



Les éruptions solaires, de leurs origines au Soleil à leur devenir dans le milieu interplanétaire

Miho Janvier

► To cite this version:

Miho Janvier. Les éruptions solaires, de leurs origines au Soleil à leur devenir dans le milieu interplanétaire. Astrophysique stellaire et solaire [astro-ph.SR]. Université Paris-Saclay, 2021. <tel-03318596>

HAL Id: tel-03318596

<https://hal.science/tel-03318596v1>

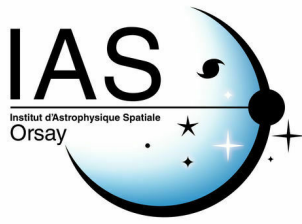
Submitted on 10 Aug 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



université
PARIS-SACLAY

MÉMOIRE POUR L'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

MIHO JANVIER

Les éruptions solaires, de leurs origines au Soleil à leur devenir dans le milieu interplanétaire

Membres du Jury:

Dominique Fontaine
Alessandro Bemporad
Karine Issautier
Benoît Lavraud
Noé Lugaz
Yannis Zouganelis

En qualité de:

Présidente du jury
Rapporteur
Rapporteuse
Rapporteur
Examineur
Examineur

soutenu le 26 mai 2021 à

Institut d'Astrophysique Spatiale

Résumé

Les éruptions solaires sont une preuve spectaculaire de l'activité de notre étoile, et sont parmi les événements les plus énergétiques de notre système solaire. Accompagnées d'émissions UV intenses et même de rayons X, elles sont à l'origine de l'injection de particules énergétiques dans le milieu interplanétaire et peuvent s'accompagner d'éjections coronales de matière solaire. Ces nuages de plasma magnétisé interagissent avec les environnements planétaires, entraînant un intérêt certain pour nos sociétés humaines d'acquérir des connaissances plus approfondies sur la prédiction des éruptions et leur évolution ultérieure.

L'amélioration de nos capacités d'observations du Soleil a fourni un bon nombre d'observables qui ont permis de compléter un modèle des éruptions solaires. Celui-ci, basé sur un mécanisme fondamental de dissipation d'énergie magnétique, appelé reconnexion magnétique, a été traité pendant des années dans sa version bidimensionnelle. Je montrerai comment la modélisation du champ magnétique solaire en 3D par des méthodes numériques nous fournit des prédictions sur son comportement lors des éruptions solaires, et comment ces prédictions peuvent être validées par une étude approfondie de la configuration des régions actives solaires. Ces travaux m'auront ainsi permis d'établir un modèle standard des éruptions solaires dans sa version 3D.

Les éjections coronales de masse (CMEs), reconnues comme l'un des principaux moteurs de la météorologie de l'espace, transportent le plasma solaire dans le milieu interplanétaire. Mes travaux de recherche cherchent à améliorer notre compréhension de leur évolution dans le milieu interplanétaire, ainsi que de leurs caractéristiques génériques. Les CMEs sont régulièrement mesurées in situ par des sondes interplanétaires. Je montrerai comment l'utilisation de nouvelles méthodes statistiques permet de révéler des caractéristiques génériques. En particulier, nous verrons comment obtenir une quantification de la morphologie des CMEs interplanétaires, comment l'analyse de leurs profils permet de mettre à jour les interactions avec le vent solaire, et d'appréhender leurs conséquences sur les rayons cosmiques.

Enfin, ce manuscrit propose un aperçu de mes autres missions liées à mon statut d'astronome-adjointe, entre autre de mon implication sur la mission Solar Orbiter, à la direction de recherche de jeunes chercheurs, à la communication scientifique.

Acknowledgements

A l'heure où je couche ces mots sur le papier (virtuel), cela va faire maintenant 10 ans presque jour pour jour que le chemin de mes recherches aura complètement bifurqué. Bien que ce chemin eut toujours les étoiles à son horizon, une incursion dans le domaine des plasmas de fusion lors de ma thèse aura légèrement dévié la trajectoire envisagée. Pourtant, c'est aussi peut-être grâce à celle-ci que je me suis retrouvée plus proche de notre Soleil, et enrichie d'un nombre important de personnes avec qui j'ai pu écumer les échelles, de la gyrocinétique, à la MHD, des tokamaks au Soleil et au milieu interplanétaire. Un beau voyage plasmique, et ces remerciements ne sauraient lister toutes et tous à qui je dois tant.

Un merci particulier à Guillaume Aulanier et Pascal Démoulin, ainsi qu'à toute l'équipe du Batiment 14, pour m'avoir fait confiance avant, pendant et après mon passage en terres meudonnaises. C'est grâce à vous que le chemin se sera précisé en astrophysique: j'ai tant appris de vous, comme le reflète j'espère ce manuscrit. Un autre merci particulier à l'équipe Solaire-Stellaire de l'IAS, de m'avoir accueillie, cette fois en terres orséennes, et m'avoir fournie mon point d'ancrage, et une petite famille "scientifique". En présence et surtout à distance ces derniers temps, votre bonne humeur aura jalonné mes dernières années de recherche!

Un autre grand merci aux membres du jury: bien que nos déplacements aient été fortement réduits par la pandémie du Covid, la lecture d'un manuscrit prend toujours du temps! Vous avez accepté avec enthousiasme (enfin je l'espère!) vos rôles, et je ne peux que vous en être extrêmement reconnaissante. Certains d'entre vous m'auront connue depuis bien des années (Noé, je suis très honorée que tu tiennes ce manuscrit entre tes mains, sachant que ma décision de partir en astro s'est faite en partie grâce à nos discussions, un jour de thèse à Kyoto!). Avec d'autres membres, je partage depuis quelques temps l'excitation et la curiosité qu'amène notre travail sur des missions spatiales. Vous compter parmi les membres de mon jury est un véritable honneur pour moi.

Ma curiosité pour le cosmos m'aura amenée à travailler sur des sujets et des techniques bien différents. Tout ce travail ne s'est fait aucunement seul, bien au contraire, et j'aimerais profiter de cette opportunité pour remercier mes collaboratrices et collaborateurs. Tellement d'interactions, de discussions, de partages, parfois, voire souvent, hors les murs de labos, ont jalonné la route de nouvelles découvertes et de passionnants débats. Aux deux "partners in crime", Pascal et Sergio, avec qui les papiers ont un pouvoir de mitose proportionnel aux intenses discussions (et dont les limites n'ont pas encore été atteintes!): merci de votre confiance sans borne et de votre gentillesse infinie. En particulier Pascal, pour la relecture de ce manuscrit, et tant d'autres encore, et pour ton soutien inconditionnel. A Florian bien sûr, avec qui j'apprends tant et avec plaisir: qui eut crû que le taekwondo nous amènerait à simuler des tubes de flux interplanétaires! A Lidia, Teresa, Deb, Steph, Jingnan, qui m'inspirent tant par leur parcours et leur soutien sans faille. Aux collègues de la SPICE weekly qui adoucissent les planings MISO dans la joie et les gâteaux (plus que 9 ans!). Aux membres de la Japanese Coconut Cowbell, même si les occasions se font rares, grazie amore! A Cilia surtout: nous n'aurons jamais assez d'heures pour refaire toute l'astrophysique en passant par les luttes de justice sociale et réformer le système. Mais nous avons encore bien des états(-uniens) à traverser!

Et bien sûr, à ma famille grandissante, même aux quatre coins du monde, même entre deux Eurostars ou deux avions, merci, merci de votre soutien éternel et sans qui tout cela ne serait rien.

Contents

Abstract	iii
Acknowledgements	v
1 Introduction du manuscrit	1
1.1 Présentation générale	1
1.1.1 De la fusion à la physique solaire	1
1.1.2 De la physique solaire au milieu interplanétaire	2
1.1.3 Missions d'une astronome-adjointe	2
1.2 Le cadre scientifique de cette HDR	4
1.2.1 Observations du Soleil	4
1.2.2 Les éjections coronales de masse solaire	6
1.2.3 Physique des plasmas, description MHD	8
1.2.4 Liste des missions et techniques utilisées	8
2 Un modèle standard pour les éruptions solaires en trois dimensions	9
2.1 Introduction	9
2.1.1 Le modèle CSHKP à deux dimensions	9
2.1.2 L'intérêt d'explorer la 3D	11
2.2 Évolution des structures magnétiques lors de la reconnexion 3D des éruptions solaires	14
2.2.1 Modèle numérique tri-dimensionnel	14
2.2.2 Evolution du cisaillement dans les boucles post-éruptives	16
2.2.3 Évolution du tube de flux torsadé et hélicité magnétique	20
2.3 La reconnexion magnétique glissante, un phénomène tridimensionnel	22
2.3.1 Reconnexion glissante et quasi-séparatrices	23
2.3.2 Simulations	24
2.3.3 Observations de la reconnexion glissante lors d'éruptions solaires	27
2.4 Évolution des courants électriques pendant les éruptions solaires	29
2.4.1 Évolution des courants photosphériques comme traceurs des structures magnétiques	29
2.4.2 Évolution temporelle de J : un marqueur de la phase impulsive d'un flare.	30
2.4.3 Courants associés aux tubes de flux torsadés	33
2.5 Résumé: Extension du modèle standard des flares en 3D	35
2.6 Autres travaux	36
2.6.1 Des flares solaires aux flares stellaires	36
2.6.2 Évolution des régions actives	38
2.7 Conclusion et Projets	40

3	Propriétés génériques des ICMEs et effets sur les environnements planétaires	43
3.1	Introduction	43
3.1.1	Observations des CMEs	43
3.1.2	Observations directes dans le vent solaire	46
3.2	Formes génériques de l'axe des nuages magnétiques et des chocs d'ICMEs	48
3.2.1	Motivations derrière les études statistiques des ICMEs	48
3.2.2	Utilisation de statistiques d'évènements	49
3.2.3	Définition des paramètres géométriques nécessaires à l'étude	50
3.2.4	Corrélations entre les paramètres physiques et l'angle de localisation λ	52
3.2.5	Détermination de la géométrie des structures d'après les distributions observées	53
3.2.6	Extension des études statistiques	57
3.3	Profils génériques des ICMEs par l'étude des époques superposées	61
3.3.1	Méthodologie des époques superposées	61
3.3.2	Profils des nuages magnétiques à l'orbite terrestre	62
3.3.3	Évolution des profils avec les distances interplanétaires	67
3.4	Autres travaux: effets sur les rayons cosmiques, modèles d'ajustements paramétriques	70
3.4.1	Effets sur les rayons cosmiques: la décroissance de Forbush	71
3.4.2	Reconstruire les nuages magnétiques à partir des données spatiales	73
3.5	Conclusions et projets	76
4	Solar Orbiter et MEDOC	79
4.1	La mission Solar Orbiter	79
4.1.1	Présentation brève de la mission	79
4.1.2	Particularités de la planification de la mission	80
4.1.3	Les opérations de SPICE	81
4.2	MEDOC	83
4.2.1	Présentation du MEDOC	83
4.2.2	Cartes de courants (projet SSA)	83
4.2.3	Intégration des données dans le futur	85
5	Conclusion, direction de recherche, et quelques réflexions	87
5.1	Conclusion et perspectives des activités scientifiques	87
5.2	Direction d'étudiants	90
5.2.1	Jurys et comité de thèse	91
5.2.2	Directions de stages d'études	91
5.2.3	Collaborations	92
5.3	L'importance de la communication scientifique	92
5.3.1	Réflexions	92
5.3.2	Activités	93
5.3.3	Space Travel VR: à la croisée en science et arts digitaux	95
5.3.4	Place des femmes en sciences	95
A	Liste des publications	97
A.1	Publications d'articles	97
A.2	Contributions à des Livres	99

B Responsabilités	101
B.1 Responsabilité de recherche, groupes de travail	101
B.2 Communauté	102
C Médiation scientifique: liste d'activités	105
C.1 2011 - 2015	105
Evènements grand public	105
Communiqués de presse	105
C.2 Depuis 2015	106
Conférences grand public	106
Associations	107
Projets personnels: SpaceTravelVR	107
Médias (Podcasts, radio, TV)	108
D CV	109
Bibliography	111

*To all the hidden figures
Your work shines while you remained in the dark*

Chapter 1

Introduction du manuscrit

1.1 Présentation générale

1.1.1 De la fusion à la physique solaire

Depuis toute jeune, les nuits étoilées et leurs spectacles célestes n'ont cessé de me fasciner: c'est avec cet émerveillement que je décidai tôt de poursuivre des études scientifiques, avec en tête de me rapprocher du métier de chercheuse. Au cours de mes années d'études, je découvris la physique des plasmas: la dynamique d'un milieu de particules chargées en présence de champs électromagnétiques, omniprésents dans l'univers, m'a charmée. Le plasma est un état de la matière où les températures et les pressions sont telles que les atomes composant toute matière perdent leur attache avec les électrons qui les composent: on parle alors de matière ionisée. Alors que cet état est un phénomène relativement rare sur Terre, dans l'univers, la majorité de la matière que nous observons se trouve sous cette forme. Il me paraissait alors naturel de m'orienter dans ce domaine pour commencer à percer les mystères de notre cosmos, et c'est dans celui-ci que je poursuivi mes études de doctorat à l'Université de Kyoto, au Japon.

Pendant ma thèse (2008-2011), je me spécialisais sur les instabilités de plasmas. Mes recherches m'auront permis de caractériser, à l'aide de mes développements d'un code numérique, une instabilité liée à une libération fulgurante d'énergie magnétique par un processus de reconfiguration du champ magnétique. Ce mécanisme de libération d'énergie est appelé "reconnexion magnétique". On pense que ce type d'instabilité peut expliquer l'impossibilité de confiner un plasma au sein de grandes chambres magnétisées (les tokamaks). C'est pourtant dans celles-ci que nos espoirs d'une énergie issue de la fusion nucléaire sont nourris, comme proposé par le projet international ITER. Mes travaux ont ainsi permis d'appréhender les meilleures configurations possibles pour stabiliser le plasma au sein des tokamaks.

La reconnexion magnétique est également le moteur à l'origine des événements les plus énergétiques de notre système solaire. On parle dans ce cas des éruptions solaires qui prennent place dans l'atmosphère de notre étoile. Après mon doctorat, armée de nouvelles connaissances en physique des plasmas et en modélisation numérique, je me tournais alors pleinement vers l'astrophysique, et en particulier vers la physique de notre Soleil et la compréhension des éruptions solaires. Celles-ci sont liées à la présence de régions sombres qui apparaissent sur la surface brillante de notre Soleil. Elles sont en fait le siège d'un champ magnétique très intense formé originellement dans les couches internes de l'étoile. Emergé, ce champ complexe emmagasine une énergie colossale, qui peut être libérée lorsque ce champ atteint un seuil d'instabilité critique.

Pendant mes deux années de post-doctorat, et dans mes recherches subséquentes, j'ai exploité un code numérique dont la particularité est de résoudre l'évolution du

champ magnétique de ces régions actives en trois dimensions. Mes recherches, que je présente dans le Chapitre 2, auront poussé notre compréhension des mécanismes de la reconnexion magnétique sous-jacents aux éruptions solaires. Celles-ci sont également liées à la reconfiguration du champ magnétique et à l'éjection, dans le système solaire, de larges structures magnétisées issues de cette reconfiguration. Grâce à ces travaux, mes collaborateurs et moi avons pu proposer une extension du modèle standard des éruptions solaires, auparavant principalement bidimensionnel, dans sa forme tridimensionnelle, et de prédire le comportement du champ magnétique confirmé par la suite grâce aux images à haute résolution du satellite SDO de la NASA.

1.1.2 De la physique solaire au milieu interplanétaire

Les grandes structures formées lors de la reconfiguration du champ magnétique dans l'atmosphère des étoiles, appelée couronne, peuvent être éjectées dans le milieu interplanétaire. On les appelle alors des éjections coronales de masse (ci-après, je garderai le sigle anglais CME pour 'Coronal Mass Ejection'). C'est sur celles-ci que je me suis penchée lors de mon séjour en tant qu'enseignante-chercheuse à l'Université de Dundee (Ecosse, 2013-2015). Ces CMEs transportent à la fois du plasma et du champ magnétique issus de notre Soleil lors de leur propagation dans le milieu interplanétaire, et sont un des plus importants acteurs de l'influence de l'activité de notre étoile sur les planètes du système solaire. Lorsque les CMEs passent à proximité de celles-ci, elles influencent leur environnement spatial: cela entraîne de belles aurores polaires, que l'on peut apprécier ici sur Terre. Cependant, ces sortes de "tempêtes de l'espace" peuvent également fortement perturber nos technologies (elles peuvent entre autre altérer le bon fonctionnement de nos satellites, les réseaux de télécommunications, les réseaux électriques et être en particulier nocives pour les astronautes).

Mes recherches pendant ces années se sont alors focalisées sur le développement de nouvelles méthodes analytiques permettant d'analyser la statistique de beaucoup de CMEs détectées par nos sondes spatiales. Le cœur de ces recherches sera exposé dans le Chapitre 3. J'ai pu ainsi démontrer l'existence de formes typiques de ces tempêtes solaires, ainsi que la variation de leurs profils au fur et à mesure de leur propagation dans l'espace. Ces travaux permettront dans le futur de développer des modèles mieux contraints de météorologie de l'espace, en particulier l'arrivée et les possibles conséquences de ces CMEs, grâce à une meilleure compréhension de leur structure globale.

1.1.3 Missions d'une astronome-adjointe

Depuis mon recrutement en 2015, en tant qu'astronome-adjointe par le Conseil National des Astronomes et des Physiciens à l'Institut d'Astrophysique Spatiale à Orsay, mes missions se sont diversifiées. Je continue mes recherches sur le lien entre la physique du milieu interplanétaire et du Soleil, et l'impact de l'activité solaire sur la Terre: mon projet en cours avec des étudiant.es porte sur la caractérisation de la diminution des rayons cosmiques due au passage de tempêtes solaires, afin de mieux comprendre leur rôle dans le bombardement cosmique des surfaces planétaires. Je continue ainsi d'étendre mes thématiques sur plusieurs domaines tout en montant de nouvelles collaborations et en impliquant de jeunes chercheur.ses. En tant que co-directrice de deux thèses, je co-dirige d'une part le développement des simulations numériques de la propagation des CMEs (thèse de Florian Regnault débutée en 2018 en collaboration avec Antoine Strugarek au CEA), et d'autre part l'exploitation de données spatiales en utilisant des techniques d'intelligence artificielle (collaboration avec l'ONERA, thèse

de Guillaume Bernoux débutée en 2019). Mon intérêt pour ce domaine a été provoqué par ma participation en tant que mentor d'une équipe de chercheurs en astrophysique et en deep-learning, à l'été 2019, dans un programme de la NASA et du SETI institute (le Frontier Development Lab¹) aux Etats-Unis. Dans ce cadre, j'ai ainsi pu développer de nouvelles idées sur l'utilisation d'algorithmes d'intelligence artificielle pour des missions spatiales "augmentées". Un exemple de celles-ci serait l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage machine testés sur des jeux de données solaires spatiales déjà disponibles afin de pouvoir calibrer à bord les instruments de missions futures.

Les nouvelles missions de la NASA et de l'ESA, Parker Solar Probe (lancée en 2018) et Solar Orbiter (lancée en février 2020), apporteront des pièces essentielles à mes sujets de recherche. Ces missions spatiales iront directement sonder les structures que j'étudie depuis leur naissance dans l'atmosphère de notre soleil. Du fait de mes compétences en analyse de données de missions planétaires et de mon implication dans la mission Solar Orbiter, je participe à la coordination des observations pendant la croisière de la mission de l'ESA et de la JAXA (Agence spatiale japonaise), Bepi-Colombo, en route vers la planète Mercure. Enfin, je participe également à la proposition de missions spatiales futures (e.g. en tant que membre de la mission Solaris récemment sélectionnée pour une phase-A par la NASA).

Ma liste de publications, au nombre de 53 dont 16 en première autrice, dans des revues de rang A, atteste à la fois de mon engagement à faire progresser mes différents domaines d'expertise, et à la volonté de collaborer à l'international. La direction de la recherche d'étudiant.es, de la licence au doctorat, me permet également d'étendre mes connaissances et de les faire participer à la recherche, comme en témoignent mes dernières publications avec de jeunes chercheurs.ses. Dans le cadre de mes missions au CNAP, j'enseigne également, à l'université Paris-Saclay, ce qui me permet de rester en contact avec les générations futures tout en partageant mes connaissances sur la physique et l'astrophysique. Je participe également au développement de la mission spatiale Solar Orbiter, en tant que co-investigatrice scientifique de deux instruments analysant la lumière du Soleil: EUI, imageur en ultraviolet extrême, et SPICE, un spectrographe. Au sein de mon équipe à l'IAS, je participe à la préparation des opérations de ce dernier instrument, ainsi qu'à l'exploitation future de ces données scientifiques qui nous permettront d'étudier le rayonnement du plasma de l'atmosphère soleil (de sa composition à son comportement). Enfin, je suis co-responsable de l'exploitation, de la mise en valeur et de la diffusion de produits à valeur ajoutée scientifique des données de sondes solaires spatiales au sein du centre d'archivage national MEDOC, à l'IAS. Ces deux volets constituent mon service national d'observation propre à mon statut d'astronome-adjointe, dont je parlerai plus amplement dans le Chapitre 4.

Avec ces diverses missions de mon corps de métier, la prise de responsabilité au niveau de la direction des recherches d'étudiants en thèse, et mon implication concrète dans la communauté (notamment en tant que membre élue de la section AA du comité du CNAP), il m'a semblé opportun de préparer mon habilitation à diriger des recherches. L'écriture du manuscrit correspond à 10 années depuis ma thèse de doctorat, et de mon changement de thématique scientifique. C'est donc avec un certain plaisir que je partage, dans les prochaines pages, un résumé des mes activités diverses qui ont jalonné la dernière décennie.

¹<https://frontierdevelopmentlab.org>

1.2 Le cadre scientifique de cette HDR

1.2.1 Observations du Soleil

Observations de la couronne solaire

La dynamique du Soleil s'observe dans un large spectre de son rayonnement électromagnétique. C'est une étoile de type G, dont la puissance de rayonnement est la plus grande dans le domaine du visible (voir Figure 1.1²).

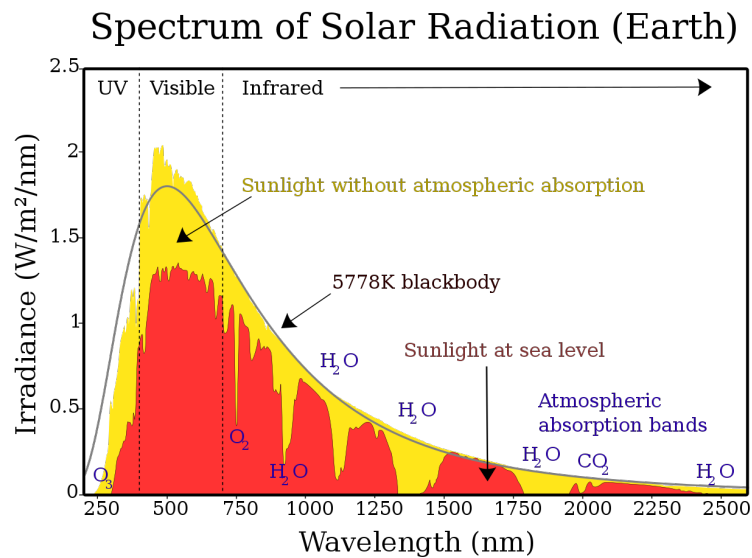


FIGURE 1.1: Spectre d'irradiance solaire au niveau de la mer.

L'atmosphère solaire rayonne donc dans une très large gamme de longueur d'onde. Elle est définie tout d'abord par la couche photosphérique opaque (d'environ 100 km d'épaisseur), à la température d'environ 5800K (domaine du visible), puis la chromosphère, de 3000 à 5000 km d'épaisseur, qui atteint une température de 35 000K, et enfin la couronne solaire, séparée de la chromosphère par une zone de transition. Dans cette couronne solaire, on y trouve des températures de plus d'un million de Kelvin. Cette température très élevée implique un rayonnement dans l'ultraviolet.

La plupart de mes études réalisées dans le cadre de la physique solaire vont traiter de la dynamique de cette couronne solaire: les observations utilisées vont alors couvrir ces différentes températures, notamment grâce à l'instrument Atmospheric Imager Assembly sur la mission Solar Dynamics Observatory (Lemen et al., 2012), lancée en 2010. Cet instrument permet à la fois l'observation de la photosphère, de la chromosphère, et de la couronne sur 10 différentes plages de longueurs d'ondes principales (voir Figure 1.2) à haute résolution spatiale (1.5 secondes d'arc) et temporelle (une image toutes les 12s).

Cette mission, toujours en exploitation, permet également l'obtention de cartes du vecteur champ magnétique grâce à l'instrument Helioseismic and Magnetic Imager (HMI Scherrer et al., 2012). Ces cartes seront également utilisées dans le cadre de mes travaux, notamment sur les courants électriques.

²https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_spectrum_en.svg

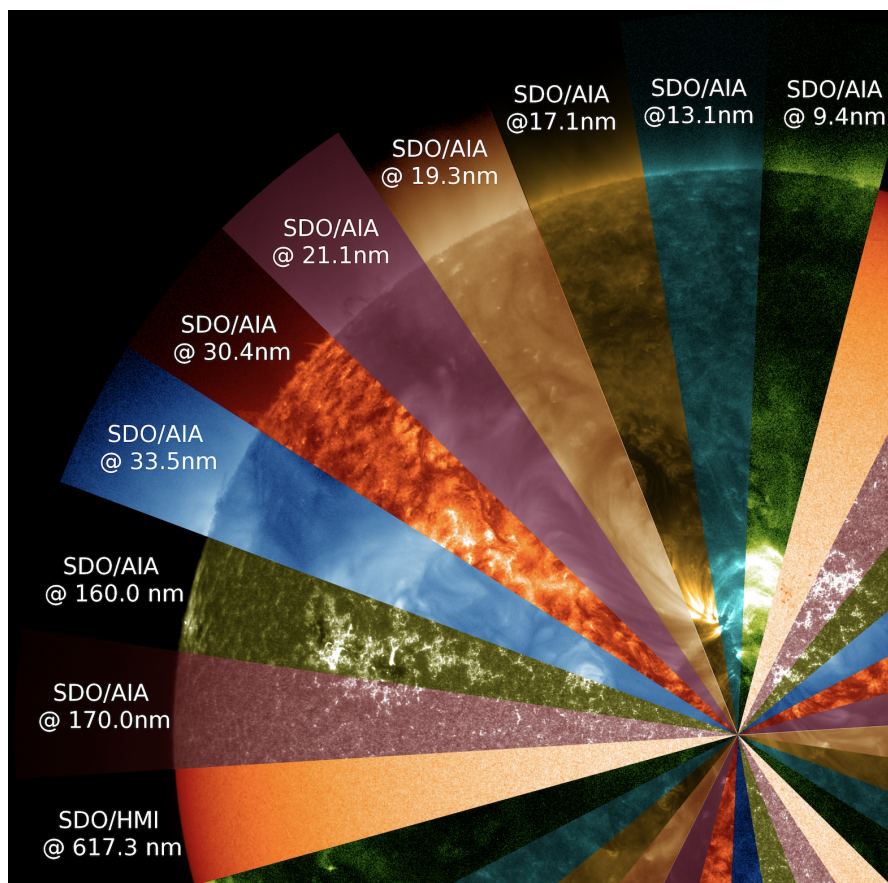


FIGURE 1.2: Les multiples canaux de l'instrument AIA sur Solar Dynamics Observatory (NASA).

Les "flares"

L'activité magnétique solaire s'observe de façon spectaculaire lors d'évènements transitoires très énergétiques: les "flares" ou embrillancements. Nous verrons que l'anglicisme flare semble plus approprié pour décrire un phénomène complexe, qui ne saurait se réduire à un simple embrillancement, et qui n'est pas nécessairement non plus associé à une éruption de matière. Je fais donc le choix de garder ce terme par la suite. Ces flares sont identifiés comme des sauts dans les courbes de lumière en ultraviolet et en rayons X mous. En particulier, on se sert de la gamme de flux 1-8 Å pour détecter et classer ces flares. Les mesures de flux en rayon X dans cette gamme sont effectuées par les satellites GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) de la NOAA depuis 1986.

Quelques exemples sont donnés Figure 1.3 où l'on peut voir l'augmentation du flux de rayons X sur une période de 9 jours. On classe ainsi les différents flares en fonction de leur gamme d'énergie: la classe de flux la moins grande, entre 10^{-8} et 10^{-7} W.m⁻² est la classe A, 10^{-7} et 10^{-6} W.m⁻² est la classe B, 10^{-6} et 10^{-5} W.m⁻² est la classe C, 10^{-5} et 10^{-4} W.m⁻² est la classe M et enfin 10^{-4} et 10^{-3} W.m⁻² est la classe X (qui est le cas pour les 4 exemples montrés).

On pense que les flares résultent de l'accumulation et de la libération explosive d'énergie magnétique dans l'atmosphère solaire, par reconnexion magnétique. Ces flares s'accompagnent également d'une élévation de la température du plasma, ainsi que de l'accélération des électrons et des ions à des énergies élevées (vus e.g. en rayonnement X) et des mouvements de plasma (visibles en EUV, et analysables de manière

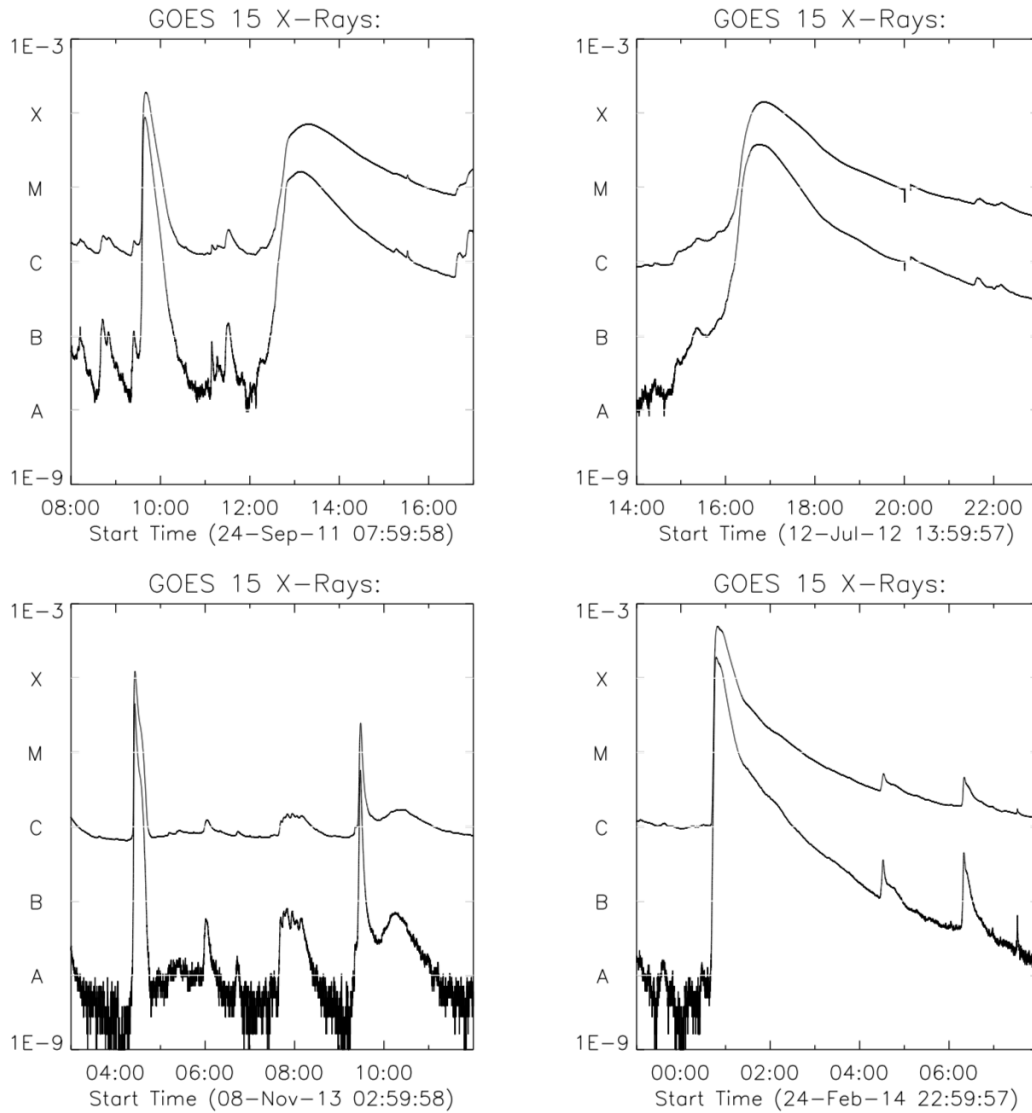


FIGURE 1.3: Quatre exemples de courbes de lumière en rayons X mous du satellite GOES, sur une durée de 9h, dans les deux canaux 1-8 Å et 0.5-4.0 Å. D'après Harra et al., 2016.

précise en spectroscopie). L'augmentation de notre capacité observationnelle (tant au sol que dans l'espace, avec plusieurs télescopes et missions spatiales dédiées à l'observation de notre astre) n'aura de cesse d'améliorer notre compréhension des flares, et de compléter un modèle dit "standard" de ce phénomène.

Ces observations et différentes modélisations sont introduites dans le Chapitre 2. C'est aussi dans ce chapitre que l'on trouvera mes différentes études du mécanisme de reconnexion magnétique traité en 3D, et des conséquences des flares sur un bon nombre d'observables qui ne peuvent être comprises qu'à partir d'un modèle 3D.

1.2.2 Les éjections coronales de masse solaire

Une des conséquences des flares est l'injection dans le vent solaire de structures magnétisées transportant en leur sein de la matière solaire. Ces CMEs sont parmi les principaux moteurs de la météorologie de l'espace, d'où un intérêt grandissant pour les

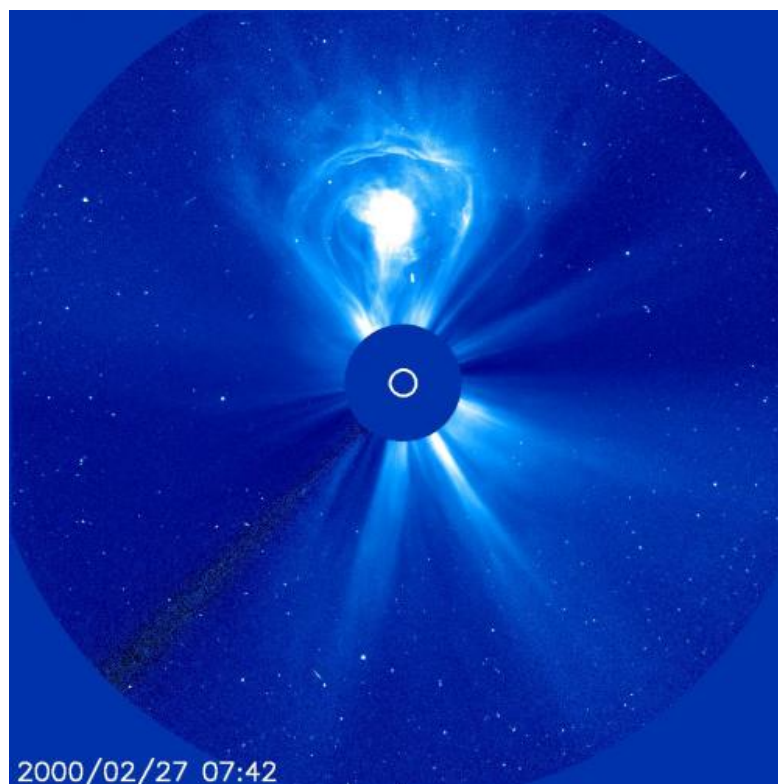


FIGURE 1.4: Une éjection coronale de matière solaire (CME) vue par le coronographe C3 de SOHO/LASCO.

étudier plus en détail.

Les CMEs sont visibles pour la plupart dans les données coronagraphiques, comme présenté dans la Figure 1.4. Entrant rapidement en expansion, la chute de densité de matière dans ces structures fait qu'il est alors très difficile de les suivre de manière cohérente dans les imageurs héliosphériques, du moins pour les moins denses d'entre elles. Néanmoins, ces CMEs sont observées de manière routinière par les instruments in situ des sondes interplanétaires.

Celles-ci révèlent en particulier l'existence de sous-structures de ces CMEs. Un choc, créé en amont lorsque la CME se propage plus rapidement que le vent solaire ambiant, permet d'accélérer des particules, tandis qu'une gaine, issue de la compression du vent solaire par le choc d'une part et d'une sorte d'effet chasse-neige de la CME d'autre part, peut se former. Enfin la CME est surtout définie comme un éjecta magnétique.

Ces différentes sous-structures, ainsi que la caractérisation quantitative de leur morphologie, et quelques-unes de leur conséquence sur les environnements planétaires, seront traités dans tout le Chapitre 3.

Dans ce chapitre, j'introduirai également différentes techniques d'analyse. D'une part, mes recherches se basent sur la mesure in situ des paramètres magnétiques et plasma de missions variées: des sondes spatiales dédiées à l'observation du vent solaire proche de la Terre, en orbite stable au point de Lagrange 1, et des sondes interplanétaires telles que MESSENGER ou Venus Express qui auront récolté des mesures du vent solaire lors de leur phase de croisière, voire lors de leurs orbites autour de leur planète-cible. D'autre part, mes travaux développent des techniques analytiques et statistiques, que je décrirai également en détail.

1.2.3 Physique des plasmas, description MHD

Les plasmas, un état de la matière dans lequel les gaz se retrouvent à l'état ionisé, constituent la majorité de l'univers observable. En effet, les étoiles, qui représentent cette majorité, se trouvent sous cet état physique, du fait de leurs conditions de températures et de pressions.

Dans notre système solaire, les plasmas se retrouvent une nouvelle fois partout: au sein du soleil et de son atmosphère, dans le milieu interplanétaire, composé de particules chargées, ainsi que dans l'environnement spatial des planètes du système solaire. Sur Terre également, on s'intéresse fortement à la physique des plasmas, notamment dans le cadre de la fusion nucléaire. Celle-ci permettrait de subvenir aux besoins grandissants d'énergie des sociétés actuelles.

Du fait de la présence de particules chargées, la dynamique d'un plasma peut donc être décrite de plusieurs façons: soit en s'intéressant aux particules elles-mêmes, se déplaçant dans un champ électromagnétique (théorie cinétique), soit en considérant une distribution de particules (théorie de Vlasov), soit en considérant le plasma comme un fluide composé d'ions et d'électrons (théorie bi-fluide) ou un fluide unique (théorie magnétohydrodynamique). Dans la suite de ce manuscrit, je m'intéresserai particulièrement à cette dernière description, très bien adaptée à la compréhension des phénomènes solaires et interplanétaires.

1.2.4 Liste des missions et techniques utilisées

Mes travaux de recherche m'auront permis au cours des années de toucher à un assez grand nombre de catalogues de données et de techniques. Je résume rapidement ci-dessous les différentes missions et techniques numériques sur lesquelles j'ai pu directement travailler, afin d'obtenir un aperçu de la variété de celles-ci:

Flares - Chapitre 2

- Données: SDO/HMI (magnétogrammes), STEREO-B/EUVI (Imagerie EUV), SDO/AIA (Imagerie EUV), Ondřejov (données radio), Hinode/EIS (spectroscopie)
- Traitement de données: IDL, Mathematica
- Numérique: simulations numériques avec le code OHM (FORTRAN, IDL), analyse du champ magnétique avec le code TOPOTR (FORTRAN).

ICMEs - Chapitre 3

- Données: ACE/MAG (données champ magnétiques) et SWEPAM (données plasma), MESSENGER/MAG (données champ magnétiques), Venus Express/MAG (données champ magnétiques), McMurdo et Oulu (moniteurs à neutrons)
- Traitement de données: Python
- Numérique: Analyse analytique et statistique: Mathematica, Python

Chapter 2

Un modèle standard pour les éruptions solaires en trois dimensions

Mes projets de recherche en physique solaire se concentrent principalement sur la restructuration du champ magnétique à grande échelle (de l'ordre du mégamètre, ou 10^6 m) lors des éruptions solaires, même si je m'intéresse également, à travers des collaborations, à l'évolution des régions actives de manière plus générale.

La restructuration du champ magnétique coronal se fait via le processus de reconnexion magnétique. Au cours des études qui sont présentées ci-après, je me suis intéressée d'une part aux mécanismes permettant la reconfiguration de certaines structures magnétiques, comme les boucles d'éruption ou l'expansion des tubes de flux torsadés, et d'autre part aux effets de la reconnexion en trois dimensions (phénomène de glissement des lignes de champ, évolution de la densité de courant électrique associée aux régions de reconnexion). Ces travaux sont résumés ci-dessous.

2.1 Introduction

Les éruptions solaires sont des événements hautement énergétiques se produisant dans l'atmosphère du Soleil. Les nombreuses observations disponibles, depuis des dizaines voire des centaines d'années (e.g. événement de Carrington), nous donnent la possibilité de les étudier dans une gamme très variée du spectre électromagnétique (des ondes radio au rayonnement gamma). Des approches analytiques et numériques ont également été proposées, avec pour souci de développer un modèle standard de ces événements.

J'introduis dans cette partie l'évolution de notre compréhension de ces événements afin de mieux introduire les travaux que j'ai effectués avec mes collègues et qui nous ont permis de faire évoluer le modèle standard des éruptions solaires, de la 2D à la 3D.

2.1.1 Le modèle CSHKP à deux dimensions

Depuis les premières observations de flares¹ par Carrington et Hodgson jusqu'à aujourd'hui, la complémentarité des observations multi-longueurs d'ondes ont permis

¹Bien que la traduction française du mot "flare" soit plus justement le terme "embrillancement", le phénomène de "flare" en anglais peut convenir à de nombreuses observations: en plus de l'augmentation de l'intensité lumineuse, le terme "flare" englobe plus de caractéristiques, qui sont discutées dans ce chapitre. C'est pourquoi, j'ai pris le parti dans ce manuscrit d'utiliser le mot anglais "flare" plutôt qu'embrillancement, et plus fréquemment que le terme "éruption", puisqu'un flare à proprement parler ne conduit pas forcément à l'éjection de matière dans le milieu interplanétaire.

d'améliorer, pièce par pièce, le modèle des éruptions solaires. Tout d'abord, le fait que l'atmosphère solaire soit principalement magnétisée (β du plasma ~ 0.01) indique que le champ magnétique est la source principale d'énergie libérée lors de ces flares. Sweet (Sweet, 1956) et Parker (Parker, 1957a) se sont alors inspirés des travaux de Dungey (Dungey, 1953) sur la reconnexion magnétique dans le cadre de la magnétosphère terrestre, pour l'appliquer à une topologie 2D dans la couronne solaire. Je relate les débuts de notre compréhension sur la reconnexion magnétique dans le cadre des éruptions solaires dans l'introduction de ma revue dans le *Journal of Plasma Physics* (Janvier, 2017).

Ces développements se sont fait en parallèle d'observations de plus en plus complètes, dont je donne des exemples dans la Figure 2.1. D'une part, les rayonnements dans plusieurs gammes d'énergie nous indiquent plusieurs évolutions: les rayons X-durs nous indiquent la présence de particules fortement énergétiques, alors que les rayonnements en rayons X mous indiquent un chauffage important du plasma magnétisé dans les régions d'embrillancement (Panneau a). L'optique en Extrême-Ultraviolet, comme par exemple avec les nombreux filtres du Atmospheric Imager Assembly sur Solar Dynamics Observatory (Panneau b) nous permet d'étudier plus précisément les régions où ont lieu ces embrillancements. Dans certains cas, ces régions indiquent la présence de filaments ou de protubérances (Panneau c) dont l'équilibre instable peut être étudié comme l'agent provoquant le processus de flare. Une des conséquences des éruptions solaires est l'éjection, dans le milieu interplanétaire, de plasma magnétisé sous forme d'éjections coronales de masse (CME, Panneau d). Enfin, l'étude en imagerie UV/EUV nous permet également d'étudier l'évolution de structures comme les rubans d'éruption (Panneau e), et les boucles éruptives (Panneaux f, g et h).

La formation des rubans d'éruption, ainsi que des boucles éruptives, ont été expliquées par une série de dessins plus ou moins complets et améliorés au fur et à mesure d'observations plus fines. Ce modèle standard porte le nom de CSHKP, d'après les travaux de Carmichael, 1964; Sturrock, 1966; Hirayama, 1974; Kopp and Pneuman, 1976. Ce modèle est reproduit dans la version revisitée par Lin and Forbes, 2000 et plus récemment, Ko et al., 2003, Figure 2.2. On voit que ce modèle, bidimensionnel, indique que les boucles éruptives sont formées par reconnexion magnétique dans une nappe de courant verticale située entre deux champs magnétiques d'orientation opposée. Les rubans d'éruptions indiqués dans la Figure 2.1, panneau e, sont issus du transport d'énergie depuis le site de reconnexion coronale. L'énergie cinétique produite par transformation d'énergie magnétique permet des écoulements hors de la zone de reconnection (outflows). Dans les dessins originaux, ces outflows sont associés à la structure magnétique formée (le tube de flux). Or, on le verra ci-après, l'instabilité du tube de flux est en fait à l'origine de son éjection, tandis que les outflows sont plus précisément de petits plasmoids qui peuvent être détectés de manière indirecte en radio (Nishizuka et al., 2015) ou directement en imagerie EUV (e.g. Takasao et al., 2012).

Le transport d'énergie dans les couches les plus basses de l'atmosphère solaire, permettant la formation de rubans d'éruption, reste encore à explorer: les rayonnements X durs sont interprétés par la présence de particules énergétiques, pouvant être collimatées le long des lignes de champ et percutant/chauffant la chromosphère, plus dense que la couronne. Cependant, les rayonnements X durs ne sont ni tout le temps présent, ni ne peuvent expliquer les émissions chromosphériques observées: ce phénomène de chauffage soudain pourrait aussi être expliqué par la présence d'ondes Alfvén et de conduction thermique.

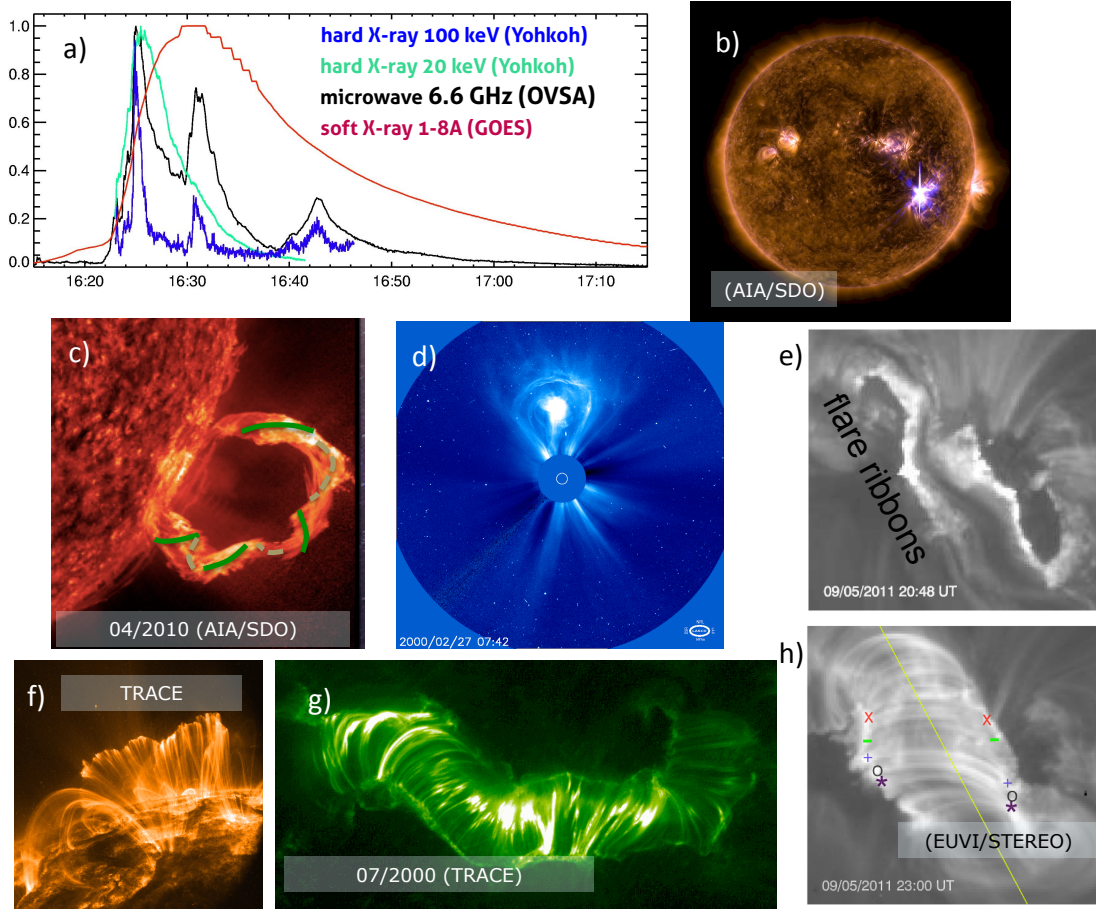


FIGURE 2.1: Les différents aspects des flares solaires: a) Evolution temporelle des différents rayonnements dans plusieurs gammes d'énergie, des micro-ondes aux rayonnements X durs. b) Image du télescope AIA sur le Solar Dynamics Observatory (NASA) montrant un embrassement ou flare. c) Les protubérances montrent des structures torsadées dont l'équilibre instable peut être à l'origine de certains flares. d) Les éjections coronales de masse, une conséquence possible des flares solaires. e) les rubans d'éruptions apparaissent comme des zones allongées brillantes et se séparant au fur et à mesure de l'évolution du flare. f, g, h) Différentes vues des boucles éruptives denses et chaudes, vues par le satellite TRACE (f et g) et EUVI de STEREO (h). La comparaison de e) et h) pour la même éruption montre que les rubans d'éruption se trouvent aux pieds des boucles d'éruption. *Références pour les images: se trouvent directement dans les parties médias des sites web des missions, pour e et h: voir Aulanier, Janvier, and Schmieder, 2012.*

2.1.2 L'intérêt d'explorer la 3D

Boucles et rubans d'éruption

Les limitations du modèle 2D CSHKP sont nombreuses, depuis l'évolution des structures formées lors des éruptions à l'explication de la reconnexion en trois dimensions.

