermez un œil, (c) observez la position de ce doigt par rapport à des objets d'arrière-plan, (d) fermez l'œil ouvert et ouvrez l'œil fermé (c.-à-d. changez de point de vue), (e) vous pouvez observer que la position de votre doigt a changé par rapport aux objets d'arrière-plan. En répétant les opérations de (b) à (e), vous pouvez voir votre doigt se déplacer alors qu'il reste au même endroit, c'est l'effet de parallaxe. En répétant une seconde fois cette expérience tout en augmentant lentement la distance entre votre doigt et votre nez, vous observerez que l'amplitude du mouvement apparent de votre doigt se réduit. Plus l'objet est éloigné, plus l'effet de parallaxe s'atténue. Ceci illustre la difficulté à mesurer la distance d'objets très éloignés en utilisant leur parallaxe. Il est donc nécessaire d'augmenter l'amplitude de l'effet de parallaxe. Une façon d'augmenter cette amplitude est d'accroître la ligne de base c.-à-d. la distance entre deux positions de l'observateur. En observant tout au long de l'année la position

d'une étoile dans le ciel, les astronomes utilisent le voyage annuel de la Terre autour du soleil pour obtenir la plus grande ligne de base à notre disposition : deux fois la distance Terre-soleil (voir Fig. 8.2). Le mouvement apparent alors décrit par l'étoile dans le ciel est appelé la parallaxe stellaire (ou parallaxe annuelle). La Fig. 8.2 explique le principe de la mesure de la parallaxe stellaire pour obtenir la distance d'une étoile par rapport au soleil. Pourtant prédite de longue date, ce n'est qu'au début du XIX siècle que les astronomes ont, pour la première fois, détecté la parallaxe stellaire. Friedrich Bessel est le premier à avoir mesuré une parallaxe stellaire, celle d'une étoile très lumineuse et aussi l'une des plus proches du Soleil, l'étoile 61 du Cygne. La parallaxe est généralement exprimée par un angle : ϖ (voir Fig. 8.2). Pour l'étoile 61 du Cygne située à 11 années-lumière du soleil (1.07×10^{17} km !), ϖ est égale à 287 millisecondes d'arc (mas) c.-à-d. moins qu'un dix millième de degré. Cette valeur est comparable à la taille angulaire de l'empreinte de Niel Armstrong sur la lune vue de la Terre ($\varpi = 150$ mas).

