#### Sommaire

<b>6.1</b>	Synthèse des résultats concernant les propriétés de la DEM . 197		
	6.1.1	Mise en évidence des limitations 198	8
	6.1.2	Diminuer les incertitudes : un challenge à la fois technique et	
		scientifique 202	2
6.2	6.2 Synthèse des résultats concernant le couplage tomographie/DEM		
	6.2.1	La tomographie, un outil performant	4
	6.2.2	Propriétés physiques des pôles 206	6
Bib	Bibliographie		

Au cours de ce travail de thèse, les difficultés liées à l'analyse de la structure thermique de la couronne solaire ont été mises en évidence, et de nouveaux outils permettant de faciliter l'interprétation des résultats ont été développés. On sait combien la mesure des paramètres physiques de la couronne solaire joue un rôle important pour la validation des différents modèles coronaux ; l'évolution de notre compréhension des mécanismes de chauffage coronal ou d'accélération du vent solaire dépendent fortement des contraintes apportées aux modèles par les observations. C'est pourquoi il est crucial de comprendre les difficultés et limitations associées à leur mesure, et donc à leur interprétation.

En particulier, nous nous sommes attachés à comprendre le comportement et les propriétés du processus d'inversion de la DEM : très utilisée pour caractériser les propriétés thermiques du plasma coronal, c'est une quantité importante pour étudier les conditions physiques régnant au sein de la couronne, mais difficile à estimer du fait des difficultés intrinsèques aux problèmes inverses. En effet, la présence des incertitudes systématiques et aléatoires, à la fois dans les données et dans les modèles physiques utilisés, donne naissance à des solutions multiples, toutes cohérentes en réalité avec un ensemble de solutions. Les algorithmes d'inversion de DEM classiques se contentent de régulariser le problème d'inversion pour obtenir une solution unique, sans s'intéresser aux solutions secondaires, ni à l'estimation précise des incertitudes associées à la mesure de la DEM. La technique développée dans ce travail, même si elle se limite à l'étude de cas simples, permet de caractériser le comportement de l'inversion dans son ensemble, en calculant toutes les solutions cohérentes avec un ensemble d'observations, connaissant le niveau d'incertitudes mis en jeu. Elle permet en quelque sorte d'étalonner le processus d'inversion *a priori*. Ceci n'est possible qu'en restreignant l'espace des paramètres ; on ne s'est donc intéressé qu'à des classes de solutions particulières. Les capacités de l'instrument AIA ont été explorées dans le cas des solutions Gaussiennes et isothermes : c'est un modèle général, qui permet de modéliser efficacement une grande variété de conditions physiques au sein de la couronne. Pour l'étude concernant le spectromètre EIS, on a utilisé un modèle de DEM plus réaliste, en loi de puissance, généralement observé dans les régions actives. Comme la mesure de la pente de cette loi de puissance est un enjeu important pour contraindre les modèles de chauffage coronal, et en particulier la fréquence des événements de chauffage, nous avons voulu mesurer dans quelle limite ce spectromètre est capable de fournir une détermination rigoureuse de la DEM.

A l'aide de cette technique, on peut ainsi quantifier la qualité de l'inversion, grâce aux cartes de probabilités *a posteriori*  $P(\xi^P|\xi^I)$  calculées par simulations Monte-Carlo des différentes sources d'incertitudes, et permettant d'obtenir les probabilités associées à chacune des solutions possibles. A partir de ces distributions de probabilités, on peut ensuite calculer rigoureusement l'intervalle de confiance associé, permettant ainsi d'interpréter correctement la DEM mesurée. L'application de cette technique à l'imageur AIA, premier imageur à présenter six bandes coronales, et au spectromètre EIS, montre que les différentes sources d'incertitudes affectent de manière importante les résultats, conduisant à une dispersion importante des solutions. Dans le cas d'AIA, les solutions sont, dans certains cas, biaisées vers des solutions totalement différentes de la DEM initiale ; cependant, l'approche Bayésienne utilisée dans ce travail permet de rendre compte de ces biais potentiels et d'en tenir compte au cours de l'analyse des résultats.

Le formalisme de la DEM permet de rendre compte de la structure thermique du plasma présent le long de la ligne de visée ; on obtient ainsi la distribution de la quantité de plasma en fonction de la température, sans obtenir d'information spatiale. On lève ainsi l'ambiguïté due à l'intégration le long de la ligne de visée dans l'espace des températures, mais on ne dispose pas d'information concernant la distribution spatiale de ce plasma. La tomographie solaire permet de reconstruire l'émissivité de la couronne en trois dimensions, permettant cette fois-ci de déterminer la distribution spatiale du plasma coronal, mais sans apporter d'information concernant ses propriétés physiques. En utilisant plusieurs points de vue différents, on peut, à l'aide d'un algorithme de tracé de rayons, reconstruire cette distribution spatiale. Là encore, il s'agit d'un problème inverse, avec toutes les difficultés qui lui sont associées. La dynamique de la couronne complique encore le processus d'inversion. Cependant, les récents développements réalisés dans cette branche sont encourageants et permettent d'obtenir des résultats exploitables, en particulier en ce qui concerne les pôles.