Prenons tout d'abord l'exemple des boucles post-éruptives. Les observations en imagerie EUV montrent qu'elles transitionnent graduellement d'une configuration cisailée, avec une géométrie plutôt orientée le long de la ligne d'inversion de polarité, à une configuration presque potentielle, c'est-à-dire presque perpendiculaire à la ligne

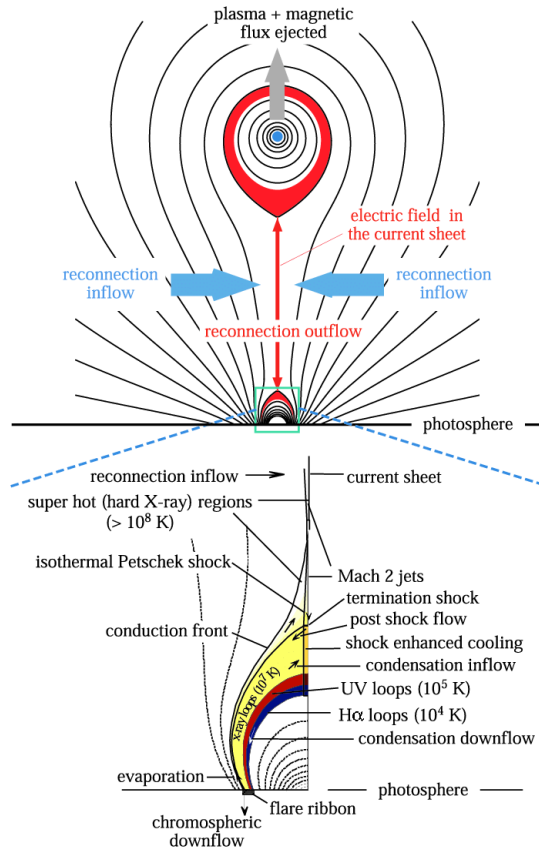


FIGURE 2.2: Partie supérieure: modèle du tube de flux torsadé au coeur de la CME, de Lin and Forbes, 2000, montrant son éruption, la nappe de courant formée derrière elle, et les boucles d'éruptions, ainsi que les écoulements d'entrée/sortie. Partie inférieure: zoom sur les boucles d'éruptions (d'après Forbes and Acton, 1996). La région de reconnexion s'élève à mesure que celle-ci se produit en continu. Adapté de Ko et al., 2003.

d'inversion de polarité (voir e.g. panneau h dans la Figure 2.1). Ce phénomène est notamment rapporté dans plusieurs publications, comme celles de Asai et al., 2003; Liu et al., 2010; Warren, O'Brien, and Sheeley, 2011. Par ailleurs, les rubans d'éruption qui se forment aux pieds de ces boucles ont une géométrie particulière, en forme de J (voir e.g. panneau e dans la Figure 2.1, ou encore dans Chandra et al., 2009; Wang et al., 2012).

Tube de flux torsadés

Du fait de données de champ magnétique coronales non-existantes, il est difficile d'appréhender la géométrie des structures magnétiques avant et pendant les éruptions solaires, notamment celles des tubes de flux torsadés dont on devine la présence indirectement (Zhang, Cheng, and Ding, 2012). Par exemple, les observations montrent l'existence de protubérances ou de filaments/sigmoids avant la phase éruptive (voir e.g. Aulanier et al., 2010; Green, Kliem, and Wallace, 2011; Savcheva et al., 2012). D'autre part, les observations in situ des CMEs (voir Chapitre 3) ainsi que les modèles numériques, dont nous verrons un exemple ci-après, tendent à montrer que l'existence des tubes de flux torsadés sont des éléments clés des éruptions solaires.

Comment ceux-ci sont-ils formés? Comment leur évolution, pré-, durant et post-flare peut-elle être appréhendée par un modèle tenant compte de leur nature intrinsèquement 3D?

Reconnexion en 3D

Les premières techniques permettant de mieux caractériser les localisations de la reconnexion magnétique dans les régions actives consistaient en l'introduction d'un point de charge magnétique permettant de décrire le champ magnétique des régions concernées (e.g. Baum and Bratenahl, 1980). Ce point de charge magnétique permet de localiser une polarité magnétique, disposée telle qu'elle permet de reproduire la distribution des polarités magnétiques d'une portion du Soleil (typiquement, une région active bipolaire, aurait donc deux charges magnétiques associées, l'une positive et l'autre négative, permettant de recréer l'observation).

Cette approche permet d'étudier la présence de points nuls et de séparatrices, donc les localisations où l'on s'attend, théoriquement, à voir des conséquences de la reconnexion (chauffage du plasma, particules). Ces modèles de topologie de charge magnétique ont été raffinés d'années en années (e.g. Henoux and Somov, 1987; Gorbachev and Somov, 1988), puis complexifiés (e.g. Mandrini et al., 1991; Démoulin et al., 1993; Barnes, Longcope, and Leka, 2005). Ces modèles ont fourni, au fil des ans et avec un nombre croissant d'observations et de techniques raffinées, des preuves convaincantes de la reconnexion magnétique comme mécanisme sous-jacent de la conversion d'énergie magnétique au cours des flares.

Cependant, d'autres observations montrèrent que les signatures de la reconnexion ne prennent pas place là où l'on trouve des points nuls et/ou des séparatrices: dans Démoulin, Henoux, and Mandrini, 1994, les auteurs calculèrent la topologie de plusieurs régions de flares, mais ne trouvèrent pas de correspondance entre les signatures d'émission en rayons X et EUV et les localisations de points nuls/séparatrices. En revanche, les propriétés du champ magnétique, et surtout le changement de connectivité drastique de celui-ci, semblaient en accord avec les signatures observationnelles de reconnexion.

Ces observations étayèrent la théorie de Hesse and Schindler, 1988 et Schindler, Hesse, and Birn, 1988, selon laquelle la dissipation d'énergie magnétique se fait dans les régions localisées de plasma "non-idéal", où les distorsions du champ magnétique amènent à la génération d'une composante forte parallèle du champ électrique. Cette distorsion du champ magnétique peut être défini comme un changement drastique de la connectivité des lignes de champ magnétique. Par exemple, en prenant une région de localisation des points d'ancrage de lignes de champ magnétique dans une polarité, une faible distorsion du champ magnétique amène à une région de localisation des points d'ancrage dans l'autre polarité similaire à celle de départ (points d'ancrage regroupés). En revanche, une forte distorsion correspondrait à une région de localisation des points d'ancrage de l'autre polarité bien différente de celle de départ. Priest and Démoulin, 1995 et Démoulin et al., 1996 rajoutèrent que la mesure de la distorsion du champ magnétique, quoique continu, permettait de trouver ces régions non-idéales, introduisant ainsi le concept de quasi-séparatrices.

Finalement, les modèles CSHKP, avec points nuls et séparatrices, puis plus tard avec quasi-séparatrices, résumés ci-dessus, ne traitent toujours pas des processus physiques à l'œuvre dans la génération des flares, depuis la formation de régions non-idéales (de fortes densités de courant électrique), du cas plus large de la reconnexion sans présence de points nuls et de séparatrices, du cisaillement magnétique dans les rubans chromosphériques et les boucles coronales éruptives. L'approche que nous avons testée, et qui

s'est révélée fructueuse, avec le groupe de Meudon est introduite par la suite: de nouvelles analyses de simulations 3D MHD réalistes de flares permettent de fournir des interprétations physiques des observations, et de compléter le modèle CSHKP dans sa version 3D.

2.2 Évolution des structures magnétiques lors de la reconnexion 3D des éruptions solaires

Dans ce sous-chapitre, nous allons nous intéresser à la modélisation tri-dimensionnelle, grâce au code OHM développé au LESIA (Observatoire de Paris), de l'évolution des boucles post-éruptives et du tube de flux torsadé, deux facettes de l'évolution du champ magnétique des éruptions solaires. J'y introduis plusieurs études auxquelles j'ai participé: Aulanier, Janvier, and Schmieder, 2012; Dudík et al., 2016; Priest, Longcope, and Janvier, 2016.

2.2.1 Modèle numérique tri-dimensionnel

Mon travail sur la modélisation tri-dimensionnelle des éruptions solaires m'a amenée à manipuler le code MHD visco-résistif, appelé OHM (pour Observationally-driven High-order scheme Magnetohydrodynamic code), développé par Guillaume Aulanier au LESIA, Observatoire de Paris (Aulanier, Démoulin, and Grappin, 2005). Ce code, à maillage non uniforme, est particulièrement adapté pour modéliser l'évolution temporelle et spatiale du champ magnétique coronale d'une région active, dans les premières phases de l'éruption.

Équations MHD

Ce code traite les équations de la MHD en coordonnées cartésiennes, dans sa version dite à " β zero", qui correspond à un plasma dans lequel la pression magnétique domine très largement sur celle du plasma (cette dernière pouvant ainsi être négligée). C'est une hypothèse bien vérifiée dans la couronne solaire, où l'on estime que $\beta \sim 0.01$. Dans ce cas, on peut s'affranchir du terme de pression dans les équations de la MHD, qui se réduisent alors à (voir Aulanier, Janvier, and Schmieder, 2012):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) + \zeta \Delta (\rho - \rho_0) \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} / (\mu \rho) + \nu \Delta \mathbf{u} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \eta \Delta \mathbf{B} \quad (2.3)$$

Les variables sont les suivantes: ρ est la densité de masse, \mathbf{u} la vitesse du plasma, et \mathbf{B} le champ magnétique. La densité de courant électrique est obtenue à partir du champ magnétique par: $\mathbf{j} = \nabla \times \mathbf{B} / \mu$.

Le terme $\eta \Delta \mathbf{B}$ représente le terme de résistivité collisionnelle, responsable de la reconnexion magnétique dans la simulation, tandis que ζ and ν sont d'autres coefficients de diffusion constants (notamment le terme en ζ qui introduit une dissipation numérique). La résistivité η est choisie constante dans le domaine, à l'exception de la

photosphère (représentée par le plan $z = 0$) où elle est nulle. Cette valeur est justifiée par les échelles de temps de diffusion photosphérique (e.g. mouvements liés à la granulation, de l'ordre du jour) bien plus grandes que les échelles de temps liées aux éruptions (de l'ordre de quelques secondes à quelques heures). Cependant, certains termes diffusifs sont introduits à quelques endroits du maillage non-uniforme afin de lisser les gradients trop importants de densité et de vitesses qui peuvent apparaître lors de la simulation. Plus de précisions peuvent être trouvées dans les articles de Aulanier et al., 2010; Aulanier, Janvier, and Schmieder, 2012.

Frontières et Conditions (pré-)initiales

Les conditions aux limites sont ouvertes sur toutes les faces du domaine, sauf sur la surface $z = 0$ qui représente la photosphère, et où des conditions dites de "line-tying" (boucles magnétiques à pieds fixes) sont prescrites. Celles-ci sont directement liées au choix de la résistivité nulle à $z = 0$, ainsi qu'un champ de vitesse nul également à cette surface.

La stabilité d'un tube de flux formé par l'évolution d'un bipole, représentatif d'une région active, a été analysée dans Aulanier et al., 2010: la simulation numérique avec le code OHM permet de reproduire les évolutions typiques de régions actives en dispersion, comme par exemple le cisaillement de grandes arcades magnétiques et la dispersion des polarités magnétiques photosphériques qui peuvent être observées par des télescopes (imagerie en EUV et/ou mesures du champ magnétique, voir e.g. van Driel-Gesztelyi et al., 2003; Green, Kliem, and Wallace, 2011 et les revues sur l'évolution des régions actives de van Driel-Gesztelyi and Green, 2015; Toriumi and Wang, 2019).

Ces évolutions sont simulées par un cisaillement sub-Alfvénic prescrit des pieds des lignes de champ magnétique (initialement potentielles), ainsi que de la diffusion magnétique lente à la photosphère (similairement à d'autres simulations comme Amari et al., 2003; Mackay and van Ballegoijen, 2006).

L'étude de Aulanier et al. (2010) montre que l'on peut étudier la stabilité du tube de flux en formation en arrêtant, à différents temps, le forçage photosphérique. L'évolution subséquente de la corde de flux vers un état d'équilibre ou non permet d'identifier la perte d'équilibre et le critère d'instabilité de la structure. Cette instabilité a été identifiée comme une instabilité MHD idéale, appelée instabilité de tore ou "torus instability" (voir notamment Kliem and Török, 2006; Démoulin and Aulanier, 2010 pour la théorie de cette instabilité appliquée dans le cadre solaire). Le seuil d'instabilité du tore dans les simulations du code OHM a été étudié par une méthode paramétrique en variant les conditions initiales dans Zuccarello, Aulanier, and Gilchrist (2015).

La simulation que j'ai étudiée dans plusieurs des études publiées et présentées ci-après consiste en l'expansion du tube de flux magnétique, une fois le seuil d'instabilité de tore atteint. Les vitesses sont réinitialisées à 0, de façon à ne considérer que les forces de Lorentz internes dues à l'instabilité. Il n'y a donc plus de forçage photosphérique: le tube de flux torsadé est alors en expansion, sous l'effet de la pression magnétique qui vainc la tension magnétique des lignes de champ alentours.

Code de tracé des lignes de champ

Tout au long des études qui vont suivre, je montrerai des cartes de lignes de champ magnétique, ainsi que d'autres quantités physiques (comme la densité de courant électrique J , le "Squashing factor" Q pour le calcul des quasi-séparatrices). Ces tracés de quantités physiques sont effectués grâce au code "Topology and field line Tracing"

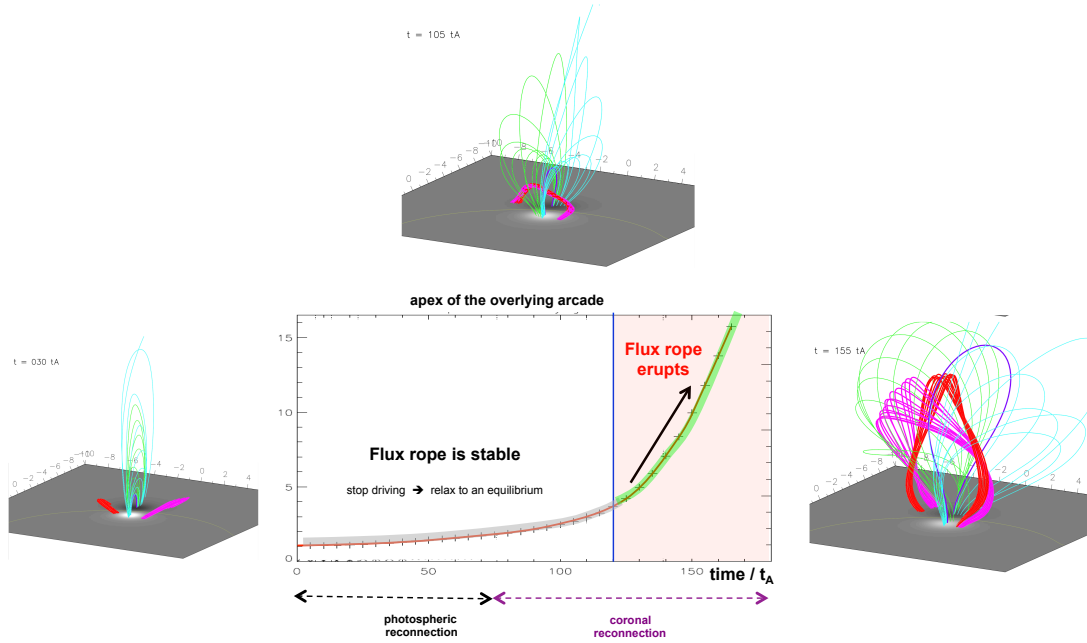


FIGURE 2.3: Évolution de l’apex du tube de flux torsadé dans le temps dans la simulation de Aulanier et al., 2010, et étude de la stabilité de la structure. Chaque temps d’arrêt du forçage photosphérique est indiqué par les traits verticaux sur la courbe. Jusqu’à $t = 120t_A$, l’arrêt du forçage photosphérique entraîne une relaxation du tube de flux vers un état d’équilibre. Une fois le seuil d’instabilité atteint, le tube de flux rentre en expansion: c’est la phase éruptive (zone rosée). Quelques configurations magnétiques issues de la simulation sont indiquées dans les inserts: l’état initial des lignes de champ potentielles (insert gauche), la formation du coeur du tube de flux (insert haut, en magenta/rouge), expansion du tube (insert droit). D’après Aulanier et al., 2010.

(TOPOTR: Démoulin et al., 1996) que j’ai pu directement modifier afin d’analyser les résultats de la simulation.

2.2.2 Evolution du cisaillement dans les boucles post-éruptives

Mon premier “plongeon” dans la physique solaire s’est effectué par l’étude conjointe des observations de boucles coronales apparaissant lors des flares, et de la simulation numérique décrite ci-dessus. La motivation de cette première étude a été la compréhension des mécanismes d’évolution du cisaillement de ces boucles, et a conduit à une première publication (Aulanier, Janvier, and Schmieder, 2012).

Observations

L’éruption observée est celle de la région bipolaire active NOAA 11193 du 9 mai 2011, observée par l’instrumentation en EUV de STEREO-B (la bande à 195 Å du Fe XII de STEREO-B/EUVI). Les rubans d’éruptions ainsi que les boucles d’éruptions associés à ces événements sont représentés dans la Figure 2.1, Panneaux e et h.

Plusieurs critères nous ont permis de choisir cet événement plutôt qu’un autre:

- nous sommes en présence d’une région bipolaire isolée, qui permet d’éviter toute interférence physique des concentrations de flux magnétiques voisines, comme d’autres régions actives proches.

- la ligne d'inversion de polarité (ou PIL) est faiblement incurvée, ce qui nous évite d'introduire des ambiguïtés dans les mesures d'angle de cisaillement.
- la région observée est presque de face, ce qui limite les effets de projection pouvant affecter l'identification des boucles d'éruption individuelles.
- l'éruption est d'énergie modérée, permettant ainsi d'éviter la saturation d'intensité des détecteurs EUV.
- l'échelle de temps est suffisamment longue pour pouvoir apprécier la transition de cisaillement de fort à faible, et ainsi pouvoir mesurer la variation d'angle avec le temps.
- la région active n'est pas soumise en permanence à des mouvements de cisaillement (pour éviter l'effet des mouvements photosphériques en générant un cisaillement dans la couronne).

Estimation du cisaillement dans les observations

Dans ces observations de quelques heures, j'ai ainsi identifié les structures topologiques les plus pertinentes, c'est-à-dire les boucles d'éruption, dites aussi post-éruptives, dont les pieds sont bien identifiables. Elles sont non saturées, donc distinguables les unes des autres, permettant d'évaluer leur cisaillement lors de l'évolution des éruptions.

Afin de mesurer le paramètre d'orientation du cisaillement des boucles post-éruptives dans l'éruption étudiée, nous avons défini un paramètre d'orientation θ correspondant à l'angle entre la ligne d'inversion de polarité, et le segment qui joint les deux pieds d'une boucle bien identifiée dans les images EUV. Celui-ci est reproduit dans la Figure 2.4. On notera par ailleurs que la référence est choisie telle que $\theta = 90$ deg (resp. 0) correspond à des boucles orthogonales à (resp. alignées avec) la PIL, donc proches d'une configuration de champ potentiel (resp. infiniment cisillées).

Alors que les valeurs du cisaillement sont assez dispersées au début de l'éruption, dans l'heure et demi qui suit le déclenchement de celle-ci, on peut voir que cette dispersion diminue et les valeurs de θ augmentent rapidement. 2 à 3 heures plus tard, la pente de l'évolution temporelle de $\theta(t)$ diminue, indiquant une saturation. Ainsi, les boucles d'éruptions formées le plus récemment, et donc formées plus haut dans la couronne (comme le montre la Figure 3 dans Warren, O'Brien, and Sheeley, 2011), se forment presque parallèlement les unes aux autres, avec un angle θ d'environ 75 deg. La quantification de ce cisaillement nous a donc permis d'affirmer que la transition d'un cisaillement fort à faible dans les boucles éruptives peut être décrit par un profil de cisaillement magnétique spatial qui diminue avec la hauteur de formation de ces boucles.

Estimation du cisaillement dans les simulations et interprétation

De la même manière, j'ai pu mesurer le cisaillement des lignes de champ magnétiques formées par reconnexion magnétique dans la simulation numérique de OHM présentée ci-dessus. Contrairement aux observations, les conditions de line-tying de la simulation facilitent l'identification de lignes de champ grâce à leur ancrage dans la photosphère à $z = 0$. En sélectionnant des lignes de champ qui se forment à des temps subséquents dans la simulation, nous pouvons alors avoir accès à la mesure précise du cisaillement.

Nos résultats, reproduits dans la Figure 2.5, montrent que θ a bien un profil d'évolution temporelle similaire à celui observé dans les observations.

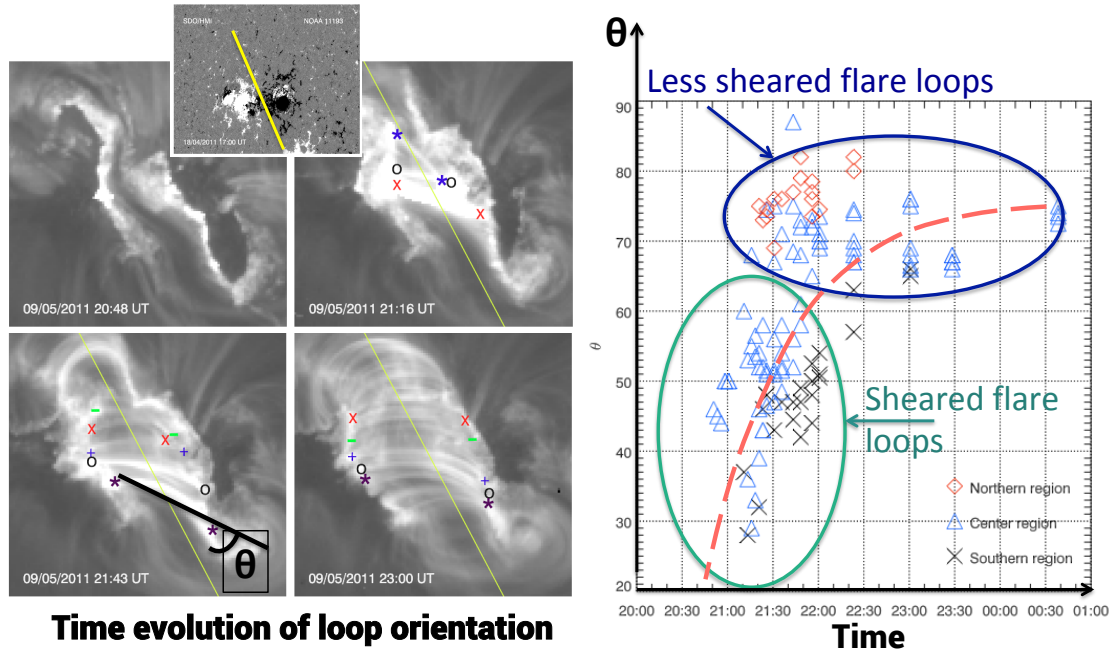


FIGURE 2.4: Évolution du cisaillement, repéré par le paramètre θ . Figure de gauche: images en EUV (STEREO-B/EUVI) de la région d'intérêt, montrant la formation des rubans d'éruptions à 20:48UT, suivies des boucles d'éruption dans les heures qui suivent. La ligne en jaune montre la ligne d'inversion de polarités, tandis que l'insert montre le champ magnétique quelques jours plus tôt, observé par l'instrument HMI sur Solar Dynamics Observatory. Les pieds des boucles d'éruptions sont repérés sur les images en EUV (voir les marqueurs de différentes couleurs), permettant de calculer le cisaillement. Figure de droite: évolution temporelle du cisaillement pour plusieurs boucles situées dans les régions nord, centre et sud de la région active, montrant une augmentation de θ , et donc une baisse du cisaillement au fur et à mesure du temps.

D'après Aulanier, Janvier, and Schmieder, 2012.

Puisque la simulation numérique nous permet d'accéder directement à la connaissance de la géométrie du champ magnétique et à son évolution temporelle, nous avons pu avancer deux mécanismes nous permettant d'expliquer la transition de cisaillement fort à faible:

- D'une part, les boucles éruptives sont formées, dans les premiers moments de l'éruption, par des lignes de champ magnétique proches de la ligne d'inversion, qui possèdent elles-mêmes un cisaillement fort (voir image de gauche dans la Figure 2.5). La reconnexion continue de reconnecter des lignes de champ de plus en plus loin de la PIL, qui possèdent un cisaillement réduit. Le cisaillement magnétique différentiel post-éruptif reflète donc qualitativement celui des boucles cisailées pré-éruptives. Ainsi, la transition de cisaillement forte à faible est due en partie au transfert de cisaillement induit par la reconnexion du champ magnétique pré- au post-éruptif.
- D'autre part, dans la phase tardive de la reconnexion, les lignes de champ magnétique qui se reconnectent sont presque bidimensionnelles, et ont une forme d' Ω (voir l'insert de droite, Figure 2.5). Bien que ces lignes de champ soient localisées proches les unes des autres dans la photosphère, elles divergent aux grandes altitudes, où leurs sommets passent au-dessus de celui du tube de flux torsadé

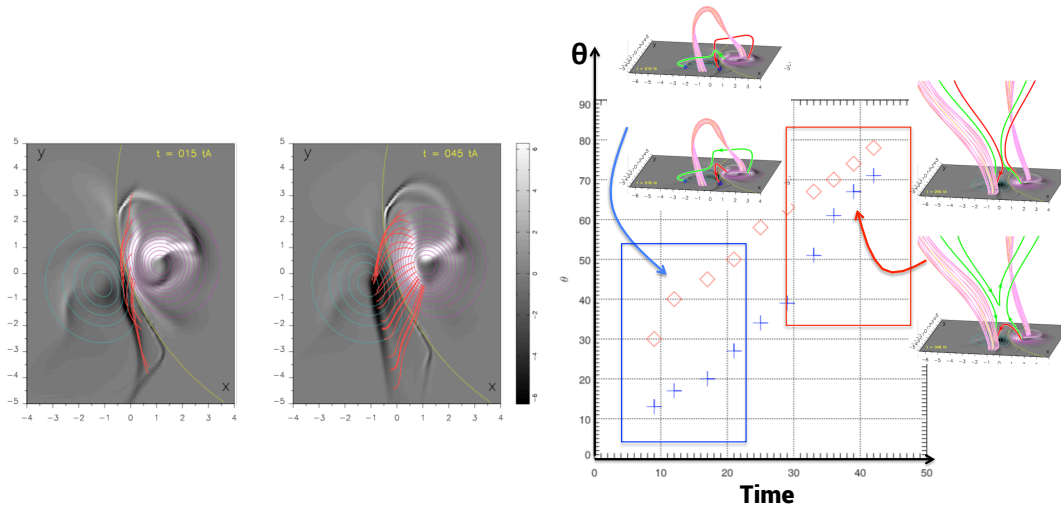


FIGURE 2.5: Évolution du cisaillement des boucles éruptives dans la simulation du code OHM, reproduisant celui observé (Figure 2.4). Deux temps issus de la simulation sont montrés, permettant de voir le cisaillement des boucles rouges (Figure de gauche), ainsi que les boucles pré et post-reconnexion (inserts dans le graphique de l'angle de cisaillement) correspondant à deux temps dans la simulation. Adapté de Aulanier, Janvier, and Schmieder, 2012.

(représentée en rose dans la figure). Cet effet est dû au redressement vertical des lignes de champ magnétique qui entourent la corde de flux. Ces changements d'inclinaison permettent une reconnexion magnétique entre des paires de boucles différentes de celles qui auraient interagi les unes avec les autres si la corde de flux n'était pas en expansion.

On note par ailleurs que dans une géométrie bidimensionnelle asymptotique (qui n'est jamais complètement atteinte dans la simulation), les deux lignes de champ seraient en fait une seule, comme dans la géométrie du modèle CSHKP 2D (celui-ci étant donc un cas limite). Cette ligne de champ unique se reconnecterait avec elle-même et formerait un plasmoid détaché.

Conclusion

En modélisant l'évolution temporelle et spatiale du champ magnétique en 3D, nous avons montré que la reconnexion magnétique conserve partiellement le cisaillement des lignes de champ pré-reconnectées dans les lignes de champ nouvellement reconnectées. Par ailleurs, nous avons également pu montrer que le cisaillement continue d'évoluer significativement du fait de l'expansion verticale des lignes de champ magnétique avoisinant la corde de flux. Ces deux phénomènes aboutissent à un cisaillement magnétique différentiel dans l'espace (en s'éloignant de la PIL) et dans le temps.

Ce résultat est essentiel car il a permis de quantifier pour la première fois l'évolution des structures magnétiques coronales lors d'une éruption grâce à des critères géométriques précis.

2.2.3 Évolution du tube de flux torsadé et hélicité magnétique

Évolution générique et influence sur les boucles coronales voisines

La simulation numérique présentée dans Aulanier, Janvier, and Schmieder, 2012 permet, nous venons de le voir, de reproduire l'évolution des boucles d'éruptions qui se forment lors d'une éruption solaire. Je présente dans la Figure 2.6 un aperçu de quelques temps issus de la simulation, et qui montre la formation de ces boucles par reconnexion magnétique (voir label "Site de la reconnexion magnétique" dans la Figure 2.6).

Cette figure présente d'une part une sélection de plusieurs lignes de champ (partie haute de la figure): le coeur du tube de flux en magenta, quelques lignes de champ alentours, proches du coeur, en cyan/vert, et des lignes de champ recouvrantes en bleu. On peut voir que plus le temps passe, plus les lignes de champ cyan/vert se torsadent également, autour du coeur en magenta. Cette enveloppe du coeur du tube de flux est bien visible avec la ligne verte dans la partie basse de la figure. Celle-ci représente deux temps d'Alfvén présentant deux lignes de champ magnétique se reconnectant, donnant d'une part une nouvelle ligne de champ correspondant à la boucle d'éruption, et d'autre part à une boucle qui va venir entourer la corde de flux magnétique. Cette enveloppe permet ainsi d'augmenter le flux magnétique et de faire grossir le tube de flux initial.

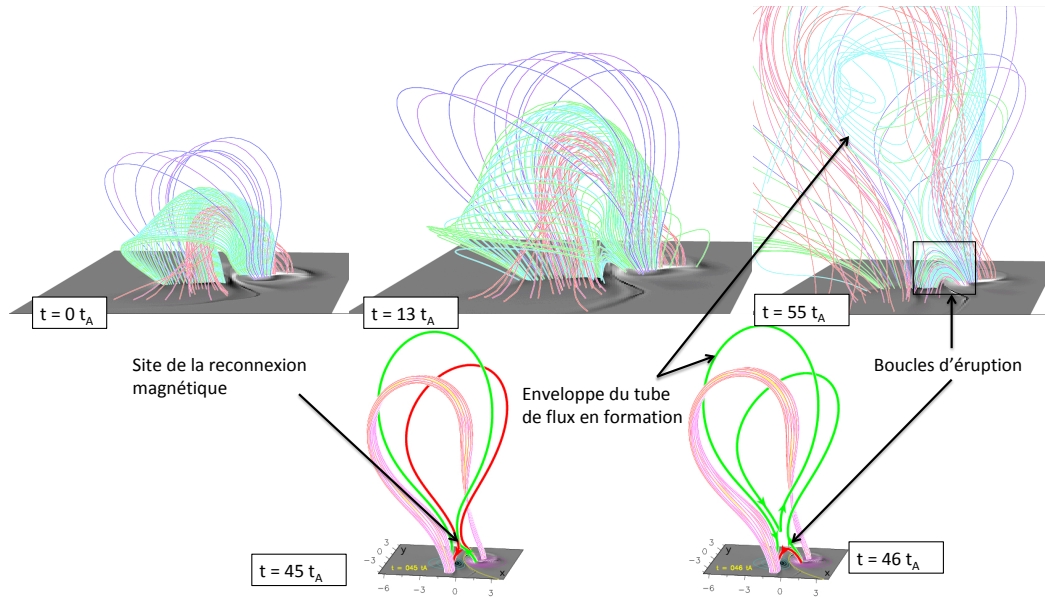


FIGURE 2.6: Évolution des lignes de champ magnétique au fur et à mesure de l'expansion du tube de flux torsadé et de la reconnexion magnétique découlant de cette expansion. Le temps $t = 0$ de la simulation correspond à l'initiation du tube de flux torsadé dans une configuration instable (début de la zone rosée dans Figure 2.3). Adapté de Aulanier, Janvier, and Schmieder, 2012.

C'est dans le travail de Dudík et al., 2016 que nous avons pu utiliser notre simulation numérique pour interpréter l'évolution du champ magnétique avoisinant une région active, sous l'influence du tube de flux en expansion. En effet, des études précédentes (Hudson, 2000; Simões et al., 2013; Russell, Simões, and Fletcher, 2015) avaient conjecturé et interprété que l'oscillation des boucles coronales au voisinage d'une région en éruption était le résultat d'un phénomène d'implosion. En fait, les boucles alentours sont contraintes par l'évolution du tube de flux, instable, en expansion: au

début de l'éruption, les boucles voisines sont poussées par la force de pression magnétique qui augmente du fait de l'expansion du tube de flux. Au fur et à mesure que le tube de flux torsadé est éjecté, la verticalisation de la structure, mentionnée déjà dans la partie précédente, fait que la structure s'étend plus rapidement verticalement qu'horizontalement. Lorsque les pieds du tube de flux deviennent quasi-verticaux vers la fin de la simulation, les boucles alentours ne sont plus poussées par cette force magnétique (alors dirigée verticalement plutôt qu'horizontalement), permettant ainsi à ces boucles de revenir à un état d'équilibre. Suivant la ligne de visée de l'imageur, comme montré dans la Figure 2.7, les boucles peuvent apparaître comme se recroquevillant sur elles-mêmes.

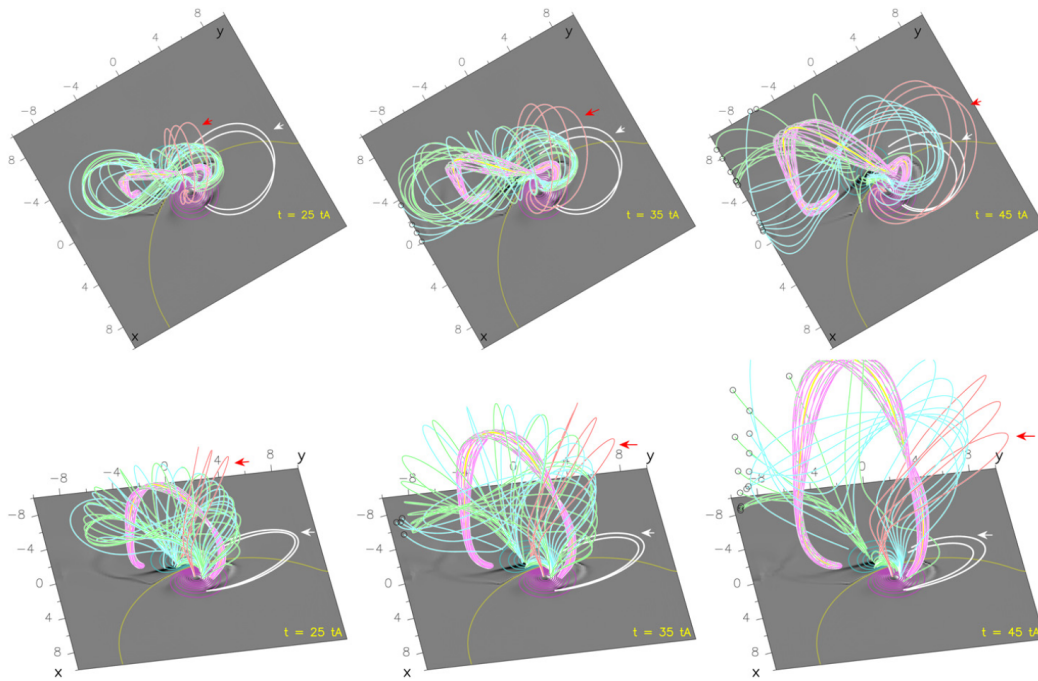


FIGURE 2.7: Influence du tube de flux en expansion sur les lignes de champ avoisinantes. Suivant le point de vue, celles-ci ont un mouvement qui a été faussement interprété comme un effet d'implosion magnétique. Il s'agit en fait d'une évolution de ces boucles vers un nouvel état d'équilibre une fois le tube de flux torsadé éjecté. D'après Dudík et al., 2016.

Étude analytique du twist du tube de flux torsadé

Lors de mon séjour en Écosse entre 2013 et 2015, j'ai poursuivi mes études sur la reconnexion magnétique et l'évolution des structures lors d'une éruption solaire. L'un de ces travaux est issu d'une collaboration avec Eric Priest de l'Université de St-Andrews (R-U) et Dana Longcope, Montana State University (E-U). Nous avons notamment travaillé sur une approche analytique du transfert de l'hélicité magnétique du champ magnétique pré-éruptif aux boucles post-éruptives et aux tube de flux torsadé.

L'hélicité magnétique est une mesure topologique de la torsion et de l'entortillement des lignes de champs magnétiques (pour référence, certaines bases théoriques en application à la physique solaire sont développées dans les papiers de Berger and Field (1984) and Berger (1999)). Cette grandeur peut être divisée en deux parties: d'un côté l'hélicité propre d'un tube de flux magnétique, exprimé par la torsion ("twist" en anglais)

et le vrillage ("writhe" en anglais) de celui-ci, et de l'autre l'hélicité mutuelle qui se réfère à l'entortillement relatif à d'autres tubes de flux (Démoulin, Pariat, and Berger, 2006). Leur somme, appelée hélicité relative, est un invariant qui est conservé totalement au cours de l'évolution d'un plasma idéal et qui se désintègre extrêmement lentement (sur un temps de diffusion magnétique global τ_D) dans un plasma faiblement résistif.

Dans le cas des éruptions solaires, qui évoluent sur des temps caractéristiques $t \ll \tau_D$, l'hélicité magnétique totale est conservée, mais peut être convertie d'une forme à une autre (e.g. d'auto-hélicité à l'hélicité mutuelle). De ce fait, l'hélicité magnétique du champ magnétique solaire est une mesure-clé, car elle peut jouer le rôle de traceur de l'évolution coronale (e.g. Zhang, Flyer, and Low, 2006; Chae, 2001; Mackay, DeVore, and Antiochos, 2014). En outre, comme l'hélicité magnétique est bien conservée à des échelles de temps inférieures à la durée de diffusion globale, sa mesure dans des structures interplanétaires telles que des nuages magnétiques (e.g. Gulisano et al., 2005; Qiu et al., 2007; Hu et al., 2014) nous permettent de lier l'évolution des CMEs dans le vent solaire avec leur source au Soleil (e.g. Mandrini et al., 2004; Luoni et al., 2005; Nakwacki et al., 2011).

Dans notre étude publiée dans Priest, Longcope, and Janvier, 2016, nous avons étudié par une approche analytique les relations d'hélicité mutuelle des boucles magnétiques cisailées pour quantifier l'évolution temporelle de l'hélicité du tube à flux torsadé lors de son éjection et son développement par reconnexion du champ environnant cisailé (tel que dans la Figure 2.6). Cette approche nous permet d'appréhender, pour une configuration relativement simple, comment la torsion de l'arcade cisailée en éruption peut être déterminée à partir de la configuration du champ magnétique initial. Pour cela, nous proposons trois hypothèses: la conservation du flux magnétique, la conservation de l'hélicité magnétique, ainsi que l'hypothèse d'équipartition d'hélicité magnétique.

Cette approche analytique permet de comprendre comment la topologie du champ magnétique évolue lors d'une éruption solaire: nous retrouvons analytiquement que le cisaillement des boucles d'éruption est bien plus prononcé proche de la ligne d'inversion que loin de celle-ci, comme dans les observations et simulation de mon travail dans Aulanier, Janvier, and Schmieder, 2012. Ce cisaillement réduit est une conséquence naturelle de l'évolution du tube de flux de notre modèle et de la géométrie tri-dimensionnelle.

Ce genre d'approche analytique pourrait être comparé et quantifié grâce aux mesures d'hélicité magnétique dans les observations et les simulations (voir par exemple les comparaisons faites dans l'article de Valori et al., 2016). Ces quantifications permettraient notamment de voir si le modèle 3D des éruptions prédit bien les hélicités mesurées directement dans les données in situ des nuages magnétiques (comme discuté dans le Chapitre 3). Cela permettrait d'obtenir des modèles d'évolution de l'hélicité des CMEs depuis leur formation au Soleil à leur détection dans le milieu interplanétaire

2.3 La reconnexion magnétique glissante, un phénomène tridimensionnel

Une grande partie de mes travaux utilisant le code OHM a consisté en l'étude poussée de la reconnexion magnétique en 3D, en l'absence de points nuls. Je présente ci-dessous ces travaux, publiés dans Janvier et al., 2013; Dudík et al., 2014; Polito et al., 2017 et Janvier, 2017

2.3.1 Reconnexion glissante et quasi-séparatrices

Observations et topologie magnétique

La compréhension des phénomènes de reconnexion magnétique lors des éruptions solaires a été grandement avancée grâce à la comparaison entre les observations et l'utilisation de modèles. Cette compréhension est passée par plusieurs étapes: dans un premier temps, les modèles de sources ou de charges magnétiques permettaient d'identifier les localisations de reconnexion attendues et de comparer celles-ci aux observations (chauffage, présence de boucles, de flares, ...). Cette approche (voir aussi plus de détails dans Janvier, 2017) se sert pour cela d'observations de la distribution du champ magnétique de la surface solaire afin de reproduire la géométrie tridimensionnelle du champ coronal. Cette cartographie 3D du champ magnétique permet alors la recherche des points nuls et des séparatrices, lieux privilégiés où trouver de la reconnexion magnétique.

Ces résultats sont alors comparés aux observations en $H\alpha$, EUV ou X, afin de comparer les localisations où les conséquences de la reconnexion magnétique sont attendues pour les phénomènes observés (flares, plasma chauffé, accélération de particules, CMEs). Bon nombre d'observations montrent de nombreuses évidences en accord avec les phénomènes attendus de la reconnexion magnétique. Les observations montrent cependant que dans certains cas, les régions de chauffage ou de flare, normalement associées à de la reconnexion magnétique, ne correspondent pas à l'existence de points nuls ni de séparatrices.

Les QSLs

En l'absence de ces éléments de topologie, la reconnexion du champ magnétique dans la couronne solaire pourrait en fait avoir lieu dans les quasi séparatrices (en anglais quasi-separatrix layers, ou QSLs, e.g. Démoulin et al., 1997). Les QSLs sont des régions de forte distorsion de la géométrie des lignes de champ magnétique ancrées dans la photosphère (Priest and Démoulin, 1995; Démoulin et al., 1996).

Cette distorsion est décrite par les dérivées des fonctions de connectivité des lignes de champ, exprimées via une matrice jacobienne. Celle-ci correspond donc à la matrice de transformation des coordonnées des points d'ancrage des lignes de champs, d'une région photosphérique à une autre. La norme N de cette matrice permet de détecter les fort changement de connectivité (Equation (1) Démoulin et al., 1996). Cependant, cette norme est dépendante du choix des plans de départ et d'arrivée des pieds d'ancrage de la ligne de champ. Une autre quantité, indépendante de celles-ci, a été définie, celle du degré d'écrasement (aussi appelé le Squashing Factor) et noté par la suite Q (Titov, Hornig, and Démoulin, 2002; Pariat and Démoulin, 2012). La norme N et le degré d'écrasement Q sont liés par le ratio des intensités de la composante du champ magnétique normale aux plans de départ et d'arrivée : $Q = N^2 / \frac{B_z(\text{plan1})}{B_z(\text{plan2})}$. Le cas où le degré de divergence est infini ($Q = \infty$) correspond au cas singulier d'une véritable séparatrice. Ainsi, le concept des QSLs permet de généraliser les concepts de topologie abordés en 2D et 3D avec des points magnétiques nuls.

On trouve ainsi que la reconnexion magnétique a lieu préférentiellement dans les régions de fortes distorsions de la connectivité du champ magnétique. Connaissant celui-ci, on peut alors identifier dans des configurations magnétiques complexes les lieux privilégiés pour le développement de forts courants électriques localisés, où la reconnexion magnétique peut alors avoir lieu.

La reconnexion glissante

La reconnexion en 3D en l'absence de points nuls est ainsi une extension du caractère singulier de la reconnexion en la présence de points nuls, pour laquelle la connectivité des lignes de champ change abruptement. En présence de QSLs mais sans point nul, le changement de connectivité magnétique est continu lors des reconnexions successives dans la zone de forte densité de courant électrique. On parle alors de reconnexion sautante (flipping reconnection, voir Priest and Démoulin, 1995), ou plus précisément, en résolvant temporellement le phénomène, de reconnexion glissante, puisque les lignes de champ semblent glisser les unes par rapport aux autres du fait de reconnexions continues dans la zone de plasma non-idéal. Alors que ce phénomène avait été principalement appréhendé théoriquement, les nouvelles avancées en simulations numériques tridimensionnelles des régions solaires ont permis de montrer que ce régime de reconnexion pouvait être également étudié numériquement (Aulanier, Pariat, and Démoulin, 2005).

2.3.2 Simulations

QSLs et courants

Dans le cas de la simulation numérique d'une éruption solaire présentée dans la section précédente, nous avons étudié dans Janvier et al., 2013 les détails de la reconnexion en 3D en l'absence de points nuls et les conséquences lors de l'éruption du tube de flux torsadé.

La simulation numérique m'a permis dans un premier temps de cartographier les localisations de la reconnexion magnétique, grâce à des coupes 2D au coeur de la structure en expansion, de la valeur du squashing factor Q . Un exemple est donné en Figure 2.8: dans la deuxième ligne, j'ai sélectionné trois temps de la simulation, correspondant à des phases différentes de l'évolution de l'expansion. On peut y voir en couleur les valeurs de Q . La troisième ligne correspond, pour les mêmes coupes 2D, aux valeurs de la densité de courant électrique J . La théorie indiquant que les localisations de fortes densités de courant électriques correspondent aux localisations de forts gradients de la connectivité, j'ai pu vérifier que les fortes valeurs de J et de Q étaient en effet co-spatiales. Par ailleurs, l'évolution temporelle permet de montrer un affaissement de la nappe de courant électrique, phénomène attendu lors d'un flare, pendant lequel le taux de reconnexion augmente fortement. Ainsi, j'ai pu utiliser ce modèle pour mettre en évidence la correspondance entre les emplacements des QSLs et les nappes de courant électrique, permettant ainsi de définir les zones préférentielles de reconnexion magnétique.