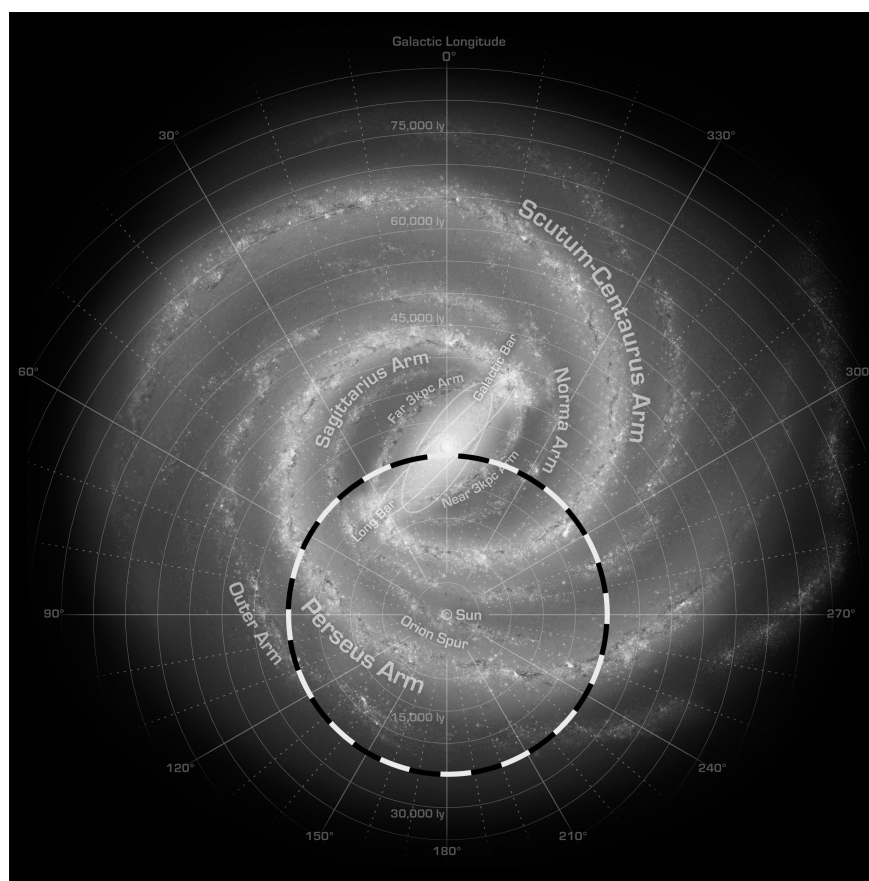


FIGURE 8.1 — Vue d'artiste de la distribution des étoiles dans la Voie Lactée telle qu'elle pourrait être observée vue d'en haut. Le soleil et la Terre se situent en périphérie dans un des bras de la spirale (au centre en bas). Le cercle en pointillé représente la limite au delà de laquelle la mesure de la distance n'est plus assez précise (erreur supérieure à 10%). Cette limite est située à 30 000 années-lumière du soleil (presque 2 milliards de fois la distance Terre-soleil). Cependant la position des étoiles peut encore être mesurée jusqu'au sein même de la galaxie la plus proche : Andromède. En tout un milliard d'étoiles seront observées par Gaia, c'est à dire un pour cent des étoiles de notre galaxie. Cette illustration, représentative de nos connaissances actuelles, est fournie par R. Hurt (NASA/JPL-Caltech).

Pourquoi aller dans l'espace ?

La mesure de la parallaxe stellaire (c'est à dire de la distance d'une étoile par rapport au soleil) peut être effectuée à condition d'avoir :

1. une très grande stabilité d'instrument et de plateforme d'observation dans le temps, car les mesures de la position de l'étoile doivent être répétées à différentes époques et connectées ensemble par la suite,
2. une détermination précise de l'emplacement de l'image de l'étoile par rapport à l'instrument et de la direction de pointage de l'instrument pour connaître la position exacte de l'étoile dans le ciel,
3. une grande efficacité de détection et de collecte de la lumière afin d'obtenir une détermination précise de l'emplacement de l'image et de pouvoir observer les objets très lointains et donc peu lumineux.

Observer le ciel depuis l'espace grâce à un satellite est la clef pour satisfaire ces trois conditions. De plus il est possible, en utilisant deux télescopes dont le pointage est séparé d'un angle important, de dissocier la mesure de la parallaxe de l'observation des objets d'arrière plan et ainsi d'obtenir une parallaxe absolue qui s'affranchit de nombreuses erreurs. Cette dernière technique dite "à grand angle" n'est possible que depuis l'espace (voir l'introduction de cette thèse Chapitre 1 pour plus de détails). Le nombre de parallaxes stellaires mesurées a constamment augmenté depuis le XIX siècle grâce au perfectionnement des techniques utilisées, et surtout grâce aux bonds technologiques successifs dans la détection et la captation de la lumière. En 1989, la mission Hipparcos de l'ESA a porté à leur apogée les mesures de parallaxes stellaires de très hautes précisions grâce à la première utilisation d'un satellite consacré à ces mesures, embarquant des capteurs de type photomultiplicateur.

