Les données de l'instrument VAULT

1 Introduction

VAULT est un acronyme pour Very high Angular resolution ULtraviolet Telescope. Ce télescope UV à très haute résolution a été conçu et construit par l'équipe de Physique Solaire du Naval Research Laboratory à Washington, D.C.. VAULT est un programme de vols fusée réalisant des observations du soleil à très haute résolution spatiale dans le but d'améliorer la compréhension des structures fines et des processus intervenant dans le chauffage de la couronne solaire. La raie H-Lyman α est particulièrement bien adaptée à l'étude de la relation entre la partie supérieure de la chromosphère et la partie basse de la région de transition. Ce programme comporte plusieurs vols fusée avec une instrumentation quasiment identique à chaque tir.

Deux vols ont déjà été effectués en mai 1999 et en juin 2002, le troisième vol a eu lieu en juillet 2005. Les deux premiers vols dédiés à la raie H-Lyman α ont été réalisés avec le support d'instruments au sol et embarqués sur les satellites TRACE et SOHO. Le premier vol a eu lieu le 7 mai 1999; 14 images du Soleil ont été enregistrées avec des temps de pose allant de 2 à 6 s correspondant à un total de 5 minutes d'observation, la figure 4.3 montre l'une des images enregistrées. La comparaison des données obtenues lors de ce vol avec les données de la voie à 17.1 nm du satellite TRACE a permis d'établir une corrélation entre les structures de la couronne et celles de la basse région de transition ([Vourlidas et al., 2001a]), notamment au niveau d'une région active. Cette corrélation suggère que l'atmosphère au-dessus de la région active comprend à la fois des boucles " chaudes ", dont la température est supérieure à 2 million de Kelvin, et des boucles " tièdes ", dont la température se situe autour de 1 million de Kelvin. Le second vol a utilisé au maximum les capacités techniques de l'instrument en réalisant 21 images avec un temps de pose de 1 s, sur une durée totale d'observation de 6 minutes. La résolution spatiale de ces images est de 0.3 secondes d'arc, ce qui est la meilleure résolution obtenue à ce jour dans la raie H-Lyman α . Les images montrent un long filament vu en absorption au-dessus de deux régions actives. Ces observations sont particulièrement intéressantes puisque jusqu'à présent, aucun filament n'avait été correctement observé dans la raie H-Lyman α . Leur faible visibilité sur les images TRC ([Bonnet et al., 1980]) avait même fait avancer l'hypothèse que les filaments ne pouvaient être distingués en imagerie H-Lyman α , ce qui était particulièrement inattendu en raison de l'importante opacité de cette raie. Grâce à l'amabilité de Angelos Vourlidas, nous avons eu accès aux données brutes du second vol de VAULT, et j'ai donc pu réaliser une étude de ce filament bien distinct et résolu après avoir traité et étalonné les données.

2 Description de l'instrument

L'instrument VAULT est un télescope de type Cassegrain suivi d'un spectrohéliographe à dispersion nulle ([Vourlidas et al., 2001b]). Les éléments principaux de l'instrument sont reproduits sur le schéma optique de la figure 4.3. Le miroir primaire du télescope est de diamètre 30 cm, ouvert à f/24.6, et ayant une obscuration de 25%. Un diaphragme de champ est placé à l'entrée du spectrohéliographe. Dans ce dernier, le faisceau est collimaté et dispersé par le premier réseau de diffraction sphérique, puis replié par un miroir plan pour être recombiné et focalisé sur le détecteur CCD par le second réseau de diffraction. La combinaison assure la compensation de la dispersion tout en sélectionnant une bande passante de 15 nm autour de la raie H-Lyman α . Un filtre UV de bande passante étroite est placé juste devant le détecteur afin d'éliminer toute lumière visible parasite. La caméra CCD utilisée est recouverte de lumogène et comporte 2048 x 3072 pixels permettant d'obtenir un champ de vue de 4.3 arcmin x 6.4 arcmin, soit environ 2,5% de la surface du Soleil. Les optiques du télescope d'entrée de l'instrument sont d'excellente qualité : $\lambda/16$ RMS à 121.5 nm (soit $\lambda/25$ PV à 633 nm) ; la coma et l'astigmatisme sont inférieurs à 0.01 seconde d'arc sur tout le champ couvert. La qualité du schéma optique et un système de contrôle d'attitude performant ont permis d'obtenir des images de grande qualité.