Vitesses de glissement des lignes de champ

Afin de caractériser le mécanisme de reconnexion glissante, j'ai poussé la précision temporelle des simulations MHD à un niveau très élevé, à des dixièmes de temps d'Alfvén. Pour chaque sortie de temps de la simulation, j'ai tracé la position de plusieurs lignes de champ sélectionnées. Comme la simulation est définie avec une condition "line-tied" à la photosphère, j'ai pu identifier deux échantillons de lignes de champ: l'un dont les pieds des lignes sont ancrés dans la partie de champ magnétique positif, l'autre dont les pieds sont dans la partie de champ magnétique négatif.

Par ailleurs, ces deux échantillons correspondent à des boucles magnétiques coronales qui, par reconnexion magnétique deviennent soit des boucles d'éruption, soit l'enveloppe du tube de flux torsadé, comme analysé dans les sections 2.2.2 et 2.2.3.

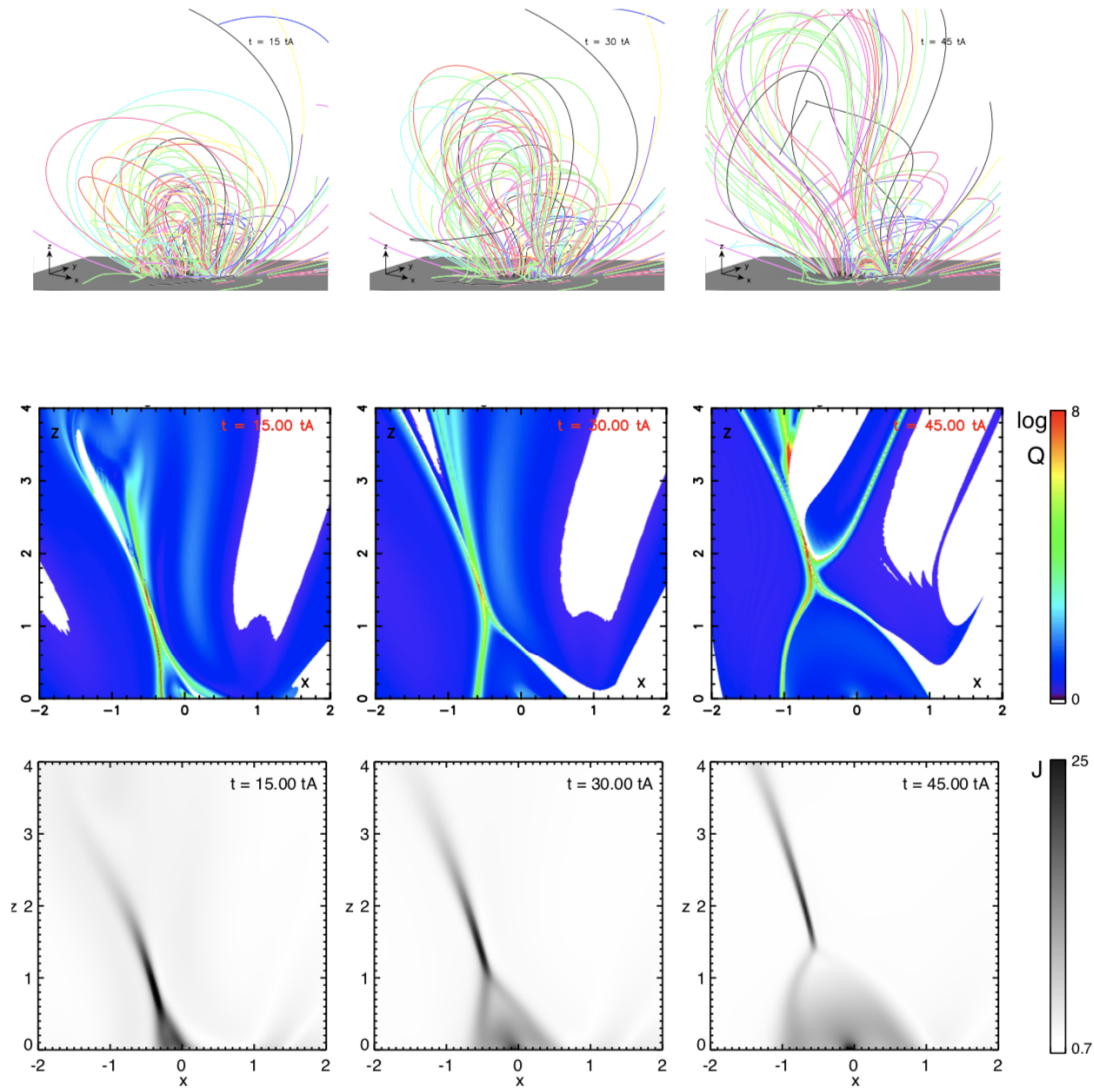


FIGURE 2.8: Cartographie des QSLs et de la densité de courant électrique J dans les simulations d'un flare éruptif. Première ligne: sélection de lignes de champ magnétiques représentant le tube de flux en expansion et les arcades magnétiques environnantes. Deuxième ligne: Coupes 2D au cœur de la boîte de la simulation (et du tube de flux en expansion) du facteur de distorsion Q , à plusieurs temps dans la simulation. Troisième ligne: Coupes 2D pour la densité de courant électrique J . Les localisations de forts J et les QSLs sont co-spatiales. Trois domaines peuvent être définis: le domaine en V inversé, où l'on trouve les boucles d'éruption étudiées dans Aulanier, Janvier, and Schmieder, 2012, le domaine en forme de goutte inversée (premier colonne), correspondant au tube de flux torsadé, et le domaine alentour, des lignes de champ voisines. D'après Janvier et al., 2013.

Un exemple est montré dans la Figure 2.9. J'ai pu ainsi montrer que ces structures se formaient intrinsèquement par reconnexion glissante.

Pour chacune des sorties de temps, et pour n'importe quelle ligne sélectionnée, il est alors possible de tracer le chemin parcouru par l'autre extrémité de la ligne de champ, dont la localisation change au fur et à mesure de la reconnexion glissante. Une de ces

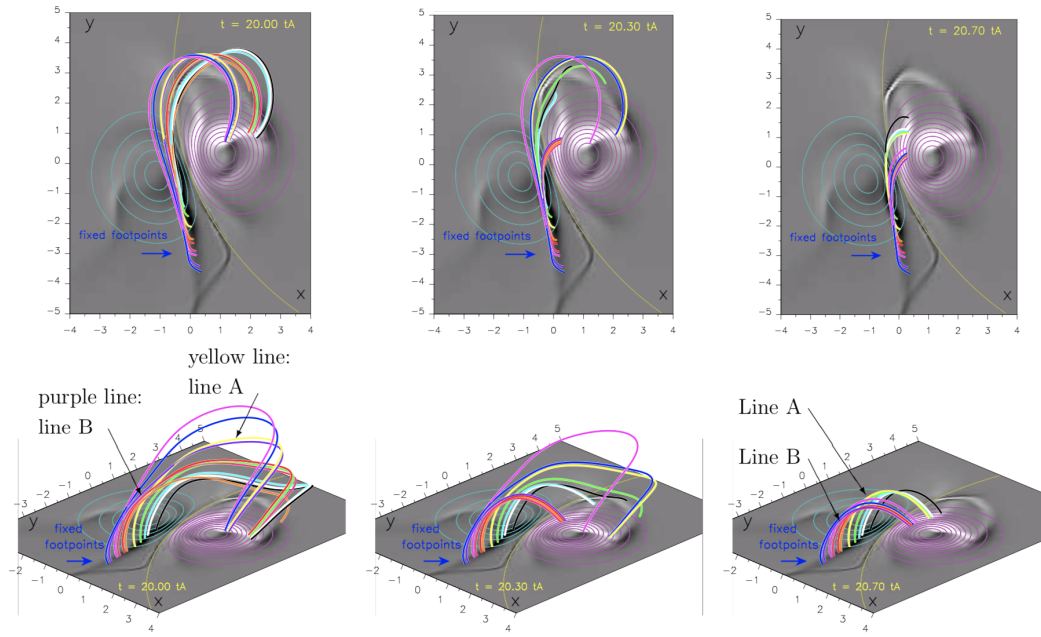


FIGURE 2.9: Exemple d'un échantillon de lignes de champ subissant la reconnexion glissante. Les pieds d'ancrage sont fixés dans la région de champ magnétique négatif (contours colorés cyan), et les lignes de champ sont intégrées à des temps différents. On voit alors que l'extrémité opposé des lignes de champ change continûment de localisation. D'après Janvier et al., 2013.

lignes de champ étudiée est montrée dans la Figure 2.10, Panneaux a et b, où les différents couleurs correspondent aux différentes positions de la même ligne de champ, à des temps différents. La position du point d'ancrage "mobile" est enregistrée (Panneau c), ce qui permet ensuite le calcul de la vitesse de glissement (Panneau d).

Ainsi, à partir de la connaissance du chemin parcouru pour plusieurs lignes de champ sélectionnées, j'ai obtenu pour la première fois les profils de vitesse de la reconnexion glissante. Ce profil de vitesse n'est pas uniforme. Au contraire, il varie fortement, comme le montrent les deux pics du Panneau d).

Importance de la norme pour la reconnexion glissante

Afin d'expliquer le profil non uniforme de la vitesse de glissement, j'ai ensuite étudié en détail si ce profil avait un lien direct avec la divergence de la connectivité, normalement mesurée par la quantité Q . En fait, comme le montre le Panneau e), où l'on trouve les profils spatiaux, sur une coupe 1D perpendiculaire au point d'ancrage fixé dans la polarité négative, de Q, \sqrt{Q}, N , la vitesse de glissement semble être bien plus proche de la norme N que de Q . En étudiant le profil de celui-ci, nous avons alors quantifié la corrélation très forte (quasiment ~ 1) entre ce paramètre et le profil de la vitesse (voir Figure 10 et Tableau 1 de Janvier et al., 2013). Nos résultats montrent pour la première fois que la vitesse de glissement des lignes de champ peut être directement appréhendée par la connaissance du profil de la norme (à résistivité constante), permettant de vérifier les modèles analytiques de reconnexion glissante.

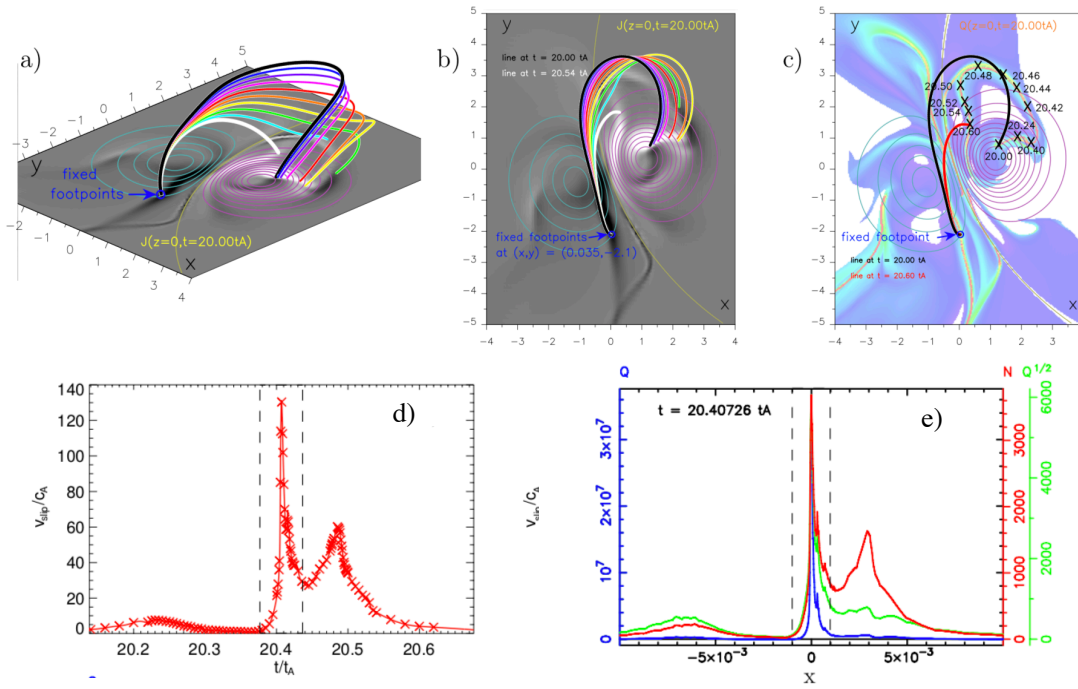


FIGURE 2.10: Sélection d’une ligne de champ magnétique, changeant de connectivité à chaque temps de sortie de la simulation. Panneau a: Etat des lignes de champ à chacune des sorties, la ligne noire représentant la position de départ, la ligne blanche correspondant à la même ligne, définie par le même point d’ancrage dans la photosphère (champ magnétique de polarité négative) à la fin du glissement. Panneau b: même ligne de champ que dans le panneau a), mais vue de dessus. Panneau c: positions du point d’ancrage “mobile” (dans la polarité positive, non fixé) pour chaque sortie de la simulation. Panneau d: profil de la vitesse de glissement, déduite à partir des distances entre chaque point et des temps du Panneau c. Panneau e: profil de la norme N en rouge, de la racine de Q en vert, et de Q en bleu. Le profil de N correspond point par point à celui de la vitesse de glissement. D’après Janvier et al., 2013.

2.3.3 Observations de la reconnexion glissante lors d’éruptions solaires

Toute première observation de la reconnexion glissante lors d’une éruption

Les prédictions données par la simulation numérique en 3D peuvent être testées grâce aux observations à haute résolution spatiale et temporelle des nouveaux télescopes spatiaux observant dans l’ultraviolet et en rayons X. Par exemple, Aulanier et al., 2007 avait montré l’existence de boucles coronales glissantes dans les données de Hinode/XRT (hors activité éruptive). Avec la haute cadence temporelle (12 s) et spatiale du Atmospheric Imager Assembly (AIA) de Solar Dynamics Observatory, un bon nombre d’événements de glissement ont récemment été analysés (voir par exemple Li and Zhang, 2015; Sobotka et al., 2016; Gou et al., 2016; Shen et al., 2019).

C’est cependant en 2014, dans le papier de Dudík et al., 2014, que nous avons montré pour la première fois la possibilité d’observer le phénomène de la reconnexion glissante lors d’un flare éruptif, donc comme dans la situation simulée numériquement. Dans ce papier, nous nous sommes intéressés aux régions complexes NOAA 11520, et 11521, où un flare de type X1.4 est survenu le 12 juillet 2012.

Le mouvement de glissement apparent des boucles d'éruptions et de leur pied d'ancrage (visualisés par les kernels, points brillants se déplaçant dans les rubans d'éruption et qui apparaissent aux pieds des boucles coronales), est principalement observé dans le canal 131 Å de AIA: voir la Figure 2.11. Nous avons pu observer plusieurs signatures de ce phénomène de glissement à des temps différents: outre les mouvements apparents, on peut également voir les conséquences de la reconnexion avec l'apparition des boucles d'éruption, ainsi que l'éruption d'un filament.

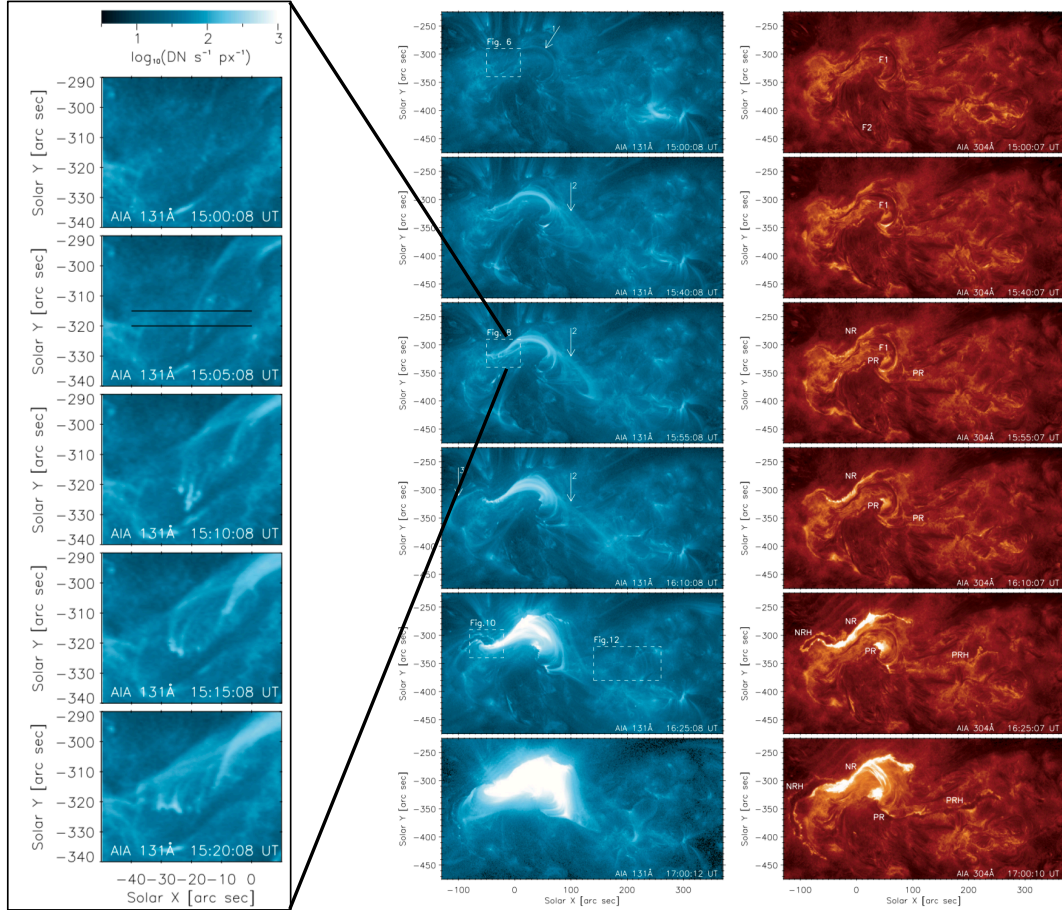


FIGURE 2.11: Le flare de type X1.4 du 12 juillet 2012 dans les régions actives 11520 et 11521, où la reconnexion glissante est observée pour la première fois lors d'un flare. Les deux panneaux de droite indiquent l'évolution temporelle des structures coronales dans les filtres 131 Å et 304 Å. On y voit notamment les boucles d'éruption et l'embrillassement important (16:25 et 17:00 UT), ainsi que la présence d'un filament en éruption (indiqué par "F1"). La zone zoomée à gauche correspond à la localisation où le phénomène de glissement est détecté, avec le mouvement apparent d'une part des pieds d'ancrage (tracés par les kernels), et des boucles. D'après Dudík et al., 2014.

Le déplacement des points d'ancrage se fait également le long des QSLs, déduites à partir d'une extrapolation relativement simple (dite potentielle, voir Figure 1 du papier). Ainsi, en comparant avec les prédictions faites par la simulation numérique, nous avons pu interpréter les observations de cette éruption, et inversement, l'observation de ce mouvement de glissement apparent aura permis de confirmer toutes les prédictions du modèle 3D, une première pour une éruption solaire. La structure des rubans

d'éruption, la propagation des points d'ancrage en leur sein, ainsi que l'évolution temporelle des boucles confirment ainsi clairement mes analyses des simulations.

Dans d'autres études sur la reconnexion glissante auxquelles j'ai participé, nous nous sommes intéressés aux conséquences de celle-ci: c'est le cas notamment des kernels, et que nous avons pu suivre dans le papier de Dudík et al., 2014.

Dans l'étude de Dudík et al., 2016, nous avons analysé le mouvement apparent de ces kernels avec des données spectroscopiques lors du flare de classe X du 10 septembre 2014. Lors de ce flare, nous avons observé la présence de la reconnexion glissante, cette fois-ci notamment lors de la phase pré-impulsive du flare. Grâce aux données EIS de spectroscopie du satellite Hinode, nous avons montré que la reconnexion glissante s'accompagnait de forts jets de plasma provenant du chauffage de la chromosphère.

Ces travaux sur la reconnexion magnétique en trois dimensions a fait l'objet d'une revue invitée dans le Journal of Plasma Physics (Janvier, 2017).

2.4 Évolution des courants électriques pendant les éruptions solaires

Je présente ci-dessous les résultats principaux des articles de Janvier et al., 2014; Janvier et al., 2016 et Barczynski et al., 2020.

2.4.1 Évolution des courants photosphériques comme traceurs des structures magnétiques

D'autres prédictions sont données par le modèle numérique d'OHM, comme l'évolution de la densité de courant électrique J au cours de l'évolution du tube de flux torsadé, et en particulier leur signature photosphérique. Nous l'avons vu dans la troisième ligne de la Figure 2.8, la couche de densité de courant monte en altitude, au fur et à mesure de l'éjection du tube de flux, et son épaisseur se réduit, tandis que la densité de courant électrique augmente.

Cette couche de densité de courant électrique étant tridimensionnelle, elle s'étend jusqu'à la surface $z = 0$ de la boîte de simulation, représentant la photosphère. La cartographie sur cette surface est représentée dans la colonne de gauche de la Figure 2.12: le tracé du volume sur la photosphère prend alors une forme en double J, comme indiqué dans le panneau d. Dans cette même figure, nous avons reproduit dans la colonne du milieu la cartographie des quasi-séparatrices sur la même surface, ainsi qu'une vue du volume tridimensionnel de J de la simulation de Kliem et al., 2013, similaire à celle d'OHM de Aulanier, Janvier, and Schmieder, 2012; Janvier et al., 2013. On voit clairement que le tracé du volume de densité de courant prend la forme de crochet proche de la surface. Cette forme de la trace photosphérique de J et des QSLs n'est pas sans rappeler la forme des rubans d'éruptions qui apparaissent aux pieds des boucles d'éruptions, comme vu par exemple dans la Figure 2.4 (premier panneau) ou encore dans le panneau f de la Figure 2.12. Ainsi, nous pouvons étendre l'appellation des rubans d'éruption aux formes prises par J et les QSLs.

Enfin, ces traces photosphériques évoluent avec le temps: les parties centrales de ces rubans, proches de la ligne d'inversion (tracé fin en jaune dans la colonne de gauche de la Figure 2.12) s'éloignent l'une par rapport à l'autre, tandis que la partie en crochet s'élargit et se déplace aussi plus loin de la ligne d'inversion.

Il avait été montré dans Démoulin, Priest, and Lonie, 1996 que la forme photosphérique des quasi-séparatrices était directement reliée à la géométrie du tube de flux

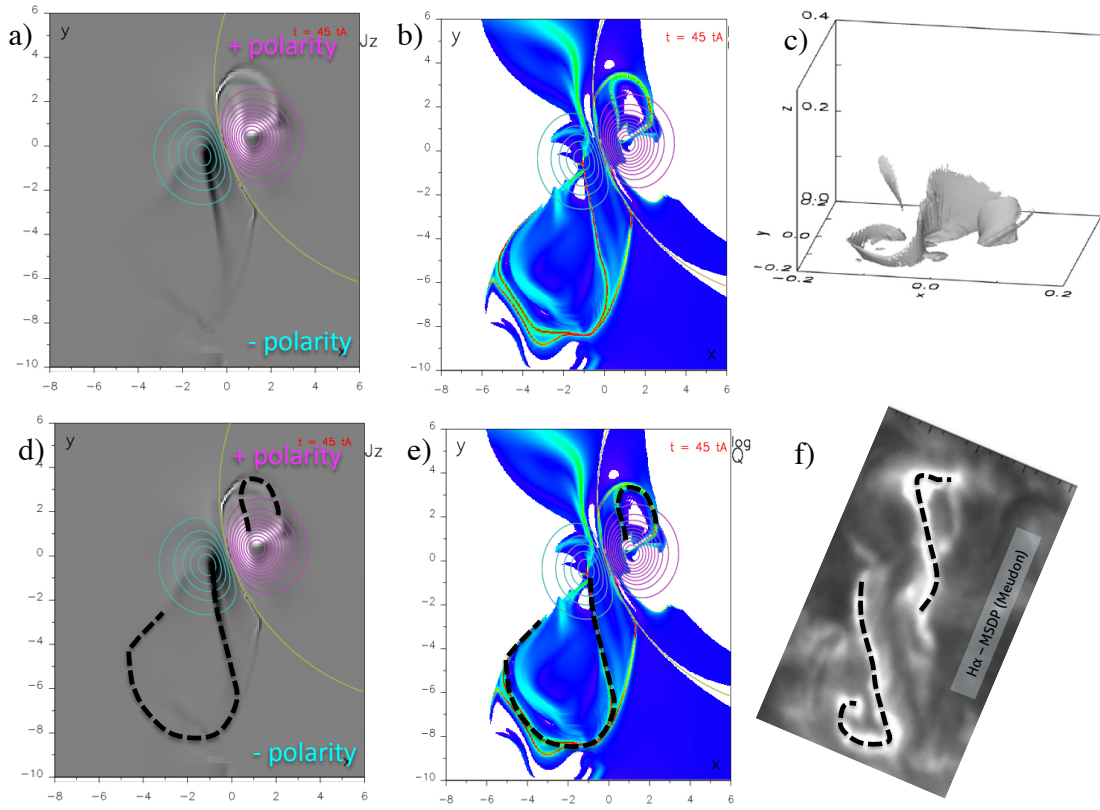


FIGURE 2.12: Panneaux a et d: cartographie à $z = 0$ (photosphère) de la composante verticale de la densité de courant électrique J_z dans la simulation d'OHM, avec dans le Panneau d une indication de la morphologie en forme de J. Panneaux b et e: même cartographie mais pour les quasi-séparatrices. Panneau c: volume tridimensionnel de la densité de courant électrique dans une autre simulation, d'après la Figure 11 de Kliem et al., 2013. Panneau f: morphologie en J des rubans d'éruption lors d'un flare, étudiés dans Chandra et al., 2009.

torsadé qui est à l'origine de la présence de ces QSLs en forme de J. Puisqu'il y a correspondance entre quasi-séparatrices et densité de courant, nous pouvons alors utiliser J comme traceur de la dynamique de la reconnexion, ainsi que de l'évolution du tube de flux torsadé.

2.4.2 Évolution temporelle de J : un marqueur de la phase impulsive d'un flare.

Il est possible de suivre les courants électriques des régions actives dans les observations grâce à la connaissance des composantes tridimensionnelles du champ magnétique. Dans notre étude (Janvier et al., 2014), nous avons utilisé les données du magnétographe HMI sur la mission SDO, qui nous permet d'obtenir le vecteur champ magnétique à raison d'une cadence de 12 minutes. Plus précisément, Véronique Bommier a utilisé le code d'inversion UNNOFIT, qui permet une meilleure détermination de l'inclinaison du champ magnétique (voir Bommier et al., 2007). Cette méthode a été appliquée aux données IQUV de niveau 1 d'HMI, sur la région AR 11158, permettant l'obtention de 20 cartes de champ magnétiques, du 15 février 2011 à 00:00 TU au 15 février à 03:48 TU.

Cette région est intéressante car même si elle semble de prime abord relativement complexe (voir panneau a de la Figure 2.13), avec 4 polarités, le flare de classe X qui a lieu le 15 février vers 02:00 TU est localisé dans la partie centrale de la région active, qui présente une configuration bipolaire semblable à celle étudiée dans les papiers de Aulanier, Janvier, and Schmieder, 2012; Janvier et al., 2013.

Grâce aux cartes du champ magnétique, j'ai pu ensuite dériver la composante verticale de la densité de courant électrique J_z à tous les temps avant et après la phase impulsive du flare, comme présenté dans le panneau c de la Figure 2.13. En suivant l'évolution des traces photosphériques de J_z , j'ai pu ainsi montrer une augmentation du signal entre deux états pris avant et après le pic du flare. Cette augmentation est d'autant plus visible sur la colonne de droite (panneau c), où nous montrons les mêmes cartes, auxquelles nous avons soustrait les valeurs de J_z mesurées avant le flare. L'augmentation juste après le pic du flare est très visible, notamment dans les régions notées "H-", "S-", "H+" et "S+". Ces régions correspondent aux différentes parties des rubans de courant: H pour "hook" ou crochet de la forme en J, et "S" pour straight, ou la partie droite de cette forme.

De manière évidente, la morphologie de ces structures de courant n'est pas sans rappeler celle appréhendée dans la simulation et dans les observations de rubans d'éruption, comme déjà vus dans la Figure 2.12.

Par ailleurs, j'ai pu quantifier la croissance du courant électrique pendant la phase impulsive de l'éruption, dans les régions encadrées. En différenciant les courants directs (dans le même sens que le champ magnétique) de ceux indirects, nous pouvons reporter, comme dans le panneau d de la Figure 2.13, l'évolution temporelle de ceux-ci. Ces courants augmentent au même moment où la phase impulsive du flare se déclenche, comme indiqué par la courbe verte correspondant au flux lumineux dans la bande 335 Å du télescope AIA sur SDO.

Nous avons interprété ces résultats comme les preuves directes de la dissipation soudaine du champ magnétique: en effet, l'effondrement de la couche de courant observée par les coupes 2D (Figure 2.8), et donc la diminution du volume, s'accompagne d'une augmentation de la densité de courant. Comme ce volume s'étend jusqu'à la photosphère, où l'on voit la trace photosphérique en forme de J, l'augmentation de J_z directement mesurée dans les observations est donc reliée à ce phénomène d'amincissement du volume de courant coronal. Cet amincissement, à courant électrique constant, implique donc une augmentation de la densité de celle-ci, qui est une nécessité pour permettre à la reconnexion magnétique de prendre place. Les mesures de flux lumineux dans plusieurs gammes de longueurs d'ondes grâce à AIA permettent de corroborer ce résultat, puisque la phase impulsive du flare est bien temporelle à l'augmentation du courant. Les conséquences de cet amincissement, en lien avec la co-temporalité du flare, indique donc une preuve directe de la soudaine dissipation du champ magnétique. Par ailleurs, nous avons démontré la co-spatialité des rubans d'éruption (toujours en 335 Å) et de la forme en J des rubans de courant, renforçant notre hypothèse de la présence d'un volume coronal de densité de courant, responsable de la dissipation de champ magnétique et donc du flare. De plus, ces signatures peuvent être vues même dans le champ magnétique photosphérique.

J'ai ensuite poursuivi l'étude de la localisation et de l'évolution des courants électriques dans des régions actives plus complexes, comme celle de NOAA AR 11283 où un flare de classe X a pris place le 6 septembre 2011. Dans cette étude (Janvier et al., 2016), nous avons montré que l'effondrement du volume de courant électrique était également visible, même si la configuration étudiée correspond à un tube de flux torsadé "piégé" au sein d'une configuration fan/spine (typique de la présence d'un point nul).

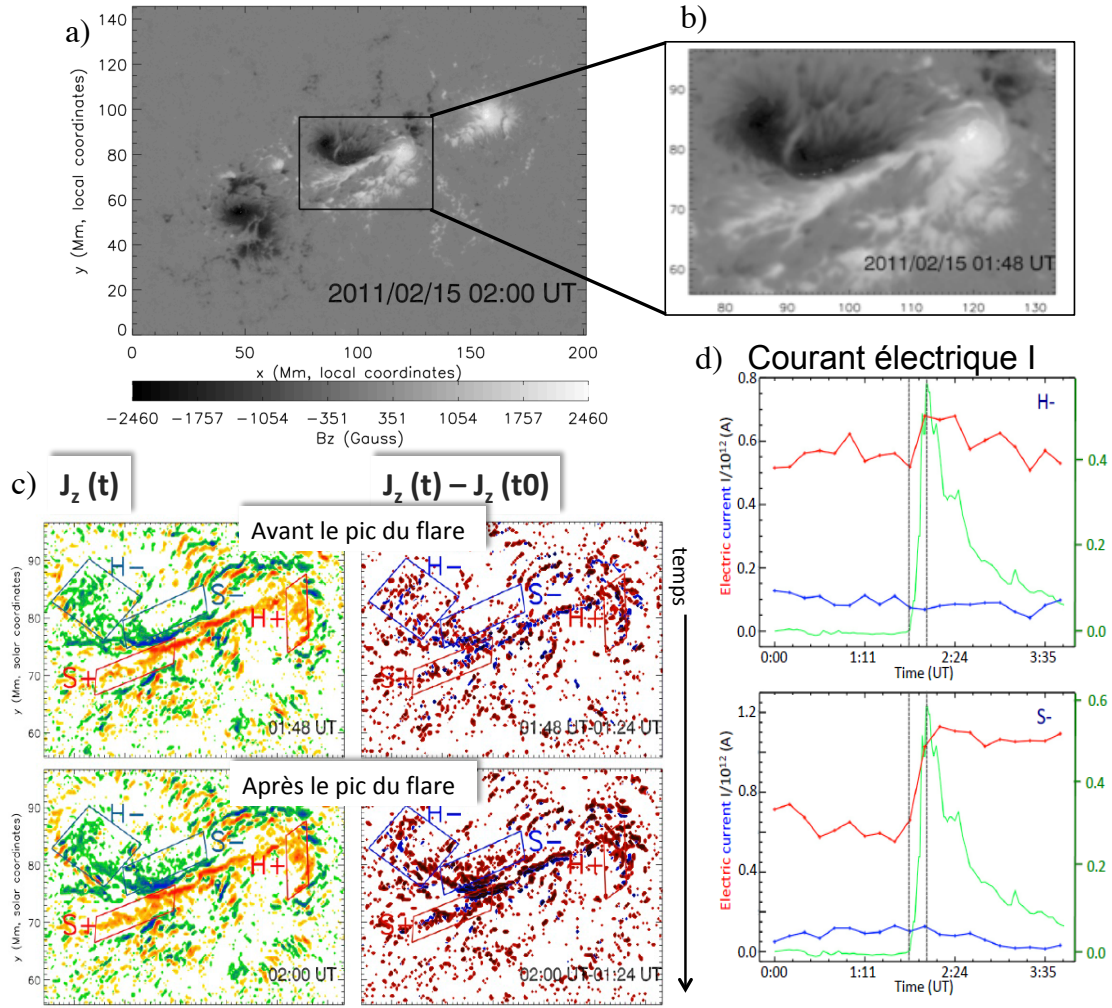


FIGURE 2.13: Panneau a: cartographie du champ magnétique (composante verticale B_z) d'après les données d'HMI, pour la région complexe AR 11158 dont nous avons étudié le flare X du 15 février 2011. L'encart montre que malgré la présence de quatre polarités, la région centrale se comporte comme un bipôle, proche de la configuration étudiée dans Aulanier, Janvier, and Schmieder, 2012; Janvier et al., 2013. Panneau c: deux cartographies de la composante verticale de la densité de courant électrique J_z , prises un temps avant (première ligne) et après (deuxième ligne) le pic du flare X. La première colonne montre J_z avec en rouge/orangé les valeurs positives, et en bleu/vert les valeurs négatives. La deuxième colonne montre les mêmes cartes, mais auxquelles nous avons soustrait les valeurs de J_z quelques minutes plus tôt (à 01:24 UT). Ce genre de cartographie de différence permet d'insister sur les changements, ici pointés par les régions colorées "H-, S-, H+, S+". Panneau d: Évolution temporelle du courant électrique dans les deux régions "H-" et "S-" où l'on trouve les augmentations de J_z les plus importantes, courant direct en rouge (même orientation que le champ magnétique) et courant de retour en bleu (orientation inverse du champ magnétique). La phase impulsive est indiquée par les deux lignes verticales, et par l'augmentation du flux lumineux dans la bande 335 Å de AIA (courbe en verte). D'après Janvier et al., 2014.

Nous avons aussi utilisé un code de reconstruction du champ magnétique tridimensionnel (la méthode dite "d'insertion de flux" (voir Savcheva and van Ballegooijen,

2009), se basant sur des observations photosphériques 2D). Ceci nous permet d'obtenir les traces photosphériques des quasi-séparatrices liées à la configuration, et de retrouver les formes en J, co-spatiales, de celles-ci ainsi que de la densité de courant électrique J_z .

Nous avons ainsi confirmé, grâce à ces deux études de comparaison de la physique de la reconnexion (les rubans de courant électrique) et de la topologie du champ (quasi-séparatrices) à partir de données d'observation, la validité des simulations 3D d'éruptions.

2.4.3 Courants associés aux tubes de flux torsadés

Nous venons de voir que les signatures photosphériques de la densité de courant électrique J_z , pouvaient être associées aux rubans d'éruptions qui apparaissent aux pieds des boucles coronales éruptives. Nous avons également interprété l'augmentation du courant électrique dans certaines régions des rubans de courant comme étant la signature de l'effondrement de la nappe de courant coronale.

Dans le papier de Cheng and Ding, 2016, les auteurs se sont intéressés à la mesure temporelle des courants non pas dans les rubans eux-mêmes, mais aux pieds du tube de flux torsadé. Les mesures, effectuées dans 4 régions actives différentes, montrent que ce courant électrique décroît: cette diminution est alors interprétée par la diminution de la torsion par unité de longueur (du fait de l'expansion du tube de flux). Comme $B_\phi \sim 1/L_z$, alors l'augmentation de la longueur du tube de flux L_z entraîne inévitablement une diminution de B_ϕ , et donc de J_z .

Dans l'étude menée par Barczynski et al., 2020, nous avons cherché à comparer cette diminution, étudiée dans plusieurs régions actives, à celle trouvée dans les simulations d'OHM. Les principaux résultats sont présentés dans la Figure 2.14: les panneaux a et b représentent les résultats obtenus de la simulation, tandis que les panneaux c et d montrent un exemple de résultats obtenus pour une région active, ici la même qu'étudiée dans Janvier et al., 2014, soit AR 11158 avec un flare le 15 février 2011.

Si l'on s'intéresse tout d'abord à la simulation, d'une part la cartographie photosphérique de la composante verticale de la densité de courant électrique J_z montre une évolution de ces rubans déjà expliquées dans la sous-section ci-dessus. On y retrouve la séparation des parties droites de la forme en J des rubans de courant, ainsi qu'une augmentation de la taille des crochets. C'est à l'intérieur de ceux-ci que l'on va définir les régions de calcul d'intensité des courants électriques, qui sont reportés dans le panneau b: au fur-et-à-mesure de l'extension du tube de flux, vu notamment avec l'accroissement des longueurs des lignes de champ magenta et cyan du panneau a, on voit que le courant direct (c'est-à-dire dans la même direction que le champ magnétique: positive dans la partie B positive, négative dans la polarité négative, dans ce cas-là où l'hélicité du tube de flux est positive) dans les régions d'intérêt T1 et T2 diminue au fil du temps.

Nous retrouvons cette même évolution dans les observations, comme présentés dans les panneaux c et d. On y voit que les régions d'intérêt sont similaires à celles présentées pour la simulation, c'est-à-dire au creux des crochets des rubans de courant (panneau c, encart c, issu des données HMI), mais aussi au creux des crochets des rubans d'éruption, comme montré avec l'image de la même région dans le filtre 1600Å du télescope AIA (panneau c, encart b).

Puisque le modèle numérique nous permet d'avoir directement accès à la connaissance de la longueur des lignes de champ magnétique, j'ai pu mesurer l'évolution temporelle de celle-ci, et ce pour plusieurs échantillons de ligne de champ. En comparant alors l'évolution temporelle de la diminution du courant électrique et l'augmentation des longueurs de ces lignes de champ, nous avons pu montrer directement que J_z évoluait bien en $1/L$. Ceci est prédit par la théorie MHD, dans lequel le paradigme

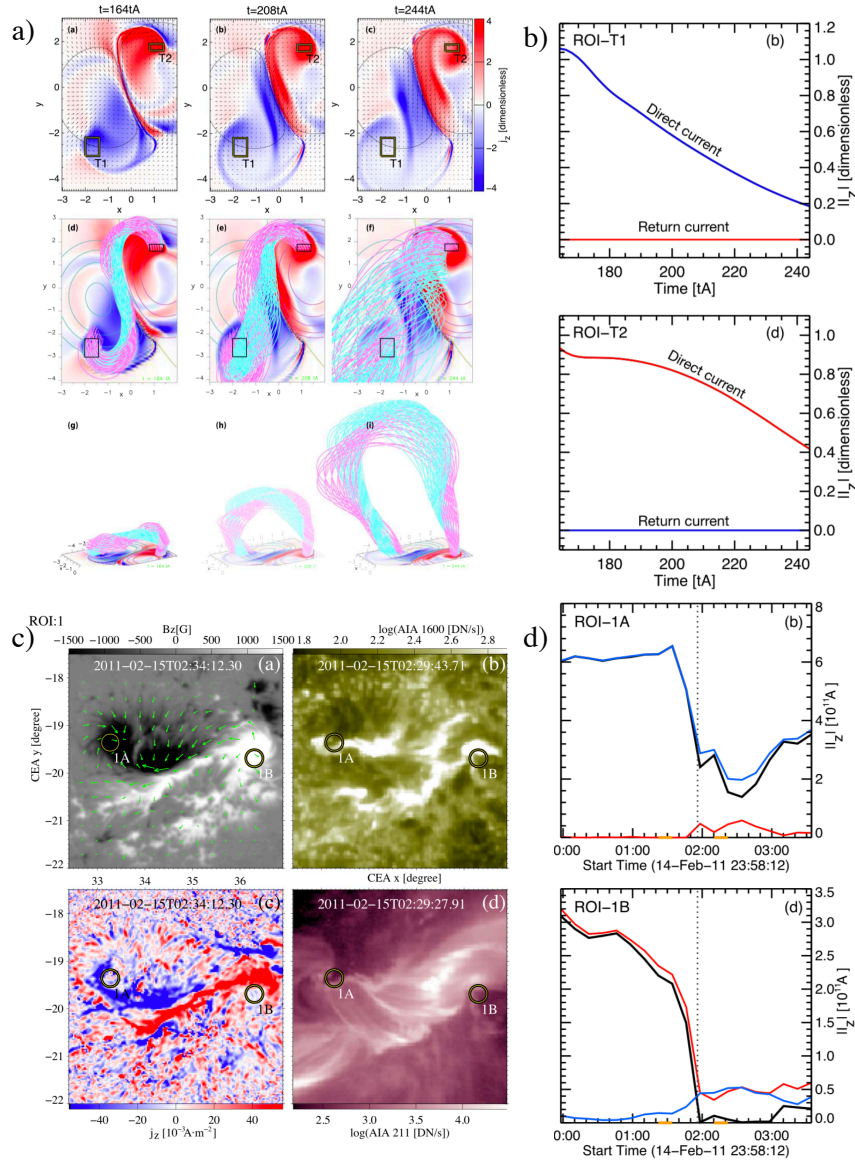


FIGURE 2.14: Panneau a: trois temps donnés de la simulation OHM pris durant l'expansion du tube de flux torsadé. Première ligne: cartographie des courants photosphériques, avec le tracé des deux régions T1 et T2 correspondant aux pieds des lignes de champ magnétique composant le tube de flux magnétique, représenté par les lignes magenta et cyan. Les deuxièmes et troisièmes lignes représentent une vue du haut et de biais de la structure en expansion. Panneau b: Diminution du courant (direct) dans les régions T1 et T2. Panneau c: Exemple d'une des régions observées, ici la région AR 11159 étudiée dans Janvier et al., 2014, où les régions des points d'ancrage du tube de flux en expansion sont choisis au creux du crochet des rubans de courant en forme de J. Panneau d: Diminution du courant (direct) en fonction du temps dans les régions 1A et 1B. D'après Barczynski et al., 2020.

$v; B$ établit que la densité de courant J est une variable secondaire, dont l'intensité et l'évolution sont directement contraints par le rotationnel du champ magnétique, d'après la Loi d'Ampère.

2.5 Résumé: Extension du modèle standard des flares en 3D

Les grandes similitudes des propriétés du champ magnétique dans les simulations que j'exploite avec les faits observés par les instruments spatiaux montrent que nos résultats sont bien ceux attendus d'une physique réaliste, même si les simulations sont décrites dans le paradigme de la MHD, qui ne capture pas la physique à petite échelle des particules. Ce paradigme est donc suffisant pour expliquer les structures à grande échelle que nous observons. Tous les travaux résumés ci-dessus nous ont ainsi permis de définir un nouveau modèle, qui étend le modèle standard des flares en trois dimensions, et dont les conséquences sont directement comparables aux observations.

L'essentiel des éléments est résumé dans la Figure 2.15. Tout d'abord, le panneau de gauche représente un tube de flux en expansion, dont la forme du coeur est dessinée par des lignes de champ violettes. Autour de celui-ci, on trouve le volume tri-dimensionnel de la densité de courant et des quasi-séparatrices, dont une partie est représentée en gris (pour le volume total, voir dans la Figure 2.12, panneau c issu de la simulation de Kliem et al., 2013). Une coupe transverse au coeur de la structure donnerait les mêmes coupes que dans la Figure 2.8. Ce volume de courant a des signatures photosphériques en forme de J, comme étudié dans toute la Section 2.4.

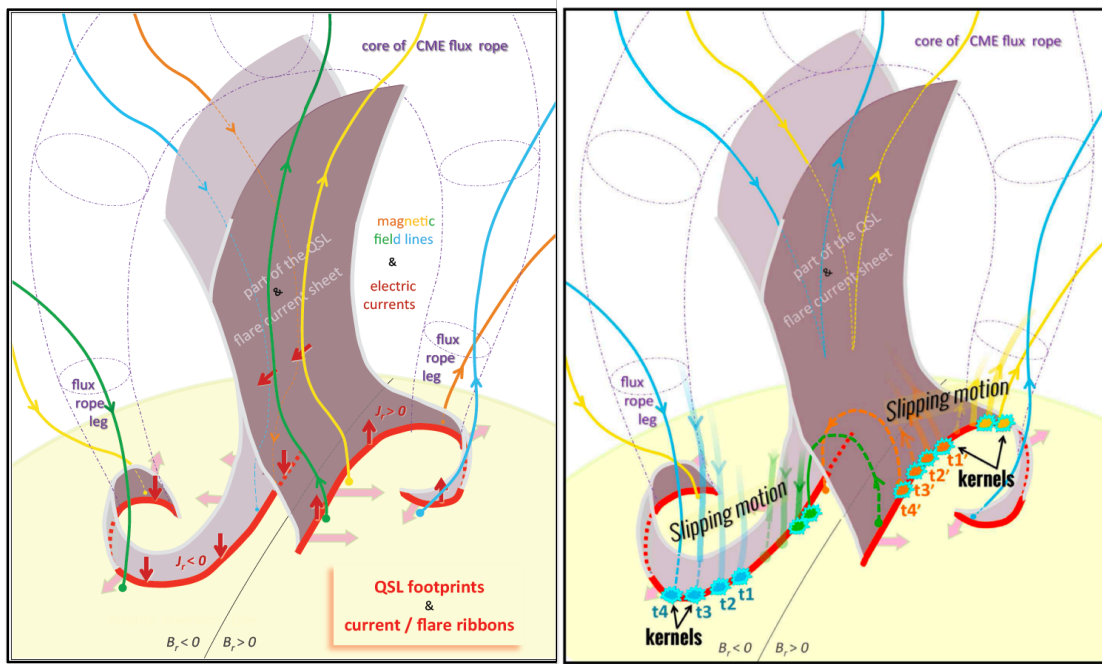


FIGURE 2.15: Panneau de gauche: modèle standard étendu en trois dimensions. Les lignes de champ pré-reconnexion (vert, jaune, bleu et orange) se trouvent de part et d'autre du volume de courant électrique représenté en gris. Les signatures photosphériques sont en forme de J, indiqués en rouge. Panneau de droite: pendant la reconnexion, les lignes de champ verte et bleue, ainsi que jaune et orange, se reconnectent entre elles. Elles subissent un mouvement de glissement, vu dans les observations par le mouvement des kernels. Ces reconnections successives donnent des boucles d'éruptions (verte et orange), ainsi que la formation d'une nouvelle enveloppe (bleue et jaune) autour du coeur du tube de flux central (violet).