Le satellite Gaia

Gaia sera le deuxième satellite Européen voué à l'astrométrie. L'astrométrie est la discipline de l'astronomie dédiée à la mesure de la position des étoiles, de leur mouvement dans l'espace et de leur parallaxe. Le satellite Gaia a été conçu dans le but d'améliorer les résultats d'Hipparcos en termes de précision de mesure de parallaxe (de l'ordre de la microseconde d'arc au lieu d'une milliseconde d'arc pour Hipparcos) et en termes de nombre d'étoiles observées (un milliard d'étoiles au lieu d'un million pour Hipparcos). Actuellement le projet Gaia est en phase finale de préparation autant du point de vue de la construction du satellite que celui du développement des logiciels de traitement des données. Gaia sera lancé dans l'espace en 2013 par une fusée Soyuz depuis la base de lancement située près de Kourou en Guyane. La destination finale du satellite n'est pas en orbite autour de la Terre mais à un emplacement du système solaire appelé L2 : le deuxième point de Lagrange du système Terre-Soleil. L2 est situé à environ 1.5 millions de kilomètres de la Terre, sur l'axe Terre-Soleil dans la direction opposée au soleil (vers Mars en quelque sorte). Cette distance correspond à quatre fois la distance Terre-lune. Une fois L2 atteint, Gaia orbitera autour du Soleil au même rythme que la Terre et ce pendant au moins 5 ans. Durant ce temps, Gaia va balayer (scanner) le ciel et observer les étoiles sans interruption. La Figure 8.3 est une illustration représentant Gaia ; tous les équipements nécessaires, soit à son fonctionnement

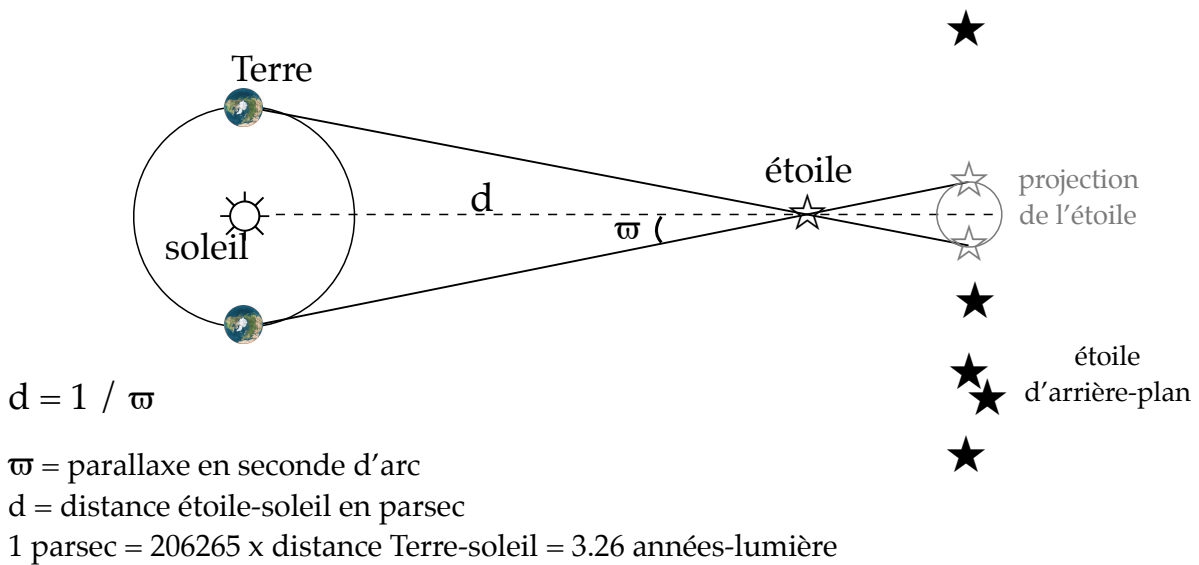


FIGURE 8.2 — Schéma représentant les principes de la mesure de la distance d'une étoile utilisant la parallaxe stellaire. Cette technique requiert des observations répétées de la position d'une étoile au cours de l'année. Ainsi la plus grande ligne de base à notre disposition, le diamètre de l'orbite terrestre autour du soleil, peut être utilisée. Le mouvement parallactique est illustré par le petit cercle gris (à droite) : c'est le mouvement apparent de l'étoile dont la distance est mesurée par rapport aux étoiles situées en arrière-plan. Ce mouvement reflète l'orbite terrestre telle qu'elle serait vue depuis l'étoile.