Le couplage de ces deux approches, la tomographie solaire et le formalisme de la

DEM, permettent alors d'obtenir un diagnostic du plasma coronal complet, en reconstruisant à la fois la structure thermique et la géométrie de la couronne. En appliquant cette procédure à l'imageur AIA, des cartes tridimensionnelles en température, densité et largeur thermique on ainsi été obtenues, permettant en particulier l'étude des plumes polaires. Leur évolution en fonction de l'altitude a également pu être analysée. Bien que préliminaires, ces résultats sont très encourageants, puisque les variations en température et en densité en fonction de l'altitude au-dessus de la surface solaire de deux plumes et du milieu interplumes ont pu être mesurées.

Dans la suite, les principaux résultats obtenus au cours de cette thèse sont rappelés, puis mis en perspective. Dans la première partie 6.1, une synthèse concernant les propriétés de l'inversion mises en évidence dans ce travail sont discutées, ainsi que les limitations déduites et leurs implications physiques. Outre les difficultés mathématiques associées à la nature inverse du problème, non étudiées en détail dans cette thèse, ce sont les incertitudes systématiques et aléatoires qui sont à l'origine des limitations mises en évidence dans les chapitres 3 et 4. Une discussion à propos de ces sources d'incertitudes et des solutions possibles pour les diminuer est ensuite proposée section 6.1.1. Dans la deuxième partie 6.2, les résultats concernant les reconstructions tomographiques sont discutés ; dans la section 6.2.1, les difficultés et limitations concernant la méthode utilisée sont présentées, ainsi qu'une discussion concernant les améliorations possibles, tandis que la section 6.2.2 expose les résultats concernant la structure des trous coronaux et des plumes polaires.

# 6.1

# Synthèse des résultats concernant les propriétés de la DEM

Les simulations réalisées dans ce travail permettent de mettre en évidence les limitations et difficultés engendrées par la présence des erreurs systématiques et aléatoires, incluses à la fois dans les données et dans le modèle direct. Cependant, il est à noter que cette technique permet d'accéder à une limite basse des incertitudes sur la DEM reconstruite : l'espace des solutions est réduit à des formes fonctionnelles des DEMs identiques aux observations simulées, alors qu'en réalité la forme de la DEM est inconnue. En réalité, il faut donc utiliser un processus d'inversion "à l'aveugle", sans *a priori* sur la solution. De fait, une incertitude supplémentaire est en réalité introduite, liée aux difficultés mathématiques associées à ce type d'inversion.

# 6.1.1 Mise en évidence des limitations

# L'imageur AIA : propriétés des solutions générales isothermes et Gaussiennes

Dans le chapitre 3, les propriétés statistiques des solutions isothermes (la DEM est alors réduite à un pic de Dirac) et Gaussiennes ont été examinées, dans le cas de mesures réalisées avec l'imageur AIA. Les formes de DEMs Gaussiennes sont très générales, et permettent de modéliser efficacement un grand nombre de conditions physiques différentes, depuis un plasma isotherme jusqu'aux plasma très multithermes. La température  $T_c$  donne une indication de la température : certes il n'y a aucune raison physique justifiant l'emploi de formes Gaussiennes, l'application de la technique de caractérisation à ce modèle général permet tout de même d'étudier les propriétés et limites fondamentales du processus d'inversion.

Le comportement des solutions isothermes a été étudié, dans l'objectif de caractériser l'amélioration apportée par la mise en service de l'imageur AIA et ses 6 bandes coronales. En effet, si les spectromètres sont par nature mieux adaptés au diagnostic de la DEM, les imageurs ont l'avantage d'offrir un meilleur rapport signal sur bruit et un champ de vue plus important; ils ont donc été rapidement utilisés pour mesurer la DEM. Cependant, les imageurs précédents ne disposaient au maximum que de trois bandes coronales, n'apportant pas suffisamment de contraintes permettant d'estimer correctement la DEM (Testa et al. 2002). A l'aide de la technique de caractérisation développée, on a montré que l'imageur AIA augmente considérablement la robustesse du problème d'inversion. Une légère corrélation entre les 6 bandes a également été détectée. En comparant les simulations réalisées pour les trois bandes coronales 171, 193 et 211 Å avec celles obtenues pour le cas à six bandes, on constate que la majorité des solutions secondaires disparaissent : les six bandes d'AIA permettent donc une détermination non ambiguë de la température des plasmas isothermes. La résolution en température dépend largement de l'amplitude des différentes sources d'erreurs; pour le niveau d'incertitudes utilisé dans ce travail (35%), cette résolution varie entre 0.03 et  $0.11 \log T_c$ . Cependant, seules des conditions optimales de mesures permettent d'obtenir une telle qualité d'inversion ; si le nombre de bandes dans lequel le signal est significatif est faible, comme dans les trous coronaux ou dans le soleil calme par exemple, la qualité de l'inversion se dégrade rapidement, donnant naissance à des solutions multiples dont les probabilités peuvent parfois être supérieures aux solutions initiales.