L'effondrement de la nappe de courant implique la reconnexion d'un continuum de lignes de champ magnétique. Ici, nous en représentons deux paires: verte/bleue,

et jaune/orange. Ces lignes de champ, une fois dans le volume de fort gradient de champ magnétique (et donc de fort J), subissent des reconnections successives du fait de l'épaisseur et de la longueur de cette nappe (contrairement au modèle 2D qui a une taille infinie dans la direction perpendiculaire aux forts gradients de B). Celles-ci font alors apparaître des mouvements des lignes de champ (représentées dans le panneau de droite par des lignes transparentes), ainsi que des mouvements aux pieds des lignes de champ vus comme le déplacement des kernels dans les observations (voir Section 2.3).

A l'issue de ces reconnections successives, les lignes de champ reconnectées forment d'une part les boucles éruptives (verte et orange dans le panneau de droite), dont le cisaillement est directement lié à celui des boucles pré-reconnectées (Section 2.2.2), et l'enveloppe du cœur du tube de flux, avec les lignes de champ bleue et jaune s'enroulant, et amenant ainsi plus de twist autour de la structure (Section 2.2.3).

Ainsi, la Figure 2.15 contient tous les éléments essentiels pour expliquer les différentes observations des flares éruptifs, et permet d'améliorer notre compréhension de ceux-ci en étendant le modèle CSHKP à des phénomènes purement tridimensionnels, comme la reconnexion glissante, le cisaillement des boucles d'éruption, l'enveloppe torsadée du tube de flux en expansion, et enfin l'évolution des courants électriques.

2.6 Autres travaux

Au cours des années, j'ai pu développer des collaborations sur d'autres sujets tels que le chauffage coronal (Pontin et al., 2017), les flares stellaires étudiés à la lumière de ceux solaires, ou encore l'évolution des régions actives, que je présente ci-dessous. Afin de ne pas trop encombrer ce manuscrit, j'ai pris le parti de ne citer que les résultats les plus importants de ces travaux.

2.6.1 Des flares solaires aux flares stellaires

Flares atypiques

Bien que la plus grande partie de mes travaux sur les flares solaires se soit concentrée sur l'établissement d'un modèle standard tridimensionnel, certaines éruptions solaires ne peuvent être expliquées par celui-ci. En effet, certaines configurations magnétiques sont trop complexes et différentes du cas d'école d'une région active bipolaire.

Dans ces cas, il faut alors définir individuellement les caractéristiques physiques comme l'environnement magnétique dans lequel un flare va prendre place. Identifier des paires de boucles reconnectées permet également de mieux comprendre où a lieu la reconnexion magnétique, et comment expliquer certaines observations qui ne rentreraient pas dans le cadre du modèle standard.

Un premier exemple et l'étude d'une région active complexe de Polito et al., 2017. Ici, nous nous sommes intéressés à trois éruptions homologues de classe C et une dernière éruption de classe M observées à la fois par le Solar Dynamics Observatory (SDO) et le EUV Imaging Spectrometer (EIS) sur Hinode, dans la région active AR 11429 du 9 mars 2012. Toutes les éruptions récurrentes se sont produites dans un court intervalle de temps (moins de 4 h), et ont montré des caractéristiques (plasma et champ magnétique) très similaires. Les premiers flares correspondent à des flares confinés, tandis que le flare de classe M est une éruption à grande échelle.

Afin d'étudier la nature homologue des éruptions, nous avons effectué une extrapolation de champ sans force non linéaire (NLFFF) de la configuration du champ magnétique 3D dans la couronne. Celle-ci montre l'absence de points nuls, et la présence en contrepartie de quasi-séparatrices, qui permettent d'expliquer l'emplacement des kernels le long des rubans d'éruption en forme semi-circulaires, et les émissions de plasma chaud le long de structures complexes. L'association de plusieurs diagnostics a ainsi permis d'étendre notre modèle pour dégager les points communs à des flares de régions plus complexes, et de se focaliser sur leurs particularités.

Un autre exemple est le papier de Joshi et al., 2019, dans lequel nous avons étudié un cas d'éruption confinée. Celle-ci est précédée par la formation d'un filament par annulation de flux magnétique au niveau de la photosphère. Nous avons notamment montré que ce filament non éruptif s'étend lentement, favorisant la croissance et la reconnexion de boucles coronales environnantes, et entraînant un flare de faible énergie (classé de type C5.0), mais de longue durée. En analysant la topologie magnétique de la région en question, grâce à une extrapolation de champ sans force, non linéaire, nous avons montré que la clé de cet événement de longue durée réside en la présence d'une longue ligne d'inversion de polarité magnétique incurvée. Celle-ci permet alors plusieurs étapes de reconnexion successive, incluant des paires de boucles plus ou moins éloignées.

Bien que ce genre de travaux soit adapté à des études de cas, qui semblent atypiques aux premiers abords, l'analyse de la topologie du champ magnétique et des indicateurs des conséquences de la reconnexion magnétique dans ces régions permet d'en réduire la compréhension à des éléments clés. Ici, et sans doute dans plusieurs cas de flares atypiques, de faible intensité mais de longue durée, la présence d'une ligne d'inversion incurvée permet plusieurs étapes de dissipation d'énergie magnétique. En effet, une ligne d'inversion longue et incurvée permet la reconnexion de structures magnétiques originellement éloignées, mais connectées par la formation intermédiaire de structures magnétiques.

Possibles applications aux flares stellaires

Le modèle standard 3D développé grâce aux simulations d'OHM nous permet d'obtenir beaucoup de quantités qui peuvent être directement reliées aux observations: morphologie des boucles d'éruption, rubans de courant, etc.

Une des questions qui se pose alors est la suivante: au vu de l'énergie magnétique dissipée dans le modèle standard, pourrait-on estimer la probabilité de flares très énergétiques sur le Soleil?

Cette question découle directement des observations de flares stellaires (e.g. Davenport, 2016) qui montrent que des équivalents solaires d'étoiles peuvent être le siège de "super-flares", c'est-à-dire des flares d'énergie de l'ordre de 10^{36} erg (Maehara et al., 2012; Nogami et al., 2014; Namekata et al., 2017; Okamoto et al., 2021).

Dans l'article de Aulanier et al., 2013, nous avons estimé la part d'énergie magnétique dissipée et celle de l'énergie cinétique produite lors de l'éjection d'un tube de flux instable (et en adéquation avec d'autres simulations similaires). Bien que dans cette simulation de type $\beta = 0$, nous ne puissions estimer l'énergie produite par chaleur ou par production de particules énergétiques, les ordres de grandeur d'énergie dissipée sont en adéquation avec les valeurs typiques estimées pour des flares solaires (Emslie et al., 2005; Fletcher et al., 2011), et les valeurs d'énergie cinétique en adéquation avec les observations de CMEs (Vourlidas et al., 2000; Vourlidas et al., 2010).

Par ailleurs, l'énergie dissipée pouvant être exprimée comme dépendante d'une fraction de la taille des régions actives impliquées dans la génération d'un flare, nous pouvons alors estimer par simple rapport la taille nécessaire d'une région active qui

serait nécessaire à la génération de flares de même énergie que les superflares observées pour des étoiles. La conclusion de cet article est univoque: pour obtenir des flares d'énergie d'environ $\sim 10^{36}$ erg, la taille d'un groupe de taches devrait couvrir presque un quart de la surface solaire.

Ce phénomène aurait dû être visible, depuis les centaines d'années d'enregistrements des taches solaires, voire même des millénaires d'observations solaires, même les plus rudimentaires. Ainsi, cet article a permis de s'opposer aux annonces d'effet indiquant la possibilité d'avoir des super-flares sur le Soleil (Shibata et al., 2013).

Inversement, on pourrait se poser la question de savoir si nos connaissances sur les flares les plus énergétiques (de classe X) du Soleil nous permettrait d'appréhender ceux des flares stellaires. Dans une équipe du International Space Science Institute (ISSI) menée par Louise Harra, entre 2013 et 2015, nous avons cherché à trouver les éléments communs entre tous les flares X observés pendant la période d'observation du Solar Dynamics Observatory (c'est-à-dire à partir de 2010), qui nous permettrait de diagnostiquer les flares d'autres étoiles.

Cependant, nos recherches (Harra et al., 2016) montrent que la variabilité des régions actives à l'origine des flares X solaires est bien trop grande: nous n'avons ainsi trouvé aucun point commun entre la géométrie des régions (plus ou moins complexes), le profil des courbes de lumière (les événements peuvent être courts et d'autres au contraire de longue durée), la fraction de la région active ayant un rôle dans l'éruption. De plus, les événements d'octobre 2014 de la région active NOAA AR 12192, ayant donné plusieurs flares X confinés, jettent un pavé dans la mare: non seulement les caractéristiques de la région active sont importantes, mais le champ environnant, difficilement, voire non détectable, pour des étoiles (champ plus faible que les taches stellaires), doit être pris en considération. Une seule observation cependant pourrait être fructueuse: celle d'un assombrissement dans les raies coronales du Soleil calme (1 à 2 MK), que nous avons relevé de manière consistante sur tous les flares X de type éruptif. Ces observations pourraient servir de guide pour l'investigation de flares stellaires éruptifs (e.g. Koller et al., 2021).

2.6.2 Évolution des régions actives

Évolution de la distribution du champ magnétique dans les régions actives

Au cours de mon séjour à l'Université de Dundee, et lors de mes nombreuses visites au Mullard Space Science Laboratory (R-U), j'ai commencé à m'intéresser à l'évolution des régions actives, puisque celles-ci sont au coeur même des éruptions solaires. Dans une collaboration menée par l'étudiante Sally Dacie (Dacie et al., 2016), nous avons étudié l'évolution temporelle de l'intensité du champ magnétique au cours de la formation et de la dispersion de plus d'une trentaine de régions actives. En particulier, nous avons pu montrer l'évolution des pentes de distribution du champ magnétique dans ces régions: ces pentes sont moins raides au fur et à mesure que le flux magnétique émergeant fusionne, atteignent un pic et se raidissent à nouveau (voir Figure 2.16).

Ce comportement diffère significativement d'un modèle de diffusion classique, ce qui suggère que celle-ci n'est pas responsable des changements observés dans la distribution du champ, mais que d'autres processus jouent un rôle significatif dans la dispersion du flux magnétique. Nous avons proposé comme scénario la possibilité que les cellules convectives des (super) granules sont responsables de la régénération continue du champ magnétique.

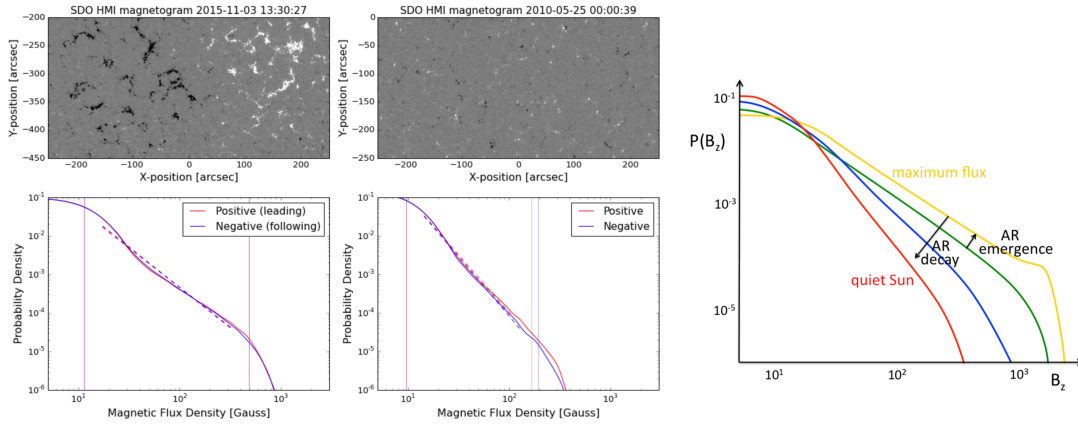


FIGURE 2.16: Évolution de l'intensité du champ magnétique pour une région active (panneau de gauche) comparé au Soleil calme (panneau du milieu). L'évolution de la pente des probabilités de distributions du champ magnétique est représenté dans le panneau de gauche, et ne correspond pas à un modèle classique de diffusion magnétique. D'après Dacie et al., 2016.

Écoulements ascendants de plasma autour des régions actives

Après nous être intéressés au champ magnétique, nous avons, dans le papier de Baker et al., 2017, regardé l'évolution des écoulements de plasma dans le voisinage des régions actives. En effet, l'un des résultats les plus intrigants du spectrographe EIS sur le satellite Hinode est la détection de flux ascendants à grande vitesse du plasma coronal (à des températures proches du million de Kelvin), aux frontières des régions actives (Doschek et al., 2007; Del Zanna, 2008; Harra et al., 2008). Ces écoulements ascendants pourraient être à l'origine du vent solaire lent, et contribuer aux différentes compositions observées dans le vent solaire (Brooks et al., 2020). Dans la première étude de Démoulin et al., 2013, les auteurs se sont intéressés à l'évolution temporelle de ces écoulements ascendants, et en particulier aux effets de projection du fait de l'évolution d'un limbe à l'autre du Soleil (voir Figure 2.17, Panneaux a et b).

En utilisant un modèle qui tient compte de la projection de la vitesse sur la ligne de visée, il est alors possible d'ajuster les valeurs des plus fortes vitesses d'écoulements ascendants au modèle et d'en déduire l'orientation intrinsèque, et donc la géométrie, de ceux-ci (voir Panneau c). Ainsi, dans l'étude de Baker et al., 2017, j'ai repris les routines d'ajustement des écoulements ascendants que j'ai utilisées sur la dizaine de régions actives que nous avons observées. Grâce à cet échantillon, nous avons pu estimer les vitesses d'écoulement et leur inclinaison typique: ceux-ci peuvent s'incliner entre la verticalité et 40° pour la polarité en aval, alors que pour la polarité en amont, les angles d'inclinaison sont plus disparates (de -29° à 28°). Nous avons également, pour certaines régions actives, montré certaines caractéristiques intrinsèques des écoulements de plasma: certains de ceux-ci sont dominés par des phénomènes tels que des petits jets de matière et/ou des éruptions (CMEs).

Nos résultats permettent de mieux contraindre les modèles de productions des écoulements de plasma dans les régions actives: certains mécanismes avancés, tels que des ondes, nanoflares, ou jets, qui sont locaux par nature, ne peuvent pas expliquer la nature globale et stationnaire des écoulements observés. Par comparaison avec des mesures déduites du champ magnétique (reconstruction du champ magnétique tridimensionnel, par exemple celui présenté dans le Panneau d de la Figure 2.17), nous

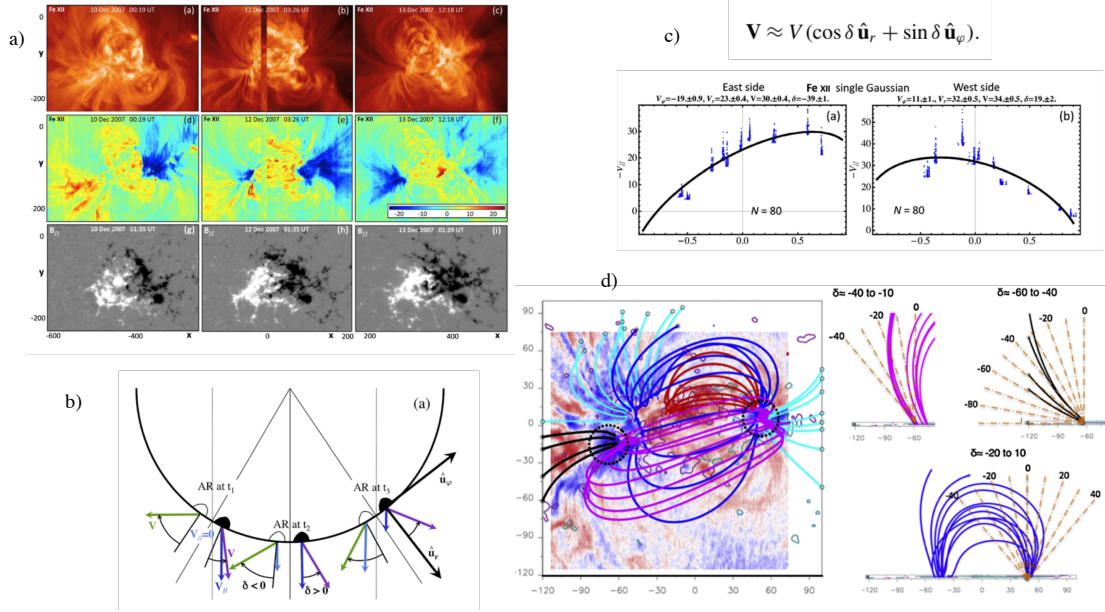


FIGURE 2.17: Panneau a: Trois temps montrant une région active, avec l'intensité et la vitesse Doppler toutes deux déduites d'un fit Gaussien simple de la ligne du Fe XII à 195.12 Å, et le champ magnétique avec le magnétogramme MDI. Panneau b: Représentation des vitesses intrinsèques pour chaque polarité (V en vert et violet) et de la composante parallèle à la ligne de visée. Panneau c: équation de l'expression de la vitesse intrinsèque V en fonction de l'orientation de l'écoulement, donné par l'angle δ , et ajustement des données (points bleus) par le modèle analytique, permettant de retrouver cet angle. Panneau d: comparaison des angles d'écoulement δ avec une extrapolation potentielle du champ magnétique d'une des régions étudiées. D'après Démoulin et al., 2013; Baker et al., 2017.

avons pu vérifier que nos observations étaient en accord avec un modèle de reconnexion le long de quasi-séparatrices, entre des boucles coronales sur-pressurisées des régions actives, et des boucles coronales sous-pressurisées des régions alentours.

En outre, ce genre d'étude pourra être complétée par les nouvelles observations spectroscopiques SPICE sur Solar Orbiter.

2.7 Conclusion et Projets

Nouvelles contraintes observationnelles pour le modèle 3D

A travers plusieurs travaux en physique solaire, j'ai pu développer une expertise sur la reconnexion 3D appliquée aux phénomènes des éruptions solaires. Cette expertise me permet aujourd'hui d'identifier les structures topologiques les plus pertinentes associées à l'évolution des éruptions, dans des régions plus ou moins complexes.

La comparaison et la corrélation des résultats de méthodes analytiques et observationnelles avec des résultats de simulations numériques 3D ont été le cœur de mon travail de mes premières années de recherche dans ce domaine. J'ai pu ainsi mettre en évidence les mécanismes sous-jacents de la reconnexion 3D afin d'établir un modèle 3D d'éruptions solaires.

Bien que ce modèle tridimensionnel permette d'expliquer un bon nombre d'observations, et semble adapté à des régions actives différentes les unes des autres, il serait intéressant de revenir sur les caractéristiques fondamentales et récurrentes des observations (par exemple, le cisaillement des boucles d'éruption, la séparation des rubans, leur morphologie) de manière plus statistique. Avec la floppée de données issues de plus de 10 ans d'observations avec le Solar Dynamics Observatory, couvrant tout le cycle solaire 24, des études plus poussées, corrélées à la complexité des régions, pourraient être envisagées.

Dans un futur proche, la possibilité d'utiliser les données de Solar Orbiter est une des plus réjouissantes. En effet, les données solaires obtenus dans la ligne de visée "Soleil-Terre" pourront être complétées, d'une part sur la même ligne de visée, mais avec une meilleure résolution spatiale, lorsque la sonde se trouvera entre le Soleil et la Terre et proche de notre astre, et d'autre part, en quadrature, permettant ainsi des observations stéréoscopiques des mêmes régions actives depuis des observatoires différents. L'instrument extrême ultraviolet EUV et l'imageur de champ magnétique PHI (dont l'IAS est co-PI des deux) me permettra de tester ce modèle 3D des éruptions solaires par des observations mieux contraintes.

Spectroscopie avec SPICE

Notre équipe à l'IAS est responsable des opérations du spectrographe SPICE sur la mission Solar Orbiter. Dans le cadre de mon service national d'observation (SNO) du CNAP, je participe aux efforts de planification des plages d'observations et à la définition de ces observations (voir Chapitre 4). Scientifiquement, les résultats de SPICE seront très intéressants, pour plusieurs raisons: la capacité de voir des régions en dehors de la ligne Soleil-Terre, de pouvoir suivre temporellement des régions avec plusieurs spectrographes (notamment Hinode/EIS et IRIS), d'observer des raies complémentaires aux autres spectrographes, et suivant certaines configurations, de pouvoir observer en quadrature ceux-ci. Tout cela, en plus de nouvelles cibles d'opportunité, comme par exemple lorsque Solar Orbiter sortira du plan de l'écliptique, et sera amené à voir les régions polaires du Soleil.

Du fait d'une télémétrie plus avantageuse que prévue au départ, nous avons, lors de la phase de croisière qui s'étendra jusqu'à fin 2021, plus d'opportunités d'observations scientifiques. Une de ces fenêtres a été celle du "Short-Term Planning 122" qui s'est déroulé du 16 au 22 novembre 2020. Nous travaillons à l'heure de l'écriture de ce manuscrit, à l'analyse des premières données de SPICE, avec des observations que j'ai coordonnées avec EIS et IRIS. Ce premier jeu de données nous permettra de voir les capacités d'observation, et d'améliorer nos cibles et nos requêtes d'observations en soutien à SPICE dans le futur.

En particulier, grâce à la combinaison des instruments sur Solar Orbiter tels que SPICE-EUV-PHI, nous pourrions aller sonder comment la topologie magnétique structure les écoulements de plasma. Ces résultats seront d'autant plus intéressants qu'ils pourront être soutenus par des campagnes d'observation multi-instruments (Imagerie EUV avec STEREO-A et SDO/AIA, champ magnétique avec SDO/HMI et données au sol e.g. réseau GONG, spectrographes Hinode/EIS et IRIS).

Évolution des tubes de flux, de la couronne au milieu interplanétaire

Comme nous venons de le voir, et comme nous le verrons dans le chapitre suivant, les tubes de flux torsadés qui sont au coeur des éruptions solaires peuvent être sondés directement par des sondes interplanétaires. Nous verrons dans le Chapitre 3 qu'il existe

une population de petits tubes de flux différente des éjections de masse coronales, dont la distribution pourrait être expliquée par des mécanismes de formation différents de ceux des CMEs. Une des possibilités est la formation de multiples petits plasmoids formés dans la zone de forte densité de courant électrique. D'autre part, les diagnostics de champ magnétique des données in situ nous donnent une meilleure idée de la structure magnétique des tubes de flux formant les nuages magnétiques, au coeur d'une partie des CMEs interplanétaires.

Grâce aux simulations numériques, il est possible de suivre la formation et l'évolution de ces structures, comme montrés en section 2.2.3. Dans le futur, les simulations que nous développons avec Antoine Strugarek au CEA/AIM nous permettront d'aller directement sonder les premières étapes de la propagation de ces tubes de flux: mesures d'hélicité, changement d'orientation, reconnexion avec le champ coronal environnant, interactions avec des régions voisines (trous coronaux, autres régions actives). Ces études nous permettront également d'interpréter les observations faites (e.g. Chen et al., 2020) et qui seront faites plus proches du Soleil par les sondes Parker Solar Probe et Solar Orbiter.

Chapter 3

Propriétés génériques des ICMEs et effets sur les environnements planétaires

Une grande partie de mes recherches repose sur l'étude des CME interplanétaires, notées ci-après ICMEs. Après une brève introduction sur l'historique des observations de ces structures, et de l'importance d'en connaître la structure interne, j'introduis dans ce chapitre mes différentes études reposant principalement sur des méthodes statistiques des événements observés. Ces méthodes m'ont, entre autre, permis d'apporter de nouvelles connaissances sur les sous-structures des ICMEs (e.g. éjecta magnétique, choc en amont de l'ICME), leur évolution dans le milieu interplanétaire et leur impact sur les environnements spatiaux des planètes du système solaire (e.g. le phénomène de décroissance des rayons cosmiques dû aux ICMEs).

3.1 Introduction

3.1.1 Observations des CMEs

Les toutes premières observations

Bien que nos connaissances sur les éjections coronales de masse (ci-après CMEs) aient fortement évolué depuis l'ère spatiale, celles-ci peuvent être observées, sur Terre, notamment lors des éclipses solaires. C'est le cas par exemple de l'éclipse totale du 18 juillet 1860 (Eddy, 1974) observée dans des localités le long du chemin de totalité. D'autres publications plus récentes (Cliver, 1989; Webb and Cliver, 1995) revenant sur des éclipses plus anciennes, ou des éclipses modernes (Hanaoka et al., 2014), montrent qu'il n'est pas impossible de voir les marqueurs d'une CME dans les éclipses totales, bien que celles-ci ne soient pas fréquentes.

Ayant eu la chance de pouvoir voir de mes propres yeux l'éclipse solaire totale en Argentine en juillet 2019, celle-ci ayant eu lieu au minimum du cycle, je n'ai cependant pu voir qu'une couronne solaire relativement "calme". Ayant voulu recommencer l'expérience pour la dernière en date (à l'écriture de ce manuscrit) du 14 décembre 2020 dans le sud du Chili et de l'Argentine, la pandémie du Covid-19 aura changé mes plans. Quel dommage, sachant que celle-ci a révélé une magnifique CME encore proche du Soleil, comme le montrent les images de Drückmüller et al. dont une est présentée en Figure 3.1, sélectionnée pour l'Astronomy Picture of the Day¹.

¹<https://apod.nasa.gov/apod/ap210107.html>

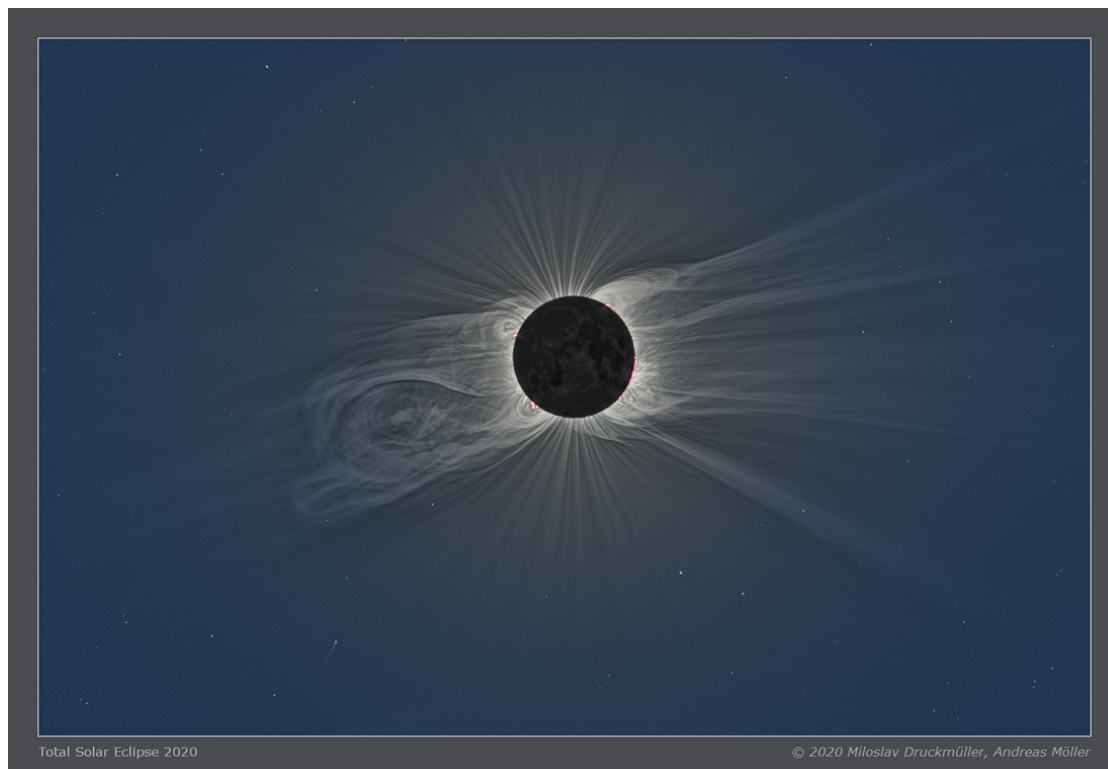


FIGURE 3.1: Vue de l'éclipse solaire du 14 décembre 2020 ayant eu lieu en Amérique du Sud. Cette image composite provient de 55 expositions à des temps différents, permettant de révéler la surface lunaire, la couronne solaire, ainsi qu'une structure d'éjection coronale de masse.

Les études sur des éjections de matière solaire commencent vers la fin du 19^e siècle, quand Janssen et Lokyer en 1868 (Janssen, 1868; Lockyer, 1868) montrent que des protubérances peuvent être observées à l'aide de spectroscopes en dehors des éclipses. Tandberg-Hanssen, 1995 relate que les observations de protubérances montrent des vitesses d'expulsion de plus de 100 km/s. Que deviennent ces structures, une fois éjectées du Soleil? Une nouvelle étape de leurs observations commence alors avec le spatial.

L'apport du spatial

La surveillance régulière des CMEs ne commence véritablement que dans les années 1970 avec l'avènement de l'ère spatiale. Les premiers phénomènes transitoires coronaux sont observés dès 1971 avec le coronographe à lumière blanche à bord de la mission OSO-7 de la NASA. Ces observations sont faites en lumière blanche grâce à la diffusion Thomson, qui correspond au rayonnement des électrons libres d'un plasma accélérés dans le champ d'une onde électromagnétique. Tousey, Howard, and Koomen, 1974 rapportent que ces phénomènes ont en moyenne une vitesse d'environ 450 km/s, les plus rapides d'entre eux pouvant atteindre des vitesses de plus de 1100 km/s. Skylab (1973-1979) aura également apporté une grande contribution à la détection des CMEs (Gopalswamy, 2016). Par ailleurs, Gosling et al., 1975 seront les premiers à faire le lien entre un "transitoire" coronal et son homologue de choc interplanétaire, en joignant différentes instrumentations (remote-sensing et in situ) avec les missions Skylab (pour la détection de la CME) et Pioneer 9 (côté interplanétaire). Cette découverte aura également montré la décélération des CMEs dans le milieu interplanétaire.

A l'heure actuelle, les CMEs sont surveillées de façon continue, donnant lieu à des catalogues d'évènements, dont je reparlerai un peu plus tard dans le cadre de mes propres études. Les deux sondes jumelles STEREO A et B (lancées en 2006) nous ont également permis d'obtenir d'autres points de vue, permettant notamment de trianguler la position des CMEs et de développer et affiner des techniques de prédiction d'arrivée de ces structures à la Terre (e.g. Sheeley et al., 1999; Rouillard et al., 2008; Lugaz et al., 2010). Dans le cadre de mes recherches, je parlerai de l'importance des diagnostics effectués à plusieurs localisations dans le milieu interplanétaire, et bien évidemment, l'apport des nouvelles sondes d'exploration de l'héliosphère interne: Parker Solar Probe et Solar Orbiter.

Structure des CMEs

Les observations par des coronographes montrent que les CMEs peuvent être typiquement décomposées en trois parties, comme le montre la Figure 3.2 (voir aussi Fisher, Garcia, and Seagraves, 1981; Kilpua, Koskinen, and Pulkkinen, 2017). Dans cette figure, on aperçoit un front de densité lumineuse importante, que l'on explique généralement par un front de compression de plasma due à l'éjection de la structure dans le vent solaire et à la formation d'un choc en amont de la structure (Sheeley et al., 1999). Celle-ci est suivie par une cavité, identifiée comme la structure magnétique (Low, 1994), c'est-à-dire le tube de flux torsadé dont j'ai longuement parlé dans la Section 2.2.3 du Chapitre 2. Enfin, on voit à nouveau une émission lumineuse importante en aval de la cavité, correspondant à du plasma froid car émettant dans la raie $H\alpha$ de l'hydrogène, et identifiée comme étant le matériel de la protubérance.

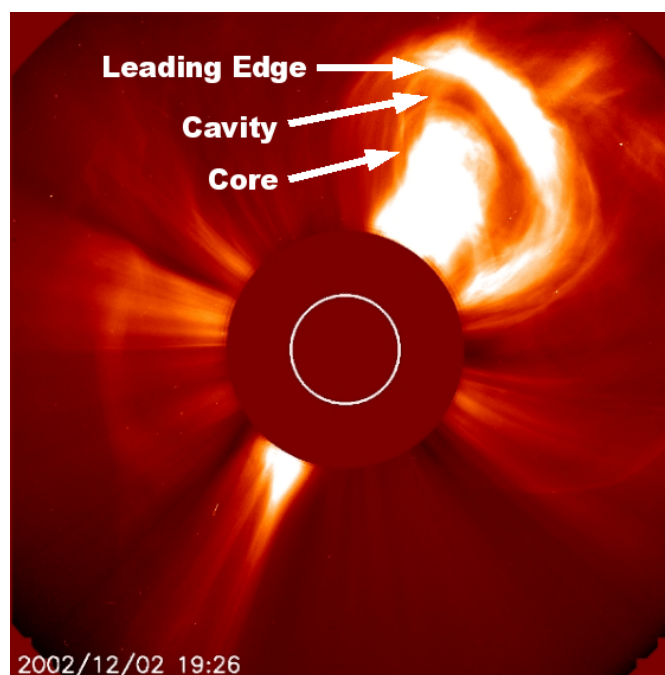


FIGURE 3.2: Une vue typique en trois parties d'une CME vue par le coronographe C2 de SOHO/LASCO. Celle-ci montre le front de surdensité marqué par un embrillancement important en lumière blanche, suivie d'une partie plus sombre identifiée comme une cavité magnétique, puis un coeur de plasma plutôt froid, généralement relié à la protubérance en éruption.

Détection des chocs interplanétaires

La présence de chocs interplanétaires, notamment proches du Soleil, a été suggérée pour expliquer les observations radio des bursts dits de type II (Uchida, 1960), ainsi que la présence de particules énergétiques. L'association de ces chocs avec des CMEs est démontrée en premier lieu par Kahler, Hildner, and Van Hollebeke, 1978 qui examineront 18 CMEs, observées par Skylab, et événements à protons observés par IMP-7. L'étude de Sheeley et al., 1985 révélera ensuite que presque tous les chocs interplanétaires sont associés à des CMEs proches du Soleil, confirmant l'étude de cas de Gosling et al., 1975. Les chocs associés aux CMEs sont maintenant observés de manière routinière dans les coronagraphes en lumière blanche et UV, permettant d'obtenir des paramètres physiques directement à partir des observations (e.g. Bemporad, Susino, and Lapenta, 2014).

3.1.2 Observations directes dans le vent solaire

Premières détections et caractéristiques

La détection directe d'un choc interplanétaire a été effectuée pour la première fois avec la mission Mariner 2 le 7 octobre 1962. Cette détection a été accompagnée quelques heures plus tard par une tempête géomagnétique terrestre (Sonett et al., 1964), démontrant l'influence des événements interplanétaires sur l'environnant spatial de la Terre. Quelques années plus tôt, Morrison, 1956 avait avancé l'hypothèse selon laquelle la modulation des rayons cosmiques, notamment leur diminution sporadique (appelée décroissance de Forbush, d'après Forbush, 1954) était liée à l'arrivée à la Terre de gros nuages de gaz ionisés et magnétisés éjectés depuis le Soleil. Le concept de "nuage magnétique" sera affiné par Parker, 1957b pour décrire des structures magnétisées à grande échelle se mouvant dans le vent solaire. Il faudra attendre Burlaga et al., 1981 et Klein and Burlaga, 1982 pour qu'une définition plus concrète des nuages magnétiques soit donnée: en utilisant le plasma et le champ magnétique de 5 sondes spatiales (Helios 1,2 IMP-8, Voyager 1,2), les nuages magnétiques ont été définis comme des structures de tube de flux torsadé avec un champ magnétique cohérent, dont l'intensité est plus importante que celle du vent solaire ambiant, possédant une rotation lisse du vecteur champ magnétique, et une température des protons plus basse que celle du vent solaire. Dans la suite, par souci de simplicité, nous écriront l'abréviation des nuages magnétiques "MCs" (pour magnetic clouds, l'expression anglaise des nuages magnétiques). Les auteurs identifieront également la région entre le choc et l'éjecta magnétique comme étant une gaine, où le plasma est turbulent et chaud, comprimé par le choc et constitué d'un champ magnétique très variable.

Les caractéristiques des ICMEs dans leur ensemble vont s'affiner au fur et à mesure des données accessibles: Fenimore, 1980 montrera que celles-ci peuvent être associées à des états d'ionisation anormalement élevés, comme mesurés par les spectres d'ions lourds du vent solaire. Hirshberg, Asbridge, and Robbins, 1971 puis Borrini et al., 1982 constateront que certaines perturbations pour lesquelles le rapport d'hélium sur hydrogène dépassait 15% sont fortement associées à de grandes éruptions solaires. Ils interpréteront l'apparition soudaine d'un plasma riche en hélium comme l'arrivée de gaz éjecté depuis la chromosphère grâce à un flare éruptif. Ces perturbations sont détectées environ 0.1 ua derrière le choc, et pourraient servir de piston mobile responsable de la formation du choc interplanétaire. Les ICMEs permettent ainsi de transporter du plasma solaire riche en hélium jusque dans le système solaire.

Enfin, Gosling et al., 1987 montreront que certaines ICMEs peuvent être associées à des faisceaux d'électrons suprathermiques (> 80 eV) qui se propagent à la fois le long

et en direction inverse du champ magnétique, indiquant que les deux pieds des ICMEs peuvent être encore connectés au Soleil.

La plupart de ces premières observations sont revues plus en détail dans Zurbuchen and Richardson, 2006; Wimmer-Schweingruber et al., 2006. Une schématisation des ICMEs est reportée dans la Figure 3.3.

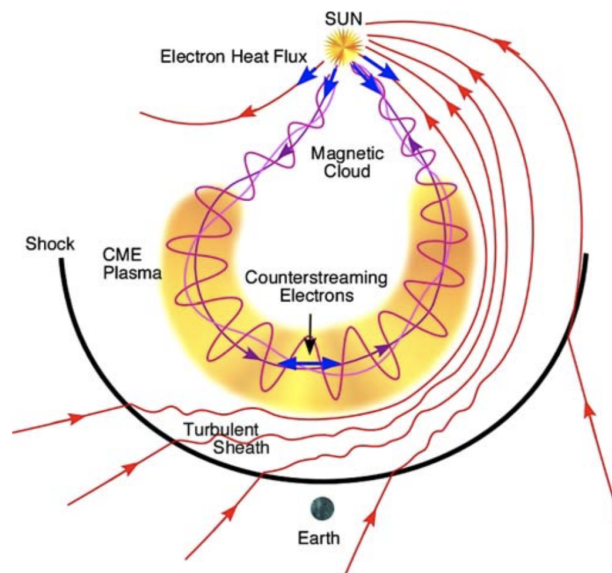


FIGURE 3.3: Schéma d'une ICME reprenant les différentes caractéristiques observationnelles de celles-ci. On retrouve le front de choc délimité en noir, suivi de la gaine turbulente correspondant à du vent solaire compressé, en amont de l'éjecta magnétique en forme de tube de flux twisté. D'après Zurbuchen and Richardson, 2006.

Je conclus cette section en enjoignant les lecteurs et lectrices intéressé.es par le contexte historique sur les CMEs à lire les nombreuses revues écrites (Kahler, 1992; Gosling, 1997; Howard, 2006; Webb and Howard, 2012; Gopalswamy, 2016; Kilpua, Koskinen, and Pulkkinen, 2017).

Difficultés d'obtention d'un modèle tridimensionnel à partir des observations.

Malgré les nombreuses observations des CMEs et de leur contrepartie interplanétaire, il reste extrêmement difficile d'appréhender leur structure tridimensionnelle.

D'une part, bien que les observations de télédétection comme les coronographes et les imageurs héliosphériques permettent d'étudier les formes des CMEs proches du Soleil, la composition ténue en plasma rend difficiles leurs observations. Par ailleurs, l'expansion soudaine des ICMEs diminue leur intensité lumineuse, contraignant fortement les observations le long de leur propagation. Ces observations sont aussi limitées du fait des effets de projection. Même si les CMEs émises depuis le limbe du Soleil peuvent être relativement bien caractérisées, il n'en va pas de même des CMEs émises le long de la ligne de visée des imageurs (alors appelées "halos" CMEs). Enfin, les observations in situ sont fortement localisées, puisque les observations sont faites loin du Soleil, et le long de la trajectoire de la sonde. Ainsi, le parcours jusqu'à l'obtention d'un modèle quantitatif, archétype des ICMEs, est semé d'embûches. Pourtant, c'est ce sur quoi le travail que je présente dans ce chapitre repose.

Nous verrons dans un premier temps l'utilisation de statistiques sur des paramètres géométriques pour trouver, entre autres, la forme quantitative de l'axe des nuages magnétiques et des chocs interplanétaires. Une autre méthode statistique dite d'époques superposées sera également introduite, permettant de définir des profils d'ICMEs obtenus par interaction variée avec le vent solaire, et leur rôle dans la décroissance de Forbush. Nous verrons enfin d'autres études traitant des modèles d'ajustement paramétrique sur les formes de MCs, ou la recherche de la cause des profils asymétriques de ceux-ci.

3.2 Formes génériques de l'axe des nuages magnétiques et des chocs d'ICMEs

Cette partie introduit les travaux des papiers suivants: Janvier, Démoulin, and Dasso, 2013; Janvier, Démoulin, and Dasso, 2014c; Janvier et al., 2015; Démoulin et al., 2016.

3.2.1 Motivations derrière les études statistiques des ICMEs

Pourquoi s'intéresser aux MCs?

Les éjectas magnétiques des ICMEs peuvent être structurés par des nuages magnétiques ou tubes de flux magnétique torsadés. Nous avons vu dans le Chapitre 2 que les instabilités à l'origine des CMEs ont pour clé ces structures magnétiques torsadées. Sonder leur géométrie permettrait ainsi de remonter le fil des événements, depuis leur formation dans la couronne solaire, à leur propagation dans le milieu interplanétaire.

Les observations des tubes de flux torsadés dans la couronne solaire sont limitées: la température de la couronne, de plusieurs millions de Kelvin, élargit les raies, le champ magnétique y décroît, diminuant la séparation Zeeman dont on se sert pour mesurer l'intensité du champ magnétique. Par ailleurs, la couronne solaire est un milieu optiquement mince, rajoutant une difficulté aux mesures.

En revanche, ces structures magnétiques peuvent être traversées par des sondes interplanétaires, permettant des mesures directes du champ magnétique et des paramètres plasma. Les contraintes observationnelles apportées par ces mesures permettent alors de sonder ces structures. Connaître la structure des nuages magnétiques et, de manière générale, les sous-structures des ICMEs, permet de contraindre les modèles d'évolution dans le milieu interplanétaire, et donc leurs évolutions intrinsèques et leurs dynamiques dans le vent solaire. Mais aussi, la mesure des champs magnétiques permet de remonter à des bilans tels que ceux du flux, de l'énergie et de l'hélicité magnétique. Cela permettrait de comprendre leur transport du Soleil à l'héliosphère. Enfin, la connaissance du champ magnétique donne accès à une meilleure connaissance sur la propagation des particules chargées au sein de ces structures.

De l'importance d'avoir des formes génériques du choc

De même, connaître la forme du choc qui précède certaines ICMEs a son importance. D'une part, nous avons vu que les chocs sont un des endroits privilégiés pour accélérer les particules (e.g. bursts de type II). Du fait de l'extension des chocs interplanétaires, connaître leur forme permettrait de comprendre comment des événements et/ou leurs conséquences (e.g. événements géomagnétiques sur Terre) peuvent être détectés à des localisations différentes dans le système solaire (par exemple, avec des sondes positionnées à des points de l'espace différents). Enfin, connaître l'évolution de la forme

du choc lors de la propagation des ICMEs permettrait de mieux appréhender le temps d'arrivée des ICMEs et leur impact possible, un élément essentiel pour la météorologie de l'espace.

Limitations des observations in situ

Nous l'avons vu précédemment, les observations in situ ont le bénéfice d'apporter une mesure physique directe du champ magnétique et du plasma, qui permettent ainsi de caractériser le passage dans une structure d'ICME. Différents modèles ont été proposés pour établir la structure interne des nuages magnétiques, par exemple les techniques dites de Minimum Variance (Sonnerup and Scheible, 1998), Grad Shafranov (voir la revue de Sonnerup et al., 2006), ou encore le modèle de Lundquist (Lundquist, 1950). Ces modèles permettent d'obtenir des paramètres de formes, comme par exemple le rayon de la section transverse du tube de flux torsadé, ainsi que l'orientation de l'axe de ces nuages. Cependant, ces modèles sont très peu contraints, et ont donc une grande incertitude, et ne permettent d'obtenir qu'une vision locale de la structure du tube de flux torsadé. Par ailleurs, les mesures in situ ne fournissent que la mesure le long de la trajectoire de la sonde à travers la structure 3D des nuages, et donc une vision très locale de la structure tridimensionnelle. Ainsi, il est estimé que seulement 1/3 des éjectas magnétiques sont associés à des nuages magnétiques, bien que cette estimation soit biaisée par l'endroit où l'éjecta a été traversé. Pour conclure, les données in situ sont également très incomplètes pour pouvoir obtenir des profils génériques 3D de formes d'ICMEs.

Comment remédier aux difficultés des observations que nous avons? Une solution serait de faire des études multi-points grâce à des sondes situées à des localisations différentes dans le système solaire. Cette approche peut par exemple être utilisée pour contraindre des modèles de propagation de CMEs grâce aux données de télédétection, notamment avec les sondes STEREO. Les sondes STEREO ont également pu servir à caractériser des événements qui ont été vus par les deux sondes ainsi que proche de la Terre par les sondes ACE et Wind (Farrugia et al., 2011; Ruffenach et al., 2012). Cependant, ces cas-là restent rares et ne permettant donc pas d'obtenir une connaissance sur la forme générique des nuages ou des chocs. Ce genre d'étude pourrait cependant être envisagé dans le futur notamment avec l'utilisation de constellation de satellites, mais reste à l'heure actuelle impossible pour obtenir une compréhension globale de la structure des ICMEs.

3.2.2 Utilisation de statistiques d'évènements

C'est dans ce contexte que nous avons proposé, avec mes collaborateurs, une nouvelle approche reposant sur des statistiques d'ICMEs. Ces statistiques sont nouvellement possibles du fait de la durée de certaines missions spatiales comme ACE (mission lancée en août 1997, en orbite stable autour du point de libration L1, Stone et al., 1998) ou Wind (mission lancée en novembre 1994, aussi en orbite autour de L1 depuis mai 2004, Harten and Clark, 1995). Ces missions nous ont permis de collecter des données du vent solaire sur des périodes aussi longues que deux décennies.

L'utilisation de statistiques sur les données spatiales n'est évidemment pas nouvelle. Certaines études utilisant par exemple le moyennage de certains paramètres ont permis de mieux contraindre certaines quantités physiques. C'est le cas par exemple de l'intensité moyenne et maximale du champ magnétique au sein des éjectas avec la distance au Soleil (voir e.g. un résumé dans la Figure 3 de Winslow et al., 2015, et les différents modèles d'évolution radiale de B). L'idée que nous avons proposée avec

mes collaborateurs est cependant nouvelle: nous avons en effet inversé l'idée d'une étude multi-point en considérant qu'une mission spatiale, au cours de son exploitation, aura croisé un très grand nombre d'évènements. Partant de l'hypothèse qu'il existe une forme générique (pour un choc par exemple, ce qui sera à vérifier), alors la collecte de données sur des ICMEs croisées à des endroits différents reviendrait à une étude multi-point par la même sonde.

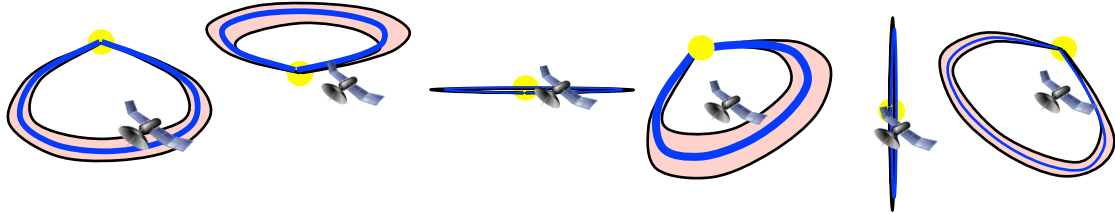


FIGURE 3.4: Au cours de plusieurs années de missions, une sonde interplanétaire aura croisé une multitude d'ICMEs à des localisations différentes. Cet échantillon est équivalent, s'il existe une forme générique, à croiser une ICME par une multitude de sondes spatiales à plusieurs endroits de la structure.