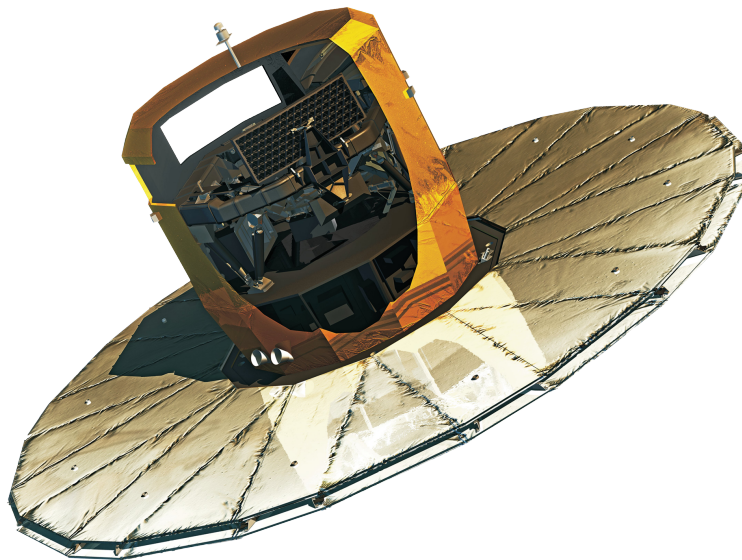


FIGURE 8.3 — Illustration représentant le satellite Gaia avec son bouclier solaire déployé. La coupe dans la tente thermique permet d'entrevoir (de haut en bas) : (a) la charge utile et ses deux miroirs primaires montés sur un tore de carbure de silicium mécaniquement et thermiquement ultra stable, et (b) le module de service qui sert au fonctionnement basique du satellite. Le satellite mesure environ trois mètres de hauteur et, une fois déployé, le bouclier solaire atteint les dix mètres de diamètre. Illustration fournie par EADS Astrium.

basique (le module de service), soit aux mesures scientifiques (la charge utile), sont positionnés à l'intérieur de la tente thermique : le cylindre du haut. Cette tente est située sur un bouclier solaire qui protège la charge utile de la lumière directe du soleil et la maintient thermiquement stable. La charge utile de Gaia est composée de deux télescopes et trois instruments qui dirigent la lumière des étoiles vers un plan focal unique. Ce plan focal est lui-même composé de 106 capteurs CCDs haute performance et fabriqués sur mesure pour Gaia. Ces capteurs produiront des images numériques de chaque étoile observée, par la suite envoyées sur Terre pour une analyse poussée. En calculant la position exacte des étoiles à chaque observation (pour chaque image), le mouvement des étoiles dans le ciel au cours des 5 années d'observation peut être ainsi reconstruit.

Le défi du traitement des données de Gaia

Le plan focal de Gaia contient plus d'un milliard de pixels, même si seulement une petite fenêtre autour de chaque étoile est transmise, la quantité de données reçues sur Terre va être considérable. De plus les images seront prises à différentes époques, pour différents types d'objets (pas seulement des étoiles, mais aussi des galaxies et des astéroïdes) et par trois types d'instruments. La complexité et la quantité des données reçues font du traitement des données l'un des défis de la mission. C'est pourquoi plus de 400 scientifiques (astronomes, ingénieurs, développeurs de logiciel) provenant de 24 pays différents participent à la préparation des logiciels de traitement des futures données envoyées par Gaia.

Les performances extraordinaires et la récolte de découvertes qui en découleront sont rendues possible en grande partie par l'utilisation d'un grand nombre de capteurs de lumière ultra-performants appelés CCD. La prochaine partie de ce résumé est consacrée aux CCDs et à l'explication des effets des radiations sur ceux-ci.

Les capteurs CCD et la menace des dommages dus aux radiations

Qu'est-ce qu'un CCD ?