Les propriétés des solutions isothermes en réponse à un plasma multitherme ont également été étudiées. En effet, plusieurs études ont suggéré la présence de plasma isotherme dans la couronne calme (e.g. Feldman et al. 1998). Si ces résultats viennent à être confirmés, leur impact sur les modèles pourrait être important. Le test d'isothermalité basé sur les courbes loci est souvent utilisé lors de l'analyse de données ; cependant il existe une ambiguïté fondamentale entre multithermalité et présence d'incertitudes : les erreurs de mesures peuvent être interprétées comme une déviation de l'hypothèse isotherme et *vice-versa*. L'application de la technique de caractérisation a permis de mesurer cette ambiguité, en étudiant dans quelle mesure erreurs et multihermalité sont équivalentes, i.e. on le même impact sur les courbes loci, et à partir de quelles conditions peut-on rejeter l'hypothèse isotherme. Les résultats présentés dans la section 3.3.1 montrent que toute une variété de plasmas multithermes est finalement compatible avec une solution isotherme donné. Ces solutions isothermes deviennent peu à peu décorrélées des propriétés du plasma observé ; dans le cas extrême où le plasma observé est à degré de multithermalité très élevé, les solutions isothermes sont biaisées vers deux solutions uniques. Un test d'isothermalité, basé sur l'analyse des distributions des  $\chi^2$  permet de mesurer la pertinence du modèle isotherme utilisé. Ainsi, au delà d'une valeur critique de  $\chi^2$ , le modèle multitherme devient plus probable; cette procédure permet finalement une quantification rigoureuse du test classique basé sur l'analyse des courbes loci, et est une généralisation du travail proposé par Landi & Klimchuk (2010).

L'analyse des solutions multithermes Gaussiennes a montré que l'instrument AIA est capable de reconstruire des DEMs de formes simples. Cependant, la précision associée à la reconstruction diminue très fortement avec le degré de multithermalité du plasma observé. Ce phénomène est indépendant de l'instrument utilisé, puisqu'il est un effet combiné du lissage du critère et des intensités. Par contre, on observe alors un biais des solutions qui, lui, est propre à l'instrument AIA : les solutions Gaussiennes sont alors biaisées vers des solutions proches de l'isothermalité (de largeur thermique  $\sigma^P = 0.12 \log T_e$ ), et centrées sur la température  $T_c = 1$  MK. Ainsi, un plasma très multitherme a une probabilité plus forte d'être détecté comme étant un plasma proche de l'isothermalité à 1 MK. De plus, en étudiant le comportement des solutions Gaussiennes en réponse à un plasma multitherme mais dont la DEM suit une fonction porte, l'analyse des  $\chi^2$  a révélé qu'il est quasiment impossible de discriminer plusieurs modèles de DEMs multithermes.

Toutes les propriétés mises en évidence dans ce travail peuvent avoir des implications physiques très importantes. L'analyse de la distribution des  $\chi^2$  seule ne permet pas de s'assurer de la pertinence du modèle utilisé. On a par exemple montré qu'un plasma très multitherme peut être détecté comme un plasma isotherme, tandis que la distribution des résidus confirme la cohérence du modèle. Il faut alors utiliser les cartes de probabilité *a posteriori* pour détecter les solutions secondaires qui sont également cohérentes avec les données. A l'heure où la structure thermique des boucles coronales est encore mal connue, ces résultats pointent les limites de l'utilisation de cet outil de diagnostic. Les différents modèles de chauffage prédisent des structures thermiques distinctes, qu'il convient de mesurer correctement si on veut être capable de discriminer entre plusieurs scénarios. Si les mesures sont biaisées, on peut alors rejeter à tort un modèle plutôt qu'un autre.

# Le spectromètre EIS : analyse des DEMs caractéristiques des boucles coronales

La technique de caractérisation a ensuite été appliquée au spectromètre EIS, mais dans le cas d'un modèle de DEM plus réaliste, définie par une loi de puissance. En effet, par des arguments à la fois théoriques et observationnels, on peut montrer que la DEM des régions actives correspond à ce type de description. Récemment, plusieurs auteurs se sont intéressés à la mesure de l'indice de cette loi de puissance, susceptible d'apporter des informations concernant l'échelle temporelle des événements de chauffage coronal. La pente de la DEM donne une indication du rapport de matière chaude/froide ; la quantité de matière froide est quant à elle directement reliée au temps de refroidissement ; et le temps de refroidissement est directement lié à la fréquence des événements de chauffage. Déterminer précisément cette pente permettrait de discriminer entre les mécanismes de chauffage impulsifs ou continus ; mais les observations actuelles suggèrent que certaines régions actives sont cohérentes avec des mécanismes à basse fréquence tandis que d'autres avancent le contraire. C'est pourquoi il est crucial de comprendre et de mesurer les incertitudes associées à la mesure de cette pente.