Ainsi, il existe des catalogues d'évènements créés par la communauté, qui réperforient par exemple: la détection de CMEs dans les données de coronographes (CACTUS², CDAW³), des listes d'évènements à la fois solaires et interplanétaires (le consortium européen HELCATS⁴ (Möstl et al., 2017) en est un excellent exemple), des listes d'évènements comme les ICMEs (liste de Richardson & Cane⁵ (Richardson and Cane, 2010) ou spécifiquement des nuages magnétiques (liste de Lepping⁶ (Lepping, Burlaga, and Jones, 1990)) ou de chocs interplanétaires⁷ (Kilpua et al., 2015)). Dans mes études, le premier parti pris a été, pour des raisons d'efficacité, de reprendre simplement ces catalogues. Dans un deuxième temps, un travail a été effectué avec mes étudiants pour affiner certains de ces catalogues.

3.2.3 Définition des paramètres géométriques nécessaires à l'étude

Proxy de la forme globale des structures

Toutes les études présentées ci-après reposent sur l'idée qu'il existe des paramètres intrinsèquement liés à la géométrie des structures étudiées. Ces paramètres peuvent être déduits des données récoltées par les sondes. C'est le cas par exemple du paramètre d'impact p qui mesure la plus petite distance (normalisée par le rayon) entre le coeur du nuage magnétique et la sonde interplanétaire lors de la traversée de celle-ci. Ce paramètre est obtenu grâce aux modèles d'ajustement des données, et est généralement donné dans les tables de nuages magnétiques (e.g. table de Lepping⁸). D'autres paramètres peuvent être introduits (voir ci-après). Ainsi, en partant d'une hypothèse, simple mais importante, que toutes les éjections coronales de masse ont une forme

²<http://sidc.oma.be/cactus/>

³<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/index.html/>

⁴<https://www.helcats-fp7.eu>

⁵<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>

⁶https://wind.nasa.gov/mfi/mag_cloud_pub1.html

⁷<http://ipshocks.fi>

⁸https://wind.nasa.gov/mfi/mag_cloud_pub1.html (Lepping, Burlaga, and Jones, 1990)

géométrique similaire, alors du fait des traversées aléatoires à n'importe quelles localisations des sous-structures des ICMEs, les distributions de ces paramètres géométriques peuvent nous donner une information sur la forme géométrique sous-jacente.

Les données des coronographes sur les CMEs nous donnent déjà une idée de la forme géométrique que pourraient prendre les chocs des ICMEs et leur nuage magnétique: une forme elliptique, en forme de goutte. Il s'agit ainsi de trouver un paramètre géométrique dont la distribution peut être directement indicatrice de la forme de la structure étudiée.

Dans le cas des nuages magnétiques, l'axe peut être un bon proxy pour la géométrie globale de la sous-structure. La forme de l'axe est aussi similaire au choc, bien que le choc soit une structure 2D. Si l'axe et/ou le choc ont une géométrie en ligne/surface droite, cela voudrait dire qu'une sonde aurait autant de chance de détecter le nez que les ailes de ces structures. Cette "chance", ou probabilité de détection, serait ainsi uniforme. Inversement, une géométrie non droite mais courbée (ou autre), impliquerait une différence dans la probabilité de détection du nez ou des ailes de ces structures.

Angles de localisation λ et d'inclinaison i

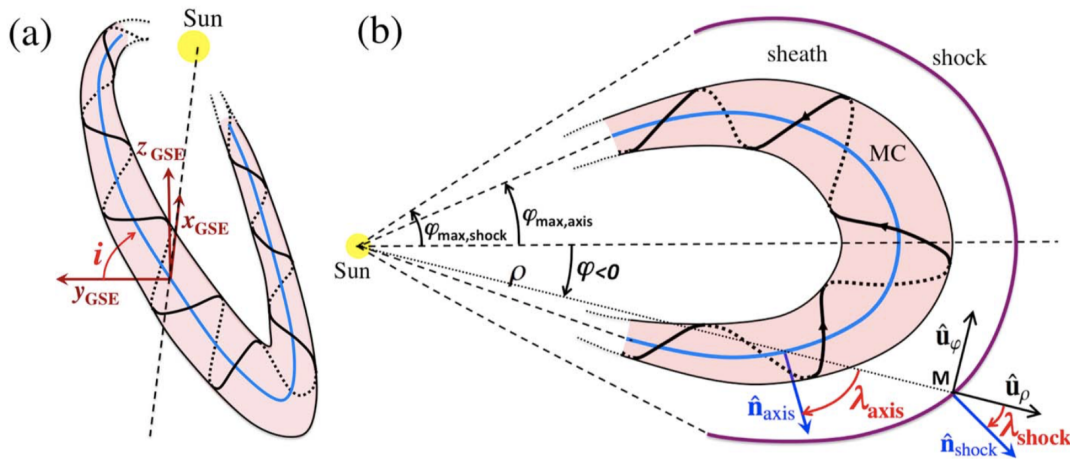


FIGURE 3.5: Diagramme d'un nuage magnétique et des paramètres associés: (a) vue en perspective, (b) vue de côté. L'axe du MC est indiqué en couleur bleue, ses frontières en noires représentant le contour torsadé du tube de flux magnétique. Les angles d'inclinaison i et de localisation λ sont définis dans 3.2.3. L'angle φ_{\max} est défini comme l'étendue angulaire maximale du nuage ou du choc. D'après Janvier et al., 2015.

Il convient donc de bien définir des paramètres géométriques. Dans le cas des nuages magnétiques, par exemple, dans le catalogue de Lepping, on trouve deux paramètres d'orientation, la latitude θ et la longitude φ . Cependant, l'axe polaire de ces coordonnées (correspondant à $\theta = 90^\circ$) représente une singularité, puisqu'elle correspond à n'importe quelle valeur de φ . Cette axe est le même que l'axe z_{GSE} en coordonnées GSE: l'axe d'un nuage peut très bien être orienté le long de cette direction, contraignant alors très peu la longitude et rendant caduque l'utilisation de ces deux angles.

Nous avons alors introduit deux nouveaux paramètres représenté dans la Figure 3.5: l'angle d'inclinaison i , qui permet de savoir si l'axe du nuage est orienté dans la direction Nord-Sud, Est-Ouest ou entre les deux, et l'angle de localisation λ qui permet directement de savoir si l'axe du nuage est croisé à l'apex de la structure ($\lambda=0$) ou loin

de celui-ci ($|\lambda| \gg 0$). L'angle d'inclinaison i est donc défini comme étant l'angle entre l'axe y et l'axe du nuage projeté sur le plan $y-z$ (en coordonnées GSE). L'angle de localisation λ est défini par l'angle entre la direction radiale depuis le Soleil et la normale à l'axe du MC. Ces deux quantités sont directement reliées à la latitude et la longitude par les équations suivantes:

$$\sin \lambda = -\cos \varphi \cos \theta \quad (3.1)$$

$$\tan i = \tan \theta / |\sin \varphi| \quad (3.2)$$

Ces deux paramètres permettent également de définir l'axe de la normale au choc (Figure 3.5, panneau b). Ainsi, nous avons introduit de nouveaux paramètres qui nous permettent directement de savoir où la structure (ici l'axe du nuage magnétique ou le choc) a été croisée.

3.2.4 Corrélations entre les paramètres physiques et l'angle de localisation λ

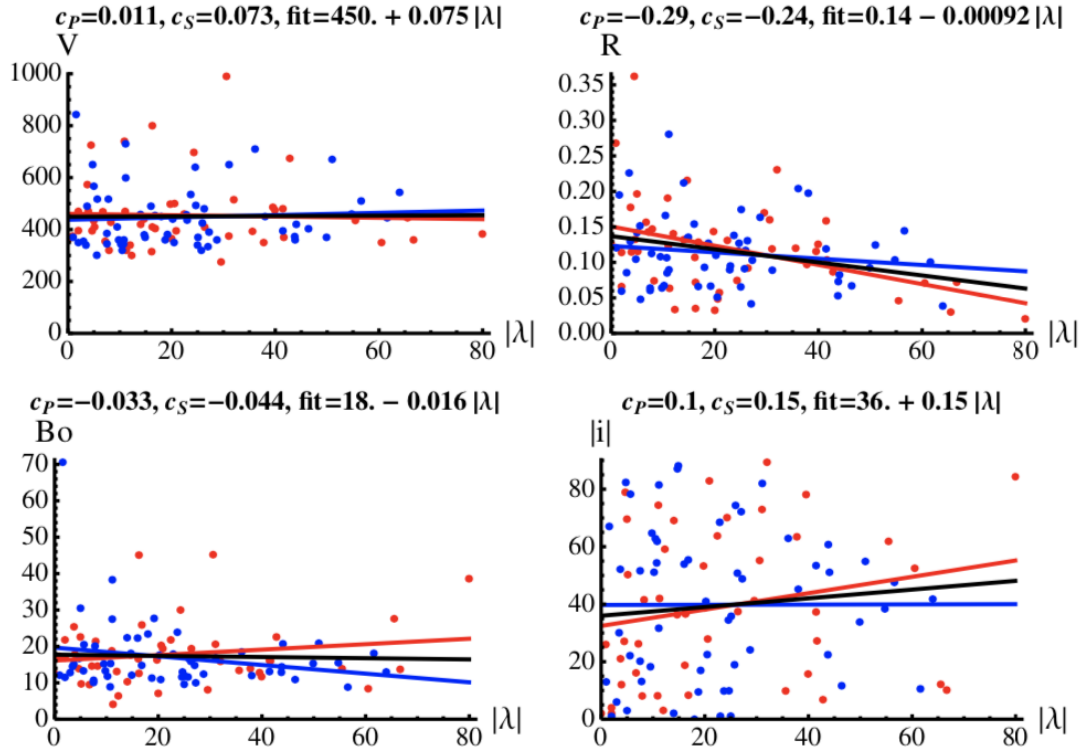


FIGURE 3.6: Propriétés de paramètres physiques pour les MCs observés à 1 ua en fonction de l'angle de localisation λ . Les paramètres physiques sont: la vitesse moyenne du MC (en km/s), le rayon du MC (R en ua), l'intensité du champ magnétique axial (B_0 en nT), et l'angle d'inclinaison i (en degrés). Les valeurs pour $\lambda > 0$ et $\lambda < 0$ sont montrées respectivement en rouge et bleu, et l'abscisse $|\lambda|$ permet de comparer les deux parties du MC. Les lignes droites sont les ajustements aux points de données, avec la ligne noire l'ajustement sur tous les nuages. Enfin, les coefficients de Pearson et Spearman, c_P et c_S sont également donnés. D'après Janvier, Démoulin, and Dasso, 2013.

Pour les nuages magnétiques comme pour les chocs interplanétaires, la connaissance de l'angle de localisation λ nous permet d'étudier l'évolution de paramètres physiques le long de l'axe des MCs et/ou du choc.

En particulier, pour les nuages magnétiques, nous nous sommes intéressés à la corrélation de plusieurs paramètres comme la vitesse moyenne du nuage, le rayon du tube de flux torsadé, ou encore l'intensité du champ magnétique axial, et λ . Ces résultats sont reproduits dans la Figure 3.6: les coefficients de corrélation Pearson et Spearman montrent qu'aucun de ces paramètres n'est corrélé avec λ (ni avec l'angle d'orientation, comme montré dans la Fig. 3 de Janvier, Démoulin, and Dasso (2013)). Ces résultats montrent d'une part que les pieds des nuages ($|\lambda|$ grand) se comportent de manière similaire et d'autre part que les propriétés des nuages sont statistiquement indépendants de l'orientation de l'axe.

La même approche a été reproduite pour les chocs interplanétaires, pour lesquels nous avons étudié la corrélation des ratios de paramètres en amont et en aval du choc, comme présenté dans la Figure 3.7. Dans cette figure, nous avons présenté les résultats des corrélations pour des chocs interplanétaires avec ou sans ICMEs détectées: les résultats montrent qu'il n'y a pas de différence entre ces deux catégories (ce que nous avons interprété comme étant dû au fait que la plupart des chocs interplanétaires à 1 ua sont sûrement créés par une CME, mais que celle-ci n'est pas forcément détectée en aval du choc). Par ailleurs, aucun des paramètres étudiés (en plus du ratio des densités, nous avons également regardé les corrélations avec le nombre de Mach, le ratio des températures) ne montre de corrélation, sauf pour la vitesse du choc V_{SN} . Cette corrélation peut s'expliquer par la géométrie des chocs: en estimant une symétrie de rotation autour de l'axe Soleil-apex du choc, la vitesse normale au front du choc V_{SN} est reliée à la vitesse radiale locale V_ρ , par la relation $V_{SN} = V_\rho \cos \lambda$. Dans la Figure 3.7, cette relation est indiquée avec la ligne pointillée verte, confirmant bien son accord avec les observations.

Les résultats pour les chocs ont été récemment étendus dans une nouvelle étude (Perez-Alanis et al, *en préparation*), dans laquelle nous avons étudié plusieurs catalogues de chocs interplanétaires à 1 ua d'après les données des missions ACE, Wind, et STEREO-A et B, confirmant que les paramètres physiques (i.e. ratios amont/aval) des chocs ne dépendent pas de l'orientation de ceux-ci.

Par ailleurs, l'étude de ces corrélations permet de voir si l'on peut étudier notre échantillon de MCs ou de chocs interplanétaires dans leur entièreté, ou si l'on doit séparer des sous-groupes dans le cas où les corrélations montreraient une dépendance avec l'endroit où les structures ont été croisées. Le fait de n'avoir pas trouvé de corrélations entre λ et d'autres paramètres est très satisfaisant, car cela veut dire que d'autres paramètres intrinsèques des nuages ne favorisent pas la détection de nuages à tel ou tel λ .

3.2.5 Détermination de la géométrie des structures d'après les distributions observées

Distributions de i et λ

En prenant différents catalogues de MCs et de chocs interplanétaires, nous avons montré que le paramètre i a une distribution pratiquement uniforme (voir Figure 3 dans Janvier et al., 2015). Ce paramètre est également robuste d'un catalogue à un autre: nous avons pu comparer des événements reportés dans plusieurs catalogues et avons montré que l'écart des valeurs de i est très petit. Le fait de trouver une distribution

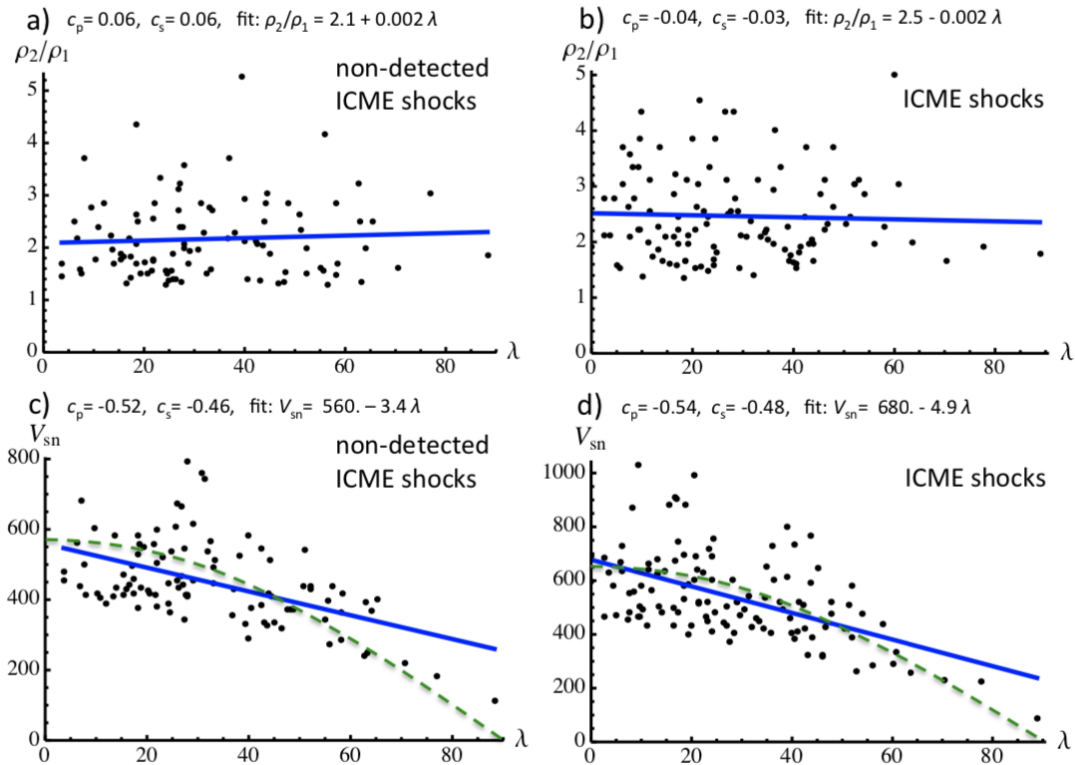


FIGURE 3.7: Propriétés de ratios de paramètres physiques en amont et en aval des chocs interplanétaires pour les chocs sans ICMEs détectées (colonne de gauche) et pour les chocs avec ICMEs (colonne de droite). Les paramètres physiques présentés ici sont: le ratio des densités (première ligne), la vitesse du choc V_{SN} (deuxième ligne), donc la tendance est compatible avec $V_{SN} = \cos \lambda$. D'après Janvier, Démoulin, and Dasso, 2014c.

uniforme de ce paramètre montre qu'il n'y a pas d'orientation privilégiée dans la propagation des nuages magnétiques et des chocs interplanétaires: la normale à l'axe ou au choc peut aussi bien être inclinée dans la direction N-S, E-O ou entre les deux.

De la même manière, nous avons étudié la distribution du paramètre λ , qui n'est quant à elle pas uniforme, comme le montre la Figure 3.8. Cette non-uniformité est différente pour les nuages magnétiques (première ligne) comparée aux chocs interplanétaires (deuxième ligne): dans le premier cas, la distribution est maximale à $\lambda = 0^\circ$ et est uniformément décroissante, tandis que pour les chocs, la distribution est asymétrique, et piquée vers les 20° .

C'est une quantité qui est aussi moins robuste que l'orientation i , puisque nous avons trouvé un assez grand écart entre des événements reportés dans plusieurs catalogues, comparé au paramètre i (voir Figure 2 dans Janvier et al., 2015). Récemment, nous avons lancé une étude avec un étudiant, Carlos Perez-Alani (Mexique, sous la tutelle de Teresa Nieves-Chinchilla, Goddard Space Flight Center aux E-U), sur un catalogue de chocs interplanétaires détectés à différentes distances héliosphériques, depuis les missions Helios à Ulysses, donc entre 0.3 ua et 5 ua (orbite de Jupiter). Nous avons trouvé que les chocs conservent leurs caractéristiques de ratio de paramètres en amont et en aval du choc et de la géométrie (forme de la distribution de λ).

Ces résultats sont importants, car ils montrent d'une part que d'un catalogue à un autre, et de papiers à d'autres, les distributions de ces paramètres de géométrie sont relativement similaires, prouvant la robustesse des observations et des méthodes

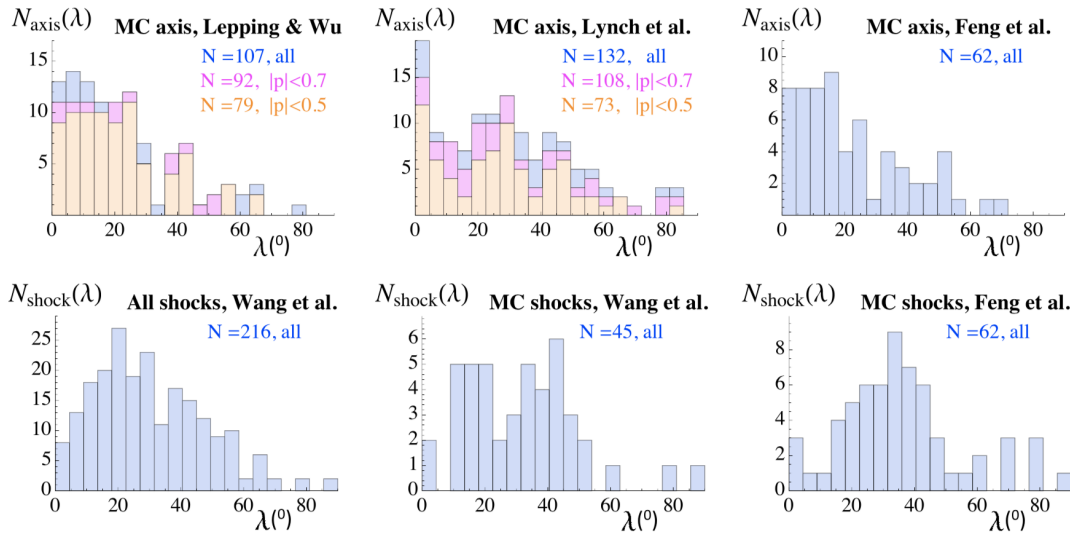


FIGURE 3.8: Distributions du paramètre λ pour des catalogues de nuages magnétiques ou de chocs interplanétaires différents. On peut voir que ces distributions sont non uniformes, contrairement à la distribution du paramètre d'orientation i . D'après Janvier et al., 2015.

d'ajustement permettant d'obtenir ces paramètres. D'autre part, le fait de trouver une distribution non uniforme du paramètre de localisation λ indique que notre hypothèse de départ est vérifiée: la géométrie de l'axe des nuages et de chocs interplanétaires n'est pas "droite". Reste maintenant à trouver cette géométrie.

Méthodes d'ajustement des distributions

Maintenant que nous avons trouvé les distributions de l'angle de localisation pour les chocs et MCs, nous pouvons ajuster ces distributions à des distributions synthétiques trouvées à partir de modèles analytiques. Nous inspirant des données, en particulier des images coronagraphiques, nous avons introduit dans Janvier, Démoulin, and Dasso, 2013 pour les nuages magnétiques un modèle ellipsoïdal, puis pour les chocs interplanétaires dans Janvier, Démoulin, and Dasso, 2014c un modèle en cosinus. Enfin, ces deux modèles ont été comparés avec le modèle de Wood (voir e.g. Wood et al., 2009) dans l'étude de Janvier et al., 2015. Je ne présente pas celui-ci, car les résultats de la distribution de cette forme sont en inadéquation complète avec les distributions observées (voir Figure 5 dans Janvier et al., 2015).

Pour rappel, le modèle en cosinus permet d'obtenir l'expression de la probabilité synthétique suivante:

$$P_c(\lambda) = P_\varphi(\varphi_c) \frac{n(1 + \tan^2 \lambda)}{(nf)^2 + \tan^2 \lambda} \quad (3.3)$$

$$\text{avec } \varphi_c(\lambda) = \frac{1}{f} \tan^{-1} \left(\frac{\tan \lambda}{nf} \right) \quad (3.4)$$

Les distributions dépendent donc fortement de deux paramètres, n et f , qui changent l'ellipsité de la forme (voir Figure 3.9, 1ère colonne). La probabilité synthétique du modèle ellipsoïdal s'exprime de la manière suivante:

$$P_e(\lambda) = P_\varphi(\varphi_e) / |d\lambda/d\varphi| \quad (3.5)$$

$$\text{avec } \frac{d\lambda}{d\varphi} = -1 + \frac{1 + \tan^2 \delta}{1 + (a/b)^2 \tan^2 \delta} \frac{a}{b \cos \varphi_e} \frac{d + a \cos \delta}{a \sin \delta \sin \varphi_e + b \cos \delta \cos \varphi_e} \quad (3.6)$$

où l'on obtient ainsi une probabilité $P_e(\lambda)$ directement reliée au paramètre b/a , représentant le rapport d'aspect entre le demi-grand axe de l'ellipse b et le demi-petit axe a . En jouant sur ce rapport d'aspect, on obtient alors des profils plus ou moins circulaires (voir Figure 3.9).

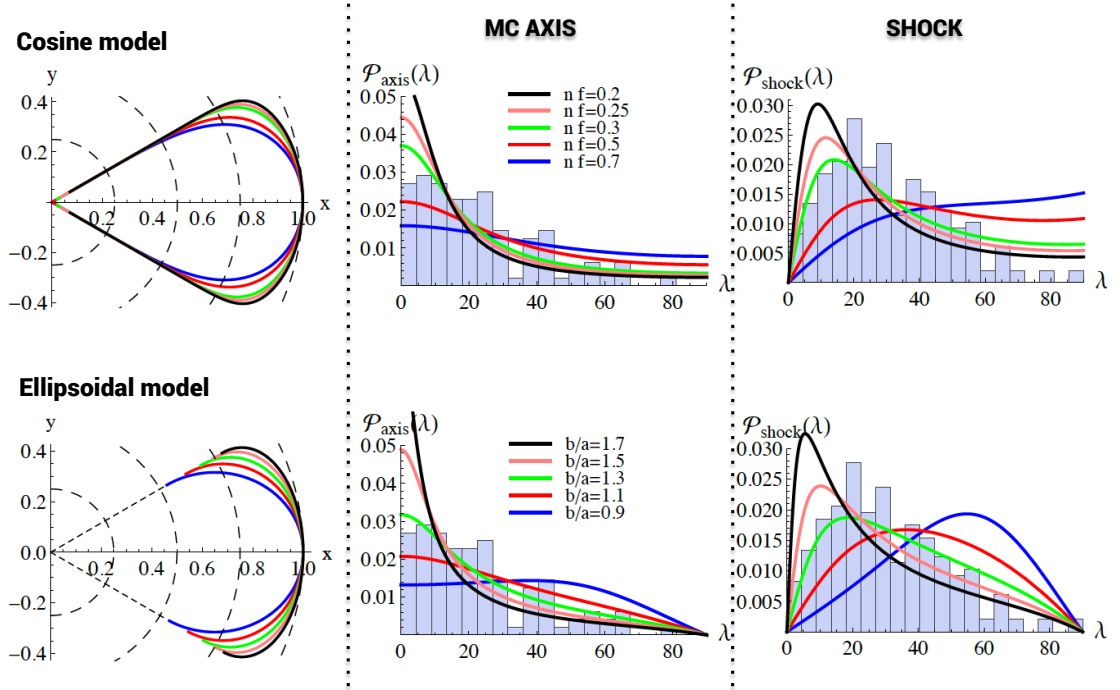


FIGURE 3.9: Comparaisons des deux modèles, le modèle en cosinus (première ligne) et le modèle ellipsoïdal (deuxième ligne). La première colonne montre la forme géométrique associée aux deux modèles, avec changement du paramètre nf ou b/a , qui permettent d'ajuster l'ellipsité de la forme. Dans la deuxième colonne, les distributions synthétiques et observées sont reportées pour les nuages magnétiques, tandis que dans la troisième la comparaison est faite pour les distributions observées pour les chocs interplanétaires. D'après Janvier et al., 2015.

Dans cette figure, nous avons reporté les probabilités synthétiques pour plusieurs paramètres nf (modèle en cosinus) et b/a (modèle ellipsoïdal), afin de comparer directement aux distributions observées (histogrammes en bleu) du paramètre de localisation pour les MCs et les chocs. Enfin, nous avons procédé aux calculs de la minimisation entre les modèles synthétiques et les distributions, permettant d'obtenir les meilleurs ajustements des histogrammes avec les probabilités synthétiques. Ces résultats sont donnés dans la Table 1 de Janvier et al., 2015, et résumés comme suit: les meilleurs minimisations sont obtenues, tant pour les nuages magnétiques que pour les chocs, et sur tous les catalogues, avec le modèle ellipsoïdal (même si l'écart reste faible avec le modèle en cosinus). Par ailleurs, nous trouvons que le rapport d'aspect le meilleur, c'est-à-dire avec la plus grande minimisation, est de l'ordre de $b/a = 1.3$ pour

les nuages magnétiques, et plutôt de l'ordre de $b/a = 1.4$ pour les chocs interplanétaires.

En conclusion, ces études montrent l'apport des statistiques pour obtenir les formes génériques des ICMEs. Nous avons vu, en particulier, que l'axe des nuages magnétiques, et la forme des chocs, pouvaient être représentés par une forme ellipsoïdale de rapport d'aspect 1.3-1.4. Ces résultats peuvent notamment servir à contraindre des modèles de propagation de CMEs. Par exemple, dans l'article de Möstl et al., 2015, nous avons proposé la toute première analyse multi-instrument de la propagation d'un choc interplanétaire d'une ICME dans le vent solaire grâce à des sondes interplanétaires, ainsi que par les instruments Mars Express et Curiosity à son arrivée à Mars. Cet événement est aussi détecté au Soleil et proche de la Terre. Dans cette étude, nous avons utilisé un modèle cinématique (Ellipse Evolution) pour comprendre comment le choc a pu être détecté à la fois à la Terre et à Mars. L'un des paramètres de ce modèle étant la forme du choc de l'ICME, nous avons pu ainsi contraindre le rapport d'aspect du choc par la valeur la plus typique de 1.4 trouvée dans Janvier et al., 2015. L'application du modèle cinématique aura permis de prédire l'heure d'arrivée, la vitesse et la forme du choc à sa détection aux planètes Terre et Mars.

3.2.6 Extension des études statistiques

Formes globales des ICMEs

Nous venons de voir que l'utilisation de catalogues de données, et en particulier de paramètres de formes comme les angles de localisation et d'orientation, permettait d'obtenir les formes géométriques les plus typiques des ICMEs. Cette même approche a été utilisée pour comprendre la distribution observée des paramètres d'impact p obtenus lors de la détection des nuages magnétiques. Ce paramètre mesure la distance normalisée entre l'axe des nuages et le passage de la sonde au plus proche de l'axe. Lepping and Wu, 2010 ont montré que la distribution de ce paramètre est une fonction décroissante. Cependant, la détection des nuages pouvant se faire de manière aléatoire, il semblerait plus juste que cette distribution soit normalement plate. Dans l'article de Démoulin, Dasso, and Janvier, 2013, nous avons pu montrer que cette distribution pouvait être expliquée par le fait que les nuages magnétiques n'ont pas véritablement de forme circulaire, mais plus allongée, aplatie d'un facteur 2 voire 3.

Par ailleurs, l'introduction du paramètre de localisation λ présenté plus haut permet d'étendre les études statistiques en permettant l'analyse des changements physiques le long des structures (chocs ou axe du tube de flux torsadé). Par exemple, dans Démoulin et al., 2016, nous nous sommes intéressés à l'épaisseur de la gaine qui se trouve entre le choc et l'éjecta magnétique. Nous avons montré que celle-ci n'avait aucune tendance globale le long du front de l'ICME: la gaine est ainsi relativement uniforme le long de $|\lambda|$ croissant. En regroupant tous ces nouveaux résultats et ceux de nos articles précédents, nous avons proposé une forme 3D générique quantitative des ICMEs, incluant la forme globale du choc, de la gaine et du tube de flux torsadé, que j'ai reproduite dans la Figure 3.10.

Cette forme générique quantitative des ICMEs permet de contraindre les formes obtenues par des modèles (analytiques ou numériques). C'est aussi une base pour étudier le transport de particules solaires lors des propagations d'ICME (par exemple, la connaissance de la forme du choc dans l'accélération des particules énergétiques), ainsi que pour la prédiction des ICMEs pouvant impacter la Terre, dans le contexte de la météorologie spatiale.

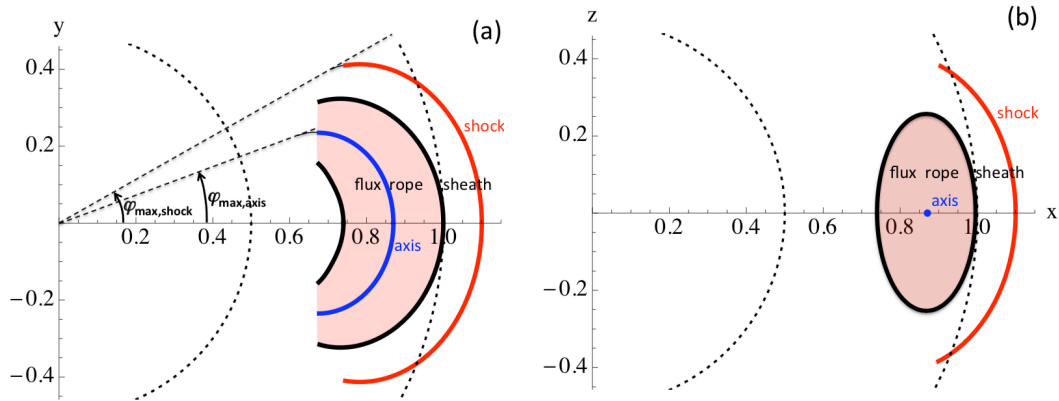


FIGURE 3.10: Obtention de la forme générique des ICMEs d'après nos études statistiques. Panneau a: vue au-dessus du plan contenant l'axe du tube de flux magnétique. On retrouve ici la forme générique en ellipsoïde pour le choc (en rouge) et l'axe du tube de flux magnétique (en bleu) et dont les rapports d'aspect typiques de 1.3-1.4 ont été trouvés par la série d'articles Janvier et al., 2013; Janvier et al., 2014; Janvier et al., 2015, ainsi que l'épaisseur de la gaine quasi-uniforme le long du front de choc (d'après Démoulin et al., 2016). Panneau b: on voit ici une coupe transverse au plan contenant l'axe du tube de flux magnétique. On retrouve la forme ellipsoïdale du choc, ainsi que la forme allongée de la section transverse du tube de flux, trouvée dans Démoulin, Dasso, and Janvier, 2013. D'après Démoulin et al., 2016.

Petits tubes de flux torsadés

Nous avons vu que les nuages magnétiques étaient des structures relativement bien identifiées dans le vent solaire. Cependant, certaines détections in situ montrent également la présence de tubes de flux torsadés, généralement de plus petite taille, et dont les caractéristiques identifiées ne suivent pas forcément celles attendues par les nuages magnétiques. Par exemple, certains de ces tubes de flux n'ont pas une intensité magnétique aussi importante que celles des nuages, ou encore la température des protons n'est pas aussi basse que celle attendue dans les nuages magnétiques.

Se pose donc la question de savoir si ces petits tubes de flux torsadés (ci-après SFRs pour "small flux ropes") font partie d'une population différente de celle des nuages magnétiques. Dans nos deux études (Janvier, Démoulin, and Dasso, 2014a; Janvier, Démoulin, and Dasso, 2014b), nous avons comparé la distribution en taille de tous les tubes de flux torsadés (nuages magnétiques compris) issus de 4 catalogues de détection in situ, détectés sur plusieurs périodes temporelles, entre 1995 et 2009, par différentes sondes spatiales (Wind et ACE). Les listes données par plusieurs auteurs donnent également les différents paramètres des tubes de flux torsadés à partir d'un même modèle simple (linéaire et à géométrie cylindrique, voir Lundquist, 1950), permettant d'ajuster les données in situ. Nous avons pour cela construit une distribution répartissant uniformément les fluctuations statistiques sur la mesure des rayons des tubes de flux.

Ce faisant, nous avons constaté que les SFRs d'un rayon plus petit que 0.1 ua ont une distribution en taille en loi de puissance, contrairement aux nuages magnétiques représentés par une distribution piquée, de type gaussien. Ces deux distributions sont visibles dans la Figure 3.11, où les catalogues de Feng et al. (courbes verte et rouge) comprennent des SFRs, tandis que ceux de Lynch et al. et Lepping et Wu se concentrent sur les nuages magnétiques. Nous pouvons alors clairement voir que la partie gauche du graphique (coupée en deux par la ligne verticale pointillée) suit une distribution en

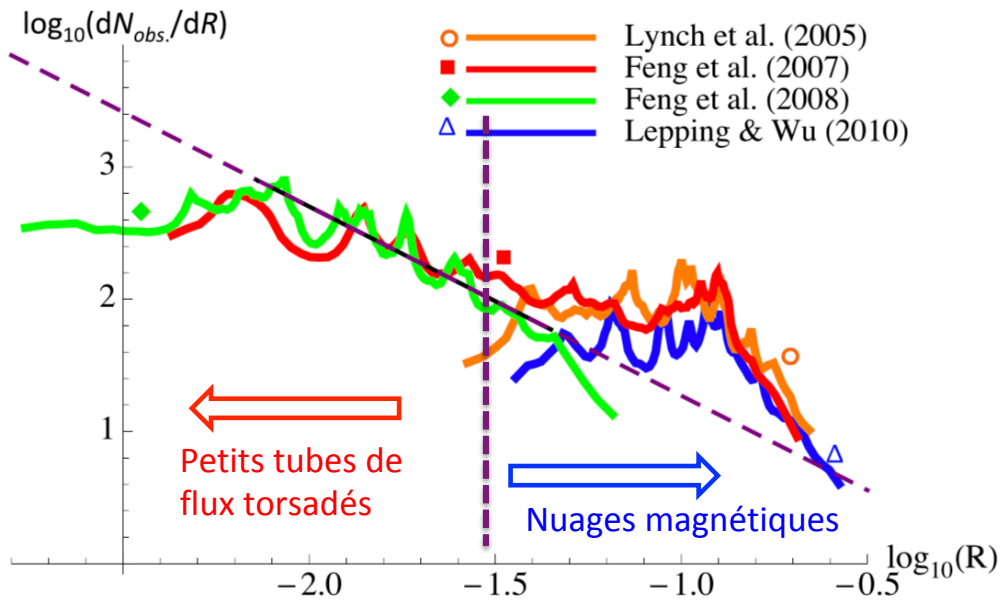


FIGURE 3.11: Distribution en taille (rayon du tube de flux torsadé R) des petits tubes de flux torsadés et des nuages magnétiques des ICMEs. Quatre catalogues ont été étudiés, dont ceux de Feng et al. qui regroupent les petits tubes de flux torsadés. Deux distributions distinctes peuvent être observées: une loi de puissance (partie gauche) pour les petits tubes de flux, et une loi piquée, de type gaussien pour les nuages magnétiques (partie droite). D'après Janvier, Démoulin, and Dasso, 2014a.

loi de puissance, tandis que la partie droite, correspondant aux nuages magnétiques, a une évolution plutôt piquée.

Ensuite, à partir de quatre catalogues de CMEs détectées par des coronographes (comme CDAW ou ARTEMIS), nous avons estimé la quantité de flux magnétiques associée au nombre d'événements enregistrés dans ces différents catalogues. Ceci nous donne alors une estimation de la quantité de flux magnétique éjectée depuis le Soleil par le biais des CMEs, chaque année.

En considérant l'angle solide correspondant à la détection des CMEs au niveau de la Terre à 1 ua (où les mesures in situ se font), la fraction de la quantité de flux mesurée à 1 ua peut alors être estimée et comparée aux véritables mesures effectuées. Nous avons ainsi constaté d'une part que les nombres prédits de CMEs mesurées à 1 ua à partir des coronographes sont similaires aux fréquences des MCs observés in situ, et que d'autre part les SFRs sont au moins dix fois trop abondants pour correspondre aux CMEs, même pour les plus petites CMEs détectées par les coronographes. En étudiant les différents scénarios possibles pour l'origine de ces SFRs, nous avons conclu que ces structures magnétiques torsadées peuvent être formées par des jets d'éruption dans la couronne basse ou dans des streamers coronaux. De manière intéressante, la loi d'échelle que j'ai trouvée est proche de celle des simulations numériques qui reproduisent la formation des plasmoides dans des couches de densité de courant électrique microscopiques, comme par exemple dans les simulations de l'instabilité de déchirement (Loureiro et al., 2012).

Par ailleurs, ces travaux permettent également de faire le lien avec une étude que j'ai effectuée en collaboration avec des collègues japonais et tchèques sur l'analyse de

la formation des plasmoides dans la couronne solaire (Nishizuka et al., 2015). Les plasmoides sont difficilement détectables dans les imageurs en EUV, alors que les observations des éruptions solaires (voir Chapitre 2) montrent la présence de signatures de reconnexion, voire même de régions assimilables à des feuillets de courant. La méthode que nous avons proposée repose sur l'idée que des particules chargées du plasma coronal, et notamment accélérées depuis le site de reconnexion, peuvent se retrouver piégées dans les plasmoides. Comme ces particules chargées émettent des ondes radio modulées, nous nous sommes intéressés à l'étude des observations de ces signatures. Nous avons pour cela utilisé les données d'une centaine d'événements observés avec le radio-spectrographe de l'observatoire d'Ondrejov en République Tchèque. L'analyse de la dérive de la fréquence d'émission indique l'éjection de ces particules, et les caractéristiques des distributions de cette dérive en fréquence permettent de remonter à des caractéristiques des plasmoides. Nous avons démontré une corrélation directe entre la taille des plasmoides et le taux de reconnexion, et avons établi un lien entre ces émissions radio et les émissions X détectées par RHESSI, et les observations associées en EUV (ultraviolet extrême) avec l'instrument AIA sur Solar Dynamics Observatory (SDO). Cette étude montre que l'éjection de plasmoides est fréquente, et donne un bon indice sur l'origine des SFRs détectés in situ.

Nos travaux (Janvier, Démoulin, and Dasso, 2014a; Janvier, Démoulin, and Dasso, 2014b) ont ainsi amené à un nouvel éclairage sur les diverses structures se propageant dans le milieu interplanétaire et pouvant affecter les magnétosphères planétaires.

Mesure d'hélicité transportée par les tubes de flux torsadés

Nous avons vu que les nuages magnétiques pouvaient être modélisés comme des tubes de flux torsadés éjectés par le Soleil, emportant ainsi une grande quantité de flux magnétique et d'hélicité. L'objectif principal de l'étude de Démoulin, Janvier, and Dasso, 2016 a été de quantifier ces quantités à partir de mesures in situ de MCs à 1 ua.

Comme nous venons de le voir pour d'autres études, l'ajustement paramétrique des données in situ par un modèle local de tube de flux torsadé (typiquement, le modèle de Lundquist) fournit l'intensité du champ magnétique axial, le rayon du tube de flux, le flux magnétique mais aussi une mesure de l'hélicité magnétique par unité de longueur le long de l'axe du tube de flux. Nous montrons d'une part que ces grandeurs sont statistiquement indépendantes de la position le long de l'axe, en étudiant leur distribution en fonction du paramètre de localisation introduit plus haut, λ . Nous avons ensuite dérivé la forme et la longueur génériques de l'axe du tube de flux torsadé à partir de deux ensembles de MCs. Ces résultats améliorent l'estimation de l'hélicité magnétique.

En comparant la quantité de flux magnétique total et d'hélicité transportés par les MCs et les SFRs, nous avons pu démontrer que bien que les SFRs soient 10 fois plus nombreux que les MCs, la principale contribution du transport de flux et d'hélicité est dominé par les plus grands MCs. En un an, ils emportent le flux magnétique d'environ 25 grandes régions actives et l'hélicité magnétique de 200 d'entre elles. Les MCs emportent une quantité d'hélicité magnétique non signée similaire à la quantité estimée pour la dynamo solaire et à celle mesurée dans les régions actives émergentes.

Je clôture ainsi cette section sur les études statistiques des ICMEs par l'étude des distributions de formes et de taille des nuages magnétiques et petits tubes de flux. Nous venons de voir que toutes ces études reposent fondamentalement sur la connaissance de certaines propriétés des tubes de flux magnétiques obtenues par ajustement paramétrique. Ces ajustements paramétriques reposent quant à eux sur une certaine

hypothèse de la forme du tube de flux (comme par exemple un modèle de champ sans force circulaire).

Dans la suite, nous verrons que d'autres études statistiques permettent d'étudier les profils (séries temporelles) des nuages magnétiques sans hypothèse préalable. Celles-ci, en contrepartie, restent limitées car ne rentrent pas dans le détail des structures tridimensionnelles. D'autre part, nous verrons également d'autres études que nous avons menées pour améliorer les ajustements paramétriques utilisés dans la communauté.

3.3 Profils génériques des ICMEs par l'étude des époques superposées

Cette partie introduit mes travaux dans les papiers suivants: Rodriguez et al., 2016; Masías-Meza et al., 2016; Janvier et al., 2019; Lanabere et al., 2020; Regnault et al., 2020.

3.3.1 Méthodologie des époques superposées

Petit historique

La méthode dites des "époques superposées" a été introduite par C. Chree (Chree, 1913), alors super-intendant à l'Observatoire de Kew (maintenant King) en Angleterre, dans le souci de corrélérer l'activité magnétique solaire (sous forme d'observations de taches solaires) et les fluctuations géomagnétiques terrestres. Puisque chacune de ces activités évolue temporellement, pouvoir corrélérer les deux signifie qu'il faut pouvoir avoir un référentiel temporel afin de lier l'évolution de l'une à l'autre. Chree a ainsi développé cette technique en prenant comme référence un temps donné (en l'occurrence, la mesure la plus grande de la déclinaison du champ magnétique terrestre sur une période de temps). Puis il a observé les caractéristiques (e.g. les aires) des groupes de taches solaires pendant plusieurs jours avant et après cette référence. Cette étape pouvant être reproduite, il est alors possible de moyenniser l'évolution temporelle de l'activité magnétique terrestre et celle des taches solaires suivant la même référence temporelle; c'est la clé de la méthode des époques superposées.

Cette technique a depuis été utilisée en physique du milieu interplanétaire afin de moyenniser un signal qui se reproduit dans des séries temporelles de paramètres physiques. Cette méthode permet ainsi de faire ressortir de manière plus importante un signal. Dans les cas des structures du vent solaire, cette approche peut être appliquée en prenant comme référence temporelle une discontinuité ou un choc interplanétaire. En moyennant plusieurs séries temporelles, il est alors possible de voir un contraste plus marqué entre le vent solaire loin de la discontinuité, et proche de celle-ci. Cette approche a été étudiée en détail par Kumar and Badruddin, 2014; Badruddin and Kumar, 2016; Yermolaev et al., 2015, notamment pour les CIRs/SIRs, ICMEs et nuages magnétiques.

Développement de la méthode et applications

Dans le cas des ICMEs, les deux sous-structures principales, i.e. la gaine et l'éjecta magnétique, permettent de définir trois temps distincts: le début de la gaine (i.e. généralement bien définie car il s'agit d'une discontinuité bien marquée avec le vent solaire), la fin de celle-ci, qui correspond donc au début de l'éjecta, et la fin de l'éjecta. Il est alors possible d'effectuer une étude d'époques superposées en re-normalisant tous les événements, afin que les trois temps distincts aient lieu au même moment, d'un événement à

un autre. Puisqu'un évènement n'a pas la même durée qu'un autre, la méthode va alors consister à binner les données temporelles de manière à ce que chacun des évènements comporte le même nombre de point temporel.

Il faut noter que cette première étape impose déjà que les caractéristiques des évènements que nous voulons étudier existent sur des échelles temporelles bien plus grandes que l'échelle de binnage. En effet, chaque bin prend la moyenne du paramètre physique étudié sur une certaine période temporelle, définie par la durée de l'évènement et le nombre de bins nécessaire à l'époque superposée. Des variations sur des échelles temporelles plus petites que cette période temporelle de binnage sont donc effacées par le moyennage effectué.

Chaque bin temporel de l'époque superposée va donc contenir un nombre de points correspondant à la totalité des évènements. On peut alors étudier la distribution de ces points: dans Rodriguez et al., 2016 comme dans Regnault et al., 2020, nous avons montré que la distribution des paramètres magnétique et de plasma suivaient tous une loi log-normale. Bien que dans la plupart des études faites sur les époques superposées, chaque bin temporel prenne la moyenne de la distribution, il peut être plus intéressant de regarder d'autres paramètres statistiques, comme la médiane, et/ou la valeur la plus probable de la distribution. C'est cette approche qui a été privilégiée dans le papier de Regnault et al., 2020, qui nous a permis de mieux comprendre les variations statistiques entre catégories d'ICMEs en comparant ces trois paramètres: valeur la plus probable, médiane et moyenne.

Dans la suite de ce sous-chapitre qui présente plusieurs de mes contributions, mes collaborateurs et moi nous sommes intéressés à l'application de la méthode superposée sur les données à 1 ua de la sonde ACE (Stone et al., 1998), en particulier les données du champ magnétique de l'instrument MAG (Smith et al., 1998) et des données plasmas de l'instrument SWEPAM (McComas et al., 1998). Je me suis aussi intéressée aux données du champ magnétique sur plusieurs autres sondes interplanétaires, comme MESSENGER (Solomon et al., 2007) et Vénus Express (Titov et al., 2006).