Un CCD est un détecteur de lumière : un appareil électronique qui peut détecter et numériser la lumière sous la forme d'images. Le CCD, aussi appelé "dispositif à transfert de charge", a été inventé en 1969 au laboratoire Bell Telephone par Willard S. Boyle et George E. Smith. Cette invention a révolutionné l'astronomie et la science en général en rendant possible la mesure précise du nombre de particules de lumière (photons) émis par une source lumineuse dans une variété de longueurs d'onde. Elle a révolutionné aussi le monde en y introduisant la photographie numérique. C'est en reconnaissance de ces accomplissements que Boyle et Smith ont reçu le prix Nobel de physique en 2009.

Un CCD est un réseau bidimensionnel d'éléments distincts appelés pixels. Les pixels sont composés de trois couches de matériaux de différente nature : (a) un matériau conducteur (tel qu'un métal), (b) un isolant, et (c) un matériau semi-conducteur (en général du silicium). Dans le semi-conducteur, les photons qui composent la lumière sont convertis en électrons. En appliquant des tensions sur le matériau conducteur de chaque pixel, il est possible de transférer les électrons d'un pixel à l'autre jusqu'à un

composant électronique (broche de sortie) qui permet de lire et de convertir chaque paquet d'électrons en tension afin de les encoder en bits de données (numérisation). Les performances d'un capteur CCD dépendent donc de sa capacité à : (a) transformer la lumière incidente en électrons, (b) transférer efficacement les électrons depuis leur lieu de création jusqu'à la broche de sortie, (c) lire les paquets d'électrons dans la broche de sortie avec le moins de bruit possible c.-à-d. d'informations parasites produites par les circuits électroniques. Une fois utilisé dans l'espace, le capteur CCD va subir des dommages dus aux radiations, ces dommages vont essentiellement dégrader la capacité d'un CCD à transférer efficacement les électrons.

Quels sont ces dommages causés par les radiations ?

Dans le contexte de cette thèse, les dommages dus aux radiations sont la dégradation des performances des appareils électroniques embarqués à bord des satellites, dégradation induite par les particules énergétiques provenant de l'espace. Bien qu'il soit presque impossible d'atteindre le vide spatial par des moyens artificiels sur Terre, l'espace est en fait loin d'être vide et ce, particulièrement, à proximité d'étoiles telles que le soleil. L'espace interplanétaire est composé de particules neutres, de plasmas, de rayons cosmiques, de micrométéorites, de débris spatiaux, et surtout de radiations. Le terme radiation en science englobe le plus souvent l'ensemble du spectre lumineux ainsi que les particules subatomiques énergétiques telles que les électrons, les protons et les neutrons. La lumière peut aussi être nocive pour les composants électroniques mais c'est essentiellement les particules subatomiques qui sont la cause des dommages dus aux radiations. Ces particules ont pour origine le soleil, en particulier les éruptions spectaculaires qui ont lieu à sa surface. Le flot continu de particules qui balaie le système solaire est appelé vent solaire. L'illustration en couverture de cette thèse, en particulier son arrière-plan, évoque ce vent en provenance des éruptions du soleil (le disque rouge du bas). Le champ magnétique de la Terre (illustrée par le disque bleu central) nous protège de ces particules et Gaia (en jaune et en haut), au deuxième point de Lagrange, se situera bien loin de cette protection subissant de plein fouet ce vent destructeur. Lorsque les particules énergétiques du vent solaire (majoritairement des protons) entreront en collision avec les CCDs de Gaia, ils vont créer des défauts dans le réseau cristallin du matériau semi-conducteur en y déplaçant les atomes de leur position de repos. Ces défauts peuvent capturer des électrons durant leur transfert d'un pixel à l'autre. La capture des électrons est aléatoire et temporaire. La libération (ou émission) d'un électron capturé, elle aussi aléatoire, peut se dérouler pendant ou après le transfert de l'image. Dans ce dernier cas, une partie du signal est donc perdue à jamais, ce qui conduit à une diminution du rapport signal sur bruit. Dans les deux cas la redistribution des électrons va déformer l'image. La Fig. 8.4 nous montre un exemple de déformation. Les défauts vont s'accumuler tout au long de la mission dans les CCDs et les effets des radiations sur les images vont donc être de plus en plus importants atteignant leur maximum en fin de mission.

Effets des dommages dus aux radiations sur les mesures de Gaia

Les astronomes vont utiliser les images d'étoiles de Gaia afin de connaître leur position dans le ciel. Pour chaque image, l'emplacement exact de celle-ci sur le CCD doit être

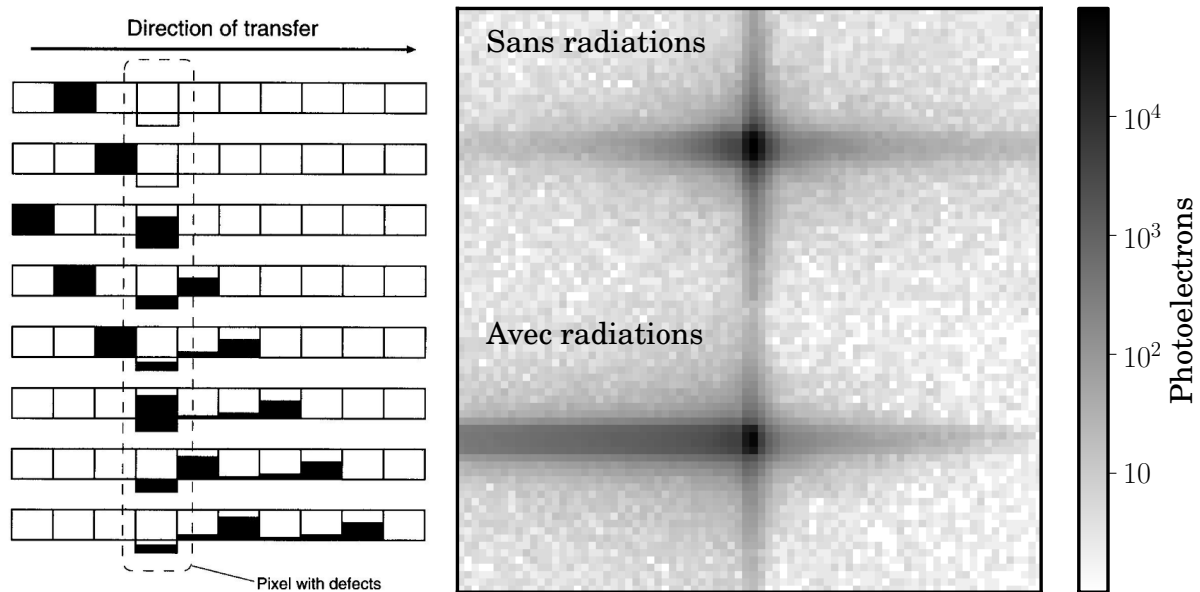


FIGURE 8.4 — **A gauche** : En créant des défauts à l'intérieur du CCD, les radiations dégradent sa capacité à transférer les paquets d'électrons d'un pixel à l'autre. Sur le schéma, chaque ligne correspond à une colonne de pixels à une étape différente du transfert de charges. Du haut vers le bas : un paquet est transféré du deuxième jusqu'au neuvième pixel. Un défaut est présent dans le quatrième pixel, il capture des électrons et les libère ensuite. Cela entraîne la création d'une trainée d'électrons caractéristique des images acquises par des détecteurs irradiés. Illustration fournie par J. Walder (Lancaster University). **A droite** : Simulation d'une image d'étoile tel que l'observera Gaia, avant et après dommages dus aux radiations. Si cet effet n'est pas pris en compte, la position et donc la distance de l'étoile est calculées de manière incorrecte. La déformation de l'image a été simulée en utilisant le modèle décrit au Chapitre 2.

connu avec une précision extrême ; l'erreur de localisation pour chaque observation doit être plus petite qu'un millième de pixel (pour une étoile lumineuse). Les positions d'une étoile dans le ciel (et sur le CCD) à différentes époques sont utilisées pour reconstruire le mouvement réel et apparent (parallaxe) de l'étoile en question afin d'en déduire sa distance. Les effets des dommages dus aux radiations sont de deux types : (a) comme je l'ai déjà établi, les radiations induisent une diminution du rapport signal sur bruit. Cette diminution est en fait une perte d'informations. Si une étoile est lumineuse, la perte de quelques électrons n'a pas d'importance. Par contre, pour une étoile à peine visible, ces quelques électrons correspondent à une fraction importante du signal total. Par conséquent les dommages dus aux radiations, s'ils ne sont pas évités, peuvent rendre Gaia aveugle aux objets de notre galaxie les plus lointains.

(b) Nous avons aussi vu que les radiations provoquent une déformation de l'image. Lorsqu'une image est déformée, elle transporte une information différente, plus complexe, sur la position de l'étoile dans le ciel. Si cet effet n'est pas pris en compte lors de l'analyse de l'image, une erreur systématique est introduite dans la mesure de l'emplacement de l'étoile sur le CCD. Cette erreur peut atteindre jusqu'à un dixième de pixel, c'est à dire cent fois le niveau acceptable. Il est donc primordial dans un premier temps d'éviter la capture des électrons grâce à des contremesures matérielles et dans un second temps de prendre en compte la déformation résiduelle de l'image lors de son analyse (contremesures logicielles).

Cette thèse

Ma recherche

Dès sa conception, les dommages dus aux radiations ont été identifiés comme une menace potentielle majeure pour les performances scientifiques de Gaia. Par conséquent les partenaires industriels de la mission ont reçu la consigne d'effectuer des campagnes de tests sur des détecteurs CCD de Gaia irradiés afin de caractériser les effets dus aux radiations sur les mesures de Gaia. Ces tests ont aussi été utilisés pour identifier et optimiser l'utilisation de contremesures matérielles et guider l'élaboration de modèles visant à reproduire ces effets. Ces efforts conjugués d'expérimentation et de modélisation ont permis aux scientifiques de Gaia d'élaborer une stratégie d'atténuation des dommages dus aux radiations. Dans ce contexte, ma recherche s'est concentrée sur la modélisation des effets des radiations sur les images acquises par les CCDs, soutenue par l'analyse des données expérimentales issues des campagnes de tests. J'ai conçu et développé le modèle le plus détaillé des effets des dommages dus aux radiations sur les CCDs. Ce modèle permet la simulation du fonctionnement d'un CCD irradié (**Chapitre 2**). Grâce à son utilisation, j'ai vérifié et approfondi notre compréhension actuelle des effets des dommages dus aux radiations, j'ai aussi apporté un soutien à la caractérisation des CCDs testés et permis une compréhension plus poussée des données expérimentales (**Chapitres 3 et 6**). Dans le cadre de cette recherche, j'ai mené la réévaluation détaillée des performances de Gaia en prenant en compte les effets des radiations (**Chapitres 3 et 4**). Enfin j'ai participé à l'effort commun pour contrer les effets des radiations en élaborant, testant, et améliorant une nouvelle approche d'analyse d'images (**Chapitres 3 et 5**), et en testant et explorant le potentiel d'une contremesure matérielle (**Chapitre 6**).

Conclusions principales

La conclusion principale de cette thèse est que les dommages dus aux radiations dans les CCDs de Gaia ne sont plus une menace pour la mission car j'ai démontré qu'il est possible de contrer ces effets néfastes en utilisant plusieurs types de contremesures matérielles et de calibrer les effets résiduels par l'emploi d'algorithmes spécifiques. Cependant, il est important de réaliser que cette thèse ne met pas un point final aux problèmes des radiations pour Gaia. En effet l'implémentation des algorithmes présentés n'a pas encore été réalisée dans l'ensemble de la chaîne de traitement de données. Et c'est seulement avec les premières données transmises par Gaia en 2013 que nous saurons si nos prévisions s'avèrent exactes. Ensuite je décris en quoi chaque chapitre de cette thèse a contribué à résoudre une partie du problème.

Chapitre 2 décrit le modèle le plus détaillé des dommages dus aux radiations dans les CCDs. Ce modèle utilise une approche originale de la distribution des électrons à l'intérieur d'un pixel et un nouveau calcul des probabilités de capture et libération d'électrons. Ces nouvelles approches permettent la reproduction des effets dus aux radiations sur une variété de mesures (astrométriques et spectroscopiques) pour une large gamme d'amplitude de signaux, en particulier pour des signaux constitués de quelques électrons seulement. L'enseignement le plus important apporté par ce chapitre est qu'aucun détail ne doit être négligé pour réussir à modéliser les effets des

dommages dus aux radiations sur les très faibles signaux : les simulations doivent être aussi réalistes que possible jusqu'au transfert des électrons au niveau de l'électrode dans chaque pixel et la simulation de chaque défaut dans le CCD.

Dans les **Chapitres 3 et 4**, je présente deux études qui ont pour but de caractériser et de quantifier l'impact des dommages dus aux radiations dans les CCDs sur la précision astrométrique finale de Gaia. La première étude se focalise sur l'analyse de l'image et la deuxième sur la propagation des erreurs au niveau de l'analyse de l'image dans l'ensemble de la chaîne d'algorithmes qui sera utilisée pour créer la carte de la Voie Lactée. Dans le **Chapitre 3**, je montre que la diminution du rapport signal sur bruit induit une perte irréversible de précision théorique de localisation d'images qui peut atteindre au plus 6% (en fin de mission). La seule façon d'empêcher cette perte irréversible d'informations passe par le biais de contremesures matérielles. Néanmoins, dans cette étude, je confirme que ces solutions matérielles ne suffiront pas et qu'il est indispensable d'adopter une nouvelle approche de l'analyse des images afin d'éviter des erreurs de localisation. Je présente donc une nouvelle approche et démontre qu'en l'adoptant il est possible de diviser par dix les erreurs dues à la déformation de l'image. Dans le **Chapitre 4**, les effets des erreurs résiduelles de localisation sur la carte finale de la Voie Lactée sont étudiés ainsi que les principes qui mènent à l'accumulation d'erreurs et la formation de faux motifs sur cette carte. Je démontre que ces motifs proviennent de la façon dont Gaia balaye le ciel, et que ces motifs peuvent être identifiés dans les résidus des algorithmes. Ces résidus étant accessibles durant la mission, il est possible d'effectuer une correction en les utilisant. La conclusion finale de cette étude est qu'il est possible de préserver la précision astrométrique finale de Gaia en utilisant deux solutions matérielles distinctes, une nouvelle approche d'analyse des images déformées et les résidus des algorithmes de cartographie du ciel.

Le **Chapitre 5** démontre le potentiel de cette nouvelle approche de l'analyse des images déformées en utilisant des données expérimentales provenant des campagnes de tests. Je montre qu'il est possible de diminuer les erreurs jusqu'à un seuil acceptable mais que la calibration de cette approche restera problématique si une solution n'est pas trouvée pour simuler les effets des radiations à plusieurs niveaux de signaux avec les mêmes paramètres. Je propose des solutions pour faciliter cette calibration.

Dans le **Chapitre 6**, j'examine l'une des caractéristiques de l'architecture du pixel des CCDs de Gaia qui vise à réduire les effets des dommages dus aux radiations : le canal enterré supplémentaire. Je montre que ce canal remplit sa fonction lorsqu'il est présent, mais qu'en raison des erreurs dans le processus de fabrication du CCD, il semblerait qu'il manque dans certains des CCDs de Gaia. Je prouve aussi que lorsque ce canal est absent, il l'est uniquement dans la partie supérieure du CCD. Enfin je démontre que ce problème, s'il est pris en compte dès l'analyse de l'image, n'affectera pas outre mesure la précision astrométrique finale de Gaia.