En utilisant notre technique de caractérisation, la capacité du spectromètre EIS à mesurer cette pente a donc été étudiée. Puisqu'on utilise un spectromètre, chacune des raies peut être isolée indépendamment ; on a donc pu simuler les incertitudes associées aux processus de physique atomiques de manière plus précise que pour l'imageur AIA, en incluant plusieurs sources distinctes d'incertitudes. A partir des distributions de probabilités a posteriori, on a calculé rigoureusement les intervalles de confiance associés à la mesure de ce paramètre. Les simulations réalisées montrent que dans la plupart des cas, un large intervalle de solutions est cohérent avec un ensemble d'observations donné. La présence des incertitudes dégrade la qualité de la reconstruction, conduisant à des intervalles de confiance de l'ordre de 0.9-1.0. La robustesse de l'inversion est fortement dépendante du nombres de raies disponibles pour contraindre la pente, mais aussi de la taille de l'intervalle de température sur lequel les données sont disponibles. Dans les cas les plus extrêmes, où on n'a que peu de raies disponibles, l'intervalle de confiance augmente jusqu'à 1.3. En outre, on a également montré que la partie à haute température de la DEM est très mal contrainte, conduisant à des intervalles de confiance très importants rendant l'exploitation des résultats quasiment impossible.

Ces résultats sont ensuite directement applicables pour évaluer la cohérence entre les prédictions d'un modèle et les mesures de DEMs. Récemment, Bradshaw et al. (2012) ont publié une étude théorique portant sur les mécanismes de chauffage impulsifs. Dans leur scénario, la couronne est chauffée par un mécanisme de nanoflares à basses fréquence; le modèle prédit des pentes comprises entre 0.8 et 2.56. En comparant ensuite leurs résultats aux mesures de pentes disponibles dans la littérature, ils concluent d'abord que 36% des mesures actuelles sont cohérentes avec leur scénario de chauffage. Cependant, en tenant compte des incertitudes calculées dans cette thèse, et estimées autour de  $\Delta \alpha = \pm 1$ , le taux de pentes mesurées cohérentes avec leur modèle varie maintenant entre 0 et 77%. Étant donné le niveau d'incertitude actuel associé à la mesure de la pente, les auteurs concluent finalement qu'on ne peut pas utiliser le diagnostic de la pente comme mesure fiable de la fréquence des événements de chauffage coronal.

Reep et al. (2013) ont également utilisé les intervalles de confiance déduits par notre technique pour calculer le degré de cohérence existant entre leurs simulations et les mesures actuelles : avec des pentes prédites entre 0.88 et 4.56, même en tenant compte de l'incertitude associée aux mesures, les auteurs déduisent que leur scénario de "nanoflare train" est cohérent avec 86 à 100% des mesures. Cependant, dans ce cas, c'est le modèle lui même qui n'apporte pas assez de contraintes permettant de diagnostiquer la fréquence de chauffage; le modèle proposé permet d'expliquer quasiment toutes les observations, mais qui peuvent également être cohérentes avec beaucoup d'autres mécanismes. Deux jeux d'incertitudes ont été utilisés au cours de ce travail, le premier correspondant plutôt à une limite haute des erreurs associées aux processus de physique atomique, tandis que le deuxième est plutôt une limite basse, typiquement adopté dans la littérature. Cependant, que l'on adopte une vision optimiste ou pessimiste ne change que peu les valeurs des intervalles de confiance. Quel que soit le jeu d'incertitude utilisé, les erreurs sur la mesure de la pente de la DEM restent de toute manière trop élevées pour permettre de placer des contraintes fortes sur la fréquence des événements de chauffage coronal.

#### Vers des simulations toujours plus réalistes

La technique développée dans ce travail tente de simuler de manière la plus réaliste possible les erreurs aléatoires et systématiques associées aux mesures. Cependant, quelques améliorations pourraient y être apportées. Les incertitudes associées à la physique atomique sont directement appliquées en perturbant directement les intensités mesurées. Or, ce sont les fonctions de contributions  $G_{X,l}$  qui sont en réalité affectées par ces erreurs. Ces incertitudes peuvent par exemple en changer la forme, l'amplitude ou encore la position du pic; ces modifications produiront effectivement une modification de l'intensité mais qui dépendra cette fois-ci de la DEM. Pour simuler ces incertitudes de manière encore plus réaliste, il faudrait donc directement inclure les perturbations sur les différents paramètres de physique atomique, résoudre à nouveau les équilibres de population et d'ionisation pour pouvoir calculer la nouvelle fonction de contribution, puis enfin, avec un modèle de DEM, calculer l'intensité. Cette procédure demande un nombre de calculs très importants, qui augmente de manière significative le temps d'exécution des simulations. Il faudrait donc pour cela commencer par améliorer encore la rapidité des calculs.

On pourrait également prendre en compte la corrélation existant entre les différentes sources d'incertitudes. Par exemple si l'on perturbe les taux d'ionisation et de recombinaison de l'ion Fe XIV de manière positive, i.e. la variable aléatoire associée à ces erreurs est positive et donc augmente un peu ces taux, alors les perturbations associées aux ions Fe XIII et Fe XV seront très probablement négatives puisque l'abondance de l'élément Fe, elle ne change pas. Beaucoup de corrélations de ce type pourraient être ajoutées au code de caractérisation; cependant, ces ajouts conduiraient à modifier directement les paramètres atomiques, donc à recalculer les fonctions de contributions, etc. On se retrouve donc dans la situation décrite dans le paragraphe précédent, dont les possibilités de calcul limitent la mise en œuvre.

Dans ces simulations, on a également supposé que l'amplitude des incertitudes associées aux paramètres atomiques est identique quelle que soit l'espèce ionique. Or, on sait que les paramètres atomiques de certains ions sont mieux connus que d'autres. L'idéal serait donc de disposer d'un jeu d'incertitudes calculé individuellement pour chaque espèce ionique. Il faut donc pour cela, parcourir la vaste bibliographie disponible traitant du sujet, et relever les incertitudes individuelles associées à chaque paramètre fourni par les expérimentateurs ou les théoriciens. C'est un très gros travail en soit, mais qui est en projet de réalisation, en collaboration avec G. Del Zanna et H. Mason (Cambridge University)

Cette technique de caractérisation pourrait éventuellement être utilisée pour des études préliminaires de futurs instruments. Ainsi, pour un projet d'imageur, dont le nombre de bandes spectrales est forcément limité, cette technique permettrait de déterminer le jeu optimal de bandes spectrales à utiliser pour estimer correctement la DEM, tout en tenant compte des contraintes apportées par le cahier des charges (nombre de bandes par exemple). Il en va de même pour un spectromètre : avec ce type de technique, on peut facilement déterminer quelles raies doivent être utilisées pour optimiser la précision de la reconstruction. En effet, augmenter le nombre de raies n'est pas le seul facteur permettant d'augmenter la robustesse : il faut aussi utiliser des raies relativement intenses. Pour les raies les plus faibles, le bruit de photon devient trop important et n'apporte finalement aucune information supplémentaire.

# 6.1.2 Diminuer les incertitudes : un challenge à la fois technique et scientifique

L'impact des erreurs aléatoires et systématiques sur la robustesse de l'inversion peut-être très important, en particulier quand la DEM devient largement distribuée en température. Le niveau des diverses sources d'incertitudes ne permet pas actuellement d'accéder à une reconstruction précise de la DEM, exception faite des distributions de DEMs proches de l'isothermalité. Les barres d'erreurs associées aux DEMs reconstruites sont pour l'instant trop importantes pour permettre la détermination de paramètres associés aux mécanismes de chauffage coronal. Cependant, diminuer les différentes sources d'incertitudes n'est pas du tout évident, et requiert des compétences scientifiques.

Le bruit de photons, ainsi que le bruit de lecture sont les deux sources d'erreurs aléatoires étudiées dans ce travail. Cependant, le bruit de lecture, lié à la numérisation de l'image est largement négligeable, devant toutes les autres sources d'incertitudes et n'est donc par la source de bruit prioritaire à minimiser. Le bruit de photons, en revanche, est une limite fondamentale de tout système de détection de flux lumineux. Proportionnel à la racine carré de l'intensité, il faut, pour le diminuer, augmenter le signal observé. Pour cela, plusieurs possibilités s'offrent à nous : augmenter le temps d'exposition, sommer temporellement ou spatialement les images. Au cours du traitement de données la dernière solution est très souvent utilisée (comme dans la base de données GAIA-DEM, ou les inversions de tomographie présentées dans le dernier chapitre), par contre, pour la première option, elle est plutôt contrainte par le cahier des charges de l'instrument. Augmenter le temps d'exposition implique une augmentation du nombre de photons à mesurer et donc, des performances des CCDs. A l'heure actuelle, les performances des CCDs sont déjà très élevées, et ne peuvent plus augmenter de beaucoup; il s'agira donc de construire des instruments plus grands, qui permettront alors de récolter un nombre de photons plus importants. Selon les missions, le cahier des charges est différent, et les cadences imposées ne permettent pas toujours d'augmenter le temps d'exposition, comme c'est le cas pour AIA, qui acquiert une image toutes les 12 secondes. Augmenter le temps d'exposition limite aussi l'étude de la dynamique de certaines structures, comme les flares. Pour diminuer le bruit de photons, il faut donc faire un compromis entre toutes ces contraintes.

Les erreurs systématiques sont celles qui, assurément, engendrent le plus de difficultés dans le processus d'inversion. Les erreurs systématiques associées à l'étalonnage des instruments peuvent provenir de sources très diverses, difficiles à identifier. En effet, le processus d'étalonnage au sol d'un instrument requiert un grand nombre d'étapes différentes, dont chacune d'entre elle introduit une erreur systématique. Il faut d'abord évaluer la fonction de réponse en longueur d'onde de l'instrument, définie comme le produit de la surface effective par le gain de l'instrument (en DN/photon). La surface effective correspond à la surface collectrice multipliée par l'efficacité de chaque composant du système de mesure (miroirs, filtres, CCDs, etc.). La procédure d'étalonnage consiste donc à mesurer l'efficacité associée à chaque composant du système optique afin de mesurer le gain et la surface effective, si possible une fois l'instrument intégré. Pour réaliser toutes ces mesures, on utilise des sources EUV standards, comme par exemple le rayonnement synchrotron.

Diminuer les incertitudes associées à l'étalonnage au sol de l'instrument revient donc à réduire l'incertitude associée à chacune des mesures. Il s'agit là d'un réel défi, dépendant principalement des moyens financiers et techniques à disposition. Une incertitude supplémentaire est ensuite ajoutée, liée à la dégradation de l'instrument causée par la contamination post-étalonnage. Cette même contamination est la principale responsable de la dégradation en vol des instruments (BenMoussa et al. 2013). Plus la contamination est importante, plus la dégradation en vol sera importante et rapide ; cependant la réduire demande d'importants dispositifs pour maintenir la propreté de l'environnement dans lequel évolue l'instrument. Là encore, les progrès dépendent fortement des moyens techniques et financiers mis à disposition. En effet, maintenir une salle à des degrés de propreté élevés, ou disposer de moyens de mesures les plus précis possibles demandent des efforts importants. La deuxième source d'incertitudes systématiques concerne les processus de physique atomique. Outre les hypothèses faites dans le modèle direct (l'équilibre thermique par exemple) qui peuvent induire une erreur systématique importante, les paramètres atomiques, ainsi que les abondances des éléments présents dans la couronne contiennent chacun une incertitude systématique individuelle. Les paramètres atomiques peuvent être déterminés à partir d'expériences de physique atomique, ou par calculs, à l'aide de code de physique quantique. Là encore, la précision des mesures expérimentales dépend fortement des moyens techniques mis à disposition. Les codes de calculs dépendent eux des moyens de calculs disponibles ainsi que de l'avancée des travaux théoriques. Dans les deux cas, les aspects techniques et financiers rentrent en jeu.

Pour conclure, diminuer les incertitudes constitue réellement un défi technique et scientifique : les moyens techniques mis à disposition sont les garants de la précision des mesures expérimentales, que ce soit pour l'étalonnage de l'instrument ou pour les mesures de physique atomique. Les avancées théoriques concernant aussi bien la physique quantique, que la physique atomique sont les garantes de la détermination de certains paramètres atomiques, dont les mesures expérimentales ne sont pas possibles. Ainsi, diminuer les incertitudes systématiques dépend d'un bon nombre de facteurs extérieurs, pas toujours faciles à contrôler.

### 6.2

# Synthèse des résultats concernant le couplage tomographie/DEM

La technique utilisée permet de coupler la tomographie au formalisme de la DEM afin d'obtenir une estimation de la DEM locale, i.e., la DEM associée à chaque voxel. Hormis la méthode DEMT (Differential Emission Measure Tomography) développée par Frazin et al. (2009), cette méthode est la seule disponible actuellement. De plus, c'est la première fois que l'instrument AIA est utilisé pour ce type de reconstruction, ce qui permet de tirer parti de ses 6 bandes spectrales, capables de fournir des contraintes plus fortes sur la DEM que les imageurs précédents (voir section 6.1.1). Les résultats présentés dans cette thèse sont préliminaires et demandent des analyses supplémentaires; cependant la méthode est aujourd'hui opérationnelle et les résultats très encourageants.

# 6.2.1 La tomographie, un outil performant

La tomographie permet d'obtenir une reconstruction tridimensionnelle de l'émissivité de la couronne solaire. Il s'agit en fait d'un autre moyen de lever l'ambiguïté engendrée par l'intégration le long de la ligne de visée. En utilisant plusieurs point de vue différents, on peut reconstruire l'émissivité en trois dimensions de la couronne solaire, à partir d'images. Pour cela, on peut utiliser plusieurs instruments, ou simplement mettre à profit la rotation naturelle solaire. La tomographie est un problème inverse, dans lequel on cherche à reconstruire l'émissivité à partir de mesures d'intensités intégrées le long de la ligne de visée : c'est un problème inverse de nature linéaire, tout comme le problème d'inversion de la DEM. Cependant, outre la nature inverse du problème, la tomographie solaire doit faire face à des difficultés supplémentaires, liés à la dynamique de la couronne et à la présence d'une sphère opaque au milieu de la zone d'intérêt, i.e. la photosphère. Un autre point important concerne la trajectoire des satellites réalisant les mesures : on peut montrer que les reconstructions tomographiques sont améliorées si l'on dispose d'un point de vue hors écliptique (Desbat et al. 2007), ce qui n'est pas le cas actuellement puisque la trajectoire des satellites est imposée par les contraintes spatiales.

Dans ce travail, des reconstructions tridimensionnelles de l'émissivité pour chacune des 6 longueurs d'ondes d'AIA ont été présentées, obtenues en utilisant 14 jours de données pour les pôles et 28 jours de données pour une reconstruction complète de la couronne. L'algorithme d'inversion TomograPy (Barbey et al. 2011) a été utilisé pour calculer ces reconstructions, en supposant la couronne statique pendant la durée d'acquisition des données. On sait que cette hypothèse est fausse, la couronne étant en réalité un milieu dynamique ; cela a pour conséquence de créer des artefacts dans les reconstructions, sous forme de zones pour lesquelles l'émissivité est négative. En effet, pour compenser l'apparition et/ou la disparition de structures au cours du temps, l'algorithme place alors des valeurs négatives le long de la ligne de visée. A l'avenir, prendre en compte cette évolution temporelle dans les reconstructions est un enjeu important. Le code d'inversion TomograPy dispose déjà de cette fonction; mais il s'agit simplement d'une inversion à quatre dimensions, pour lequel un a priori de douceur temporelle très fort est imposé. Des travaux dans ce sens ont été initiés par Barbey et al. (2008), où l'évolution temporelle est prise en compte pour les plumes polaires. La rotation différentielle de la couronne n'est pour l'instant pas prise en compte dans les résultats.

Cependant, dans chaque bande spectrale, les reconstructions montrent des propriétés morphologiques cohérentes avec ce qu'on observe dans les images. Les régions actives présentent des émissivités plus élevées, tandis que les trous coronaux sont caractérisés par des émissivités faibles. Aux pôles, on observe à la fois des structures très fines et allongées, tandis que des nodosités pseudo-cylindriques sont également observables. Ces reconstructions suggèrent que les deux types de plumes discutés dans la littérature co-existent : on retrouve à la fois des structures cohérentes avec la définition des plumes de type rideau, tandis qu'on observe également des plumes cylindriques. Ces plumes sont visibles dans les six canaux d'AIA, mais plus particulièrement en 131 et 171 Å, conformément à ce qu'on observe dans les données.

Il faudrait cependant s'assurer que toutes ces structures sont réelles et non des artefacts de reconstruction liés à l'évolution temporelle par exemple. Pour cela, on pourrait réaliser des reconstructions pour les mêmes dates à l'aide des imageurs à bord des sondes jumelles STEREO. Ainsi, en disposant de deux points de vues différents, le temps d'acquisition des données pourra encore être réduit à environ 7 ou 8 jours, minimisant ainsi l'évolution temporelle. On pourra ainsi vérifier la présence de ces structures dans les reconstructions.

Même si la tomographie doit faire face à des difficultés importantes, ces reconstructions montrent qu'il est tout de même possible d'obtenir des informations importantes concernant la morphologie de la couronne. En particulier, les structures polaires peuvent être plus facilement étudiées que le reste de la couronne, d'abord parce qu'on peut réduire le temps d'acquisition des données à 14 jours, puisque le plasma coronal est optiquement mince, mais aussi car les trous coronaux restent suffisamment stables sur de telles périodes. En revanche, le temps de vie des plumes est encore mal connu ; il est alors difficile d'évaluer l'effet de l'évolution temporelle sur ce type de structures.

#### 6.2.2 Propriétés physiques des pôles

Une fois les reconstructions en émissivité obtenues, on a ensuite estimer la DEM locale associée à chaque voxel. Pour cela, on utilise un modèle de DEM locale Gaussien, et on utilise ensuite une simple minimisation par moindres carrés pour estimer la solution. On obtient ainsi une estimation de la distribution en température, en densité et en largeur thermique de la couronne entre les altitudes 1 et 1.3  $R_{\odot}$ . Les reconstructions polaires montrent, en moyenne, un plasma plutôt homogène en température, moins dense que le soleil calme, et proche de l'isothermalité. La température mesurée au sein du trou coronal varie entre 850 000 K et 1.1 MK. Elle est très similaire dans les plumes et dans le milieu interplumes, contrairement aux résultats de Wilhelm (2006) et de Wilhelm et al. (2011), qui mesurent des températures plus basses dans les plumes. Ces caractéristiques ne sont ni mesurées dans les reconstructions tridimensionnelles, ni dans les inversions de DEM obtenues à partir d'images de la base de données GAIA-DEM (voir section 3.4). Pour vérifier ces propriétés, il conviendrait de mesurer la température dans les plumes et le milieu interplumes de manière indépendante, par exemple en utilisant les données du spectromètre EIS à la même période pour obtenir la DEM.

Les plumes apparaissent plus denses que leur environnement, une propriété déjà bien connue. Pour une altitude de  $1.05 R_{\odot}$ , on mesure des densités de l'ordre de  $6.5 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$  dans le milieu interplumes et autour de  $1 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$  dans les plumes. Cependant, ces valeurs sont, en moyenne, plus élevées que celles mesurées auparavant, excepté l'étude récente proposée par Banerjee et al. (2009). Ces différences peuvent avoir des origines différentes, dont il faudra vérifier l'influence. La PSF de l'instrument n'est pas complète, et certains effets instrumentaux ne sont pas encore pris en compte; cela peut engendrer une erreur systématique dans les mesures. La mise à jour de la base de données CHIANTI pourrait également être à l'origine de ces différences de mesures : la base a récemment été mise à jour (Landi et al. 2013), avec en particulier d'importantes conséquences sur le calcul des fonctions de réponses en température des bandes à 94 et 131 Å. Les mesures disponibles dans la littérature étant réalisées avec les versions antérieures, il se peut que les intensités mesurées aient été sous-évaluée, conduisant à des valeurs de densité plus faibles. Pour le vérifier, on pourrait réaliser les mêmes inversions avec une version antérieure de la base.

Enfin, la méthode en elle-même pourrait induire un biais systématique dans les reconstructions. Pour vérifier la cohérence de la méthode, un travail est actuellement en cours avec une équipe de Predictive Science Inc. En utilisant leurs simulations MHD, on reconstruit la couronne à trois dimensions, puis on compare nos reconstructions avec les simulations tridimensionnelles initiales. Ces simulations sont disponibles dans les 6 longueurs d'onde d'AIA, ce qui permettra de tester complètement la méthode et de vérifier que les propriétés physiques mesurées ne sont pas biaisées. On pourrait également vérifier qu'on obtient le même ordre de grandeur en utilisant un instrument différent, s'assurant ainsi qu'il ne s'agit pas d'un artefact engendré par l'erreur associée à l'étalonnage de l'instrument. Cependant, les prédécesseurs d'AIA ne possèdent que trois bandes spectrales différentes; comme montré dans le chapitre 3, la robustesse du problème d'inversion de la DEM diminue très fortement. On pourra cependant se contenter d'estimer les solutions isothermes puisque le plasma aux pôles est très proche de l'isothermalité; on pourra ainsi avoir un ordre de grandeur des valeurs des densités et températures dans les trous, et comparer avec nos résultats actuels.

En comparant ces reconstructions tridimensionnelles à la DEM mesurée par la base de données GAIA-DEM à partir d'images, on s'aperçoit que la température et la largeur thermique mesurées dans les reconstructions tridimensionnelles sont beaucoup plus faibles. Par contre, sur la portion de trou coronal on observe des températures similaires. Il s'agit en fait d'un effet du à l'intégration le long de la ligne de visée, qui, aux pôles, traverse une partie du soleil calme, dont les propriétés physiques sont différentes. Ainsi, la température du pic de la DEM est plus importante, puisqu'on traverse une zone de plasma plus chaud; la largeur thermique est plus importante puisqu'on a à la fois de la matière chaude et froide présente le long de la ligne de visée. Sur le disque, on n'observe pas ce phénomène puisque la ligne de visée est beaucoup plus courte, et traverse donc beaucoup moins de matière.

Enfin, puisqu'on dispose d'un étalonnage du processus d'inversion des DEMs aux formes fonctionnelles Gaussiennes, obtenu dans le chapitre 3, on pourra finalement interpréter de manière plus fine ces reconstructions. Les incertitudes associées à chaque mesure de DEM locale peuvent ainsi être rigoureusement calculées et des cartes montrant les solutions les plus probables peuvent être déduites. Ainsi, on sera capable de fournir non seulement des cartes tridimensionnelles des propriétés physiques des régions polaires, mais également les incertitudes associées à ces mesures, estimées *via* la technique de caractérisation développée dans la première partie de cette thèse.

# Bibliographie

- Banerjee, D., Pérez-Suárez, D., & Doyle, J. G. 2009, A&A, 501, L15
- Barbey, N., Auchère, F., Rodet, T., & Vial, J.-C. 2008, Sol. Phys., 248, 409
- Barbey, N., Guennou, C., & Auchère, F. 2011, Sol. Phys., 283, 227
- BenMoussa, A., Gissot, S., Schühle, U., et al. 2013, Sol. Phys.
- Bradshaw, S. J., Klimchuk, J. A., & Reep, J. W. 2012, ApJ, 758, 53
- Desbat, L., Gratton, L., et al. 2007, SampTA 07, 19
- Feldman, U., Schühle, U., Widing, K. G., & Laming, J. M. 1998, ApJ, 505, 999
- Frazin, R. A., Vásquez, A. M., & Kamalabadi, F. 2009, ApJ, 701, 547
- Landi, E. & Klimchuk, J. A. 2010, ApJ, 723, 320
- Landi, E., Young, P. R., Dere, K. P., Del Zanna, G., & Mason, H. E. 2013, ApJ, 763, 86
- Reep, J. W., Bradshaw, S. J., & Klimchuk, J. A. 2013, ApJ, 764, 193
- Testa, P., Peres, G., Reale, F., & Orlando, S. 2002, ApJ, 580, 1159
- Wilhelm, K. 2006, A&A, 455, 697
- Wilhelm, K., Abbo, L., Auchère, F., et al. 2011, A&A Reviews, 19, 35