3.3.2 Profils des nuages magnétiques à l'orbite terrestre

Étude de Rodriguez et al., 2016: focus sur les nuages magnétiques

Les premières études auxquelles j'ai participé, et qui m'ont introduite à la technique des époques superposées, sont celles de Rodriguez et al., 2016 et Masías-Meza et al., 2016. Avec Rodriguez et al., 2016, nous nous sommes principalement intéressés à l'étude de 63 nuages magnétiques observés par la sonde ACE, entre 1998 et 2006, et issus de la liste de Richardson and Cane, 2010. Bien que cette liste contienne de nombreuses ICMEs, la sélection faite dans l'étude comporte des nuages magnétiques de très bonne qualité (ceux indiqués dans la liste de RC comme de qualité '2'). Pour chacun de ces nuages, leur équivalent au Soleil sont identifiés par le coronographe LASCO à bord de la sonde SOHO.

Cette étude nous a d'une part permis de révéler un paramètre judicieux aidant à la définition des frontières du nuage magnétique: le $rmsBoB$, définit comme la magnitude des fluctuations du champ magnétique sur la magnitude de celui-ci:

$$rmsBoB(t) = rms(\mathbf{B}(t)) / B(t) \quad (3.7)$$

$$rms(\mathbf{B}(t)) = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \langle (B_i - \langle B_i \rangle)^2 \rangle} \quad (3.8)$$

Ce paramètre décroît fortement à l'intérieur du nuage magnétique, montrant bien que la cohérence du champ magnétique y est bien plus importante que dans le vent solaire (et la gaine) environnante (un exemple est présenté dans la Figure 3.12). D'autre part, l'analyse de la composition des ratios des densités d'ions d'oxygène O^{+7}/O^{+6} et des alphas/protons montrent une diminution (généralement associée à la présence d'un nuage magnétique) qui perdurent au-delà de la fin du nuage. Ce résultat est indicatif de la présence de reconnexion entre le nuage magnétique et le vent solaire en aval de l'ICME. C'est ce que l'on appelle le phénomène d'érosion, et qui correspond donc à l'interaction magnétique entre les lignes de champ magnétique composant le nuage magnétique et celles du vent solaire. Enfin, une fraction importante des nuages observés à 1 ua est associée à une sur-densité plasma en aval de l'ICME. La comparaison avec les sources solaires montrent que l'arrière du nuage peut être fortement impacté par la présence d'un vent rapide rattrapant la structure (par exemple dans le cas des ICMEs éjectées proches de trous coronaux), ou d'une autre ICME.

Etudes de Masías-Meza et al., 2016 et Regnault et al., 2020: nuages magnétiques, gaines et classifications

Cette étude s'est poursuivie en prenant en compte la gaine des ICMEs dans le papier de Masías-Meza et al. (2016). Dans la Figure 3.12, nous pouvons voir que les propriétés de la gaine, mises en avant par la méthode SEA, montrent qu'elles sont bien différentes de celles du nuage magnétique: les températures, les densités et les fluctuations magnétiques y sont bien plus élevées qu'à l'intérieur de celui-ci.

Par ailleurs, dans cette étude, nous avons également cherché à classer les ICMEs par un paramètre parmi ceux du plasma et du champ magnétique. Pour cela, nous avons séparé notre échantillon d'ICMEs en 3 parties égales, classées soit par ordre de valeurs des températures, vitesses, champs magnétiques moyennés dans la gaine ou dans le nuage. Le meilleur classement est obtenu en comparant l'évolution de tous les paramètres sur les trois sous-échantillons. Parmi tous les paramètres disponibles, nous avons ainsi trouvé que la vitesse absolue de l'éjecta magnétique, moyennée sur toute sa durée, et un bon proxy pour classer les ICMEs (donc avec un classement cohérent avec tous les autres paramètres).

Par la suite, nous avons effectué un travail plus approfondi lors de la thèse de Florian Regnault (à retrouver dans le résumé de son travail, Regnault, 2021), à l'aide de la méthode d'apprentissage machine dite des "k-means". Cette méthode permet, de manière non-supervisée, d'évaluer la "distance" (similarité ou non) entre événements pour un ou plusieurs paramètres donnés dans un échantillon et de trouver des noyaux (appelés clusters) qui correspondent à des caractéristiques retrouvées dans certains événements de notre échantillon. Dans notre cas, nous avons étudié tous les profils temporels de chacun des paramètres, et ce sur un échantillon de plus de 400 ICMEs tirés de la liste de Richardson & Cane. Nous n'avons trouvé de clusters pour aucun de ceux-ci. Cela montre qu'il existe en fait un continuum de valeurs et de profils d'évolution temporelle des paramètres de plasma et de champ magnétique dans les ICMEs, et qu'il n'existe ainsi pas de populations distinctes d'ICMEs.

La méthode de classement et d'échantillonnage implique donc un certain arbitrage dans le choix des paramètres utilisés pour "classer" les ICMEs, et les diviser en sous-échantillon. Dans le cas de l'analyse de Masías-Meza et al., 2016, nous avons par exemple pris la vitesse absolue des nuages magnétiques, tandis que dans Regnault et al., 2020, nous avons privilégié la différence entre la vitesse de l'ICME et celle du vent solaire en amont de la structure.

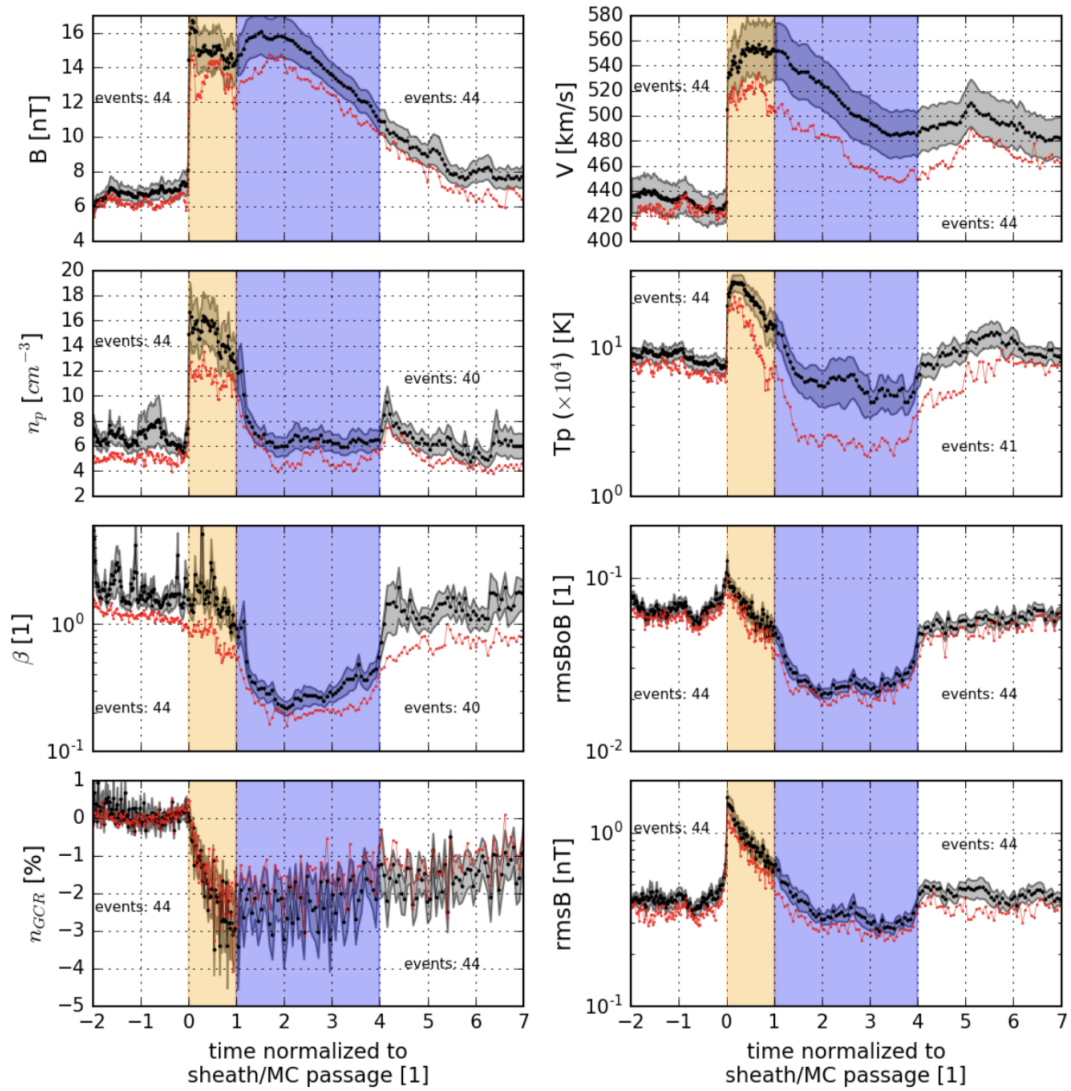


FIGURE 3.12: Méthode des époques superposées appliquée à 44 événements d'ICMEs avec une gaine bien identifiée. De gauche à droite, et de haut en bas, on trouve: le champ magnétique total B , la vitesse des protons V , la densité des protons n_p , la température des protons T_p , le beta du plasma β , $rmsBoB$ (défini par l'équation 3.8), le pourcentage du décompte des rayons cosmiques n_{GCR} , et $rmsB$. L'aire temporelle correspondant à la gaine est colorée en orange, tandis que l'aire temporelle correspondant au nuage magnétique est indiquée en bleue. D'après Masías-Meza et al., 2016.

Dans les deux études, nous avons pu montrer que les profils de la gaine et des nuages magnétiques évoluent en fonction des vitesses (absolues ou relatives). Par exemple, le saut à l'avant de la gaine n'est pas aussi prononcé pour le champ magnétique et les autres paramètres plasmas pour les nuages magnétiques lents, contrairement aux rapides. Dans le cas des ICMEs (relativement) lentes, on trouve que le nuage magnétique, et de manière plus générale l'éjecta magnétique, a un profil de champ magnétique total plus symétrique que ceux des ICMEs (relativement) rapides. Par ailleurs, les ICMEs rapides ont aussi une gaine en compression, qui se voit en particulier sur le profil de la vitesse, asymétrique et en pente positive entre la discontinuité et l'interface gaine/éjecta magnétique (voir les résultats dans la Figure 3.14).

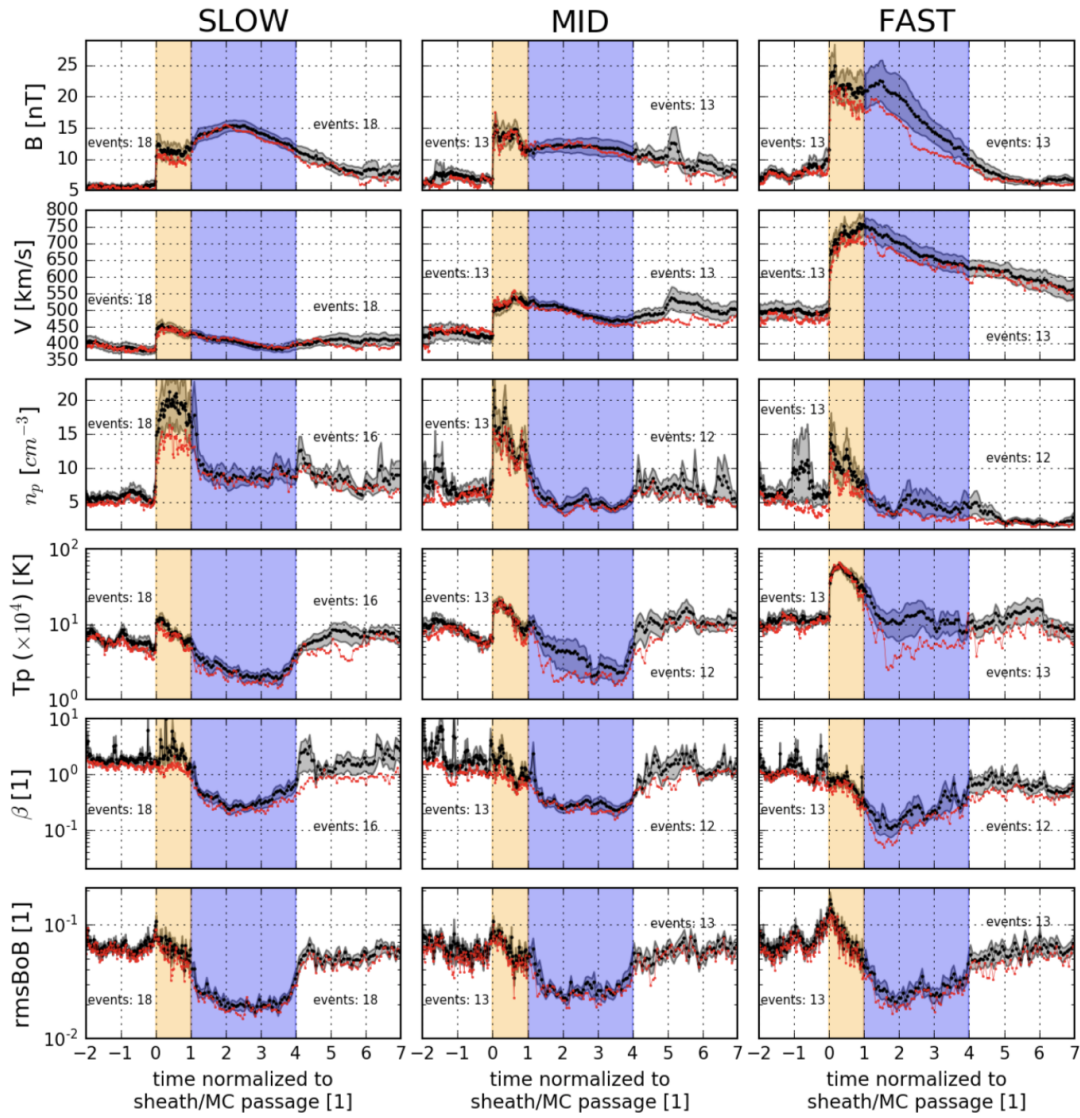


FIGURE 3.13: Méthode des époques superposées appliquée aux 44 évènements d'ICMEs classés par trois catégories de vitesse: ICMEs lentes (gauche), moyennement lentes (milieu) et rapides (droite). Les paramètres, hormis le *rmsB*, sont les mêmes que ceux de la Figure 3.12, avec le même code de couleur. Le nombre d'évènements pris pour chacune des sous-structures (vent solaire en amont + gaine d'une part, et nuage magnétique et vent solaire en aval d'autre part), est indiqué sur chacun des graphiques et dépend de la disponibilité des données. D'après Masías-Meza et al., 2016.

Dans l'analyse faite par Regnault et al., 2020, nous avons également pu étudier les ICMEs sans gaine, qui montrent également des profils symétriques et proches de ceux des ICMEs (relativement) lentes. Cela suit le même raisonnement présenté ci-dessus: ces ICMEs se propagent plus lentement à l'origine dans le vent solaire (d'où la non-formation d'une gaine), et de ce fait sont en équilibre de force avec le milieu environnant.

Nous avons ainsi interprété l'asymétrie prononcée dans les ICMEs rapides par un processus de relaxation encore en cours avec le vent solaire environnant, contrairement aux ICMEs lentes dont les profils de champ magnétiques et de vitesse montrent des

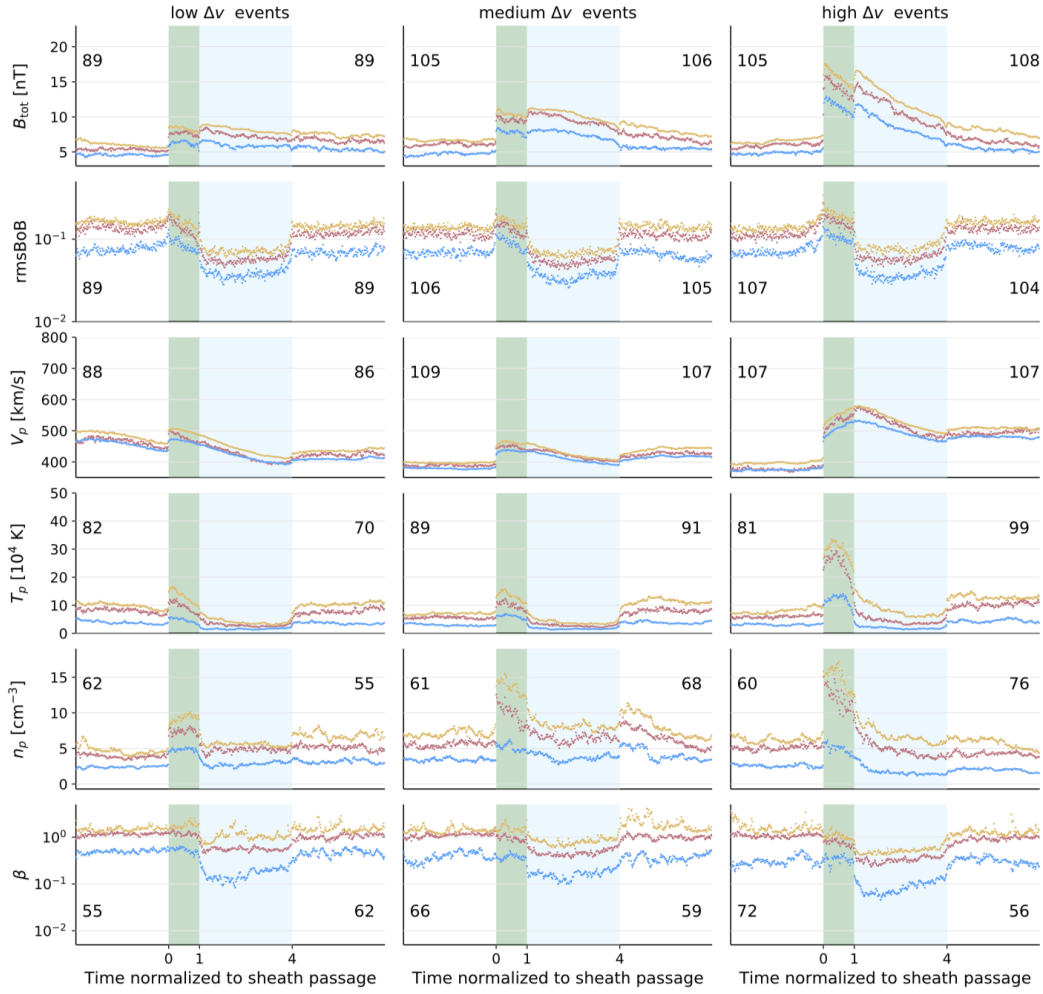


FIGURE 3.14: Méthode des époques superposées appliquée à plus de 300 ICMEs issus de la liste de Richardson & Cane avec des frontières revisitées dans le papier de Regnault et al., 2020. Ces ICMEs sont ensuite classées par ordre croissant des valeurs de la différence de vitesse entre l'éjecta magnétique et le vent solaire en amont de l'ICME. On définit ainsi une catégorie d'ICMEs à Δv faible (colonne de gauche), moyen (colonne du milieu) et élevé (colonne de droite). Les paramètres sont les mêmes que dans la Figure 3.13. D'après Regnault et al., 2020

sous-structures (gaines et éjecta) plus relaxé et en expansion.

Autres classifications

L'étude de Regnault et al., 2020 nous ayant permis de scanner des ICMEs sur une période de 20 ans de données de la sonde ACE, nous avons également pu classer les événements en fonction de leur occurrence suivant le cycle solaire. Nous avons ainsi trouvé que la distribution des ICMEs est similaire entre le pic et le creux d'activité, mais avec une distribution plus large des paramètres pour le pic d'activité, montrant une plus grande variation dans le profil des ICMEs dans ce pic.

Enfin, en croisant notre liste des ICMEs avec les événements de nuages magnétiques rapportés dans la table de Lepping (Lepping, Burlaga, and Jones, 1990), nous avons également pu partager les ICMEs en sous-catégories, selon qu'ils présentaient ou non un nuage magnétique associé. Nous avons trouvé que les ICMEs qui possèdent un

nuage magnétique ont des profils de paramètres plasma identiques à ceux qui n'en possèdent pas, bien que le profil magnétique soit plus prononcé (intensité plus grande) pour les ICMEs avec des nuages. Cela confirme l'hypothèse selon laquelle les ICMEs ne sont croisées par des sondes proches du coeur de leur structure que dans 30% des cas environ, même si cela ne veut pas dire que seuls 30% des ICMEs ont des nuages magnétiques.

Conclusion et applications à d'autres études

Ces résultats nous montrent comment utiliser des catalogues d'ICMEs pour trouver des caractéristiques moyennes d'ICMEs, ou les plus probables comme leur profil et montrer des phénomènes d'ajustement (e.g. compression) lors de la propagation de ces structures, qui prennent encore place à 1 ua. Cela permet également de mieux comprendre comment les processus de propagation peuvent affecter ces structures.

Cette méthode s'avère extrêmement efficace pour atténuer toutes les fluctuations aléatoires d'un événement à un autre. Ainsi, nous avons exploité la méthode pour d'autres analyses, comme par exemple pour l'étude du twist (le nombre de tours par unité de longueur du champ magnétique autour de l'axe principal) dans les nuages magnétiques (Lanabere et al., 2020). Dans cette étude, que je ne détaille pas ci-après mais qui me permet d'étayer mes propos sur la diversité d'application de la méthode des époques superposées, nous avons étudié les différentes composantes du champ magnétique afin d'en extraire des propriétés génériques de twist. En effet, cette quantité est importante pour mieux contraindre, d'une part les modèles d'ajustement aux données in situ permettant d'obtenir les caractéristiques des tubes de flux, et d'autre part les scénarios de formation des nuages magnétiques et d'interaction avec le vent solaire.

En utilisant la méthode des époques superposées pour les composantes du champ magnétique dans le référentiel du tube de flux (nous permettant ainsi de nous affranchir de l'effet de l'orientation spatiale de celui-ci, qui impacte la direction du "twist"), nous avons pu déterminer la distribution typique du twist dans les nuages magnétiques. Il s'agit d'une distribution uniforme proche du coeur du nuage, qui augmente modérément proche de la surface magnétique externe des nuages. Le profil ainsi trouvé correspond bien au profil analytique donné par le modèle de Lundquist, qui est un modèle parmi d'autres d'ajustement des nuages magnétiques (voir plus loin, études menées sur les méthodes d'ajustement paramétrique). Cette étude nous a ainsi permis de justifier, pour la première fois à partir de données statistiques, qu'un modèle d'ajustement très utilisé dans la communauté, était bien valide au vu des résultats trouvés (en tout cas, sur un échantillon de nuages magnétiques croisés dans le coeur, et non fortement asymétriques).

3.3.3 Évolution des profils avec les distances interplanétaires

Introduction de l'étude

Au cours d'une réunion de travail du consortium européen HELCATS⁹, j'ai eu l'opportunité de présenter mes travaux sur les aspects statistiques de mes études sur les ICMEs. Ce consortium européen ayant comme but principal de regrouper le maximum d'informations sur les éjections coronales de masse vues par les instruments de télédétection et in situ de plusieurs missions (STEREO-A et B, Wind, ACE, mais aussi Venus Express et MESSENGER), j'ai pu à cette occasion nouer de nouvelles collaborations avec des collègues

⁹<https://www.helcats-fp7.eu>

travaillant sur différentes données. C'est donc grâce à Simon Good (alors à Imperial College, Royaume-Uni), Tanja Amerstorfer et Christina Möstl du Space Research Institute (Autriche) et Reka Winslow (University of New Hampshire, E-U) que j'ai pu avoir directement accès aux données magnétiques des missions MESSENGER et Venus Express.

Ces deux missions sont des missions planétaires, dont le but était d'étudier l'environnement des deux planètes les plus proches du Soleil, Mercure et Vénus. Bien que leurs jeux de données ne semblent a priori pas directement en lien avec les ICMEs, elles ont toutefois permis la mesure directe du champ magnétique du vent solaire par les magnétomètres (respectivement pour MESSENGER et Venus Express: Anderson et al., 2007; Zhang et al., 2006). Ces mesures ont été effectuées pendant la phase de croisière mais aussi lors des orbites autour des planètes, permettant ainsi de récolter des données intéressantes, et ce à des distances plus proches du Soleil que les missions spatiales à 1 ua.

Pourquoi une analyse en époques superposées

L'idée originelle que j'avais eue au tout début de notre collaboration était de reproduire les résultats de Janvier et al., 2015 sur l'axe des nuages magnétiques, et ce à différentes distances du Soleil. Cependant, cette étude s'est avérée infructueuse, du fait d'un manque important de données. D'une part, le début des deux missions correspond à un minimum d'activité solaire: le temps passé dans le vent solaire lors de la phase de croisière de ces sondes ne correspond pas à une période fructueuse en récolte d'ICMEs observées in situ. Par ailleurs, une fois arrivées à leur cible, ces sondes ont passé un temps relativement important dans les magnétosphères (induite dans le cas de Vénus), entraînant ainsi de gros trous de données et rendant les échantillons inutilisables pour appliquer les techniques d'ajustement permettant de retrouver les caractéristiques des tubes de flux. Enfin, sur quelques bons cas d'ICMEs présentant un tube de flux interne, mes deux collaborateurs ont appliqué leur propre méthode d'ajustement pour obtenir les paramètres du tube de flux. Sur les mêmes cas, les écarts dans les résultats étaient trop importants pour nous donner assez confiance en les résultats.

C'est pourquoi nous nous sommes alors tournés vers l'utilisation de l'analyse en époques superposées, qui s'était avérée très fructueuse suite à l'étude menée dans Masías-Meza et al., 2016. Cette technique impose un certain nombre d'évènements, mais permet toutefois des trous de données dans les séries temporelles, puisque celles-ci sont moyennées sur tous les échantillons. Nous nous sommes donc penchés sur toutes les ICMEs observées à distance fixe, c'est-à-dire l'orbite de Mercure (distance moyennée sur toute la durée de l'orbite, celle-ci étant excentrique) ainsi que celle de Vénus. Il a fallu ensuite procéder à un nettoyage manuel de toutes les données qui correspondaient à la traversée dans la magnétosphère (induite dans le cas de Vénus) des planètes, avant de pouvoir appliquer la méthode des époques superposées.

Résultats

Nous avons ainsi trouvé que malgré le manque de données rendant l'interprétation de la statistique difficile, le profil générique des ICMEs est un peu plus asymétrique à l'orbite de Mercure qu'à la Terre, comme le montre la Figure 3.15. Dans celle-ci, nous avons superposé les lignes verticales indiquant les maxima de l'intensité du champ magnétique dans les éjectas trouvés aux orbites de Mercure, Vénus et L1, montrant que le pic est plus proche de la gaine, plus proche du Soleil. Nous avons interprété ces profils comme étant le résultat de l'interaction entre le vent solaire et l'ICME en

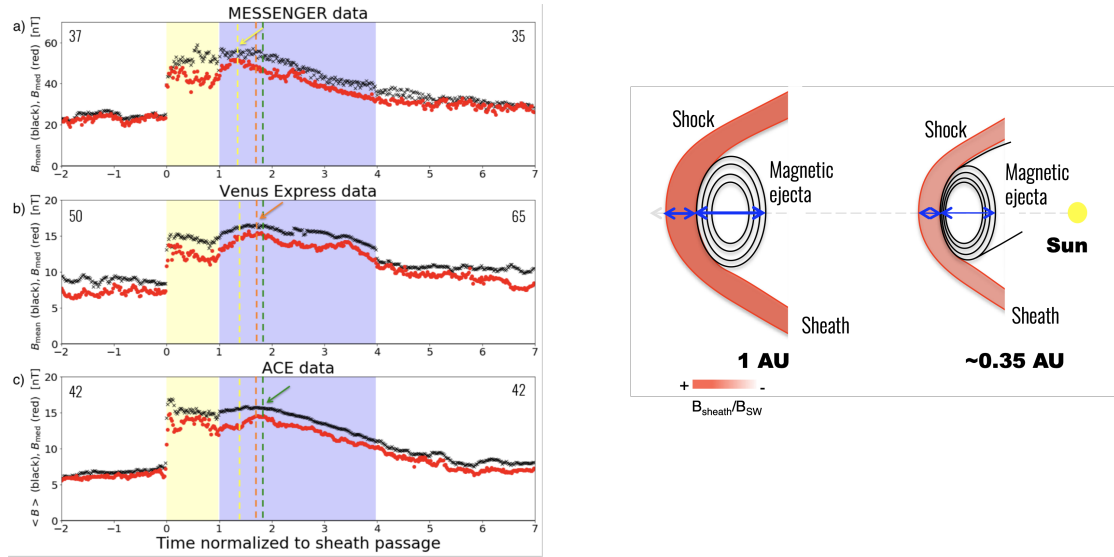


FIGURE 3.15: Panneaux de gauche: SEA sur les données magnétiques des ICMEs à l'orbite de Mercure (a, MESSENGER, 37 évènements), de Vénus (b, Vénus Express, 65 évènements), et au point de Lagrange L1 (c, ACE, 42 évènements). Les points rouges (noirs) indiquent les points médians (moyens) des distributions à chaque échantillon temporel. La zone en jaune indique la gaine, tandis que la zone en bleu indique l'éjecta magnétique. Sont reproduits en vertical les localisations des pics du champ magnétique dans les profils de l'éjecta magnétique. D'après Janvier et al., 2019. Panneau de droite: représentation des profils de l'éjecta et de la gaine aux deux distances de Mercure et de la Terre, indiquant une compression plus accentuée du profil dans l'éjecta, et une gaine encore en formation pour l'ICME à Mercure, comparée à la Terre.

propagation dans celui-ci. Proche du Soleil, l'éjecta magnétique commence à accumuler par accréation du vent solaire une gaine: celle-ci ne peut que croître au fur et à mesure du déplacement de l'ICME. Par ailleurs, plus l'ICME passe du temps dans le vent solaire, plus le phénomène de relaxation de la structure magnétique éjectée depuis le Soleil a le temps de s'imposer. Ceci expliquerait les profils plus symétriques trouvés à L1, comparés à 0.35 ua (orbite de Mercure).

Nous avons aussi cherché à classer les ICMEs par vitesses croissantes, comme dans l'étude de Masías-Meza et al., 2016. Cependant, il n'y a pas de données plasma du vent solaire pour les missions MESSENGER et Venus Express. De ce fait, j'ai cherché le meilleur proxy pour la vitesse des éjectas magnétiques en réanalysant les données de ACE: ayant trouvé que l'intensité du champ magnétique dans la gaine était bien corrélée à la vitesse du nuage magnétique, j'ai pu me servir de celle-ci pour classer les ICMEs des plus "lentes" aux plus "rapides" (en vrai, en les classant par intensité de champ magnétique dans les gaines).

Certains des résultats sont reproduits dans la Figure 3.16. On trouve que les ICMEs classées suivant leur intensité du champ magnétique dans la gaine reflètent la même évolution, à 1 ua, que ceux classés en vitesse (en comparant avec l'étude de Masías-Meza) et donc que les profils asymétriques sont retrouvés pour les ICMEs qui se déplacent a priori rapidement (car forte intensité du champ magnétique dans la gaine) et ce, à n'importe quelle distance. Cela peut s'expliquer par le fait que les ICMEs rapides accumulent plus de vent solaire dans leur gaine, bien qu'y passant moins de temps, car la densité accumulée s'échappe très difficilement dans les flancs de la structure. De part

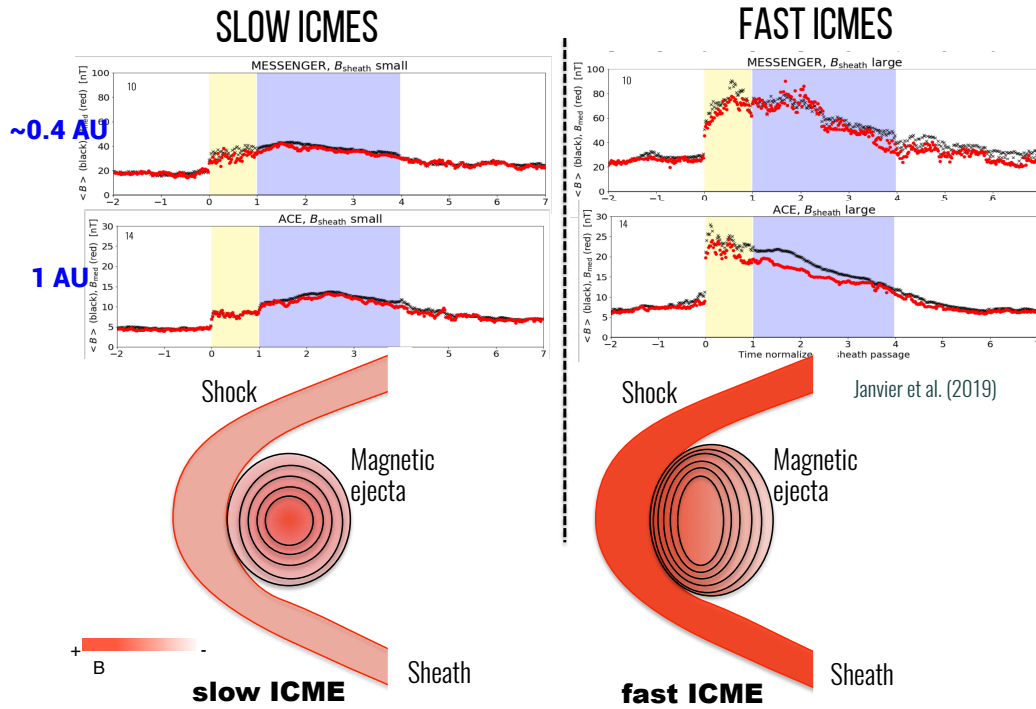


FIGURE 3.16: Panneaux du haut: analyse en époques superposées sur les données magnétiques des ICMEs à l'orbite de Mercure et de la Terre pour les ICMEs lentes (gauche) et rapides (droite). Les graphiques suivent les mêmes labels que dans la Figure 3.15. Les ICMEs rapides montrent, peu importe la distance, une gaine plus intense (ratio aval/amont de la discontinuité à $t = 0$ plus important), un champ magnétique plus intense dans la gaine et l'éjecta, et un profil plus asymétrique dans l'éjecta. D'après Janvier et al., 2019. Panneaux du bas: représentation des profils de l'éjecta et de la gaine pour les ICMEs lentes et rapides, indiquant le profil asymétrique et une gaine plus intense pour les ICMEs rapides.

une gaine plus importante, et un temps moins long passé dans le vent solaire, les profils des éjectas sont plus comprimés à l'avant, comparés aux ICMEs lentes qui peuvent atteindre un état relaxé, et de ce fait plus symétrique.

On conclut ainsi que les ICMEs sont des entités qui sont encore très dynamiques dans l'héliosphère interne, puisque l'on trouve des ICMEs avec des profils magnétiques très asymétriques montrant une interaction avec le vent solaire. Ce genre d'étude pourra être complétée dans un futur proche par les données des sondes Parker Solar Probe, Solar Orbiter, et Bepi-Colombo, toutes parties ces dernières années et permettant l'exploration de l'héliosphère interne.

3.4 Autres travaux: effets sur les rayons cosmiques, modèles d'ajustements paramétriques

Cette partie introduit mes travaux dans les papiers suivants: Démoulin, Dasso, and Janvier, 2018; Démoulin et al., 2019; Freiherr von Forstner et al., 2020 et Janvier et al., 2021.

3.4.1 Effets sur les rayons cosmiques: la décroissance de Forbush

Introduction

Les rayons cosmiques sont des particules très énergétiques qui bombardent constamment les planètes du système solaire. On parle de rayons cosmiques galactiques lorsque les sources de ces particules se situent en dehors du système solaire. A l'intérieur de celui-ci, la source la plus importante est le Soleil, en particulier lors des flares et/ou des CMEs, qui peuvent créer des événements de particules énergétiques (principalement des protons) solaires (ou SEP events). Leur variation dans le temps est bien documentée (voir par exemple la revue de Potgieter, 2013).

Un phénomène qui nous intéresse plus particulièrement ici est celui de la décroissance des rayons cosmiques sur des périodes de quelques heures à quelques jours, associée au passage de transients dans le vent solaire, notamment des ICMes. Cette décroissance est appelée décroissance de Forbush, d'après Forbush, 1937 (ci-après FD pour "Forbush Decrease"). A cause des deux sous-structures des ICMes (gaine et éjecta), celles-ci sont connues pour induire une décroissance en deux temps (Cane et al., 1994), même si ces deux temps ne sont pas toujours observés (Jordan et al., 2011). Plusieurs études ont permis de montrer que l'intensité du champ magnétique ainsi que les fluctuations magnétiques et la vitesse de l'ICME sont toutes très bien corrélées à l'intensité de la décroissance de Forbush (Dumbović et al., 2011). Dans la suite, nous nous sommes principalement intéressés au rôle des profils (vitesses, champ magnétique, paramètres du plasma) des sous-structures magnétiques afin de mieux modéliser la décroissance de Forbush.

Influence de la vitesse des ICMes dans la décroissance de Forbush

Dans l'article de Masías-Meza et al., 2016 décrit plus haut dans le contexte d'application de la SEA, je n'avais pas présenté les autres conclusions obtenues dans l'étude. En effet, nous nous sommes non seulement penchés sur la classification des ICMes pour démontrer l'influence de la vitesse de propagation des ICMes sur les profils génériques des sous-structures, mais nous avons également étudié l'influence de ces différents profils sur la décroissance de Forbush.

Ces résultats sont montrés dans le graphique de la Figure 3.12 montrant l'évolution du nombre de neutrons détectés par des moniteurs à neutrons (en l'occurrence ici, celui de McMurdo en Antarctique). Celle-ci est exprimée en pourcentage du niveau moyen du vent solaire calme trouvé en amont des ICMes.

Dans cet article, nous nous sommes également penchés sur l'effet d'une gaine à forte intensité de champ magnétique qui est par ailleurs fluctuante (mesurée par le rmsBoB) dans le cadre des ICMes rapides et lentes. Nous avons alors pu trouver une loi empirique (voir Equation 4 dans le papier) permettant de retrouver la décroissance des rayons cosmiques mesurés par le moniteur à neutron de McMurdo. Ainsi, la vitesse des ICMes, et de surcroît son interaction avec le vent solaire, permet de mieux appréhender les conséquences de leur interaction avec l'environnement spatial de la Terre.

Comparaison de la décroissance de Forbush à la Terre et Mars

C'est au cours d'une conférence SCOSTEP sur la météorologie spatiale en 2016 que j'eus le plaisir de faire la connaissance de Jingnan Guo, une brillante chercheuse avec qui je partage de nombreux intérêts scientifiques (reconnexion magnétique, flares, ICMes). Nos discussions nombreuses ont soulevé plusieurs points d'études similaires: études statistiques, multi-sondes, mais également l'étude de la décroissance de Forbush. L'obtention

de plusieurs bourses pour visiteurs externes m'a permis de l'inviter à plusieurs reprises, afin de discuter de collaborations possibles.

L'une d'entre elles s'est concrétisée par le papier de son étudiant Johan Freiherr von Forstner à l'université de Kiel, publié dans Freiherr von Forstner et al., 2020. Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aux caractéristiques des décroissances de Forbush causées par les ICMEs, détectées à la Terre, mais aussi sur la surface de Mars avec le Radiation Assessment Detector à bord du robot Curiosity de la mission Mars Science Laboratory.

En particulier, nous avons regardé quelles étaient les corrélations entre le taux de décroissance des rayons cosmiques et l'amplitude de la décroissance, à la Terre et à Mars. Nous avons ainsi trouvé que les facteurs de corrélation suivent une régression linéaire dont la pente est plus importante à Mars qu'à la Terre, d'un facteur 1.5 à 2 de différence: ces résultats sont reproduits dans la Figure 3.17.

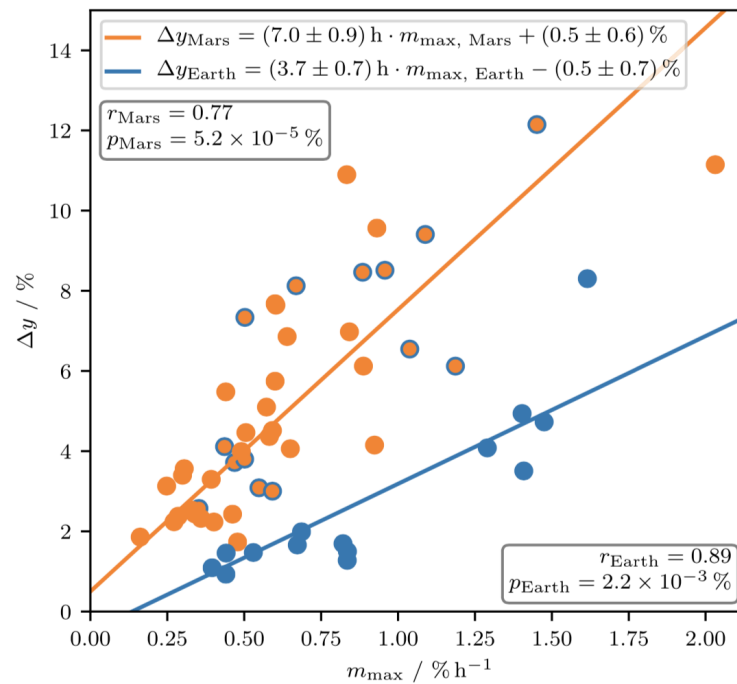


FIGURE 3.17: Comparaison des corrélations entre l'amplitude de la décroissance de Forbush (Δy et le taux horaire de décroissance m_{\max} , pour des FDs vus à la Terre (en bleu) et à Mars (en orange) lors du passage d'ICMEs. Les évènements en points orange cerclés de bleu correspondent à des ICMEs vues à la fois à la Terre et à Mars lors de l'alignement radial de ces planètes. Le facteur de corrélation de Pearson r ainsi que les régressions linéaires sont également indiquées. D'après Freiherr von Forstner et al., 2020

Cette différence peut s'expliquer par le fait que le taux de décroissance temporaire dépend directement de la durée de passage des sous-structures des ICMEs, et donc est relié à la taille des structures. Or, les ICMEs s'étendent radialement. En particulier, les résultats de mes travaux sur les profils typiques à Mercure, Vénus et la Terre (présentés dans la partie 3.3.3 et tirés de Janvier et al., 2019) montrent que la gaine, sous-structure de l'ICME qui conduit aux décroissances les plus importantes, s'élargit d'un facteur ~ 1.5 entre la Terre et Mars, ce qui peut expliquer la différence présente dans la Figure 3.17 entre la Terre et Mars.

Effets des sous-structures sur la décroissance de Forbush

Mes collaborations avec Jingnan Guo se sont consolidées après ce travail, et nous avons continué ensemble sur un projet actuel, associant également Sergio Dasso et son nouvel étudiant en thèse Christian Gutierrez, Pascal Démoulin, et deux étudiants: Florian Regnault, qui avait travaillé sur le code d'analyse des SEA, et Sofia Tropsi-Moutesidou, que j'eus le plaisir d'accueillir lors de son stage du programme Erasmus+ au printemps 2020.

Nous avons utilisé la méthode des époques superposées sur des ICMEs observées pendant plus de 17 ans avec la sonde ACE, permettant d'obtenir quatre échantillons: des ICMEs avec ou sans gaine à l'origine d'une décroissance de Forbush, ainsi que des ICMEs avec ou sans gaine non associées à un FD.

Notre étude préliminaire montre que l'éjecta magnétique (dont l'influence séparée de celle de la gaine peut être observée dans l'échantillon des ICMEs sans gaine, associées à un FD) peut être presque aussi efficace pour amener à un FD. Dans la majorité des cas cependant, comme les ICMEs les plus rapides amènent à des FDs importants, et sont associés à une gaine, l'influence de l'éjecta est masquée par la présence d'une gaine.

Nous trouvons également que le profil de la décroissance de Forbush a tendance à suivre le profil du champ magnétique dans l'éjecta (lorsque ceux-ci sont sans gaine), tandis que le profil du FD atteint son maximum proche de la gaine lorsque celle-ci est présente.

En comparant les ICMEs associées ou non à un FD, et de vitesses semblables (permettant ainsi de s'affranchir de l'effet de ce paramètre), nous avons pu montrer que l'intensité du champ magnétique et son profil ont un rôle plus important que les fluctuations du champ magnétique.

Enfin, le retour à la normale après une décroissance de Forbush provoquée par une ICME ne se fait pas spontanément. Bien au contraire, nous avons trouvé que ce retour s'effectuait sur une durée plus longue d'au moins trois fois la durée du passage de l'éjecta. Le niveau atteint, inférieur à celui du vent solaire pré-ICME, serait alors la contribution des rayons cosmiques venant du côté solaire, le passage de l'ICME écrantant une partie des rayons cosmiques arrivant du côté où l'ICME se propage.

Ces résultats vont faire prochainement l'objet d'une soumission d'article (Janvier et al. *en préparation*).

3.4.2 Reconstruire les nuages magnétiques à partir des données spatiales

Améliorer les modèles d'ajustement des nuages magnétiques

Nous avons vu que mes résultats permettent d'obtenir pour la première fois, à partir de mesures locales in situ, la structure générique 3D des ICMEs (choc, gaine et nuage magnétique) à leur arrivée sur Terre (voir Section 3.2.2). Cependant, la mise en oeuvre de telles analyses repose sur la connaissance de paramètres physiques tels que le rayon et l'orientation de l'axe du nuage magnétique.

Dans Démoulin, Dasso, and Janvier, 2018, nous avons donc cherché à caractériser les biais systématiques d'une méthode générique appelée "minimum variance analysis" (MVA, Sonnerup and Scheible, 1998). C'est une méthode flexible et avec très peu d'hypothèses, contrairement à d'autres méthodes telles que les modèles de Lundquist ou de Grad-Shafranov (imposant un champ sans force à géométrie circulaire ou une invariance axisymétrique). La méthode MVA consiste à trouver les directions dans lesquelles la projection d'une série de N vecteurs a une déviation quadratique moyenne

extrême. Cette méthode peut être appliquée à la série temporelle du champ magnétique B mesuré in situ lors de la traversée des MCs. En reposant sur l'identification des valeurs propres, on mesure à quel point les variances sont différentes ou similaires dans trois directions orthogonales aux vecteurs propres.

Un premier biais que nous avons testé a été la différence entre modèles cylindriques et elliptiques avec une expansion temporelle comparable à celle observée dans les MCs. Nous avons également identifié un biais proportionnel au paramètre d'impact. Inclure l'expansion dans le MC modélisé cependant n'a pas d'effet significatif sur l'orientation obtenue à partir de la MVA. Nous avons également trouvé que cette méthode appliquée aux séries temporelles de B/B permettait de réduire le biais due à l'ellipticité des sections de MCs.

Cette étude nous a amenés à souligner l'importance de bien définir les limites du tube de flux torsadé, car celles-ci impactent fortement la déduction de l'orientation de l'axe. Une amélioration de la MVA est donc d'imposer la même quantité de flux azimuthal avant et après le passage au plus proche de l'axe du tube de flux, afin de définir une valeur pour les frontières de celui-ci. De manière générale, cette étape permet également de redéfinir des frontières qui pourraient être perturbées par le champ environnant (gaine en amont, vent solaire à l'arrière, entraînant par exemple de la reconnexion magnétique, voir e.g. Ruffenach et al., 2012; Ruffenach et al., 2015). Toutes ces considérations nous ont amenés à proposer un modèle plus complet de la minimum variance permettant de résoudre ces biais.

Dans un second temps, nous avons poursuivi notre étude sur les méthodes d'ajustement paramétrique des nuages magnétiques en revisitant la méthode de Lepping (Lepping, Burlaga, and Jones, 1990) qui se sert du modèle de Lundquist (Lundquist, 1950). Cette méthode d'ajustement ne nécessite normalement pas que la composante axiale du champ magnétique soit nulle aux frontières du MC. Pourtant, ceci est imposé dans plusieurs publications, alors que Nishimura, Marubashi et Tokumaru (2019) montrent qu'imposer ou non $B_z(FR) = 0$ aux limites du nuage pourrait avoir un effet important sur l'orientation de l'axe calculé. C'est probablement la principale cause de la différence d'orientations du FR trouvée par Lynch et al. (2005) et Lepping et Wu (2010) pour les mêmes MCs comme montrés dans la figure 2 de Janvier et al. (2015) (et peut-être, la différence également trouvée par mes collaborateurs sur les quelques cas analysés à MESSENGER et Venus Express!).

Ensuite, à partir de l'ajustement du modèle aux données, nous avons défini à partir des deux frontières du MC les deux limites, inférieures et supérieures, du rayon du tube de flux torsadé. Ces paramètres remplacent les paramètres R_0 et t_0 typiquement déduits dans les études de Lepping et al. Cela nous permet, entre autres, de revisiter les nuages du catalogue de Lepping: nous avons alors constaté que les MCs croisés à 1 ua sont typiquement asymétriques, avec un côté plus grand à la fois en taille et en flux magnétique en avant ou en arrière de l'axe du tube de flux (pas de côté privilégié pour l'ensemble des MCs). Ceci peut être dû à la physique de l'éruption, ou à une plus grande érosion survenant à l'avant ou à l'arrière du tube de flux. De manière générale, nous concluons que la méthode de Lepping comprend tous les éléments clés pour adapter un modèle de tube de flux aux données in situ des MCs, à la condition essentielle de bien définir les frontières (un résultat également souligné par notre étude sur la MVA). Tant que la signification du modèle est bien comprise, ce modèle permet un nombre minimum de paramètres libres sans imposer de conditions non physiques. Il comprend également une variété de profils de torsion magnétique qui peuvent être attendus dans le contexte de la physique solaire (twist constant comme dans le modèle de Gold-Hoyle, twist plus ou moins important suivant les régions d'éruption). Ces travaux, en complément des tout récents de Lanabere et al., 2020, montrent que le profil

de Lundquist est un bon atout pour obtenir un modèle des nuages magnétiques qui ont des profils faiblement asymétriques.

D'où vient le profil intrinsèque des nuages magnétiques?

Nos travaux sur les statistiques d'ICMEs utilisant la méthode des époques superposées (subsections 3.3.2 et 3.3.3) montrent qu'il n'est pas anodin de trouver des profils asymétriques dans les données des différents paramètres magnétique et plasma, cette asymétrie pouvant évoluer d'une ICME à une autre, voire d'une catégorie à une autre (e.g. les ICMEs rapides comparées aux lentes).

Cependant, il faut aussi se souvenir que les mesures sont effectuées à des temps différents, puisque les mesures locales d'une sonde spatiale dépendent de la trajectoire de la structure étudiée, et donc de sa vitesse de propagation. Par ailleurs, les configurations magnétiques sont en expansion dans le vent solaire, comme le montrent les imageurs coronographiques et héliosphériques ou directement par la mesure directe de la vitesse du plasma. Ce phénomène a lieu du fait de la diminution de la pression totale dans le vent solaire environnant avec la distance radiale. C'est un effet qui est qualifié, dans notre communauté, de "vieillissement": plus la structure met du temps à se propager, plus l'avant de la structure aura été croisée tôt par une sonde, comparée à son arrière, entraînant ainsi un biais dans les mesures.

Cependant, au vu des résultats donnés par les SEAs, il nous semblait important de décorrélérer cette explication, relativement simple, d'une évolution intrinsèque comme l'indiquent par exemple les différentes asymétries sur le champ magnétique trouvées en fonction de la vitesse de propagation des structures.

Dans le papier de Démoulin et al., 2020, nous avons ainsi dérivé une méthode pour estimer le taux d'expansion à partir de la vitesse du plasma observée lors du passage de nuages magnétiques (nous nous sommes, dans ce papier, focalisés sur des nuages magnétiques, car leur structure (notamment les frontières) est bien définie, contrairement aux éjectas magnétiques). Cette méthode nous permet d'exprimer d'une part le facteur d'expansion en fonction de la vitesse observée, et d'autre part de convertir les coordonnées temporelles données dans les séries des paramètres, en coordonnées spatiales, permettant ainsi d'exprimer le champ magnétique $B'(x')$ dont les effets du vieillissement sont complètement enlevées. Ces profils spatiaux ont été reproduits dans la Figure 3.18, où l'on voit, en courbe de couleur, ce champ magnétique pour plusieurs des méthodes utilisées (développement de Taylor à plusieurs ordres pour obtenir la vitesse, modèle d'expansion analytique).

Nous avons ainsi montré que l'effet du vieillissement était la principale source de l'asymétrie magnétique observée pour seulement 28% des MCs. Après correction de l'effet de vieillissement, l'asymétrie est répartie, dans notre échantillon, presque symétriquement entre les MCs avec un champ magnétique plus fort à l'avant et ceux à l'arrière.

Ces différentes asymétries peuvent être expliquées par plusieurs effets: il peut s'agir d'une compression importante de la gaine, pour une asymétrie à l'avant des MCs, comme nous l'avons remarqué pour les éjectas rapides (études de Janvier et al., 2019; Regnault et al., 2020), ou par une compression à l'arrière due à un vent solaire rapide (étude de Rodriguez et al., 2016). Enfin, si l'effet de vieillissement est typiquement faible, il convient tout de même d'en corriger ses effets, par la technique que nous avons proposée dans ce papier.

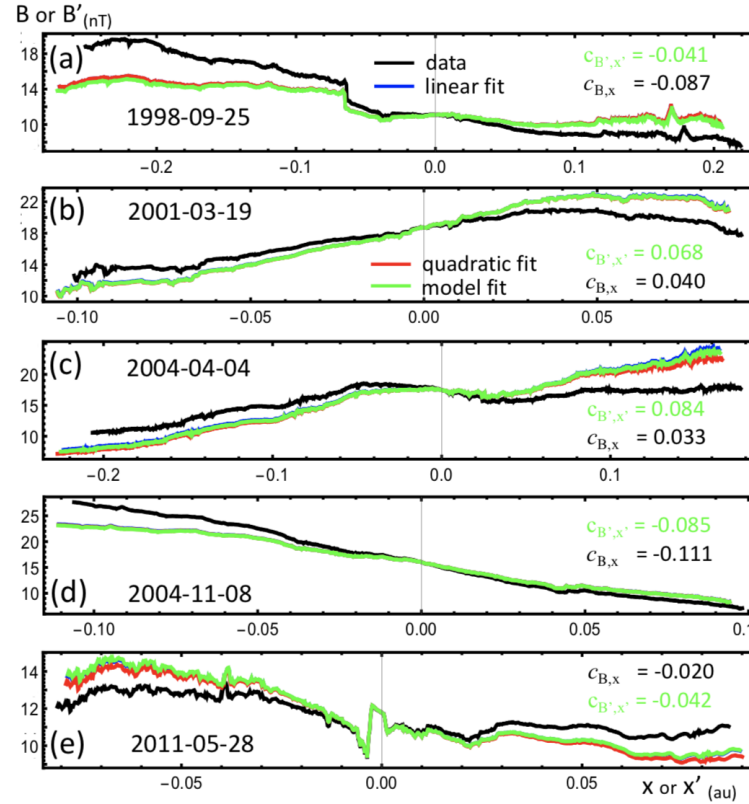


FIGURE 3.18: Champ magnétique B de plusieurs nuages magnétiques obtenu par détection in situ (noir) et retranscrits dans une coordonnée spatiale. Les courbes de couleurs montrent ce même champ magnétique avec l'effet d'expansion ou de vieillissement retiré par notre modèle, B' (les différentes couleurs montrant différents degrés de complexité des modèles provenant de l'ajustement des données de la vitesse, linéairement ou quadratiquement). Deux valeurs de mesure de l'asymétrie sont données: c_B pour B , et $c_{B'}$ pour B' , montrant qu'il persiste une asymétrie des profils bien que l'effet de l'expansion soit enlevé. D'après Démoulin et al., 2020.

3.5 Conclusions et projets

Mes études sur les ICMEs ont débuté au travers de premières discussions avec Pascal Démoulin lors de la première année de mon post-doctorat au LESIA. Ayant fait le saut entre la physique des plasmas et les observations solaires quelques mois auparavant, me plonger dans les données in situ et les modèles analytiques ne s'est pas fait sans peine! Il m'aura fallu la patience de Pascal et de Sergio (Dasso) et d'innombrables discussions pour que je prenne véritablement conscience de la valeur des données in situ (qui, il faut bien le dire, étaient tout de même un peu moins attractives à l'époque que les belles données de SDO!).

C'est cependant avec un plaisir grandissant que je me suis investie dans cette thématique de recherche en étudiant des processus physiques dans des mesures directes, bien sûr, en oubliant, un instant, la difficulté de l'étalonnage de ces mesures... étant moi-même relativement loin de l'instrumentation in situ, je ne peux qu'avoir confiance en les équipes scientifiques et avoir le luxe de ne regarder "que" les données dites de niveau 2! Cela m'a permis de compléter les aspects de modélisation et d'observations

de télédétection que je développais au même moment, sur la thématique des éruptions solaires.

Au cours des années, mes nombreuses études m'ont amenée à appréhender les structures globales des ICMEs, motivée par un désir de comprendre la physique générale de propagation dans l'héliosphère, plutôt qu'une autre approche, que sont les études de cas. J'ai pu ainsi proposer des méthodes statistiques originales pour déterminer la structure générale de l'axe magnétique et le choc des ICMEs, ce à partir de plusieurs catalogues issus de la communauté. Les modèles analytiques, en particulier le modèle ellipsoïdal, que nous avons développés avec mes collaborateurs, peuvent être proposés dans des simulations de propagation de chocs interplanétaires, comme l'étude que nous avons faite avec Möstl et al., 2015.

Ces travaux peuvent aussi être utilisés pour mieux contraindre les simulations numériques. En effet, lors de nombreuses discussions, notamment lors des conférences Shine 2017 et 2018, j'ai pu interagir avec nos collègues internationaux experts en simulation de CMEs. Bien que ces simulations permettent qualitativement de reproduire certains aspects de la propagation d'ICMEs, notamment pour certaines études de cas (par exemple Lionello et al., 2013), il n'y a finalement que peu de dialogues entre les numériciens et les chercheurs proches des données scientifiques.

Pourtant, comme nous venons de le voir à travers ce chapitre, les données de plus en plus nombreuses, et multipoints des missions interplanétaires, nous permettent d'obtenir des profils des paramètres plasma et magnétique dont il faut comprendre l'origine. S'agit-il de profils intrinsèques, liés à la physique de l'éruption? Ou s'agit-il de profils modifiés par l'interaction avec le vent solaire? En quelle proportion, et peut-on mieux comprendre les données à 1 ua avec un modèle contraint par les nombreuses découvertes faites récemment?

C'est dans ce but que nous avons formé une collaboration avec Antoine Strugarek au laboratoire CEA/AIM. Expert en modélisation numérique, nous avons monté un projet (SOLHELIO) permettant à un doctorant (Florian Regnault) de développer un module de propagation de CME du Soleil jusqu'à l'orbite terrestre dans le code PLUTO (Mignone et al., 2007). Les premiers résultats (Regnault et al., *en préparation*) sont très encourageants: en partant d'un modèle de tube de flux torsadé (Titov-Démoulin modifié, voir Titov et al., 2014), nous parvenons à reproduire l'évolution dans le vent solaire de cette structure. Par ailleurs, les coupes synthétiques du champ magnétique et des données plasma (vitesse du vent, densité) effectuées aux orbites de Mercure et Vénus reflètent très bien les résultats des époques superposées obtenues dans Janvier et al., 2019. Une analyse approfondie est actuellement en cours. Par ailleurs, ce genre de modèle, qui permet de suivre l'évolution d'une CME depuis sa formation dans la couronne solaire, permet de mieux comprendre comment les effets de l'éjection impactent les structures observées dans le milieu interplanétaire (par exemple, en mesurant l'hélicité, le flux magnétique transporté, en regardant les phénomènes d'accélération ou de décélération, voire d'érosion avec le champ magnétique du vent solaire).

Avec les missions Parker Solar Probe (NASA), Solar Orbiter (ESA/NASA), et Bepi-Colombo (ESA/JAXA), nous bénéficions en ce moment de trois sondes interplanétaires proches du Soleil. La combinaison des instruments disponibles et leurs orbites permettent déjà des observations coordonnées d'événements (e.g. Davies et al., 2020; von Forstner et al., 2021). Sachant que le cycle solaire 25 vient tout juste de commencer, les prochaines années se révéleront, je l'espère, très fructueuse dans la "récolte" d'événements interplanétaires. J'insiste en particulier sur l'aspect multipoint qu'apportent ces sondes, en plus des données récoltées à 1 ua par la sonde STEREO-A et celles proches de la Terre. Les observations de télédétection nous permettront d'une part de contraindre par imagerie les modèles de départ des CMEs: la stéréoscopie permet par

exemple de mieux appréhender la direction du champ magnétique (notamment avec les magnétogrammes HMI sur SDO et PHI sur Solar Orbiter) ou du plasma (avec la spectroscopie, e.g. SPICE sur Solar Orbiter, EIS sur Hinode, IRIS). L'imagerie en EUV et lumière visible permettra de contraindre les modèles cinématiques (EUI et METIS sur SolO, la suite SECCHI sur STEREO-A, AIA sur SDO et la suite LASCO sur SoHO). Enfin, les données in situ à plusieurs distances et longitudes héliographiques permettent d'étudier la cohérence des structures des CMEs (e.g. Lugaz et al., 2018; Good et al., 2019).

Les différentes techniques que nous avons développées (Minimum variance, ajustement du modèle de Lundquist revisité, suppression de l'effet de vieillissement) nous permettront également d'étudier les cas futurs, voire de revenir sur certains événements pour lesquels nous savons qu'il y a une grande différence dans la mesure de l'orientation de l'axe (cf Figure 2 de Janvier et al., 2015). L'idéal, comme nous l'avons vu dans certains de nos papiers (Janvier et al., 2019; Regnault et al., 2020) étant de pouvoir revenir sur la définition des frontières afin de s'assurer de la cohérence de celles-ci. Leur définition est très importante dans l'obtention d'une bonne mesure de l'orientation des MCs.

Ces diverses approches, basées sur des observations à la fois in situ et héliosphériques, sur le développement de modèles analytiques, et sur la comparaison avec des données synthétiques issues de simulations numériques, sont primordiales pour comprendre l'évolution des structures magnétiques dans le milieu interplanétaire, puis leur interaction avec les environnements planétaires. Mes travaux se poursuivront donc dans ce sens, complétés par les apports nouveaux des nouvelles sondes spatiales, qui offriront de nouvelles contraintes permettant d'améliorer nos modèles.

Chapter 4

Solar Orbiter et MEDOC

Dans le cadre de mes missions liées à mes fonctions d’astronome-adjointe, mon temps de travail est réparti entre un temps de recherche, dont le détail des travaux a été donné dans les chapitres précédents, des enseignements à hauteur de 66 h équivalent TD, et un service national d’observations.

Mon service se partage entre une contribution à la mission Solar Orbiter dans l’équipe des opérations de l’instrument SPICE, et une autre au centre de données solaires spatiales MEDOC à l’IAS. Il relève donc à la fois des services SO-5 (pôle de diffusion de données de physique solaire) et SO-2 (instrumentation pour l’exploration dans le système solaire). Je détaille ci-dessous les travaux effectués dans ce cadre.

4.1 La mission Solar Orbiter

4.1.1 Présentation brève de la mission

Solar Orbiter est une mission de l’agence spatiale européenne (ESA), lancée en février 2020 et actuellement en orbite autour du Soleil. Sa mission est de résoudre les nombreux mystères de notre étoile, depuis l’origine du vent solaire qui remplit l’héliosphère, jusqu’à la génération et la variabilité du champ magnétique solaire. Elle abordera la question centrale de l’héliophysique: comment le Soleil crée-t-il et contrôle-t-il l’héliosphère, cette bulle magnétique générée au sein de notre étoile?

L’héliosphère est donc le domaine d’influence du Soleil et englobe l’espace où se trouvent les planètes du système solaire. Rempli de particules et de champs magnétiques émanant du Soleil, il fournit un milieu où les processus physiques fondamentaux communs aux plasmas solaires, astrophysiques et de laboratoire peuvent être étudiés. La variabilité du Soleil s’exprime en partie par le cycle d’activité solaire à long terme d’environ 11 ans. Sa compréhension réside dans la façon dont le champ magnétique est généré et se comporte dans les couches internes du Soleil. D’autre part, le champ magnétique évolue également sur une échelle de temps plus courte, comme les éruptions solaires, qui peuvent envoyer des particules énergétiques et des nuages magnétisés dans le milieu interplanétaire. Ces événements peuvent affecter les technologies utilisées sur Terre comme le GPS. La mission Solar Orbiter, en analysant le Soleil et le vent solaire dans ses moindres détails, nous permettra de comprendre les variations de l’héliosphère et leurs effets sur l’environnement terrestre.

La sonde transporte une série de dix instruments de télédétection et de mesures in situ. Les instruments de télédétection couvrent une grande gamme de longueurs d’ondes afin d’observer le plasma, de la photosphère à la couronne ainsi que le champ magnétique. L’un des buts de la mission est de combler l’écart entre les observations

du Soleil et les mesures directes du plasma, des champs et ondes magnétiques et électriques, et des particules énergétiques. En raison des capacités scientifiques et de ses points de vue uniques (jusqu'à 0,28 ua de distance, et avec des orbites hors du plan de l'écliptique), nous nous attendons à faire des percées majeures dans la compréhension de la façon dont l'activité solaire influence le système solaire proche.

4.1.2 Particularités de la planification de la mission

Du fait de l'orbite atypique de la sonde et de la télémétrie changeante durant la mission, les observations de la couronne solaire doivent être planifiées à l'avance. Cette planification se fait en plusieurs étapes. La première étape est le "Long-term planning" ou LTP, qui recouvre une période de 6 mois de missions (typiquement, Janvier à Juin, puis Juillet à Décembre) et est défini par les équipes PI des instruments et de l'ESA lors des "Science Working Team" presque un an à l'avance. Lors de ces réunions, les objectifs scientifiques sont considérés en fonction des opportunités (périhélies, quadrature avec la Terre, et/ou observations coordonnées) et les fenêtres d'observation placées dans ces 6 mois (à raison de 3 fenêtres de 10 jours consécutifs). Un schéma des orbites de différentes sondes pendant un LTP est représenté dans la Figure 4.1, dans un système de référence où la Terre et le Soleil sont fixes.

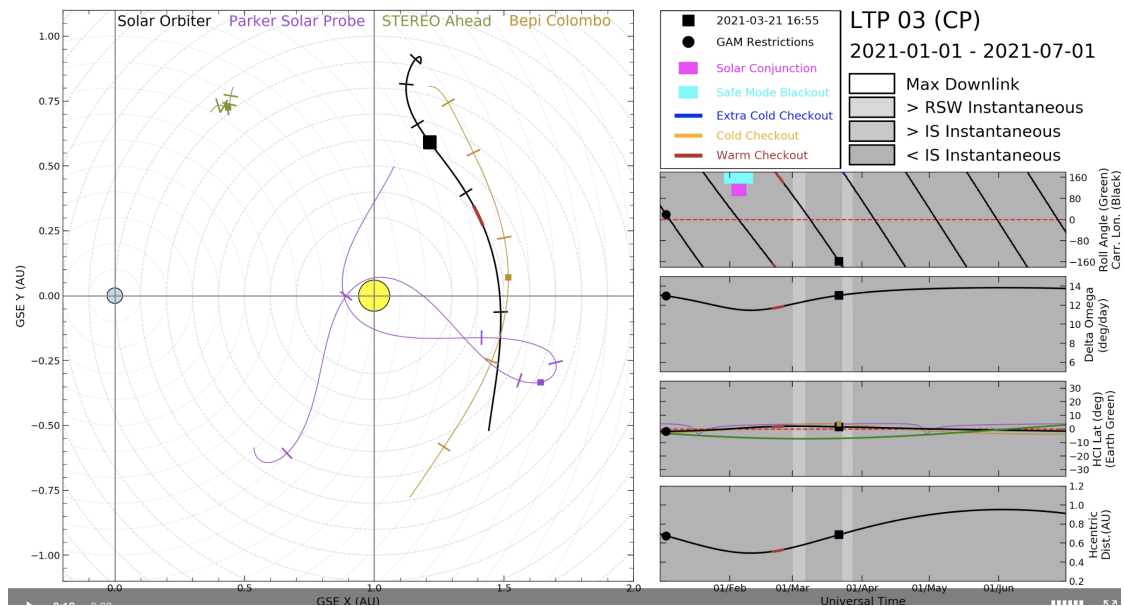


FIGURE 4.1: Schéma représentant l'évolution de l'orbite de Solar Orbiter (en noir) pendant le Long-Term Planning 03 correspondant à la période Janvier-Juin 2021. Sur celui-ci sont également placées les orbites de Parker Solar Probe (en violet) et Bepi Colombo (en ocre), permettant de repérer facilement les périodes adéquates pour planifier des observations coordonnées. Le Soleil est représenté par un cercle jaune au centre du graphe (gauche) et la Terre est représentée par un cercle pâle.

Par ailleurs, depuis le départ de la mission, il s'est avéré que la télémétrie réelle est bien meilleure que la télémétrie envisagée avant le lancement, nous permettant d'augmenter les capacités d'observation lors d'opportunités qui se révéleraient suite à l'étude d'orbites d'autres sondes, ou d'autres observations solaires en plus. Ces opportunités sont également planifiables à l'avance.

Quelques mois après l'exercice des LTPs, c'est au tour du Science Operation Working Group (SOWG) de se réunir afin de placer plus précisément les fenêtres et modes

d'observations des instruments. Cette étape se fait environ 6 mois avant le démarrage d'un LTP, et permet notamment de coordonner des séquences d'observations conjointes avec les divers instruments de la mission. Ceci est important pendant la phase de croisière, afin d'intercalibrer certains des instruments (e.g. EUI, SPICE et METIS).

Enfin, quelques semaines avant le démarrage des observations, les "planneurs" sont en charge de soumettre le "Short-Term Planning" ou STP, qui correspond à une séquence de commandes d'ingénierie et de modes d'observations scientifiques. Celle-ci est alors envoyée au centre des opérations scientifiques SOC de l'ESA, qui transformera alors toutes les commandes pour envoi au centre des opérations (le MOC).

Nous pouvons ainsi voir que la préparation et la recherche des meilleurs compromis pour les observations de la mission Solar Orbiter sont effectuées suivant des étapes bien précises, et bien en amont des périodes d'observations. Les activités scientifiques ne peuvent être réalisées que par des chercheurs, dont l'expertise scientifique est primordiale. C'est donc dans ce cadre que je suis impliquée au sein de l'IAS à la préparation des opérations de SPICE.

Je rajouterai enfin que l'IAS offre un cadre idéal pour ce service, car fortement impliqué dans la conception et l'exploitation de cette mission. En effet, il a pris part à la conception hardware de nombreux instruments d'observations à distance : c'est le cas en particulier de l'imageur dans la gamme ultraviolet EUI, de l'imageur spectral SPICE, ainsi que de l'imageur PHI qui mesurera en particulier les champs magnétiques.

4.1.3 Les opérations de SPICE

L'outil MISO

Notre équipe à l'IAS est en charge des opérations de l'instrument SPICE, le spectrographe dans l'ultra-violet extrême de la mission. La gestion de l'instrument s'effectue en collaboration avec le Rutherford Appleton Laboratory (R-U) qui a été commissionné par l'ESA en tant que maître d'oeuvre de l'instrument. Le RAL s'occupe donc de la partie ingénierie de l'instrument, tandis que l'IAS s'occupe de la gestion et des opérations.

En pratique, dans les années suivant mon recrutement jusqu'au lancement de Solar Orbiter, ma tâche a principalement consisté à la participation au sein de l'équipe à l'élaboration du logiciel de planification des opérations (permettant notamment de placer les séquences d'observations) et à leurs compatibilités avec l'instrument. Cela nous a amené à proposer l'outil de planification Multi-Instrument Sequence (ou MISO) (planning tool) dont nous nous servons de manière quotidienne lors des phases de planification.

Le rôle de "planner"

Le boîtier contenant tout le système de l'instrument SPICE contient également le "Contamination Monitoring System" ou CMS, qui scanne différentes données de divers instruments de la mission (e.g. température). En tant qu'opérateurs de SPICE, nous sommes également en charge à l'IAS de planifier de manière quasi-quotidienne les séquences permettant d'opérer le CMS et de fournir à l'ESA le rapport de celui-ci.

Ainsi, depuis le lancement réalisé avec succès de la mission, je participe en tant que "planner" à l'élaboration des STPs pour opérer le CMS, ainsi qu'aux opérations scientifiques, notamment toutes celles réalisées lors de la fenêtre d'observation de mi-mars 2021 (le Remote-Sensing Checkout Window 3). Ces dernières m'ont permis:

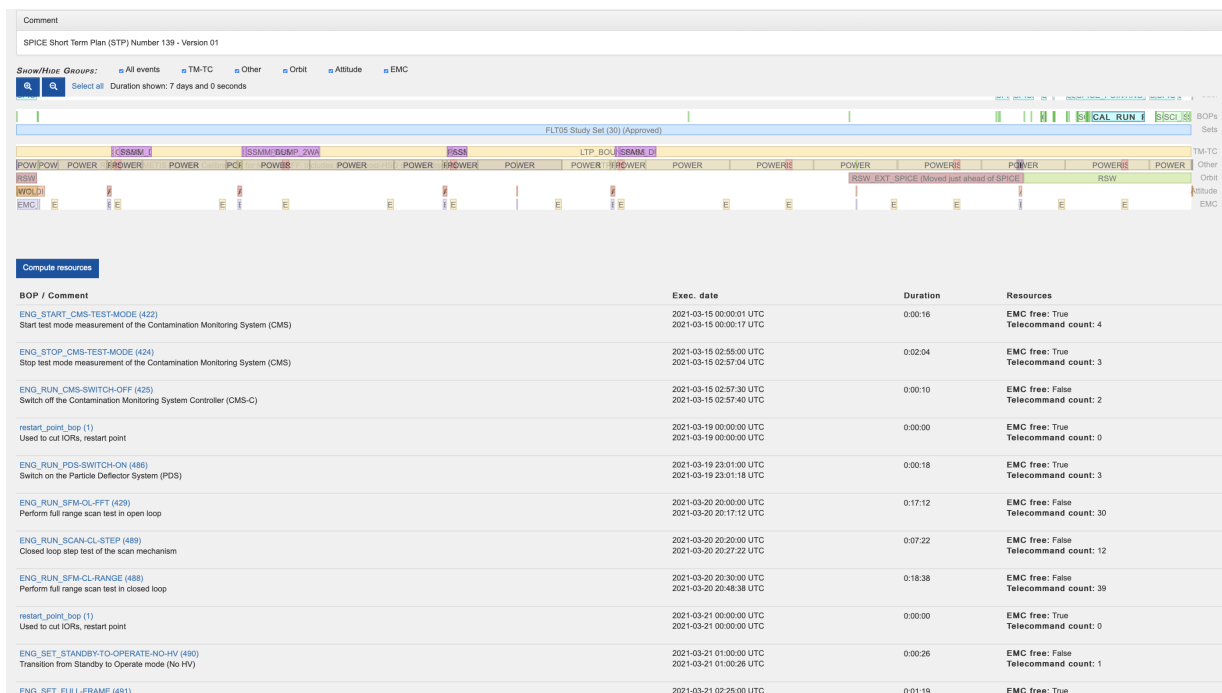


FIGURE 4.2: Capture d'écran montrant un des outils de planifications des opérations de l'instrument SPICE, développé à l'IAS. L'outil montré ci-dessus représente la ligne de temps pour une "short-term planning" donnée, et permet de placer des programmes d'observations contenant les séquences voulues.

- de me familiariser avec la mise en place de toutes les séquences permettant différents modes d'observations du spectrographe (e.g. en mode dynamique, ou synoptique, avec des temps de pose et des raies différentes),
- d'établir les liste de raies possibles pour chacune des observations à charger en amont des observations,
- de s'adapter de manière flexible aux opportunités de dernière minute (coordination avec d'autres instruments pour des séquences d'observations rapides, augmentation de la capacité d'observation suivant la télémétrie).

Observations coordonnées avec d'autres missions spatiales

En plus des opérations coordonnées avec les autres instruments de Solar Orbiter, la particularité de l'orbite de la sonde permet également des opportunités d'observations conjointes avec la Terre.

Dans le cadre de la spectroscopie solaire, deux autres missions sont d'un intérêt tout particulier: HINODE avec le spectrographe EUV EIS, et la mission IRIS (plutôt dédiée à la chromosphère/zone de transition).

La fenêtre d'observation (la STP-122 du 16-21 novembre 2020) a été la première opportunité de mettre en place des observations coordonnées avec tous ces instruments. Malgré le fait que Solar Orbiter soit positionné à 120 degrés de la Terre, j'ai pu organiser une campagne d'observation synoptique, permettant de suivre une région active apparue sur le disque solaire quelques jours plus tôt avant son passage dans le champ de vue de SPICE. Les résultats de cette campagne sont encore en cours d'analyse, mais

celle-ci nous a déjà permis de mettre en place un protocole qui permet de demander du temps d'observations pour des données complémentaires d'autres missions ou télescopes.

Dans un futur proche, nous allons donc proposer le même genre d'observations pour les opportunités de quadratures qui auront lieu au printemps et à l'été 2021, afin de tester les résultats avant le début de la phase nominale fin 2021.

Animation au sein de l'équipe SPICE à l'IAS

Je participe au sein de mon équipe à la gestion du consortium SPICE (organisation, avec mes collègues, des réunions du consortium). Je suis également en charge de l'aspect communication interne et externe de l'instrument, avec l'élaboration du site web de SPICE, et de l'organisation des activités de communications.

4.2 MEDOC

4.2.1 Présentation du MEDOC

Le centre de données spatiales MEDOC (Multiple Experiment Data and Operation Center - <https://idoc.ias.u-psud.fr/medoc>) est un centre de traitement, d'archivage, et de diffusion de données solaires : c'est le centre thématique national (convention CNES/INSU/Paris-Saclay) pour les données solaires spatiales. Ce centre fournit les données de plusieurs missions spatiales ou instruments dédiés à l'étude et à la surveillance du Soleil: SOHO (ESA/NASA), Spirit/CORONAS (Roskosmos), STEREO (NASA), AIA/SDO (NASA) et Picard (CNES). Ce volume de données, sans précédent dans l'histoire de la physique solaire, est exploité par nombre de chercheurs grâce à leur mise en ligne sur la base de données solaires MEDOC. Cette activité doit être pérennisée et une des tâches de mon service est d'assurer la continuité de l'intégration des données des missions présentes et futures et de fournir les données intégrables au MEDOC.

4.2.2 Cartes de courants (projet SSA)

La météorologie de l'espace définit les conditions spatiales d'environnements naturels comme celui de la Terre. Les perturbations de ces environnements sont principalement provoquées par le Soleil et peuvent affecter les activités technologiques humaines. Il devient de plus en plus évident que les prévoir, dans un temps imparti adéquat, nécessite une surveillance continue de notre étoile. En particulier, il faut pouvoir surveiller et caractériser les sources à l'origine des perturbations, ainsi que fournir les conditions initiales et aux limites pour des modèles qui seraient basés sur les données observationnelles.

C'est dans ce cadre que nous avons répondu avec succès à un appel à projet de l'ESA dans le cadre du "Space Situation Awareness" (SSA). Dans le cadre de cet appel d'offre, nous proposons de répondre aux exigences de la météorologie de l'espace en proposant le développement d'un ensemble de ressources solaires permettant l'analyse des événements météorologiques solaires.

En particulier, j'ai proposé et je suis responsable, entre autres produits à valeur ajoutée de météorologie solaire, de la mise à disposition des cartes des courants électriques dans les régions actives. Celles-ci sont dérivées de magnétogrammes vectoriels à haute résolution et cadence temporelle à partir des données de l'instrument SDO /

HMI. Ces données sont hébergées au MEDOC. Les régions de forte densité de courant électrique se produisent dans les régions de fort cisaillement de champ magnétique, le plus souvent dans les régions actives du Soleil. Cela est dû d'une part à l'émergence localisée de structures magnétiques telles que les tubes de flux torsadés, et d'autre part par l'évolution intrinsèque des taches solaires. Les régions à haute densité de courant électrique sont des régions où les conditions "MHD idéale" du plasma peuvent se dégrader: ces régions deviennent alors des localisations préférentielles pour la reconnexion magnétique (voir Chapitre 2). À ce titre, il a été montré que l'évolution des courants électriques dans les régions actives sont de bons indicateurs des mécanismes sous-jacents déclenchant les éruptions solaires (voir, par exemple, Janvier et al., 2014; Janvier et al., 2016). Un exemple est donné pour rappel en Figure 4.3, même si plus de détails sont discutés dans le cadre de mes recherches dans le Chapitre 2.

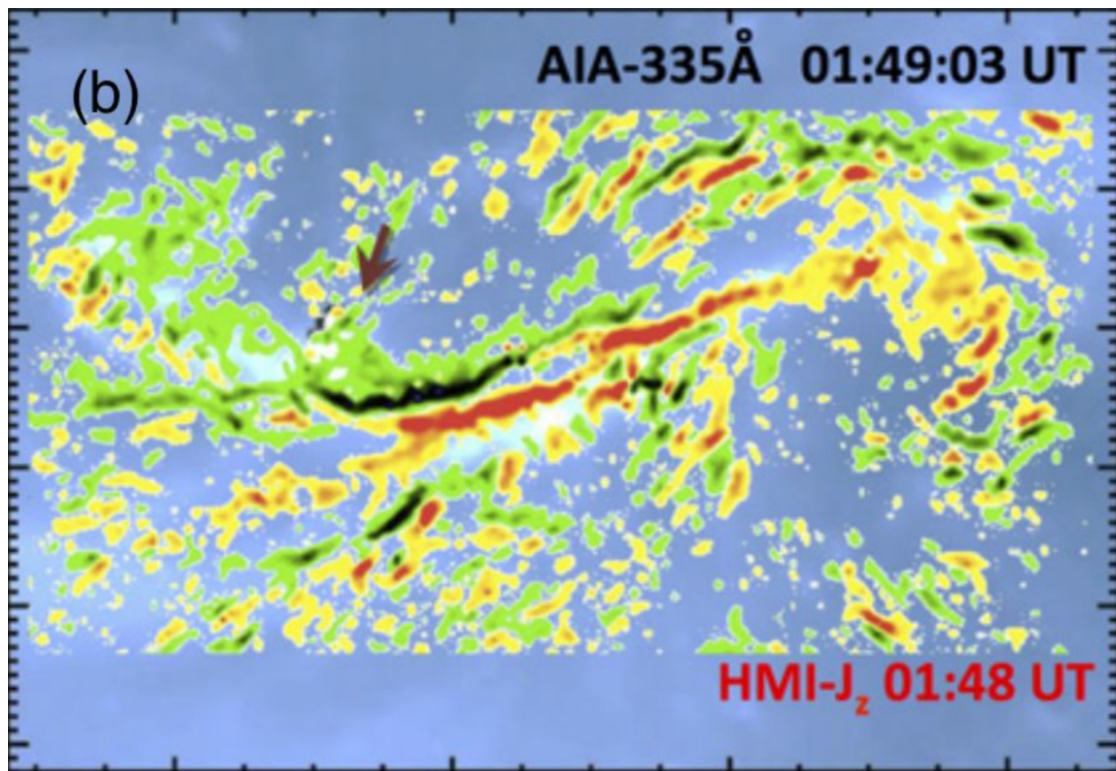


FIGURE 4.3: Exemple de cartes de courant électrique (ici, la composante verticale J_z) dans une région active, permettant d'appréhender des régions à fort cisaillement de champ magnétique et pouvant servir de marqueurs possibles d'éruptivité. (D'après les études de Janvier et al., 2014; Janvier et al., 2016.)

Enfin, les courants totaux non neutralisés et non signés dans les régions actives se sont avérés être un bon prédicteur de l'activité éruptive, surpassant d'autres proxys tels que le flux magnétique non signé (Kontogiannis et al., 2017).

En conséquence, les régions de densité de courant électrique sont des proxys intéressants à surveiller, nous informant sur les structures magnétiques complexes et les processus éruptifs des régions actives. Elles montrent de bonnes perspectives d'inclusion dans les opérations de prévision des éruptions. Nous avons donc proposé de produire systématiquement des cartes de J_z , la composante verticale de la densité de courant électrique, qui peut être dérivée des composantes transverses du champ magnétique vectoriel. Le champ magnétique vectoriel est dérivé en temps quasi réel dans ce que

l'on appelle les SHARP (Space Weather HMI Active Region Patches) par l'équipe d'instruments HMI (code d'inversion Milne-Eddington). La série de données HMI de champ magnétique vectoriel en temps quasi réel est déjà disponible dans l'archive MEDOC, avec un retard de l'observation d'environ 1 à 2 heures. Cela devrait permettre la production de cartes J_z à une cadence de 12 min, avec pas plus de 2 heures de retard à partir de l'heure d'observation.

Dans le cadre de cette activité, nous développons donc:

- un pipeline pour générer des cartes de courants électriques et pour calculer automatiquement les courants signés et non neutralisés non signés, à mesure que de nouvelles données sont disponibles (en cours)
- des images J_z -maps pour les régions actives du Soleil. Ceux-ci peuvent être superposées avec des images SDO / AIA.
- des signalements spécifiques pour certains seuils des valeurs des courants électriques.
- la mise à disposition du produit via le portail Solar Weather ESC de l'ESA

La mise à disposition de ces cartes de courants électriques via le SSA SWE Network étendra les services offerts par le Solar Weather ESC et les rendra largement disponibles. Les communautés d'utilisateurs de la météorologie de l'espace SSA ciblées sont principalement des fournisseurs de services tiers, des utilisateurs experts et la communauté scientifique. Les produits peuvent être utilisés pour des analyses post-événement pour les concepteurs et opérateurs de satellites, ou encore pour la météo de l'espace dans le système solaire.

4.2.3 Intégration des données dans le futur

La mission du MEDOC en tant que centre de traitement, d'archivage et de diffusion de données solaires est diverse, depuis l'identification des données de physique solaire, à leur collecte et à leur mise à disposition à la communauté scientifique. En particulier, MEDOC prépare l'intégration des données de la mission Solar Orbiter. Mon travail consiste à l'heure actuelle à la veille des besoins de la communauté ainsi que de l'intégration des futurs jeux de données de la mission dans MEDOC. En particulier, la mission Solar Orbiter permettant le lien entre données de télédétection et in situ, un des objectifs principaux est d'appréhender au mieux cette connexion par le développement d'outils de prédiction et de modélisation de la couronne solaire et du vent solaire. C'est notamment l'objectif d'un groupe de travail de Solar Orbiter (le MADAWG), dont MEDOC est partie intégrante.

Chapter 5

Conclusion, direction de recherche, et quelques réflexions

5.1 Conclusion et perspectives des activités scientifiques

Les "points forts" de mes recherches

Chacune des parties liées à mes thématiques de recherche (les chapitres 2 et 3) a déjà mis en avant la conclusion de celles-ci et leurs perspectives futures. Je ne réitérerai pas ces points ci-dessous, mais donnerai un aperçu rapide des points forts de mes activités que j'ai développées jusqu'à présent.

Mes activités de recherche ont pour but la compréhension de l'évolution et de la restructuration du champ magnétique, depuis l'atmosphère solaire au milieu interplanétaire. J'aime travailler avec des techniques différentes, sur des sujets différents, qui me permettent d'avoir un aperçu global de phénomènes physiques liés les uns aux autres. C'est ainsi que je navigue avec une curiosité sans fin entre les phénomènes éruptifs au Soleil, dont les empreintes sont vues par nos télescopes en télédétection, aux nuages magnétiques et à des approches plus analytiques, aux rayons cosmiques et à leurs interactions avec les structures transitoires de l'héliosphère. Bien qu'aborder ces différents sujets demande parfois une certaine gymnastique, c'est un véritable plaisir que de travailler sur des phénomènes dont les concepts fondamentaux peuvent se transposer d'un sous-domaine à un autre. Un bon exemple est celui de la reconnexion magnétique, le fil conducteur de mon passage entre la physique des plasmas et la physique solaire.

Ces travaux m'ont ainsi poussée à inventer de nouvelles techniques d'analyse dans chacun de mes projets: c'est le cas des techniques numériques me permettant d'analyser des instabilités MHD non-linéaire à l'origine de la reconnexion explosive (travail de thèse), à l'exploitation poussée de codes numériques et leurs comparaisons aux observations, à l'élaboration de techniques statistiques me permettant d'analyser les traits génériques des phénomènes transitoires de l'héliosphère. Tous ces projets sont basés sur des compétences acquises au cours des années:

- L'exploitation de simulations numériques:
 - Développement/exploitation d'un code MHD en 2D (mon doctorat), avec de nouvelles techniques pour caractériser des modes non-linéaires d'instabilité MHD dans les plasmas de fusion à très faibles coefficients de diffusion.
 - Développement/exploitation d'un code MHD en 3D (post-doctorat + recherches récentes sur le modèle 3D des flares). Simulations à zéro beta et à champ ancré dans la photosphère pour reproduire la couronne solaire.

Ces compétences m'ont permis de participer à d'autres études utilisant des simulations numériques (comme celle sur le chauffage coronal avec le code Lare3D (Pontin et al., 2017)). Elles me permettent également de diriger en collaboration étroite avec Antoine Strugarek (CEA/AIM) les développements de Florian Regnault pour la modélisation des ICMEs dans le vent solaire avec le code MHD 3D à maillage adaptatif PLUTO.

- La comparaison à des mesures directes (observations)
 - Dans les plasmas de laboratoire : évaluation des temps caractéristiques de développement des îlots magnétiques dans les tokamaks (mesures in-situ dans les chambres magnétiques confinant le plasma)
 - En physique solaire: mesures télémétriques multi-longueurs d'onde (radio, UV extrême, magnétogrammes) et in-situ permettant d'étudier les propriétés magnétiques des structures observées. J'analyse moi-même directement des données spatiales, permettant une synergie des approches numériques et observationnelles pour en comprendre la physique intrinsèque. Résultats importants: Compréhension des phénomènes solaires observés (images 2D) que je peux interpréter grâce à mon travail sur les modèles 3D utilisant des outils topologiques du champ magnétique.
 - Analyse des structures du milieu interplanétaire (nuages magnétiques, chocs) grâce à de nouvelles méthodes (combinant statistiques et modèles analytiques). Ce travail me permet de comprendre l'évolution des éruptions solaires, de leur genèse dans l'atmosphère du Soleil au milieu interplanétaire.

Ces connaissances me sont essentielles aujourd'hui pour interpréter et relier les données de missions multi-instruments comme Solar Orbiter, et pour créer des synergies de recherche entre plusieurs missions (par exemple, pour coordonner les efforts d'observations entre Solar Orbiter et d'autres observatoires comme Bepi-Colombo, Hinode, ...)

Perspectives

Tous mes résultats sont motivés par une volonté de compréhension des phénomènes fondamentaux qui régissent l'évolution des structures magnétiques, que ce soit dans les plasmas de laboratoire ou dans les plasmas solaires (j'en fait d'ailleurs le lien dans une de mes revues par le biais de la reconnexion magnétique (Janvier, 2017)).

Les mécanismes sous-jacents sont universels, et existent sur des échelles temporelles et spatiales variées. L'analyse de la reconnexion et de la topologie en 3D permet de comprendre à la fois l'évolution du champ magnétique de l'atmosphère solaire, le chauffage et la formation d'îlots magnétiques par reconnexion, des structures magnétiques dans la couronne solaire et leur propagation dans le milieu interplanétaire. Bien que ces dernières années de recherches m'aient appris que planifier ses recherches sur la durée soit une entreprise vaine (mes sujets se développent surtout par "mitose" de problèmes suite à des discussions entre collègues, et par opportunités au détour de rencontres fortuites), certaines grandes perspectives attisent toutefois ma curiosité.

C'est le cas par exemple:

- d'aller sonder un peu plus les mécanismes microscopiques de la reconnexion magnétique dans le cadre de la physique solaire. La détection d'un rayonnement multi longueurs d'ondes (notamment les rayons X durs) lors des flares, mais aussi les expériences de plasmas de laboratoire, nous indiquent que la reconnexion

magnétique dissipe de l'énergie magnétique sous des formes diverses et variées. Du chauffage du plasma, à de l'énergie cinétique, à des particules énergétiques, le problème de la partition énergétique de ce phénomène reste entier. Par ailleurs, les nouveaux résultats issus d'expériences de plasmas de laboratoire (e.g. Yamada et al., 2015) indiquent que la partition énergétique n'est pas la même, que l'on considère les ions ou les électrons du plasma dans la nappe de courant où la reconnexion prend place. Qu'en est-il de celles rencontrées dans la couronne solaire? Existe-t-il un scénario différent pour les flares non éruptifs, et ceux à l'origine de CMEs rapides? Peut-on mieux comprendre le phénomène des CMEs dites "furtives" (stealth CMEs, Howard and Harrison, 2013), qui n'ont pas de signatures éruptives, mais dont les caractéristiques sont similaires aux CMEs issues des flares? J'espère que les nouvelles données de Solar Orbiter, et notamment nos observations en spectroscopie "comparée" (utilisant différents observatoires, comme IRIS qui regarde plutôt la chromosphère/région de transition, et EIS qui regarde plutôt la couronne chaude) nous permettront d'ajouter de nouvelles contraintes sur le chauffage du plasma lors des flares.

- de transposer nos connaissances sur l'activité éruptive de notre Soleil aux autres étoiles. Kepler, TESS, et bientôt Plato nous ont fourni et nous fournira de nouvelles données de flares stellaires, ce qui nous permettra de caractériser les phénomènes éruptifs sur d'autres étoiles. Une idée potentielle est l'utilisation de techniques numériques, telles que celle que nous développons avec le CEA sur la modélisation des CMEs solaires contraintes par nos données in situ. Grâce à nos développements, qui allient des études statistiques de données de sondes afin de contraindre les études paramétriques possibles par le numérique, nous pourrions dans le futur caractériser les processus clés de l'initiation des CMEs afin d'obtenir les ingrédients nécessaires aux flares éruptifs stellaires.
- d'améliorer notre compréhension de l'influence des phénomènes transitoires dans l'héliosphère sur les environnements planétaires. L'analyse de données des missions planétaires (e.g. MESSENGER, Venus Express) combinée à la surveillance planétaire (par exemple les conséquences enregistrées sur les surfaces planétaires comme la décroissance de Forbush) nous donnent une fenêtre d'études sur les processus à grande échelle de l'arrivée des CMEs aux planètes. Des études telles que celles que nous avons menées dans Möstl et al., 2015; Freiherr von Forstner et al., 2020 nous montrent que les réponses d'instruments au sol sur d'autres planètes du système solaire (comme l'instrument RAD sur Mars Science Laboratory) contraignent également les modèles de propagation des ICMEs ou des interactions de vents solaires rapides/lents. Dans le futur, d'autres instruments comme BERM sur BepiColombo nous permettront d'aller sonder les variations des rayons cosmiques dans l'héliosphère interne, voir dans l'héliosphère lointaine avec des missions comme Interstellar Probe¹. L'idée d'aller sonder l'héliosphère lointaine est pour moi des plus excitantes, car elle combine mon intérêt certain pour le champ magnétique, les phénomènes transitoires, et invoque un imaginaire, une sorte de "terra incognita" que seules les sondes Voyager ont exploré (et de manière infime!). Ad astra, donc!

Toutes ces perspectives, bien que très excitantes à long terme, ne sauraient supplanter les travaux à plus court terme que je présentais dans les chapitres précédents. Comme je le mentionnais plus haut, mes recherches ont fait écho aux opportunités qui m'ont été données ou que j'ai moi-même cherchées, et c'est toujours avec grand plaisir

¹<http://interstellarprobe.jhuapl.edu>

que j'accueille de nouvelles idées, discussions, projets, et l'opportunité de mieux connaître ou de découvrir des collaborations avec d'anciens et de nouveaux collègues. A 10 ans d'années après ma thèse, et encore (je l'espère!) bien d'autres devant moi, c'est donc ces interactions que je privilégierai avant tout, car ce sont elles qui m'auront fourni l'énorme satisfaction du travail en équipe, de séances de "brain picking", de réflexions sur nos sociétés, d'heures infinies de bons moments passés, dans et hors recherche, de pauses café dans les conférences, du plaisir de se retrouver.

La crise mondiale liée à la pandémie du COVID19 nous l'aura bien montré: plus que le nombre de publications et de citations, ce qui nous fait tenir, outre la satisfaction intellectuelle de repousser un peu plus loin les frontières de notre savoir, ce sont les échanges, l'appartenance à une communauté. En quelques mots de fin, ma plus grande perspective de carrière, c'est de continuer à créer un environnement de recherche inclusif et le plus égal et agréable possible. Quitte, finalement, à passer aussi du temps à lutter contre un système qui nous pousse à une compétitivité sans fin, et avec si peu d'égard et d'auto-critique sur sa nature discriminatoire, et des conséquences sur notre société.

Les deux dernières sections suivantes montreront, je l'espère, mon implication vers ce chemin.

5.2 Direction d'étudiants

Au cours de mes années de recherche, j'ai pris un plaisir grandissant à collaborer et à diriger le travail de jeunes chercheur.ses. Je m'implique annuellement dans la formation par la recherche d'étudiant.es lors de stages, et ce à tous les niveaux (de la licence au master). Ces stages conduisent mes étudiant.es à contribuer de façon significative à la rédaction d'articles. Par ailleurs, je co-dirige depuis 2019 deux thèses de doctorat, et m'investit de manière régulière dans des jurys et comités de suivi de thèse. Enfin, mes intérêts sur des sujets variés, et mes nombreuses collaborations m'ont également permis de m'impliquer dans des travaux de collaborations de jeunes doctorant.es et post-doctorant.es.

Je précise toutes ces implications ci-dessous, qui démontrent ma volonté de m'engager dans la formation des jeunes générations de chercheur.ses.

Directions de thèses de doctorat

- Thèse de Florian Regnault à l'IAS Equipe Physique solaire/stellaire, 2018-2021

Titre: "Origine et évolution des éjections de masse coronales dans l'héliosphère"
Demi-financement DIMACAV sur le projet "SOLHELIO - Les structures fondamentales de la météo de l'espace: évolution des éjections coronales de masse à travers l'héliosphère."

Direction: En co-direction avec Frédéric Auchère (IAS) et en collaboration avec Antoine Strugarek (AIM/CEA).

ED: Ecole doctorale Ondes et Matière

Objectif: analyse des données in situ d'ICMEs par les méthodes d'époques superposées, et étude paramétrique conjointe par le code numérique PLUTO afin de trouver les processus physiques d'interactions entre les ICMes et le vent solaire.

Publications: Regnault et al., 2020, + une en préparation.

- Thèse de Guillaume Bernoux à l'ISAE-ONERA PSI Physique Spatiale et Instrumentation, 2019-2022

Titre: "Utilisation de l'imagerie solaire pour la prédiction de l'état des ceintures de radiations terrestres."

Direction: En co-direction avec Angelica SICARD (ONERA), sous la supervision d'Antoine Brunet (ONERA) et Eric Buchlin (IAS).

ED: ED173 Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E), Toulouse

Objectif: être capable de prédire la dynamique des ceintures de radiations en utilisant des méthodes d'apprentissage machine, en partant de données provenant de l'imagerie solaire, dans une optique «opérationnelle»

5.2.1 Jurys et comité de thèse

Jurys de thèse

- Examinatrice de la thèse de Tohir Akramov sous la direction de Hubert Baty, Université de Strasbourg, septembre 2017. "La reconnexion magnétique explosive dans les nappes de courant multiples : application à l'environnement des pulsars"
- Examinatrice de la thèse de Luis Linan sous la direction de Guillaume Aulanier et Etienne Pariat, Observatoire de Paris, septembre 2020. "Accumulation et évolution des hélicités magnétiques relative, non potentielle et mêlée, lors des phénomènes actifs de l'atmosphère solaire"

Comités de suivi de thèse

- Membre du comité de la thèse de Samantha Stever (IAS) - 2016-2019
- Membre du comité de la thèse de Edouard Lecoq (IAS) - 2017-2020
- Membre du comité de la thèse de Naïs Fargette (IRAP) - 2019-2022
- Membre du comité de la thèse de Tania Le Pivert (IAS) - 2020-2023
- Membre du comité de la thèse de Claire Baskevitch (LATMOS/LESIA) - 2020-2023

5.2.2 Directions de stages d'études

Etudiant.es en Master

- Mars 2011 (1 mois, Université de Kyoto): Aohua Mao (M2). Simulations numériques du double tearing. En poste de recherche en Chine.
- Printemps 2016 (3 mois, IAS): Baptiste Meylheuc (M1). Imagerie solaire et ondes EIT. Embauché depuis au CNES.
- Printemps 2019 (4 mois, IAS): Florian Regnault (M2). Analyses de données in situ d'ICMEs par les époques superposées. En thèse à l'IAS.
- Printemps 2021 (2 mois, IAS): Siméon Cholley (M1). Analyses de données de champ magnétique de Bepi-Colombo pendant la phase de croisière.

Etudiant.es en Licence

- Ete 2015 (2 mois, Université de Dundee): Fraser Dougan (L3-Honours). Analyse des données SDO (AIA et HMI) pour obtenir des cartes de courant électrique. A participé à l'étude de Janvier et al., 2016.
- Ete 2016 (1 mois, IAS): Manon Césaire (L3). Etude statistique des chocs depuis la base de données ipshock.fi.
- Ete 2017 (1 mois, IAS): Elise Bonhomme (L3). Développement du code numérique en Python pour les analyses statistiques des données de MESSENGER et Venus Express. A participé à l'étude de Janvier et al., 2019.
- Printemps 2020 (3 mois, IAS): Sofia Topsis-Moutesidou (L3, Erasmus+). Développement du code numérique en Python pour les analyses statistiques des données de ACE et de moniteurs à neutrons pour l'analyse des décroissances de Forbush. A participé à une étude en cours de rédaction.
- Automne 2020 (1 mois, stage d'immersion recherche, IAS/en ligne): Walid Amrouche et Yannis Benmansour (L2). Retrouver des tempêtes solaires dans les données de sondes spatiales in situ et remote-sensing.

5.2.3 Collaborations

Mes collaborations avec de plus jeunes doctorants et post-doctorants ont augmenté au cours du temps, me permettant ainsi de m'impliquer dans la formation par la recherche de jeunes chercheur.ses. Ces collaborations sont internationales, et je me permets de les citer ci-dessous:

- Travaux de doctorants: Masías-Meza et al., 2016; Lanabere et al., 2020 (Argentine) Dacie et al., 2016; Polito et al., 2017 (Royaume-Uni), Freiherr von Forstner et al., 2020 (Allemagne), + une supervision directe des travaux de Carlos Alanis-Perez (Mexique) en co-direction avec Teresa Nieves-Chinchilla (NASA/GSFC, E-U) (publication en préparation)
- Travaux de post-doctorants: Joshi et al., 2019 (Corée) et Barczynski et al., 2020 (France)

Par ailleurs, mon travail de mentor d'une équipe de recherche alliant la physique solaire et réseaux de neurones pendant le Frontier Development Lab (NASA/Seti Institute, Eté 2019) a conduit mon équipe à publier un papier (dos Santos et al., 2020).

5.3 L'importance de la communication scientifique

5.3.1 Réflexions

Depuis ma thèse de doctorat, ma passion pour la communication scientifique avec le grand public et pour la promotion de la science aux populations sous-représentées n'a fait que grandir. Il me semble en effet très important de partager au plus grand nombre les connaissances et les nouvelles découvertes de notre domaine, qui plus est parce que celui-ci est financé par de l'argent publique et que notre domaine participe aux avancées

scientifiques et technologiques dont les retombées ne sont pas sans conséquence dans la vie publique.

La diffusion de ces connaissances au grand public, aussi appelée communément "communication scientifique", fait d'ailleurs partie de la première mission des astronomes et astronomes-adjoints, au vu du décret 86-434 définissant les missions de notre corps.

A notre époque, la communication scientifique peut se faire sous plusieurs formes, que ce soit lors de présentations dans des salles de classes, des festivals de science ou des séminaires grand public, ou encore par la rédaction d'articles grand public dans des revues plus ou moins spécialisées, sur internet, et enfin grâce à de nouvelles technologies permettant la visualisation des données scientifiques et une nouvelle approche de communication, qui se fait souvent en dehors d'un cadre institutionnel. A la croisée entre technologie, design, art et science, de nombreux projets permettent désormais d'inciter le public à connaître les sciences de manière éducative et ludique. Cependant, la maîtrise de ces technologies de communication, la compréhension de l'attente du public, le développement de projet, les déplacements pour faire connaître ces projets au public, et enfin et surtout les demandes d'argent permettant de financer de tels développements demandent du temps. Ce temps, il me semble, ne devrait pas être considéré comme du temps normalement dédié à la recherche pure.

Ce temps, qui plus est surtout pour un.e jeune chercheur.se dont la compétitivité au niveau international se mesure aux nombres de projets scientifiques et de publications, est par ailleurs difficile à prendre. En effet, ce temps est partagé sur différentes missions (SNO, enseignements), en plus de la mission principale de recherche. Ainsi, bien que la diffusion des connaissances fassent partie de notre première mission, celle-ci est bien trop souvent reléguée à une activité "en surplus" prise sur le temps libre des chercheur.ses investi.es.

A l'heure où les sciences subissent un fort impact négatif du fait des politiques de réduction budgétaire, de compétitivité débridée, de la montée des pseudo-sciences et d'un grand débat autour des "fake news", il est important que les scientifiques s'investissent davantage dans la communication vers le grand public. J'invite ainsi les lecteurs et lectrices de ce manuscrit à réfléchir à la mise en valeur de ces activités bien souvent considérées comme à la marge, et impactant fortement l'investissement des chercheur.ses motivé.es à faire connaître notre domaine au plus grand nombre. J'aimerais moi-même que cette réflexion, qui pourrait prendre la forme d'un débat au sein de notre communauté, puisse amener:

- à reconsidérer les ratios de temps impartis aux différentes missions;
- voire même à définir une mission de communication bien à elle en contrepartie d'une autre;
- à reconsidérer le décompte des activités de dialogue entre sciences et sociétés qui ne sont pas forcément dans un cadre institutionnel.

Faute d'avoir pu moi-même engager un dialogue avec certain.es de mes pair.es, je continue avec la même motivation mes diverses actions que je présente ci-dessous, et en détail dans l'Annexe C.

5.3.2 Activités

Ma passion de faire partager la science au plus grand nombre, et qui plus est en tant que femme en science, est le levier que j'ai le plus à cœur, en plus de mes contributions liées à l'exercice de mon métier. Ce sont ces interventions qui m'ont convaincue de l'envie de tous de comprendre le monde qui nous entoure. Ce désir, je pense, vient

du plus profond de nous, la curiosité étant inscrite dans notre ADN. Mes interventions sont variées et me permettent de toucher un large public: dans les classes d'école, dans les hôpitaux pour enfants malades, lors de festival de sciences, dans les médias (comme dans l'émission "La méthode scientifique" à laquelle j'ai été invitée à participer) ou dans des événements à grande portée comme ceux des TED et TEDx. Enfin, mes propres projets à la croisée entre science et expériences digitales sont pour moi des opportunités à la fois de sensibiliser un large public aux sciences, qui plus est au domaine de l'astrophysique qui me fascine tous les jours, mais aussi une forme d'activisme, en montrant que la science peut et doit se montrer accessible à tous.tes, sans discrimination de genre.

Ce partage avec le grand public a commencé dès mes années de thèse, pendant lesquelles j'ai été amenée à plusieurs reprises à participer sous diverses formes à des activités de diffusion scientifique (portes ouvertes, conférences astrophysiques à l'Université de Kyoto). Lors de mon post-doctorat à l'Observatoire de Paris, j'ai contribué avec un plaisir grandissant aux activités grand public du site, notamment des portes ouvertes telles que "La Nuit des planètes", ainsi que des colloques organisés par AXA (alors financeur de mon post-doc) me permettant de partager le sujet de mes recherches à travers plusieurs formats (vlog, concours photos).

Au cours de mon séjour au Royaume-Uni, j'ai pu me familiariser avec une communauté très active de la communication scientifique. J'y ai beaucoup apprécié la place importante faite à la culture scientifique et le partage au grand public dans ce pays. C'est dans ce contexte que je me suis lancée sur d'autres formats de communication, participant par exemple au concours international "Famelab", me permettant d'obtenir le prix du public de la région Ecosse, et d'avoir reçu un prix pour mes présentations à la House of Commons (le Parlement britannique) lors de l'événement SET for Britain (2015).

Depuis mon retour en France, mes actions de communication scientifique prennent des formes très variées, entre l'organisation de ma propre association alliant science et arts digitaux (voir sous-section suivante), conférences grand public, médias et visites de classe. La transmission du savoir aux élèves du primaire et du secondaire est de façon générale très stimulante, car leurs esprits vifs et intéressés m'obligent constamment à remettre en question mes acquis personnels afin de reformuler mon savoir dans un langage plus accessible.

Au cours de ces dernières années, c'est un dernier volet, celui du monde associatif, qui me donne un retour poignant sur nos actions. En tant que bénévole, je participe au sein de trois associations: Les Ptits cueilleurs d'étoiles², avec laquelle je me rends au chevet d'enfants et adolescents dans des hôpitaux pour enfants malades, Champ Libre³ avec laquelle je rends visite à des personnes détenues dans des services pénitenciers, à la fois pour échanger sur leur quotidien dans un milieu carcéral et pour leur transmettre ma curiosité et mes recherches. Enfin, je fais partie de la plateforme SciAll⁴, organisation internationale formée par un de mes amis "TED Fellows", regroupant de jeunes chercheur.ses dans les STEAM (Sciences, Technologies, Engineering, Art and Mathematics) et dont le but est de partager "l'envers du décor" de leur quotidien dans le monde académique. Ces actions permettent de directement toucher des populations à la marge de la société et/ou sous-représentées, et je ressors de chacune de ces expériences avec un regard encore plus informé sur notre société.

²<http://lesptitscueilleursdetoiles.fr>

³<http://www.champlibre.info>

⁴<https://sciall.org>

5.3.3 Space Travel VR: à la croisée en science et arts digitaux

Par ailleurs, je cherche toujours à allier mon désir de communiquer sur mes recherches avec les développements de nouveaux moyens de pédagogie, en particulier sur des plateformes digitales. Mon premier projet, lauréat d'un prix de la Science and Technology Facilities Council du Royaume Uni en 2015, m'a permis de démarrer une collaboration avec un cinéaste et de proposer au grand public un film en réalité virtuelle sur les tempêtes solaires, présenté lors de plusieurs festivals de science nationaux et internationaux. A la croisée de la science et des mondes digitaux, j'ai développé mes nouveaux projets, financés par le CNES, de réalité virtuelle sur la mission Solar Orbiter et de réalité augmentée (tous les deux présentés au grand public lors du lancement de Solar Orbiter au centre spatial Kennedy en Floride), me permettent d'attirer un public varié et avide de nouvelles découvertes, tout en proposant du contenu scientifique de manière ludique. Ces développements sont le fruit d'une association Loi 1901 que j'ai fondée, SpaceTravelVR⁵, dont le but est de mettre en ligne gratuitement ces projets et de participer à des festivals scientifiques pour en faire partager le plus grand nombre. Ces engagements m'ont valu d'être reconnue par le magazine sur la technologie et les sciences, WIREDUK, en 2016 avec un prix de l'innovation, ainsi que d'être nommée TED Fellow par l'organisation TED en 2017, puis enfin, d'obtenir le prix "Jeune Chercheuse" de la Société Française d'Astronomie et d'Astrophysique en 2018.

5.3.4 Place des femmes en sciences

Concernant le caractère complexe du problème de genre et de la sous-représentation des femmes en science, mon intérêt sur ce sujet est avant tout une démarche personnelle, qui découle de mes expériences au travers des années en tant que femme dans la recherche, qui plus est issue d'un milieu multiculturel. Ma carrière dans la recherche scientifique ayant démarré au Japon, j'avais pu dès cette époque me confronter à une culture toute autre que celle dans laquelle j'avais effectué mes études, et me retrouver dans un milieu principalement masculin m'a forcée à ouvrir les yeux sur les questions d'inégalités de genre dès le début de ma carrière scientifique.

Par ailleurs, découvrir d'autres manières de faire de la science dans d'autres pays, que ce soit en poste à l'étranger ou lors de missions et de collaborations, m'a permis de mieux appréhender le rôle de la société et de la culture dans les problèmes de genre. Observer, analyser, comprendre, et découdre les tissus d'inégalités (de genre, mais aussi d'ethnicité) passe avant tout pour moi par un travail d'apprentissage que je poursuis quotidiennement en m'informant le plus possible par le biais des médias et de livres. Ce travail personnel, je le partage avec mes collègues au travers de discussions, et récemment dans des ateliers que je co-organise sur le campus (et en visioconférence depuis le début du confinement dû à la pandémie du virus COVID-19) spécifiquement sur les questions du devenir de la science en France et des inégalités femmes-hommes. La pandémie actuelle n'ayant fait que souligner et approfondir des inégalités déjà existantes, ce contexte m'a motivée à continuer ces ateliers de réflexions sur le plus long terme au sein de mon université. (Ces actions, à l'heure de l'écriture de ce manuscrit, sont en train de se concrétiser par le montage d'un collectif dédié à ces questions sur le campus Paris-Saclay, dont je suis l'un.e des membres principales.aux).

Enfin, je participe activement à la promotion de mes jeunes collègues par divers moyens: sous la forme de mentorat que j'ai pris beaucoup à cœur ces dernières années, de recrutement des jeunes étudiantes pour des stages de recherche, et en jouant le rôle de référente dans les soumissions de propositions de financement ou de recrutement

⁵www.spacetravelvr.org

de mes collègues. Je participe également activement à la valorisation des parcours de mes consœurs dans les rôles que je suis invitée à remplir, comme l'organisation de conférences ou mon implication dans des comités nationaux. Je fais par exemple partie du Conseil National des Astronomes et de Physiciens depuis 2020, et dans le jury de recrutement j'ai à cœur de mettre sur la table les discussions sur les biais (conscients et inconscients) dans l'espoir véritable d'accélérer le changement vers plus d'égalité. Cependant, je pense que ma plus grande contribution concernant mon engagement en faveur des femmes en science, et par un plus large aspect des populations sous-représentées, est mon implication dans la communication scientifique sous ses formes diverses, et dont j'ai parlé plus haut.

J'espère ainsi que mes recherches, mon implication dans la communauté scientifique française et internationale, ainsi que mon engagement permanent dans la promotion de la science sous des formes variées influencent, et continueront à influencer les mentalités et les politiques en matière d'éducation, de science, et d'inclusion du plus grand nombre d'entre nous. Et c'est avec ce profond désir, d'ouverture de la science, de partage de la curiosité de l'émerveillement, que je continue ces activités.

Appendix A

Liste des publications

A.1 Publications d'articles

1. de Vries et al., 2008
2. Li et al., 2009
3. Janvier, Kishimoto, and Li, 2010b
4. Janvier, Kishimoto, and Li, 2010a
5. Janvier, Kishimoto, and Li, 2011a
6. Janvier et al., 2011
7. Janvier, Kishimoto, and Li, 2011b
8. Aulanier, Janvier, and Schmieder, 2012
9. Aulanier et al., 2013
10. Démoulin, Dasso, and Janvier, 2013
11. Janvier et al., 2013
12. Janvier, Démoulin, and Dasso, 2013
13. Kishimoto and Janvier, 2013
14. Janvier et al., 2014
15. Janvier, Démoulin, and Dasso, 2014a
16. Janvier, Démoulin, and Dasso, 2014b
17. Janvier, Démoulin, and Dasso, 2014c
18. Dudík et al., 2014
19. Nishizuka et al., 2015
20. Janvier et al., 2015
21. Möstl et al., 2015
22. Janvier et al., 2015

23. Harra et al., 2016
24. Rodriguez et al., 2016
25. Dudík et al., 2016
26. Rodriguez et al., 2016
27. Janvier et al., 2016
28. Masías-Meza et al., 2016
29. Lavraud et al., 2016
30. Démoulin et al., 2016
31. Démoulin, Janvier, and Dasso, 2016
32. Priest, Longcope, and Janvier, 2016
33. Dacie et al., 2016
34. Janvier, 2017
35. Pontin et al., 2017
36. Baker et al., 2017
37. Polito et al., 2017
38. Lugaz et al., 2018
39. Démoulin, Dasso, and Janvier, 2018
40. Joshi et al., 2019
41. Janvier et al., 2019
42. Démoulin et al., 2019
43. Rouillard et al., 2020
44. Spice Consortium et al., 2020
45. Barczynski et al., 2020
46. Lanabere et al., 2020
47. Freiherr von Forstner et al., 2020
48. Démoulin et al., 2020
49. Zouganelis et al., 2020
50. Kilpua et al., 2020
51. Regnault et al., 2020
52. Peter et al., 2021
53. dos Santos et al., 2020

A.2 Contributions à des Livres

SKA: French SKA White Book - The French Community towards the Square Kilometre Array Link: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2017arXiv171206950A>

M. Janvier, Y. Kishimoto, J. Li, "Study of the mechanisms leading to the nonlinear explosive growth of double tearing instabilities in fusion plasmas" Zero Carbon Energy Kyoto 2010, Springer, Proceedings of the Second International Symposium of Global COE Program "Energy Science in the Age of Global Warming (...)", pp252-257, (2011)

M. Janvier, Y. Kishimoto, J. Li "Multiple scale nonlinear phenomena in nature: from high confinement in fusion plasmas to climate anomalies" Zero Carbon Energy Kyoto 2009, Springer, Proceedings of the First International Symposium of Global COE Program "Energy Science in the Age of Global Warming (...)", pp315-319, (2010)

Appendix B

Responsabilités

B.1 Responsabilité de recherche, groupes de travail

Solar Orbiter mission

2015 - Present

(European Space Agency, M-class mission)

I am the Deputy Project Scientist within the Lead Operation Team at IAS for the SPICE instrument (spectroimaging of the Sun's atmosphere). I am also a scientific co-investigator on the EUV instrument (Extreme Ultra Violet imaging) and a member of the MADAWG Group (Solar Orbiter Data Analysis Working Group).

Bepi-Colombo Cruise Phase Science Study Group

2020 - Present

Bepi-Colombo is a JAXA- ESA mission on its way to Mercury. As its instruments will be working during the cruise phase of the mission, the study group will investigate potential science targets.

Enhanced Solar Weather Analysis at the MEDOC Center for ESA Space Situation Awareness

2019 - Present

MEDOC, the space missions-database for solar physics data center at IAS was awarded a contract from ESA within the Space Weather Awareness program. I work as part of the team at IAS to design, develop, improve and produce data for the ESA SSA portal, especially maps of electric currents in active regions.

Bepi-Colombo/Solar Orbiter Coordinated Observations Working Group

2019 - 2020

As both JAXA-ESA Bepi-Colombo and ESA-NASA Solar Orbiter missions are in their cruise phases, coordinated observations need to be planned. This is the aim of the working group.

NASA Frontier Development Lab, Core Domain Mentor

Summer 2019

I participated in NASA Frontier Development Lab 2019 edition as a core domain mentor to the heliophysics team "Expanding the capabilities of NASA's Solar Dynamics

Observatory". Frontier Development Lab (FDL) applies AI technologies to science to push the frontiers of research and develop new tools to help solve some of the biggest challenges that humanity faces. These range from the effects of climate change to predicting space weather, from improving disaster response, to identifying meteorites that could hold the key to the history of our universe. FDL is a public-private partnership with NASA in the USA and ESA in Europe.

Member of the ESA Heliophysics archives User Group

2018

Helped ESA develop the heliophysics database and coordinate the user activities for the Sun-Heliophysics database.

White papers

- 2020: SOLARIS Mission proposal: Solaris would address fundamental questions of solar and stellar physics that can only be answered with a view of the Sun's poles. Solaris would observe three solar rotations over each solar pole to obtain observations of light, magnetic fields, and movement in the Sun's surface, the photosphere. Solaris has been selected for phase A in August 2020 by NASA.
- 2020: White paper on Science Platforms for Heliophysics data. Submitted to the Heliophysics 2050 workshop
- 2019: MimOSA, proposed as a white paper for the European Space Agency Voyage2050 mission concepts. The Magnetic Imaging of the Outer Solar Atmosphere (MimOSA) is a mission concept aiming at unlocking the driver of the dynamics in the upper solar atmosphere.
- 2015: INSTANT mission proposal team (ESA/CHINE). Mission concept for observations at Lagrangian point L5 « INvestigation of Solar-Terrestrial Activity aNd Transients » (not selected)

B.2 Communauté

Comités nationaux

Membre (nommée) de la section Astronomie-Astrophysique du "Conseil National des Astronomes et des Physiciens" (2019-2023)

Responsabilités locales

Membre de l'équipe de communication de l'IAS (depuis 2017)

Organisation de conférences

- Avril 2021: Ecole Solar Orbiter à l'Ecole de Physique des Houches: organisatrice principale
- Mars 2021 (et Juillet 2022): COOLSTARS20.5 et 21. Membre du SOC

- Janvier 2021: COSPAR Hybrid 2021, DSO/organisatrice de session + co-organisatrice du Workshop "Cloud Computing for Space Sciences
- Mai 2019: Ecole des Houches Physique des Plasmas, co-organisatrice
- Avril 2018: European Geophysical Union, co-organisatrice de session
- Juillet 2017: SHINE, co-organisatrice de session
- Avril 2017: European Geophysical Union, co-organisatrice de session
- Décembre 2016: American Geophysical Union, co-organisatrice de session
- 2014-2015: responsable des séminaires, Division de Maths, Université de Dundee
- Juillet 2015: co-organisatrice de deux sessions à la «National Astronomical Meeting », la conférence annuelle de l'astronomie britannique
- Septembre 2014: école d'été de la Sciences & Technology Facilities Council (LOC, oratrice invitée)
- Juin 2013: LOC pour l'IAUS300, Paris

Travail de Referee

- Rapporteuse pour plusieurs revues scientifiques de rang A (Nuclear Fusion, Physics of Plasmas, Solar Physics, Astronomy and Astrophysics, The Astrophysical Journal Letters, Planetary and Space Science, Journal of Geophysical Research – Space Physics, Nature Communications, Nature)
- Rapporteuse pour le ERC-Grant (2016) et membre d'un NASA Review Panel (2018)

Appendix C

Médiation scientifique: liste d'activités

C.1 2011 - 2015

Evènements grand public

- Mars 2015: Sélection à l'événement SET for Britain 2015, et présentation de mes recherches dans la chambre des communes du Royaume-Uni (Parlement à Westminster) devant des députés de la chambre. Obtention de la médaille de Bronze.
- 2014-2015: Concours international de vulgarisation scientifique «Famelab », orchestré par le British Council. J'ai été sélectionnée à la compétition locale et ai gagné la deuxième place lors de la compétition régionale qui s'est tenue en janvier 2015 à Edimbourg.
- Printemps 2013: AXA Research Fund Young Talents Workshop + POP Days «Multi-risks»
- Janvier 2013: Concours photo du Fonds AXA pour la recherche sous le thème « Vos recherches dans l'œil d'un objectif ». Ce concours photo a pour but de vulgariser les travaux scientifiques des lauréats de la bourse du Fonds AXA. Ma participation a été honorée par le troisième prix du Jury, et ma photographie, présentant de façon créative et artistique mon projet de post-doc, fait partie d'une exposition itinérante dans les entités AXA à travers le monde.
- Printemps 2012: Participé à la correction d'un cycle de poèmes, publiés dans le numéro 8 d'Avant Poste (magazine littéraire et artistique, association Avant-Poste, imprimé et paru en novembre 2012) et regroupés sous le titre « Soleil Système », écrits par Augustin Gilmore.
- Mars 2012: volontaire pour « la Nuit des planètes » organisée par l'Observatoire de Paris.

Communiqués de presse

- 2015: Communiqué de presse de l'Université de Dundee, repris par le site internet de la BBC¹ pour le papier Janvier, Démoulin, and Dasso, 2014b.

¹<http://www.bbc.com/news/uk-scotland-tayside-central-29612693>

- 2014: Communiqué de presse de l'Université de Cambridge pour le papier Dudík et al., 2014.
- Décembre 2012, un communiqué de l'Observatoire de Paris (« Eruptions solaires : pas d'apocalypse en vue ») pour le papier Aulanier et al., 2013.

C.2 Depuis 2015

Conférences grand public

- Juin 2021: Evènement ARISS - Contact avec l'ISS et Thomas Pesquet, interventions sur le campus Paris-Saclay.
- Mars 2021 (en ligne): Conférence invitée pour la National Student Space Conference (Royaume-Uni)
- Juillet 2020 (en ligne): participation à SpaceRocks² pour parler de la mission Solar Orbiter.
- Juin 2020 (en ligne): Conférence invitée pour "Du big bang aux bigs bands"³, Orsay.
- Décembre 2019: Conférence invitée pour "Etoiles en scène" (Obs de Paris, organisée au Grand Rex à Paris)
- Juin 2019: Conférence invitée pour "La Nuit Blanche de l'Astronomie"⁴, IAP, Paris.
- Octobre 2019: Conférence grand public au Club d'astronomie Limoges.
- Avril 2019: Visite de classes à l'Institut Notre-Dame St-Germain en Laye.
- Février 2019: Conférence invitée au meeting GLACKMA (Espagne)
- Février 2019: Présentation invitée à conférence Elbereth, Paris
- Octobre 2018: Conférence invitée pour les PhD Days "Visions in Science" du Max Planck Institute (Berlin, Allemagne)
- Octobre 2018: Conférence grand public au Club d'astronomie Ivry sur Seine.
- Août 2018: Conférence Grand Public au Griffith Observatory à Los Angeles (US)
- Mars 2018: Conférence à l'association ALCOR, Orsay
- Novembre 2017: Conférence invitée, TEDx Saclay⁵
- Août 2017: Communication scientifique et présentation dans l'école St Judes à Arusha, Tanzanie.

²<https://spacerocksofficial.com>

³<http://www.dubigbangauxbigbands.fr>

⁴<http://www.iap.fr/actualites/laune/2019/Mai/nuit-blanche-fr.html>

⁵https://www.ted.com/talks/miho_janvier_sur_le_soleil_il_pleut_aussi?language=fr

- Août 2017: Nominée en tant que TEDGlobal Fellow 2017 par l'entreprise . Participation au TEDGlobal 2017, mise en ligne de ma présentation⁶.
- Juin 2017: Invitation et présentation aux classes du lycée Mill Hill à Londres
- Janvier 2017, Conférence grand public, médiathèque Valençay
- Novembre 2016: Conférence grand public, Club Astro Orsay
- Novembre 2016: Wired UK, présentation en tant que lauréate du prix "Innovation fellow"
- Juin 2016: Présentation des enjeux de la physique solaire lors de la journée de célébration des 20 ans de la mission SOHO organisée par l'IAS.
- Janvier 2016: Présentation au Colloque Bouyssy Jeunes Chercheurs organisé par la Société Française de Physique (Janvier 2016), obtention du prix de la meilleure communication.

Associations

- Volontaire de l'organisation internationale SciAll⁷, en tant que Vlogueuse.
- Volontaire depuis 2018 pour l'association Les Ptits Cueilleurs d'étoiles⁸. Visites dans les hôpitaux pour enfants malades (Hôpital de Margency, Necker Hôpital pour Enfants malades, service immunologie, Fondation PSG)
- Volontaire depuis 2019 pour l'association Champ Libre⁹. Visites dans le milieu carcéral (Prison de Nanterre) et de personnes isolées (Service Psychiatrique, Institut Paris Brune)

Projets personnels: SpaceTravelVR

Je développe depuis 2015 des projets alliant science et nouvelles technologies (en particulier, sur la réalité virtuelle et la réalité augmentée) sous le chapeau d'une association, SpaceTravelVR¹⁰. Cette association a ainsi pour but de promouvoir l'astrophysique au plus grand nombre, sous forme ludique et éducative.

Le premier projet, SolarStormVR, a été développé lors de mon séjour à Dundee au Royaume-Uni, en collaboration avec une petite entreprise de cinématographie, TreeHouse Ltd. SolarStormVR a été développé pour les premiers casques de réalité virtuelle, et est maintenant disponible gratuitement sur YouTube360.

Le deuxième projet, SolARExpedition, est un projet de réalité augmentée, qui a été récemment traduit en application smartphone/tablette, et disponible gratuitement sur les Apples et Google stores.

Enfin, le troisième projet, Solar Orbiter Virtual Experience (SolOVE), est un projet qui bénéficie d'un financement du CNES et dont le développement est en cours.

Ces projets ont été présentés au fur et à mesure de leur développement aux endroits suivants:

- Février 2016: SmashFest UK (SolarStormVR)

⁶https://www.ted.com/talks/miho_janvier_lessons_from_a_solar_storm_chaser?language=en

⁷<https://sciall.org>

⁸<http://lesptitscueilleursdetoiles.fr>

⁹<https://www.champlibre.info>

¹⁰Conférencegrandpublic, ClubAstroOrsay

- Avril 2016: Edinburgh International Festival (SolarStormVR)
- Juin 2016: The Times Cheltenham Science Festival (SolarStormVR)
- Octobre 2016: Fête de la Science, IAS (SolarStormVR)
- Novembre 2016: Journées de l'Association Française de réalité virtuelle (SolarStormVR)
- Septembre 2017: Fête de la Science, IAS (SolarStormVR, SolARExpedition)
- Novembre 2017: TEDx Saclay, village des innovations (SolarStormVR, SolARExpedition)
- Avril 2018: Journées Plasapar au Centre Georges Pompidou, Paris (SolarStormVR, SolARExpedition)
- Juin 2018: Présentation au personnel du CNES à Toulouse lors des journées de la thématique SHM
- Octobre 2018: Journée des Jeunes Chercheurs du CNES, Cité de l'Espace, Toulouse (SolarStormVR, SolARExpedition)
- Octobre 2018: Fête de la science, Université Evry + IAS, Orsay
- Octobre 2019: Nuit Blanche à la Commanderie, St-Quentin en Yvelines
- Novembre 2019: Journée des Jeunes Chercheurs du CNES, Cité de l'Espace, Toulouse (SolarStormVR, SolARExpedition, SolOVE)
- Février 2020: Lancement de Solar Orbiter, SolARExpedition, SolOVE)

Ces différents projets ont bénéficié d'un financement de la Sciences and Technologies Facilities Council (2015, R-U), de la Sf2A (2016), ainsi que du CNES.

Médias (Podcasts, radio, TV)

- Savant Sachant Chercher (Podcast, FR, Octobre 2020)
- Intervention dans le documentaire "A la conquête du soleil" sur RMC découverte sur les missions Solar Orbiter et Parker Solar Probe, Février 2020
- La Méthode Scientifique (France Culture, Janvier 2020), "Missions Solaires: la bataille pour la couronne"
- Probablement (Podcast, FR, October 2019)
- Bilingual News (Podcast, anglais/japonais, Mars 2019)
- Podcast Science (Podcast, FR, Juin 2018)
- SpacePod with Carrie Nugent (Podcast, anglais, mars 2018)
- La Méthode Scientifique (France Culture, Novembre 2017), "Les derniers mystères de notre étoile"
- Interviews pour l'éclipse totale solaire 2017 (RFI , "Invitée de la mi-journée")

Appendix D

CV

Bibliography

- Amari, T. et al. (Mar. 2003). "Coronal Mass Ejection: Initiation, Magnetic Helicity, and Flux Ropes. I. Boundary Motion-driven Evolution". In: *Astrophysical Journal* 585.2, pp. 1073–1086. DOI: [10.1086/345501](https://doi.org/10.1086/345501).
- Anderson, Brian J. et al. (Aug. 2007). "The Magnetometer Instrument on MESSENGER". In: *Space Science Reviews* 131.1-4, pp. 417–450. DOI: [10.1007/s11214-007-9246-7](https://doi.org/10.1007/s11214-007-9246-7).
- Asai, Ayumi et al. (Mar. 2003). "Evolution of Conjugate Footpoints inside Flare Ribbons during a Great Two-Ribbon Flare on 2001 April 10". In: *Astrophysical Journal* 586.1, pp. 624–629. DOI: [10.1086/367694](https://doi.org/10.1086/367694).
- Aulanier, G., P. Démoulin, and R. Grappin (Feb. 2005). "Equilibrium and observational properties of line-tied twisted flux tubes". In: *Astronomy and Astrophysics* 430, pp. 1067–1087. DOI: [10.1051/0004-6361:20041519](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041519).
- Aulanier, G., M. Janvier, and B. Schmieder (2012). "The standard flare model in three dimensions - I. Strong-to-weak shear transition in post-flare loops". In: *A&A* 543, A110. DOI: [10.1051/0004-6361/201219311](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219311). URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219311>.
- Aulanier, G., E. Pariat, and P. Démoulin (Dec. 2005). "Current sheet formation in quasi-separatrix layers and hyperbolic flux tubes". In: *Astronomy and Astrophysics* 444.3, pp. 961–976. DOI: [10.1051/0004-6361:20053600](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053600).
- Aulanier, G. et al. (Jan. 2010). "Formation of Torus-Unstable Flux Ropes and Electric Currents in Erupting Sigmoids". In: *Astrophysical Journal* 708.1, pp. 314–333. DOI: [10.1088/0004-637X/708/1/314](https://doi.org/10.1088/0004-637X/708/1/314).
- Aulanier, G. et al. (Jan. 2013). "The standard flare model in three dimensions. II. Upper limit on solar flare energy". In: *Astronomy and Astrophysics* 549, A66, A66. DOI: [10.1051/0004-6361/201220406](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220406). arXiv: [1212.2086](https://arxiv.org/abs/1212.2086) [astro-ph.SR].
- Aulanier, Guillaume et al. (Dec. 2007). "Slipping Magnetic Reconnection in Coronal Loops". In: *Science* 318.5856, p. 1588. DOI: [10.1126/science.1146143](https://doi.org/10.1126/science.1146143).
- Badraddin and A. Kumar (Feb. 2016). "Study of the Cosmic-Ray Modulation During the Passage of ICMEs and CIRs". In: *Solar Physics* 291, pp. 559–580. DOI: [10.1007/s11207-015-0843-4](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0843-4).
- Baker, Deborah et al. (Apr. 2017). "Apparent and Intrinsic Evolution of Active Region Upflows". In: *Solar Physics* 292.4, 46, p. 46. DOI: [10.1007/s11207-017-1072-9](https://doi.org/10.1007/s11207-017-1072-9). arXiv: [1702.06022](https://arxiv.org/abs/1702.06022) [astro-ph.SR].
- Barczynski, Krzysztof et al. (May 2020). "Electric Current Evolution at the Footpoints of Solar Eruptions". In: *Astrophysical Journal* 895.1, 18, p. 18. DOI: [10.3847/1538-4357/ab893d](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab893d). arXiv: [2004.07990](https://arxiv.org/abs/2004.07990) [astro-ph.SR].
- Barnes, G., D. W. Longcope, and K. D. Leka (Aug. 2005). "Implementing a Magnetic Charge Topology Model for Solar Active Regions". In: *Astrophysical Journal* 629.1, pp. 561–571. DOI: [10.1086/431175](https://doi.org/10.1086/431175).
- Baum, P. J. and A. Bratenahl (Sept. 1980). "Flux Linkages of Bipolar Sunspot Groups - a Computer Study". In: *Solar Physics* 67.2, pp. 245–258. DOI: [10.1007/BF00149805](https://doi.org/10.1007/BF00149805).

- Bemporad, A., R. Susino, and G. Lapenta (Apr. 2014). "Plasma Physical Parameters along Coronal-mass-ejection-driven Shocks. I. Ultraviolet and White-light Observations". In: *Astrophysical Journal* 784.2, 102, p. 102. DOI: [10.1088/0004-637X/784/2/102](https://doi.org/10.1088/0004-637X/784/2/102). arXiv: [1403.0870](https://arxiv.org/abs/1403.0870) [astro-ph.SR].
- Berger, M. A. and G. B. Field (Oct. 1984). "The topological properties of magnetic helicity". In: *Journal of Fluid Mechanics* 147, pp. 133–148. DOI: [10.1017/S0022112084002019](https://doi.org/10.1017/S0022112084002019).
- Berger, Mitchell A. (Dec. 1999). "Introduction to magnetic helicity". In: *Plasma Physics and Controlled Fusion* 41.12B, B167–B175. DOI: [10.1088/0741-3335/41/12B/312](https://doi.org/10.1088/0741-3335/41/12B/312).
- Bommier, V. et al. (Mar. 2007). "UNNOFIT inversion of spectro-polarimetric maps observed with THEMIS". In: *Astronomy and Astrophysics* 464.1, pp. 323–339. DOI: [10.1051/0004-6361:20054576](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20054576).
- Borrini, G. et al. (Sept. 1982). "Helium abundance enhancements in the solar wind". In: *J. Geophys. Res* 87.A9, pp. 7370–7378. DOI: [10.1029/JA087iA09p07370](https://doi.org/10.1029/JA087iA09p07370).
- Brooks, David H. et al. (May 2020). "The Drivers of Active Region Outflows into the Slow Solar Wind". In: *Astrophysical Journal* 894.2, 144, p. 144. DOI: [10.3847/1538-4357/ab8a4c](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab8a4c). arXiv: [2004.07461](https://arxiv.org/abs/2004.07461) [astro-ph.SR].
- Burlaga, L. et al. (1981). "Magnetic loop behind an interplanetary shock - Voyager, Helios, and IMP 8 observations". In: *J. Geophys. Res* 86, pp. 6673–6684. DOI: [10.1029/JA086iA08p06673](https://doi.org/10.1029/JA086iA08p06673).
- Cane, H. V. et al. (Nov. 1994). "Cosmic ray decreases and shock structure: A multi-spacecraft study". In: *Journal of Geophysical Research* 99.A11, pp. 21429–21442. DOI: [10.1029/94JA01529](https://doi.org/10.1029/94JA01529).
- Carmichael, H. (1964). "A Process for Flares". In: *NASA Special Publication*. Vol. 50, p. 451.
- Chae, Jongchul (Oct. 2001). "Observational Determination of the Rate of Magnetic Helicity Transport through the Solar Surface via the Horizontal Motion of Field Line Footpoints". In: *Astrophysical Journal, Letters* 560.1, pp. L95–L98. DOI: [10.1086/324173](https://doi.org/10.1086/324173).
- Chandra, R. et al. (Aug. 2009). "Evidence of Magnetic Helicity in Emerging Flux and Associated Flare". In: *Solar Physics* 258.1, pp. 53–67. DOI: [10.1007/s11207-009-9392-z](https://doi.org/10.1007/s11207-009-9392-z). arXiv: [0906.1210](https://arxiv.org/abs/0906.1210) [astro-ph.SR].
- Chen, Yu et al. (Nov. 2020). "Small-scale Magnetic Flux Ropes in the First Two Parker Solar Probe Encounters". In: *Astrophysical Journal* 903.1, 76, p. 76. DOI: [10.3847/1538-4357/abb820](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abb820). arXiv: [2007.04551](https://arxiv.org/abs/2007.04551) [physics.space-ph].
- Cheng, X. and M. D. Ding (July 2016). "The Characteristics of the Footpoints of Solar Magnetic Flux Ropes during Eruptions". In: *Astrophysical Journal, Supplement* 225.1, 16, p. 16. DOI: [10.3847/0067-0049/225/1/16](https://doi.org/10.3847/0067-0049/225/1/16). arXiv: [1605.04047](https://arxiv.org/abs/1605.04047) [astro-ph.SR].
- Chree, C. (Jan. 1913). "Some Phenomena of Sunspots and of Terrestrial Magnetism at Kew Observatory". In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A* 212, pp. 75–116. DOI: [10.1098/rsta.1913.0003](https://doi.org/10.1098/rsta.1913.0003).
- Cliver, E. W. (Sept. 1989). "Was the eclipse comet of 1893 a disconnected coronal mass ejection?" In: *Solar Physics* 122.2, pp. 319–333. DOI: [10.1007/BF00912999](https://doi.org/10.1007/BF00912999).
- Dacie, S. et al. (Dec. 2016). "Evolution of the magnetic field distribution of active regions". In: *Astronomy and Astrophysics* 596, A69, A69. DOI: [10.1051/0004-6361/201628948](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628948). arXiv: [1609.03723](https://arxiv.org/abs/1609.03723) [astro-ph.SR].
- Davenport, James R. A. (Sept. 2016). "The Kepler Catalog of Stellar Flares". In: *Astrophysical Journal* 829.1, 23, p. 23. DOI: [10.3847/0004-637X/829/1/23](https://doi.org/10.3847/0004-637X/829/1/23). arXiv: [1607.03494](https://arxiv.org/abs/1607.03494) [astro-ph.SR].
- Davies, E. E. et al. (Dec. 2020). "In situ multi-spacecraft and remote imaging observations of the first CME detected by Solar Orbiter and BepiColombo". In: *arXiv e-prints*, arXiv:2012.07456, arXiv:2012.07456. arXiv: [2012.07456](https://arxiv.org/abs/2012.07456) [physics.space-ph].

- de Vries, P. C. et al. (June 2008). "Scaling of rotation and momentum confinement in JET plasmas". In: *Nuclear Fusion* 48.6, 065006, p. 065006. DOI: [10.1088/0029-5515/48/6/065006](https://doi.org/10.1088/0029-5515/48/6/065006).
- Del Zanna, G. (Apr. 2008). "Flows in active region loops observed by Hinode EIS". In: *Astronomy and Astrophysics* 481.1, pp. L49–L52. DOI: [10.1051/0004-6361/20079087](https://doi.org/10.1051/0004-6361/20079087).
- Démoulin, P. and G. Aulanier (2010). "Criteria for Flux Rope Eruption: Non-equilibrium Versus Torus Instability". In: *Astrophys. J.* 718, pp. 1388–1399. DOI: [10.1088/0004-637X/718/2/1388](https://doi.org/10.1088/0004-637X/718/2/1388). arXiv: [1006.1785](https://arxiv.org/abs/1006.1785) [astro-ph.SR].
- Démoulin, P., S. Dasso, and M. Janvier (Feb. 2013). "Does spacecraft trajectory strongly affect detection of magnetic clouds?" In: *Astron. Astrophys.* 550, A3, A3. DOI: [10.1051/0004-6361/201220535](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220535). arXiv: [1211.5343](https://arxiv.org/abs/1211.5343) [astro-ph.SR].
- (Nov. 2018). "Exploring the biases of a new method based on minimum variance for interplanetary magnetic clouds". In: *Astronomy and Astrophysics* 619, A139, A139. DOI: [10.1051/0004-6361/201833831](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833831). arXiv: [1809.00522](https://arxiv.org/abs/1809.00522) [astro-ph.SR].
- Démoulin, P., M. Janvier, and S. Dasso (2016). "Magnetic Flux and Helicity of Magnetic Clouds". In: *Solar Phys.* 291, pp. 531–557. DOI: [10.1007/s11207-015-0836-3](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0836-3).
- Démoulin, P., E. R. Priest, and D. P. Lonie (Apr. 1996). "Three-dimensional magnetic reconnection without null points 2. Application to twisted flux tubes". In: *Journal of Geophysical Research* 101.A4, pp. 7631–7646. DOI: [10.1029/95JA03558](https://doi.org/10.1029/95JA03558).
- Démoulin, P. et al. (Apr. 2013). "The 3D Geometry of Active Region Upflows Deduced from Their Limb-to-Limb Evolution". In: *Solar Physics* 283.2, pp. 341–367. DOI: [10.1007/s11207-013-0234-7](https://doi.org/10.1007/s11207-013-0234-7). arXiv: [1211.5962](https://arxiv.org/abs/1211.5962) [astro-ph.SR].
- Démoulin, P. et al. (2016). "Quantitative model for the generic 3D shape of ICMEs at 1 AU". In: *Astron. Astrophys.* 595, A19, A19. DOI: [10.1051/0004-6361/201628164](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628164).
- Démoulin, P. et al. (July 2020). "Contribution of the ageing effect to the observed asymmetry of interplanetary magnetic clouds". In: *Astronomy and Astrophysics* 639, A6, A6. DOI: [10.1051/0004-6361/202038077](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038077). arXiv: [2005.05049](https://arxiv.org/abs/2005.05049) [astro-ph.SR].
- Démoulin, Pascal et al. (Dec. 2019). "Re-analysis of Lepping's Fitting Method for Magnetic Clouds: Lundquist Fit Reloaded". In: *Solar Physics* 294.12, 172, p. 172. DOI: [10.1007/s11207-019-1564-x](https://doi.org/10.1007/s11207-019-1564-x). arXiv: [1912.09829](https://arxiv.org/abs/1912.09829) [astro-ph.SR].
- dos Santos, Luiz F. G. et al. (Dec. 2020). "Multi-Channel Auto-Calibration for the Atmospheric Imaging Assembly using Machine Learning". In: *arXiv e-prints*, arXiv:2012.14023, arXiv:2012.14023. arXiv: [2012.14023](https://arxiv.org/abs/2012.14023) [astro-ph.SR].
- