Mesurer la largeur des raies coronales

Zizhang étudiait en vue d'obtenir une charge officielle. Le Maître lui dit : "Ecoute beaucoup, laisse de côté ce qui est douteux et ne répète le reste qu'avec prudence; de cette façon, tu te tromperas rarement. Observe beaucoup, laisse de côté ce qui suspect, et n'adopte le reste qu'avec prudence; de cette façon tu n'auras que rarement lieu de te repentir. Si tu te trompes rarement dans tes propos, et si tu n'as que rarement lieu de te repentir de tes actions, ta carrière est toute faite."

Entretiens de Confucius, II. 18

Sommaire

6.1 O	bservations réalisées pendant ma thèse
6.1.	1 Travail préparatoire
6.1.	2 Liste des observations et des raies utilisées
6.2 O	btention d'un spectre hors-limbe
6.2.	1 Addition de plusieurs images
6.2.	2 Découpage spatial : spectres à une altitude donnée
6.2.	3 Détermination de l'altitude
6.2.	4 Bruit du détecteur
6.3 C	orrection de lumière diffusée instrumentale
6.3.	1 Le problème de la lumière diffusée instrumentale

	6.3.2	Méthode suivie
	6.3.3	Effet de la correction
6.4	Ajus	tement gaussien des raies 144
	6.4.1	Obtention de la largeur des raies
	6.4.2	Barres d'erreur
	6.4.3	Ajustements multi-gaussiens
6.5	Larg	eur instrumentale 150
	6.5.1	Contribution instrumentale dans le spectre corrigé de la lumière
		diffusée
	6.5.2	Correction de la largeur instrumentale
	6.5.3	Effet de la correction
6.6	Mes	ure du rapport des raies du Si VIII (1445/1440 Å) 151

6.1 Observations réalisées pendant ma thèse

6.1.1 Travail préparatoire

J'ai réalisé des observations avec SUMER quasiment à chaque campagne MEDOC qui a eu lieu pendant ma thèse (cf. Sec. 6.1.2, pour la liste de celles que j'utilise pour cette thèse). La plupart concernaient les trous coronaux polaires, certaines des zones de couronne "calme", à plus basse latitude (toujours au dessus du limbe). Le but de ces nombreuses observations était d'obtenir des conditions d'observations optimales : qualité des trous coronaux, et optimisation des temps d'exposition avec le nombre de raies observées (voir aussi Sec. 5.5.3).

J'ai préparé le programme¹ de l'observation associée au jeu de donnée 1 (cf. Tab. 6.1) en me basant sur les spectres de références de SUMER (cf. Sec. 5.5); j'ai en particulier utilisé le tableau de Feldman et al. (1997), pris à environ 30" au dessus du limbe (dans un jet coronal), en extrapolant les valeurs dans un trou coronal à l'aide d'observations recherchées dans la base de donnée MEDOC (les raies sont moins intenses dans un trou coronal, du fait de la chute de densité). J'ai utilisé les spectres de référence pris sur le disque² pour avoir une estimation des problèmes de lumière diffusée instrumentale (problème dont j'ai pu évaluer l'importance lors du traitement du jeu de données 0, dans Dolla et al. (2003), cf. Annexe C; ce problème est présenté en détails Sec. 6.3). J'ai donc commencé par faire un inventaire de toutes les raies disponibles dans le domaine spectral couvert par SUMER. J'ai écarté en particulier certaines raies du fait de leur trop faible intensité. J'ai essayé aussi d'écarter celles qui présentaient des mélanges trop important avec des raies voisines³, ainsi que celles qui étaient trop contaminées par la lumière diffusée instrumentale. Il fallait par contre essayer d'en observer qui présentent une gamme de valeur de rapport charge-sur-masse q/m la plus large possible (Fig. 6.1).

Dans les observations qui ont suivi, j'ai adapté les programmes en fonction des résultats précédents, des temps d'observation disponibles, et de l'information supplémentaire que je voulais retirer (e.g., nouvelles raies associées à des ions de valeur de q/m intéressante, même si elles étaient moins intenses). Il est apparu important, une fois vérifiée la relative stabilité des caractéristiques des raies dans le temps (cf. Sec. 7.1), d'augmenter les temps de pose, de façon à obtenir une meilleure précision spatiale (avec une meilleure statistique, il est possible de sommer sur moins de pixels en Y⁴).

¹cf. Annexe A

 $^{^{2}}$ cf. Sec. 5.5

 $^{^{3}}$ blending, en anglais

⁴cf. Fig. 5.8 pour les repères de coordonnées.



Fig. 6.1: Rapport charge-sur-masse (q/m) et masse atomique de différents ions observables dans le domaine spectral du spectromètre SUMER. La couleur indique la température de formation (des plus basses, en bleu-violet, aux plus hautes, en rouge). Seules les raies ayant les températures de formations les plus élevées pourront être exploitées à des altitudes un peu importantes hors du limbe, surtout dans les trous coronaux. Ceci limite le domaine de valeur couvert pour q/m.

Jeu de données	date	position	R_{\odot} apparent (arcsec)
0	23 - 29/05/01	X=860, Y=-600	956.5
1	30/05/02	X=0, Y=1150	956.5
2	28/05/02	X=0, Y=-1150	956.5
3	23/05/02	X=990, Y=0	956.5
4	21/05/02	X=990, Y=250	956.5
5	18-22/11/03	X=0, Y=1145	980.0
6	11-14/06/04	X=0, Y=-1140	960.0

Tab. 6.1: Liste des jeux de données utilisés dans cette thèse. Le détecteur A de SUMER a été utilisé dans tous les cas. Toutes ces observations ont été réalisée avec la fente de $1'' \times 300''$, sauf le jeu 3, réalisé avec celle de $1'' \times 120''$.

6.1.2 Liste des observations et des raies utilisées

Le tableau 6.1 présente les jeux de données qui seront utilisés dans la suite de cette thèse. Toutes ces observations ont été réalisée avec la fente de $1'' \times 300''$, sauf le jeu 3, réalisé avec celle de $1'' \times 120''$. Des détails sur les conditions d'observations seront données Sec. 7.2.

Le jeu de données 0 consiste en l'observation de raies du Fe x (1463.5 Å) et Fe x_{I} (1467.08 Å), dans la couronne calme (cf. Annexe C).

Le jeu de données 3 consiste en l'observation d'une raie de l'O VI (1031.93 Å) et d'une du Mg x (1249.88 Å, à l'ordre 2), successivement, chacune pendant une heure, avec une raie toutes les 5 secondes. Le 28/05/02, une heure de plus d'observation a été consacrée au Mg x, en (X = 0, Y = -1060), au dessus d'un trou coronal, mais la statistique était trop faible pour une véritable exploitation.

Les raies exploitées dans certains jeux de données sont énumérées dans les tableaux 6.2 et 6.3 (pour le détail des transitions impliquées, voir les catalogues précédemment cités). La longueur d'onde λ indiquée dans ces tableaux est celle d'observation (i.e., longueur d'onde réelle \times ordre d'observation); il s'agit des valeurs données par Feldman et al. (1997) (je n'ai pas réalisé de calibration précise, elle est inutile pour la mesure des largeurs de raies). Le rapport charge-surmasse q/m est normalisé à celui des protons. Les raies indiquées sont celles qui sont utilisées à l'altitude la plus basse du jeu de données; certaines ne sont plus exploitables aux altitudes plus élevées. Les temps d'exposition pour les jeux 1 et 2 (trous coronaux) sont de l'ordre de l'heure (avec souvent plusieurs raies dans le même domaine spectral observé), l'observation complète ayant pris respectivement 13 et 16 heures. Pour le jeu 4 (couronne calme), ces temps d'exposition étaient inférieurs, tandis qu'ils étaient multipliés par 2 voir par 4 dans les observations ultérieures de trous coronaux (observations étalées sur plusieurs jours).

Les mesures de densité ont été effectuées grâce aux données du JOP 158 effectuées le 30/05/02. J'ai utilisé la partie consacrée au Si VIII correspondant à l'altitude couverte par mes propres observations (temps d'exposition d'environ 2h50, avec une fente de $4'' \times 300''$).

6.2 Obtention d'un spectre hors-limbe

6.2.1 Addition de plusieurs images

L'exploitation de spectres ayant une statistique suffisante sur de petits intervalles spatiaux (de l'ordre de la dizaine de secondes d'arc en Y) requiert de longs temps de pose. Il est néanmoins préférable de segmenter ce temps de pose lors des observations, de façon à garder une information

ion	λ (Å)	ordre	masse atomique	q/m
Ar VIII	1400.52	2	39.95	0.18
Ar VIII	1427.64	2	39.95	0.18
Ca X	1148.00	2	40.08	0.22
Fe X	1028.02	1	55.85	0.16
$Fe X^a$	1463.50	1	55.85	0.16
Fe XI	1467.08	1	55.85	0.18
Fe XII	1349.36	1	55.85	0.20
Fe XII	1242.00	1	55.85	0.20
Mg IX	1412.11	2	24.31	0.33
Mg X	1249.88	2	24.31	0.37
N V	1238.81	1	14.00	0.29
Na IX	1363.45	2	22.99	0.35
O VI	1031.93	1	16.00	0.31
S X	1196.20	1	32.06	0.28
Si IX	1389.39	2	28.08	0.28
Si X	1277.88	1	28.08	0.32
Si VIII	1445.75	1	28.08	0.25
Si XI	1161.82	2	28.08	0.36
Si XI	1208.30	2	28.08	0.36

^a La raie du Fe x à 1463 Å n'apparaît pas sur les courbes contenues dans le corps principal de ce manuscrit, mais dans celles de l'Annexe D (cf. Sec. 9.1, dans ce manuscrit).

Tab.	6.2:	Liste	des	raies	exploitées	dans	le jeu	1	(trou	coronal)	
------	------	-------	-----	-------	------------	------	--------	---	-------	----------	--

ion	λ (Å)	ordre	masse atomique	q/m
Ar XII	1054.57	1	39.95	0.28
Ca X	1148.00	2	40.08	0.22
Fe X	1028.02	1	55.85	0.16
Fe XI	1467.08	1	55.85	0.18
Fe XII	1242.00	1	55.85	0.20
Fe XII	1349.36	1	55.85	0.20
Mg IX	1412.11	2	24.31	0.33
Mg X	1249.88	2	24.31	0.37
Na IX	1363.45	2	22.99	0.35
Ne VIII	1560.66	2	20.17	0.35
S X	1552.48	2	32.06	0.28
S X	1196.20	1	32.06	0.28
S XI	1149.77	2	32.06	0.31
Si IX	1352.98	1	28.08	0.28
Si IX	1389.39	2	28.08	0.28
Si XI	1161.82	2	28.08	0.36
Si XII	1041.32	2	28.08	0.39

Tab. 6.3: Liste des raies exploitées dans le jeu 4 (couronne calme).



Fig. 6.2: Images de contexte et pointage de SUMER pour les jeux de données 1 et 2 (respectivement au Nord et au Sud). La couverture spatiale de la fente est représentée sur ces images de EIT/SOHO dans les canaux à 284 Å (à gauche) et à 195 Å (à droite, seule la position du jeu 3 est alors représentée). Au pôle Sud, le trou coronal n'est pas vraiment visible sur le disque; la ligne de visée, hors du limbe, est probablement contaminée par de la couronne "calme".

temporelle (en particulier, en cas d'événements transitoires (il faut alors essayer, autant que possible, de ne pas en tenir compte), et au cas où des problèmes de transmission feraient perdre certaines données).

En contrepartie, il faut ensuite additionner de nombreuses images du détecteur pour reconstituer le temps de pose complet. Ces images, tableaux du nombre de photons détectés pendant le temps d'exposition, comprennent 1024×360 pixels (longueur d'onde × dimension spatiale Y)⁵). Avant addition, les images sont inspectées visuellement (en pouvant s'aider aussi de différence d'images avec l'image moyenne, pour mettre en évidence les anomalies).

6.2.2 Découpage spatial : spectres à une altitude donnée

A partir des tableaux de données obtenus à l'étape précédente, des spectres pris à différentes positions (en Y) sont obtenus en découpant la dimension Y_D du détecteur en intervalles de plusieurs lignes (de façon à obtenir une statistique suffisante pour l'exploitation des raies). Ces intervalles sont néanmoins suffisamment petits pour éviter de provoquer un élargissement additionnel du fait de la distorsion résiduelle du détecteur (cf. Sec. 5.5.2).

On obtient ainsi des spectres en nombre de coups par pixel du détecteur (correspondant à la longueur d'onde). Pour l'ajustement gaussien, ce sont ces spectres que l'on utilisera (la conversion en Angstroems intervenant après), mais pour les graphiques, on représentera ces spectres avec une échelle en longueur d'onde.

L'erreur sur chaque pixel est prise comme étant la racine carrée du nombre de coups enregistrés (erreur statistique, dite aussi "Poissonnienne").

⁵Rappellons que l'instrument est stigmate dans la direction spatiale Y. Les différents traitements des données brutes ont été décrits Sec. 5.5.2. Plusieurs domaines spectraux sont observés à chaque observation, pouvant comprendre chacun plusieurs raies intéressantes pour le problème du chauffage préférentiel.



Fig. 6.3: Exemple du nombre de coups intégrés sur la totalité des pixels de l'axe X_D (longueur d'onde), pour chacune des 360 lignes du détecteur. L'image de la fente apparaît de façon évidente entre la ligne 30 et la ligne 320 (coordonnée Y_D du détecteur).

6.2.3 Détermination de l'altitude

Avant le découpage, il faut préalablement repérer les limites de l'image de la fente du spectromètre sur le détecteur (la hauteur Y_D du détecteur n'est pas illuminée en totalité). Cette image, correspondant à environ 300″ dans la plupart de mes observations (fente de 1 × 300″), s'étale sur un peu plus de 300 lignes (la valeur exacte, ainsi que la position sur le détecteur, dépendant de la longueur d'onde, mais aussi des conditions de température de l'instrument).

La Fig. 6.3 représente un exemple de nombre de coups $N = N(Y_D)$ intégrés sur la totalité des pixels en X_D (i.e., toutes les longueurs d'onde du domaine spectral observé) pour chaque ligne (position Y_D); l'image de la fente y est repérable de façon évidente. Pour détecter précisément les bords de cette image, j'ai profité du fait que, lors des observations au dessus du limbe, l'intensité suit une variation (relativement) monotone selon Y_D (le sens de variation dépendant de l'hémisphère observé). Les limites de l'image de la fente correspondent donc à de fortes variations de la dérivée de $N(Y_D)$ en fonction de Y_D (Fig. 6.4).

Le quotient C entre la dimension spatiale couverte par l'image de la fente F (e.g. 300") et la dimension de l'image en pixels permet la conversion entre pixels et secondes d'arc. La ligne médiane de l'image correspond alors à la position centrale de la fente (X_C, Y_C) , celle pointée lors des observations, tandis que la première ligne de cette même image correspond à une valeur $Y_0 = Y_C - F/2$. On a donc $Y = Y_0 + pos \times C$, où pos est la position dans l'image en pixels.

Finalement, pour obtenir l'altitude h au dessus du limbe, associée au pixel considéré, il faut



Fig. 6.4: Dérivée de la courbe de la figure 6.3 : les pics permettent de localiser finement les limites de l'image de la fente sur le détecteur (en excluant les pics trop rapprochés des extrémités du détecteur).

retrancher la dimension du rayon solaire à la date considérée, vue depuis SOHO⁶ :

$$h = \sqrt{\mathbf{X}_C^2 + \mathbf{Y}^2} - \mathbf{R}_{\odot} \tag{6.1}$$

Puisque chaque spectre est en réalité intégré sur plusieurs lignes (en Y_D , ou Y), chaque spectre sera donc associé à une altitude moyenne (couvrant en réalité un certain intervalle d'altitudes).

Pour une meilleure précision (le pointage fournit par l'instrument peut être biaisé), il faudrait déterminer la position du limbe avec des données à cheval sur le disque et hors du limbe (par exemple, avec le JOP 158). Je ne l'ai pas fait systématiquement. J'ai néanmoins effectué une évaluation de l'écart entre pointage renvoyé par l'instrument, et position du limbe repéré grâce aux données du JOP 158 : celui-ci ne dépassait pas 3 ou 4". Je ne considérerais pas cela comme très important vu les intervalles utilisés pour produire un spectre (au minimum, 10").

6.2.4 Bruit du détecteur

Les pixels non illuminés peuvent servir à déterminer le bruit de fond du détecteur : environ $3 \cdot 10^{-5}$ coups.s⁻¹.px⁻¹. Pour des temps de pose de l'ordre de l'heure, cela représente environ

⁶Le rayon solaire vu de la Terre, variable selon l'époque de l'année, peut être trouvé dans *The Astronomical Almanac* (e.g. U. S. Naval Observatory and Royal Greenwich Observatory (2001) pour l'année 2003, ou http://asa.usno.navy.mil/). Il faut ensuite lui rajouter 1% pour tenir compte de la position de SOHO entre la Terre et le Soleil.

0.1 coups par pixel, ce qui est très peu au regard du nombre de coups dans les raies observées. J'en ai néanmoins tenu compte dans le calcul de l'intensité du continuum, lorsqu'il m'a servi à estimer l'intensité de la lumière diffusée (cf. Sec. 6.3).

6.3 Correction de lumière diffusée instrumentale

6.3.1 Le problème de la lumière diffusée instrumentale

Lorsqu'on observe des spectres pris par SUMER hors du limbe, il apparaît des raies "froides" (typiques de la photosphère ou de la chromosphère) parmi les raies plus "chaudes" de la couronne. Ces raies froides mettent en fait en évidence la lumière diffusée instrumentale⁷. Un grand soin a été apporté lors de la réalisation de l'instrument pour éliminer toute lumière parasite (qui serait due, par exemple, à des réflexions internes); le problème vient plus directement des surfaces réfléchissantes du système optique lui-même. L'image complète du Soleil est en permanence formée sur le miroir principal de SUMER (c'est son orientation qui permet de sélectionner la zone de l'image qui illuminera la fente du spectromètre). Du fait des défauts de très petite taille de sa surface (typiquement, de dimension spatiale l'ordre de la longueur d'onde utilisée; dans l'EUV, il suffit donc de défauts très petits), l'image d'un point n'est pas un point, mais une tâche⁸ (voir aussi les explications de Feldman et al. (1999)). A 3.5 pixels du centre de la tache (dans la dimension spatiale), il ne reste plus que 0.1 % du pic (Lemaire et al., 1997), ce qui est négligeable lors d'observations sur le disque. En revanche, du fait du contraste entre l'intensité sur le disque et hors du limbe, la lumière diffusée due au disque devient non négligeable lors des observations hors-limbe (dit autrement, on est "ébloui" par le disque). Rappelons que SUMER n'est pas un coronographe, il n'est donc pas équipé d'un occulteur.

L'intensité de la lumière diffusée en un point de l'image est en fait la somme de toutes les contributions de chaque point du disque (convolution). Comme l'intensité de la lumière diffusée décroît moins vite avec l'altitude d'observation que l'intensité réellement émise par la couronne, la contamination devient de plus en plus importante avec l'altitude, et de façon plus critique dans les trous coronaux, déjà moins intenses que le reste de la couronne. Finalement, à partir d'une certaine altitude, certaines raies ne correspondent plus qu'à de la lumière diffusée instrumentale : d'après Feldman et al. (1999), le spectre de SUMER est entièrement dû à la lumière diffusée au dessus de 1.6 R_{\odot} . Il se base pour cela sur le changement de pente de l'intensité décroissante des raies coronales avec l'altitude : elle devient moins forte vers les hautes altitudes, devenant semblable à celle de raies dont le caractère de lumière diffusée est indiscutable (voir aussi David (1998)).

Les spectres observés hors du limbe sont donc la somme du spectre d'émission coronale au dessus du limbe et d'un spectre moyen caractéristique de l'émission du disque, ce dernier dépendant des contributions de chaque région du disque (régions actives, "soleil calme" et trous coronaux) et intégré sur les différentes couches (photosphère, etc.). Il varie donc selon la date d'observation, et les contributions relatives des différentes raies de lumière diffusée peuvent varier selon la région observée hors du limbe, et avec l'altitude, en fonction de la localisation de leur émission sur le disque.

Toutes les raies observables sur le disque contribuent à la lumière diffusée . Les raies coronales particulièrement intenses sur le disque (e.g. celles du Mg X, ou du Fe XII) sont donc contaminées hors du limbe par leur propre lumière diffusée (en général, une raie de largeur plus petite), mais

⁷En anglais : instrumental scattered light ou stray light.

⁸c'est la notion de *Point Spread Function*, ou PSF, en anglais.

aussi par des raies "froides" de longueur d'onde voisine (elles aussi de largeur différente, du fait de la température différente au lieu dominant d'émission, ou de la différence de masse entre les deux espèces d'ions). Ce dernier type de contamination est très souvent négligé par les études qui ont été réalisées avec SUMER. Dans tous les cas, dès que la contribution de la lumière diffusée devient non négligeable, la largeur de la raie observée est différente de celle de la raie véritablement émise dans la couronne (du fait du décalage éventuel des longueurs d'onde des deux raies, et de leurs largeurs différentes). Il est donc très important de corriger cet effet.

6.3.2 Méthode suivie

Certains travaux ont pris en compte le problème de la lumière diffusée instrumentale de SUMER (e.g. Doschek and Feldman, 2000). David (1998) effectue une correction sur l'intensité uniquement, à partir du comportement d'une raie froide en fonction de l'altitude, et en tenant compte de la répartition spatiale des raies sur le disque solaire à la date de l'observation (la méthode est aussi décrite dans Gabriel et al. (2003)). Il montre que plus on est proche du limbe, plus ce sont les régions toutes proches sur le disque qui apportent la plus grosse contribution à la lumière diffusée. Loin du disque au contraire, les régions du disque les plus éloignées finissent par avoir un poids relatif plus important.

En ce qui concerne l'exploitation de la largeur des raies, la correction demande de connaître à la fois le profil de la largeur de la raie en lumière diffusée (surtout quand elle a une longueur d'onde légèrement différente), et sa contribution dans la raie observée hors-limbe. Le fait d'utiliser un spectre pris à haute altitude comme référence est évoqué dans Doschek and Feldman (2000); la largeur de la raie en lumière diffusée est alors égale à celle observée à très haute altitude (pourtant, ils ne concluent pas à un effet important dans la variation de certaines largeurs de raies avec l'altitude, minimisant en particulier le rôle joué dans le plateau en largeur observé à environ $1.2 R_{\odot}$).

Il nous faut donc tout d'abord prédire les intensités relatives des différentes raies de lumière diffusée qui se trouvent sur le domaine spectrale observé, avec tout le détail de leur profil; cela constitue ce que j'appelerai un *spectre de référence*. Après estimation de la contribution relative de la lumière diffusée dans le spectre hors-limbe⁹ observé à une certaine altitude (à partir de l'intensité d'une raie dont on sait qu'il ne s'agit que de lumière diffusée sur le spectre hors-limbe (raie "froide")), on ajuste l'intensité du spectre de référence, pour obtenir le *spectre de lumière diffusée* correspondant à l'altitude observée (voir Fig. 6.5). Ce spectre de lumière diffusée est ensuite soustrait du spectre observé hors-limbe, pour obtenir le *spectre corrigé*, qui correspond à l'émission réelle de la couronne.

On a donc effectué ainsi une correction point par point du profil observé hors du limbe.

Cette méthode, avec des spectres de référence de lumière diffusée pris très loin du limbe, est utilisée par exemple par Singh et al. (2003a,b), dans le cas d'observations depuis le sol pour des raies dans le visible et le proche infrarouge, ainsi que par Banerjee et al. (2000) pour des raies de l'O VI.

spectre de référence

J'utilise comme "spectre de référence" un spectre acquis à très haute altitude (en général, à la limite observable avec SUMER, à environ 1700" du centre du soleil ($\approx 1.7 \text{ R}_{\odot}$), sauf dans le

⁹Lorsque je parle de "spectre hors-limbe", je fait référence au spectre observé entre environ 50" et 350", qui nous intéresse pour étudier la largeur des raies. Il ne faut pas le confondre avec les spectres pris à très haute altitude qui me servent de "spectre de référence".

cas du domaine spectral associé aux raies du Fe x et du Fe xI (autour de 1465 Å), qui peut être pris plus bas pour une meilleure statistique). Comme on l'a vu, il ne reste alors plus que de la lumière diffusée.

J'ai montré dans Dolla et al. (2003) (cf. figures dans l'annexe C) que les spectres pris sur le disque (dans une zone de "soleil calme"), mais movennés sur une centaine de secondes d'arc, ne permettaient pas un prédiction optimale de la lumière diffusée (on s'en rend compte, entre autre, grâce à l'écart entre intensité observée et prédite pour des raies de lumière diffusée qui apparaissent nettement sur les spectres hors-limbe, sans être mélangées à des raies coronales). Ce défaut vient de ce que ces spectres restent trop "locaux", alors que la lumière diffusée provient d'une convolution sur toute la surface du disque (comprenant aussi des régions actives et des trous coronaux). L'avantage du spectre pris à haute altitude réside dans ce que cette convolution est déjà faite, ce qui évite aussi la modélisation du type de celle de Gabriel et al. (2003). Bien sûr, extrapoler le spectre de référence pour la lumière diffusée à toutes les altitudes n'est pas entièrement correct, puisque les contributions des différentes régions du disque sont modifiées selon la distance au limbe (donc les intensités relatives des différents types de raies, selon leur température de formation)). Pourtant, cette erreur devient de plus en plus négligeable à mesure que l'on observe loin du disque (cf. Feldman et al. (1999)), là où précisément la correction de lumière diffusée devient le plus nécessaire! Doschek and Feldman (2000) estiment par ailleurs que le comportement, en fonction de l'altitude, des raies froides et chaudes vue en lumière diffusée, est similaire (et ce d'autant plus, encore une fois, que la distance au limbe augmente).

J'ai personnellement noté une meilleure adéquation entre les raies de lumière diffusée identifiables sur les spectre hors-limbe et les spectres de lumière diffusée lorsque ces deux types de spectres étaient pris à la même période (concordance en intensité, ce qui s'explique par les contributions des différents types de régions solaires, mais aussi parfois en longueur d'onde, ce qui s'explique plutôt par les conditions instrumentales¹⁰. Mais encore une fois, la différence se fait surtout sentir aux basses altitudes, où la contribution relative de la lumière diffusée est moins importante.

Pour obtenir les spectres de référence, je me suis efforcé d'observer le même domaine spectral que celui du spectre hors-limbe pour lequel la correction de lumière diffusée doit être effectuée. Ces spectres à très haute altitude exigent de longs temps de pose, et sont obtenus par sommation sur une grande partie du détecteur (le flux de photons est très faible). Ceci pose le problème d'un élargissement artificiel des raies du spectre de référence du fait de la distorsion résiduelle du détecteur. Pourtant, lorsque j'ai procédé à des vérification de l'importance de cet effet sur les spectres de lumière diffusée, je n'ai pas noté de variation notable de la largeur des raies (dans la limite des barres d'erreur). En fait, la faible statistique de photons ne permet pas vraiment de corriger cet effet (dans le cas contraire, on pourrait par exemple découper le détecteur en petits intervalles selon Y_D , et réaligner les spectres obtenus avant sommation, mais les raies ne sont pas toujours suffisamment intenses)). Je pense néanmoins que soustraire une raie de lumière diffusée trop large à une raie hors-limbe tend à diminuer la largeur de la nouvelle raie, ce qui signifie que les effets que j'observe sont sous-évalués, et non pas sur-évalués (cf. aussi Sec. 7.1).

Etant donné que l'on va réaliser une correction point par point des profils, il est nécessaire que le spectre de référence soit obtenu avec la même largeur de fente que le spectre hors-limbe (pour que les raies présentent la même largeur instrumentale, cf. Sec. 6.5.1).

¹⁰cf. plus bas, sous-section "Intercalibration en longueur d'onde des spectres hors-limbe et de lumière diffusée"

Spectre de lumière diffusée

Comme on l'a compris, on peut considérer que les contributions relatives des différentes raies du spectre de lumière diffusée restent figées selon l'altitude d'observation. Il reste donc à appliquer une simple homothétie selon l'altitude h où est effectuée la correction pour prédire le spectre de lumière diffusée correspondant. Le coefficient de dilatation C = C(h) est déterminé de façon à faire coïncider, sur le spectre hors-limbe et sur le spectre de lumière diffusée, l'intensité d'une raie identifiée comme étant purement de la lumière diffusée (par exemple, des raies atomiques, ou d'ions faiblement chargés; on peut aussi se baser sur les température de formation, ou les "classes" de Feldman et al. (1997); j'ai parfois utilisé une moyenne sur plusieurs raies). Cette intensité est déterminée à partir du produit de l'amplitude par la largeur de la raie, fournis par un ajustement gaussien (Sec. 6.4).

A défaut de raie suffisamment intense, on peut aussi utiliser l'intensité du continuum. Dans ce dernier cas, vu les longs temps d'exposition et le petit nombre de photons dans certains domaines spectraux (e.g. Fe X), il faut tenir compte du bruit du détecteur. Si le nombre de coups par pixel est parfois faible, une grande statistique est néanmoins obtenue en effectuant la mesure sur une grande partie du détecteur (idéalement la moitié centrale, la plus sensible). La valeur du continu est déterminée à l'aide d'une méthode de réjection de pics : le spectre est considéré comme un ensemble de valeurs décrivant un signal constant soumis à des fluctuations. Les valeurs supérieures à la moyenne ± 2 écarts-type sont éliminées, au cours d'itérations successives, jusqu'à convergence.

L'erreur absolue sur chaque point du spectre de lumière diffusée $I_{\text{diff}}(\lambda)$ (dilaté par rapport au spectre de référence) correspond à la somme des deux erreurs suivantes : l'erreur due à la statistique du nombre de coup $N(\lambda)$ reçu dans le spectre de référence ($\sqrt{N(\lambda)} \times C$, où C est le coefficient de dilatation définit plus haut), et l'erreur sur la détermination du coefficient C : $\Delta C/C \times I_{\text{diff}}(\lambda)$

Intercalibration en longueur d'onde des spectres hors-limbe et de lumière diffusée

L'avant-dernière étape de la correction consiste à recalibrer les longueurs d'onde du spectre de lumière diffusée sur celles du spectre hors-limbe (y compris lorsque qu'on observe les mêmes domaines spectraux; il se produit en effet une dérive temporelle des propriétés de dispersion de l'instrument, alors que ces spectres sont observés à plusieurs heures, voire plusieurs jours d'intervalle; et surtout, le mécanisme pas-à-pas de réglage de la longueur d'onde ne revient pas exactement sur la même position).

Pour cela, on choisit de nouveau une raie de référence (idéalement, il s'agit encore une fois d'une raie "froide" vue en lumière diffusée sur le spectre hors-limbe). Après ajustement gaussien sur les deux spectres, l'échelle de longueur d'onde du spectre de lumière diffusée est translatée de façon à ce que les positions de la raie sur les deux spectres coïncident. Un nouveau spectre de lumière diffusée est créé en interpolant les valeurs de l'ancien aux points de l'échelle de longueur d'onde du spectre hors-limbe.

J'ai parfois utilisé plusieurs raies de référence, lorsqu'il apparaissait que la seule translation ne permettait pas la concordance complète des deux spectres. Il faut alors effectuer aussi une dilatation de l'échelle de longueur d'onde. Ceci ce produit surtout dans le cas où le spectre de référence a été pris à une date très différente de celle du spectre hors-limbe : les propriétés de dispersion de l'instrument peuvent être modifiées par des variations de température, par exemple.

Spectre corrigé

Le spectre corrigé de la lumière diffusée (correspondant donc à l'émission réelle de la couronne) est obtenu en soustrayant le spectre de lumière diffusé au spectre hors-limbe point par point (pixels correspondant à la longueur d'onde).

L'erreur sur les points de ce spectre (en nombre de coups par pixels) est la somme des erreurs sur le spectre hors-limbe et sur le spectre de lumière diffusée.

On trouvera des exemples de spectres de lumière diffusée dans la figure 6.5, et dans les annexes C (avec en particulier l'augmentation de la contribution relative de la lumière diffusée avec l'altitude) et D. La figure 6.6 donne des exemples de spectres reconstruits après correction de la lumière diffusée.

6.3.3 Effet de la correction

La présence du spectre diffusé dans les spectres observés hors-limbe peut provoquer, selon les cas, les deux effets contraires d'élargissement ou d'amincissement "artificiels" des raies; la correction produira donc l'effet inverse, en rétablissant la largeur réelle de la raie émise dans la couronne.

L'élargissement intervient essentiellement lorsque la raie qui contamine possède une longueur d'onde différente (transition différente), et une intensité qui ne prédomine pas trop dans la raie totale observée (e.g. Fex contaminé par l'OI à 1028 Å, ou le CI à 1463 Å, à basse altitude). L'amincissement se produit par exemple lorsque la raie contaminante provient de la même transition, mais que la raie typique du disque a une largeur plus petite du fait des conditions de température et/ou de vitesse non-thermique (e.g. Mgx; en fait, les raies coronales observées sur le disque sont toujours, pour autant que j'ai pu en juger, plus minces sur le disque que hors du limbe); c'est ce dernier cas qui est uniquement traité par bon nombre de travaux, ce qui conduit alors à une sous-estimation du problème de la lumière diffusée avec SUMER (e.g. Doschek et al. (2001)). Mais il existe un autre cas d'amincissement, qui survient pour des raies élargies à basse altitude par la raie d'une transition différente, mais qui finit par dominer à haute altitude : on ne mesure alors plus que cette raie, qui est bien souvent plus mince (raies "froides", cf. exemples du Fe x). Dans cette optique, il n'est pas impossible que ce problème ait été négligé dans le cas d'instruments autres que SUMER : le mélange de raies "froides" (en lumière diffusée) et "chaudes" (coronales) serait sous-estimé, en ne se concentrant que sur la lumière diffusée provenant que de la raie coronale elle-même (je pense en particulier à CDS/SOHO).

La section 8.1 présente les conséquences de la correction de lumière diffusée sur la variation de la largeur des raies avec l'altitude. D'autres exemples de l'effet de la correction de lumière diffusée sont donnés dans les articles des annexes C (Fig. 3 et 4) et D (en particulier, Fig. 8).

Toute correction n'étant jamais parfaite, ce qui compte pour la confiance dans les raies corrigées, c'est autant le nombre de coups restants dans la raie (statistique), que la contribution de lumière diffusée qui a été soustraite. Devant les risques qu'il y ait des contributions différentes (lumière diffusée, mais aussi photo-excitation, etc.) dans des raies de transitions différentes impliquant un même ion, il me parait plus prudent de conserver la même transition pour comparer des températures/vitesses non-thermiques à des altitudes différentes. Ceci n'est pas le cas, par exemple, dans Tu et al. (1998) (qui ne tiennent d'ailleurs pas compte de la lumière diffusée), pour le Si VIII : ils comparent la raie à 1445 Å à basse altitude avec celle à 944 Å à haute altitude (mélangée au S VI, cf. Fig. 6.5). J'ai pu constater, dans le jeu de données 2, que les largeurs de ces deux raies étaient déjà différentes à une même altitude!

La raie à 1445 A me semble elle-même suspecte, bien que j'ai longtemps sous-estimé sa



Fig. 6.5: Exemple de spectre de lumière diffusé (en rouge), venant s'ajouter au spectre d'émission coronale pour former le spectre observé (en bleu). La contribution relative de la lumière diffusée augmente avec l'altitude (60, 134 et 253", de haut en bas). Les spectres sont en coups par pixels (intégré sur des intervalles spatiaux de plus en plus grand avec l'altitude, pour une meilleure statistique; la calibration est inutile pour l'ajustement des raies, cf. Sec. 6.4.1), mais l'échelle des abscisses est en longueur d'onde (valeurs correspondantes des pixels), pour faciliter l'identification des raies.



Fig. 6.6: Spectres corrigés de la lumière diffusée, correspondants aux spectres de la figure 6.5. Les barres d'erreurs sont délimitées par les lignes pointillées.



Fig. 6.7: Raie du Si VIII à 1445 Å, à 58" et 178" au dessus d'un trou coronal (jeu 1). Les "accidents" indiqués par les flèches, qui augmentent d'intensité avec l'altitude, et se retrouvent sur d'autres jeux de données, font penser que cette raie est en fait contaminé par de la lumière diffusée (ayant sous-estimé le problème, je n'ai malheureusement pas acquis de spectre de référence pour la lumière diffusée correspondant à cette raie). Il est probable qu'il y ait aussi une contamination de l'autre côté de la raie.

possible contamination, et n'ai donc pas pris de spectre de référence pour la lumière diffusée. La figure 6.7 montre en effet des déformations du profil qui se développent à plus haute altitude. Ces déformations apparaissant sur plusieurs jeux de données, il est exclu qu'elles soient due à une erreur statistique. Doyle et al. (1998) parle d'ailleurs d'un mélange avec une raie du NIV, sur le disque. La contamination par de la lumière diffusée expliquerait le comportement de cette raie à haute altitude (décroissance, après une phase de croissance, cf. Fig. 8.1).

Un intérêt secondaire de la correction de lumière diffusée consiste, en l'absence d'ajustement multi-gaussien, de permettre l'élimination de certaines raies froides proches des raies coronales (sans pour autant provoquer de mélange), qui perturbent la procédure d'ajustement (en particulier, pour l'estimation de la partie polynomiale, cf. Sec 6.4; la modification de l'ajustement du continu ainsi provoquée se répercute sur celle de l'amplitude maximum de la raie, et donc sur celle de la largeur).

6.4 Ajustement gaussien des raies

6.4.1 Obtention de la largeur des raies

La largeur des raies (entre autres) est fournie par un ajustement à l'aide d'une gaussienne à laquelle on ajoute un polynôme du second degré (termes constant, linéaire, et quadratique). Il s'agit d'un ajustement par minimisation des moindres carrés¹¹, à l'aide de la procédure CUR-VEFIT dans IDL. C'est le spectre en nombre de coups par pixels qui est utilisé, pour éviter une recalibration en coups $\cdot \text{Å}^{-1}$, à la fois du spectre et de son erreur statistique. La valeur en Angstroems est obtenue en multipliant le résultat en pixel par la dispersion angulaire connue du spectromètre (fonction FT_Calambda de *Solar Software*; cette dispersion dépend de la longueur d'onde)¹².

¹¹Least square fit, en anglais.

¹²Selon les dates d'observations, cette dispersion varie, mais de quelques pixels pour les 1024 que compte le détecteur sur l'axe X_D , ce qui est négligeable à l'échelle d'une seule raie, et surtout devant l'incertitude due à la discrétisation sur les pixels du détecteur.

6.4.2 Barres d'erreur

La procédure d'ajustement fournit aussi des barres d'erreur sur les paramètres ajustés (à 1 sigma, ou dit autrement, l'écart-type de la distribution de solutions obtenue en faisant varier les valeurs des points du profil en fonction de leur barre d'erreur (elle aussi à 1 sigma)). L'incertitude sur la largeur peut descendre à une fraction de pixel, du fait de la modélisation par une fonction (en l'occurrence, gaussienne; cf. Wilhelm et al. (1995)).

Pour évaluer la confiance que l'on peut avoir dans cet ajustement, j'ai réalisé des simulations de raies "bruitées" : à partir d'une raie de paramètres déterminés (amplitude, centre, largeur, constante...), on génère un ensemble de raies dont chaque point se voit ajouté (en valeur relative) un bruit gaussien (d'écart-type égal à l'erreur sur le nombre de coups, typiquement sa racine carrée). On compare ensuite l'erreur moyenne fournie par la procédure d'ajustement avec la moyenne des erreurs réellement commise par la procédure (puisqu'on connaît la solution correcte). De façon générale, les deux erreurs coïncident.

Quelques points importants mis en évidence par cette étude méritent d'être notés (même si certains sont assez triviaux) :

- Si la raie est échantillonnée sur un plus grand nombre de points (e.g. largeur plus grande à nombre de points constants), alors l'erreur absolue sur le centre de la raie augmente (mais pas celles sur l'amplitude ou la largeur; Fig. 6.8).
- Lorsque le nombre de coups dans la raie augmente, le rapport signal-sur-bruit augmente, l'erreur diminue donc sur chacun des paramètres (Fig. 6.9).
- L'ajout d'une constante dans le spectre diminue ce même rapport signal-sur-bruit ; l'erreur fournie reste encore identique à l'erreur moyenne constatée (Fig. 6.10).
- En revanche, si l'erreur sur chaque point du spectre est surestimée par rapport à l'erreur réelle (en donnant à la procédure d'ajustement des barres d'erreurs supérieures au bruit effectivement rajouté), alors la procédure d'ajustement renvoie une erreur surestimée par rapport à l'erreur réellement commise (Fig. 6.11). Ce résultat parfaitement logique met en lumière le problème que pose une éventuelle surestimation de l'erreur commise lors de la correction de lumière diffusée.

Par souci de "sécurité", j'ai néanmoins préféré majorer l'erreur sur la largeur par 0.1 pixel. Il m'a par ailleurs paru préférable de ne garder que les résultats de raies ayant au minimum 100 coups, voire plus, à l'amplitude maximale de la raie.

6.4.3 Ajustements multi-gaussiens

J'ai essayé de réaliser des ajustements multi-gaussiens dans le cas de raies très proches l'une de l'autre. Les procédures classiques de minimisation de moindres carrés ne convergent alors plus vraiment. Je me suis donc tourné vers un *algorithme génétique*¹³ du nom de PIKAIA, développé par P. Charbonneau¹⁴, et en particulier la version IDL de S. McIntosh¹⁵. Les résultats sont apparus très inégaux, et n'ont pas donnés en définitive de meilleurs résultats que les ajustements à une seule gaussienne (les algorithmes génétiques demandent par ailleurs de long temps de calculs; la plupart du temps, il est nécessaire d'injecter le résultat fourni dans une procédure classique de minimisation des moindres carrés, de façon à obtenir une meilleure convergence. Le principal intérêt de l'algorithme génétique est d'éviter de converger vers une "fausse" solution avec la minimisation des moindres carrés, du fait de la présence de maximum locaux. Pour plus

¹³utilisé, par exemple, dans Doyle et al. (1999); Peter and Vocks (2003).

¹⁴http://www.hao.ucar.edu/Public/models/pikaia/pikaia.html

¹⁵cf. le site internet précédemment cité



Fig. 6.8: Simulation de raies bruitées pour différentes largeurs de la raie (ce qui a pour effet de modifier le nombre de point sur lequel elle est échantillonnée). En pointillé rouge, l'erreur moyenne réellement commise par la procédure d'ajustement ; en pointillé noir, l'erreur (moyenne) fournie par la procédure. Raies d'amplitude maximale égale à 1000 coups.



Fig. 6.9: Simulation de raies bruitées pour différentes valeurs de l'amplitude maximale : l'erreur commise sur les différents paramètres d'ajustement diminue évidemment lorsque le rapport-signal-sur-bruit augmente (en pointillé rouge, l'erreur moyenne réellement commise par la procédure d'ajustement ; en pointillé noir, l'erreur (moyenne) fournie par la procédure. Raies de largeur gaussienne égale à 3 points d'échantillonnage).



Fig. 6.10: Simulation de raies bruitées pour différentes valeurs de la constante ajoutée à la raie gaussienne. La valeur croissante de la constante diminue le rapport rapport-signalsur-bruit, ce qui augmente les barres d'erreur sur les paramètres (raies d'amplitude égale à 100 coups, et de largeur gaussienne égale à 3 points d'échantillonnage. En pointillé rouge, l'erreur moyenne réellement commise par la procédure d'ajustement; en pointillé noir, l'erreur (moyenne) fournie par la procédure).



Fig. 6.11: Simulation de raies bruitées pour différentes valeurs des barres d'erreur donnée à la procédure d'ajustement en chacun des points de la raie. Celles-ci sont surestimées d'un certain facteur par rapport au bruit gaussien effectivement ajouté. En retour, la procédure surestime les barres d'erreur sur les paramètres d'ajustement, alors qu'elle ne commet pas réellement ces erreurs (raies d'amplitude égale à 100 coups, et de largeur gaussienne égale à 3 points d'échantillonnage, avec une constante égale à 20 coups. En pointillé rouge, l'erreur moyenne réellement commise par la procédure d'ajustement ; en pointillé noir, l'erreur (moyenne) fournie par la procédure).

de détails, se référer à la documentation citée).

6.5 Largeur instrumentale

6.5.1 Contribution instrumentale dans le spectre corrigé de la lumière diffusée

Le spectre observé sur le détecteur correspond à la convolution du spectre reçu à l'ouverture de l'instrument, avec le profil instrumental. La largeur instrumentale des raies mesurées par SUMER est principalement due à la largeur finie de la fente du spectromètre¹⁶ (cf. Sec. 5.5.1 et 5.5.3).

Si le spectre hors-limbe et le spectre de lumière diffusée qui lui est soustrait ont tous les deux été acquis avec la même fente, on peut considérer que le spectre obtenu après la soustraction du spectre de lumière diffusée est toujours convolué avec le profil instrumental. En effet, on peut considérer que la contribution instrumentale apparaît après le passage de la fente (si elle est due aussi à d'autres parties du spectromètre, la démonstration reste valide), alors que la lumière diffusée provient essentiellement du miroir primaire (avant dispersion par le spectromètre; à partir du miroir secondaire, il ne reste plus que l'image de la fente, c'est-à-dire plus rien du rayonnement direct du disque, cf. Fig. 5.7, p. 119). Soit α la fonction d'appareil, et I et \tilde{I} les intensités respectivement entrant par la fente et reçue par le détecteur; on peut donc écrire :

$$\tilde{I}_{\rm hl}(\lambda) = \int \left[I_{\rm E}(\lambda) + I_{\rm D}(\lambda) \right] \cdot \alpha(t - \lambda) \,\mathrm{d}t \tag{6.2}$$

$$\tilde{I}_{\rm D}(\lambda) = \int I_{\rm D}(\lambda) \cdot \alpha(t-\lambda) \,\mathrm{d}t \tag{6.3}$$

Les indices hl, E et D correspondent respectivement au spectre observé hors du limbe, au spectre réellement émis par la couronne (ou plutôt, reçu sur le miroir), et au spectre de lumière diffusée. Le spectre une fois corrigé \tilde{I}_{corr} est donc bien égal au spectre émis par la couronne convolué avec la fonction d'appareil :

$$\tilde{I}_{\rm corr}(\lambda) = \tilde{I}_{\rm hl}(\lambda) - \tilde{I}_{\rm D}(\lambda)$$
(6.4)

$$= \int I_{\rm E}(\lambda) \cdot \alpha(t-\lambda) \,\mathrm{d}t \tag{6.5}$$

6.5.2 Correction de la largeur instrumentale

La procédure con_width_funct_3.pro (écrite par K. Wilhelm et inclue dans Solar Software), permet de corriger la largeur des raies du profil instrumental (déconvolution). Cette correction dépend a priori de la longueur d'onde, de l'ordre, du détecteur utilisé, et bien sûr de la fente. En ce qui concerne le détecteur A, la dépendance en fonction de la longueur d'onde est négligeable; on pourrait se contenter d'une soustraction quadratique de la valeur constante de 99 mÅ en largeur à mi-hauteur (valeur corrigée depuis les travaux de Chae et al. (1998)), soit 42 mÅ en largeur gaussienne, telle que définie p. 77^{17} .

¹⁶Ainsi, plus on utilise une fente large, plus le profil des raies sera élargi.

¹⁷soit environ un pixel du détecteur.

6.5.3 Effet de la correction

Après correction de la largeur instrumentale, la largeur diminue d'environ 7 % pour le Fe XII (1242 Å), et d'environ 4 % pour l'O VI (1031 Å) (raies mesurées à environ 60" au dessus du limbe, dans un trou coronal (jeu de données 1)). Au dessus de 60", les largeurs augmentent, la contribution relative de la largeur instrumentale diminue donc.

6.6 Mesure du rapport des raies du Si VIII (1445/1440 Å)

Les données SUMER du JOP 158 subissent les mêmes traitements que les autres. Les spectres sont créés par sommations sur plusieurs lignes du détecteur (le long de l'axe Y_D).

Après avoir repéré les limites en longueur d'onde des deux raies du Si VIII (1440 et 1445 Å), le total des coups dans l'intervalle correspondant est intégré (comme par exemple, Doschek et al. (1997)). J'ai restreint ces limites pour ne pas tenir compte des petites contributions qui apparaissent sur les ailes, de plus en plus importantes avec l'altitude (cf. Fig. 6.7; je n'ai pas opéré de correction de la lumière diffusée sur ces raies, puisqu'il n'y avait pas de spectre de référence disponible, malgré les soupçons). La composante due au continu est ensuite soustraite. L'erreur absolue consiste en la somme de l'erreur statistique sur le nombre total de coups (racine carrée) et de l'erreur sur la détermination de l'intensité du continu.

Le rapport des deux intensités (celle de la raie à 1445 sur celle à 1440 Å) est ensuite reporté sur la courbe de la figure 4.2 (p. 75) pour obtenir la densité à l'altitude considérée. La barre d'erreur sur ce rapport, reporté sur cette même courbe, donne une incertitude sur la densité.