3 Traitement des données

Sur les 21 images enregistrées au cours du second vol fusée, 17 ont le même pointage : le champ de vue de l'instrument montre une zone de Soleil calme et une zone de régions actives sur laquelle un long filament est vu en absorption. Les 3 autres images ont un champ de vue permettant d'observer le bord solaire et de fines protubérances. Ces images ont été enregistrées le 14 juin 2002 entre 18 h 12 min 01s et 18 h 17 min 47 s.

3.1 Soustraction du courant d'obscurité

La première étape du traitement des données avant leur analyse est de corriger les contributions du détecteur au signal. Je n'ai pas eu accès au fichier de calibrations de l'instrument et du détecteur, mais une image a été prise au cours du vol avant l'ouverture de la porte de l'instrument. Cette image permet d'obtenir le courant d'obscurité du détecteur. Cette image et son histogramme sont présentés sur la figure 4.4. Cette contribution a été soustraite aux images brutes fournies par l'instrument. L'une de ces images brutes et son histogramme sont donnés sur la figure 4.4, de même que l'image corrigée et son histogramme.

3.2 Etalonnage des données

Afin de pouvoir étudier quantitativement les données de ce vol fusée, il est nécessaire d'étalonner photométriquement les images. Pour cela, j'ai obtenu la valeur de l'irradiance totale H-Lyman α pour la journée du 14 juin 2002 grâce aux données de l'instrument TIMED SEE (Solar EUV Experiment). L'irradiance totale H-Lyman α vaut 4.58 $10^{11}ph.cm^{-2}.s^{-1}$, ce qui correspond à une radiance moyenne



Fig. 4.1: Une des images obtenues par le premier vol fusée VAULT le 7 mai 1999 (A. Vourlidas 2003, communication privée).



Fig. 4.2: Une des images obtenues par le second vol fusée VAULT le 14 juin 2002 (A. Vourlidas 2003, communication privée).



Fig. 4.3: Schéma optique de l'instrument VAULT ([Vourlidas et al., 2001b]).



Fig. 4.4: En haut : image et histogramme du courant d'obscurité sur le détecteur de VAULT. Au milieu : image et histogramme d'une image brute de VAULT. En bas : image et histogramme de la même image à laquelle le courant d'obscurité a été soustrait.

de 6.74 $10^{15}ph.cm^{-2}.s^{-1}.sr^{-1}$. J'ai ensuite utilisé une image à 30,4 nm de l'instrument EIT à bord de SOHO (voir figure 4.5) pour connaître la proportion de régions actives dans le disque solaire entier et en déduire la radiance moyenne du Soleil calme en H-Lyman α . Je considère pour cela que les régions actives contribuent 5 fois plus au flux H-Lyman α que les régions de Soleil calme. Les régions actives couvrent approximativement 6.7% du disque solaire le jour des observations. La radiance moyenne du Soleil calme vaut donc $5.31 \ 10^{15}ph.cm^{-2}.s^{-1}.sr^{-1}$. J'ai ensuite cherché une zone de Soleil calme sur les images VAULT; une de ces zones est représentée par la zone 2 sur la figure 4.6. Enfin, j'ai calculé la valeur moyenne de l'intensité des zones de Soleil calme sur les 16 images ayant un pointage et un temps de pose identiques (17 ont le même pointage mais l'une d'entre elles a un temps de pose de 5 secondes). J'ai par la suite fait correspondre cette valeur moyenne à celle calculée grâce aux données TIMED SEE et EIT.

Les 17 images ne montrant pas le bord solaire présentent un très fort gradient d'intensité de l'ouest vers l'est (pente de $-5 \, 10^{11} ph.cm^{-2}.s^{-1}$ par pixel), ce qui est clairement illustré par la figure 4.7. Afin de s'assurer qu'il n'y a pas de contribution instrumentale à ce gradient d'intensité, j'ai calculé le profil moyen sur chaque image d'une zone relativement uniforme de Soleil calme représentée par la zone 1 sur la figure 4.6. Un de ces profils est représenté sur la figure 4.8, il présente une pente 5 fois plus faible $(-0.9 \, 10^{11} ph.cm^{-2}.s^{-1}$ par pixel). Cela suggère que le fort gradient est dû à la présence de la région active sur la partie ouest des images et non à un effet instrumental.

4 Etude d'un filament

Même si les caractéristiques du plasma qui constitue les filaments et les protubérances sont bien connues ([Patsourakos and Vial, 2002]), il reste beaucoup de choses à découvrir au sujet de ces structures (qui sont en fait les mêmes structures mais vues respectivement en absorption sur le disque solaire et en émission hors limbe). En particulier, les éjections de matière coronale sont souvent liées à des éruptions de filaments; il est donc indispensable de mieux comprendre la structure magnétique des filaments, leur formation et leur évolution vers un état instable et éruptif.

Les données fournies par l'instrument VAULT sont uniques et donc particulièrement intéressantes pour deux raisons : ce sont les premières observations de filament de région active, en imagerie, dans la raie H-Lyman α et l'excellente résolution des images permet pour la première fois dans l'ultraviolet de résoudre des structures fines dans le filament, comme c'est déjà le cas dans le domaine visible grâce au Swedish Telescope (voir figure 4.9). La contrepartie d'un vol fusée est hélas le faible volume de données : un seul filament et en tout 21 images. La figure 4.10 montre un agrandissement du filament observé, sujet de l'étude dans cette section, et la figure 4.11 montre le profil du filament moyenné sur une portion de 11 secondes d'arc.

Les figures 4.12, 4.13 et 4.14, montrent les histogrammes respectifs d'une portion du filament (zone Filament sur l'image 4.6), d'une zone de région active (zone AR sur l'image 4.6), et d'une zone de Soleil calme (zone 2 sur l'image 4.6) On peut ainsi calculer les rapports de radiance entre les différentes zones; les résultats sont notés dans la table 4.1. On remarque notamment que le rapport de radiance du filament à la radiance de la zone de Soleil calme différe des résultats obtenus avec l'instru-



Fig. 4.5: Image EIT 30.4 nm du 14 juin 2002. On observe, un peu au dessus de l'équateur à gauche du disque solaire, le long filament présent sur les images VAULT.



Fig. 4.6: Image VAULT. Zone 1 : zone de région active pour le diagnostic d'effet instrumental. Zone 2 : zone utilisée pour le calcul de la valeur moyenne de l'intensité du Soleil calme. RA : zone de région active. Filament : partie du filament observé.



Fig. 4.7: Coupe moyenne sur une image VAULT suivant la direction ouest-est



Fig. 4.8: Coupe moyenne sur la zone 1 d'une image VAULT suivant la direction ouest-est



Fig. 4.9: Image d'un filament (différent de celui des images VAULT) observé à 430,5 nm au Solar Swedish Telescope.

ment SUMER ([Vial et al., 2005]). Cependant, dans le cas présent le filament se trouve au-dessus d'une région active et il est concevable que l'émission de la région active sous-jacente explique cette différence.

Afin de mieux comprendre les processus de formation des filaments, leur implantation dans les différentes couches de l'atmosphère solaire, il est nécessaire comparer les observations d'un même filament dans différents domaines de longueur d'onde correspondant à différents domaines de température de formation et de façon moins directe à différentes altitudes dans l'atmosphère solaire.

J'ai donc recherché les différentes observations de ce filament disponibles. Plusieurs instruments au sol ont observé ce filament. J'ai choisi les données $H\alpha$ de l'observatoire Big Bear car la coïncidence temporelle était la meilleure. D'autre part, les satellites SOHO et TRACE observaient également. J'ai

$\frac{R_{\rm filament}}{R_{\rm Soleil\ calme}}$	1.67
$\frac{R_{\rm filament}}{R_{\rm région \ active}}$	0.14
$\frac{R_{\rm Soleil\ calme}}{R_{\rm région\ active}}$	0.24

Tab. 4.1: Rapports de radiance entre les différentes zones d'intérêt.



Fig. 4.10: Filament observé par VAULT au-dessus des régions actives 9998 et 9999 (nomenclature de la National Oceanic and Atmospheric Administration); on peut observer plusieurs structures fines dans le filament.



Fig. 4.11: Coupe moyenne du filament.



Fig. 4.12: Image et histogramme d'une portion du filament.



Fig. 4.13: Image et histogramme d'une zone de région active.



Fig. 4.14: Image et histogramme d'une zone de Soleil calme.

Observation	λ (nm)	T de formation (approx.)	Largeur mesurée (arcsec)
BBSO	656,3	6000 K	10
VAULT	$121,\! 6$	8000 K	20
EIT	30,4	80000 K	20
TRACE	17,1	">1 000 000 " K	25

Tab. 4.2: Largeurs moyennes du filament étudié obtenues pour les observations Big Bear Solar Observatory, VAULT, EIT, TRACE.

conservé l'image dans la raie de l'helium II pour EIT et celle de TRACE dans la raie du fer IX/X. Des observations avec le spectromètre CDS ont été effectuées dans le cadre d'un programme de coordination des observations solaires (JOP 148, Joint observation program), mais le filament n'apparait hélas pas sur celles ci car le champ de vue des rasters CDS est bien plus petit que celui de VAULT (244" x 240" pour CDS contre 4.3' x 6.4' pour VAULT).

La première étape dans l'étude de la comparaison entre les différentes observations est le coalignement des images. Les renseignements de pointage des instruments ne sont pas toujours suffisants et il faut de toutes facons tenir compte de la rotation du soleil puisque les données n'ont pas été prises en même temps. L'image TRACE a été enregistrée 6 heures après les images VAULT et l'image de l'observatoire Big Bear a été enregistrée 3 heures avant, ce qui correspond respectivement à des déplacements de 24 et 12 secondes d'arc environ. J'ai donc coaligné les observations en utilisant les données de pointage des différents instruments puis affiné cet alignement en corrélant l'image VAULT aux autres images, après avoir dégradé la résolution de l'image VAULT à celle de l'image à coaligner.

Les images du filament correspondant à ces quatre observations sont données sur la figure 4.15. Dans toutes les observations, le filament a le même aspect général : orientation et forme. Seule l'image VAULT permet de distinguer des structures fines même si certaines excroissances ou " branches du filament " (en haut à droite et à gauche du filament) sont visibles à toutes les longueurs d'onde et résolution spatiale. Cette figure montre également que le filament ne semble pas toujours avoir la même largeur. Ces différences de dimensions ont déjà fait l'objet de plusieurs publications ([Schwartz et al., 2004], [Heinzel et al., 2001] et [Heinzel et al., 2003]), dont la dernière propose un modèle de structure 3D d'un filament. Le filament serait selon ce modèle composé d'une partie " H α " et d'extensions de part et d'autre de cette première partie dans le domaine ultraviolet extrême. Ces extensions apparaissent comme des structures absorbant le rayonnement sous jacent et sont environ 5 fois plus larges que le même filament observé dans le visible à H α ([Heinzel et al., 2001]).

En effet, j'ai tracé la coupe du filament pour chacune des observations, le résultat est illustré sur la figure 4.16. Les tracés ne montrent pas une telle différence de largeur. Si on considère comme largeur du filament la largeur à mi-hauteur de la moyenne des zones à droite et à gauche du filament, on obtient les résultats reportés dans le tableau 4.2. Le rapport de largeur du filament entre les images ultraviolettes et l'image H α est au maximum égal à 1.7. Cela pourrait vouloir dire que les zones décrites par Heinzel et al. comme étant des " extensions UV " de filaments (c'est-à-dire de la matière froide absorbant) seraient en fait simplement des zones de réduction de l'émission du rayonnement sous jacent.



Fig. 4.15: Images du même filament vu par différents instruments au sol et dans l'espace. De gauche à droite : Big Bear Solar Observatory (656.3 nm, au sol), VAULT (121.6 nm, espace), EIT (30.4 nm, espace), TRACE (17.1 nm, espace)



Fig. 4.16: Comparaison des différentes coupes du filament (moyennées le long de celui ci) obtenues à partir des données TRACE, EIT, BBSO et VAULT.

5 Etude d'un groupe de protubérances

En plus du filament de région active étudié précédemment, les trois dernières images VAULT montrent le bord solaire et un groupe de protubérances. Les protubérances sont le même type de structure que les filaments, mais elles sont vues en émission hors du limbe. La figure 4.17 montre l'image VAULT entière puis la partie de cette image où figure le groupe de protubérances. Ces protubérances se présentent comme un groupe de boucles entremêlées. L'imagerie seule ne permettant pas le calcul des vitesses Doppler, il est impossible d'avoir des informations sur les mouvements de la matière dans ces protubérances, seuls des mouvements apparents peuvent être observés à partir de données d'imagerie. On peut cependant supposer que de forts gradients de vitesse seraient observés dans le cas des boucles se développant dans un plan perpendiculaire au plan du ciel comme c'est le cas dans la figure 4.19. Cette information aurait peut-être permis de conclure sur la fusion ou la superposition suivant la ligne de visée des deux structures de la figure 4.17 ne sont pas suffisantes pour conclure, si ce n'est sur l'opacité de la raie H-Lyman α puisqu'aucune augmentation d'intensité notable n'a été observée entre la coupe ou les structures sont séparées et celle ou les deux ne sont plus discernables.

Une autre région d'intérêt dans ce groupe de protubérances est celle présentée sur la figure 4.19. Les coupes suivant la direction de ces boucles et la moyenne de celles-ci illustrée sur la figure 4.20 montrent une augmentation de l'intensité au sommet des boucles qui constituent cette protubérance. Cela peut être dû à un effet d'intégration suivant la ligne de visée de l'instrument ou à un remplissage du sommet des boucles. Il est impossible de conclure avec uniquement trois images.

6 Conclusion

Cette étude d'un filament observé avec l'instrument VAULT dans la raie va être poursuivie mais donne déjà des résultats intéressants en ce qui concerne les largeurs comparées du filament dans plusieurs longueurs d'onde et la structure fine de celui ci. La prochaine étape d'analyse des données VAULT concernant ce filament sera de calculer les angles des structures autour de ce filament et d'étudier son degré de torsion et sa stabilité. Une autre étude est en cours concernant les protubérances visibles dans les 3 images où figure le bord solaire.

Ces deux études ont également mis en avant les limitations de l'utilisation de données UV sans spectroscopie ainsi que la difficulté de combiner plusieurs intruments spectromètres et imageurs. Il est par exemple impossible d'obtenir une information sur les mouvements de matière en ayant uniquement des données d'imagerie. D'autre part, il est impossible d'expliquer la concentration de matière audessus des boucles de protubérance ou dans les fibrilles du filament. L'association de la spectrométrie et de l'imagerie permettrait également de calculer l'intensité intégrée dans la raie H-Lyman α seule, dépourvue de la contribution du continuum sous-jacent. Des cartes de la largeur et de la dissymétrie de la raie dans le champ total de l'image pourraient être réalisées grâce à l'apport de la spectrométrie. Les études réalisées plaident en faveur de la réalisation et l'utilisation d'un spectromètre imageur dans l'ultraviolet. Ainsi les problèmes de coïncidence temporelle ou spatiale, dans le cas des observations CDS dédiées à VAULT, et ceux liés aux grandes différences de résolution spatiales seraient résolus (coalignement). Un spectromètre imageur dans l'ultraviolet permettrait de faire des observations à



Fig. 4.17: Zooms successifs sur une des images VAULT montrant le bord solaire et un groupe de protubérances.



Fig. 4.18: Coupes des protubérances de la figure 4.17; on n'observe pas d'augmentation notable de l'intensité lorsque les protubérances se croisent ou fusionnent. La ligne bleu indique la valeur moyenne de la radiance sur la coupe, et la ligne rouge correspond au niveau maximum de radiance lorsque les deux protubérances sont distinctes.



Fig. 4.19: Protubérance.



Fig. 4.20: Coupe moyenne sur la zone encadrée de la protubérance de la figure 4.19 .

haute résolution spatiale simultanément dans différentes longueurs d'onde, sur un domaine restreint à une ou deux raies proches ou sur un plus grand domaine spectral suivant le type de spectromètre imageur utilisé.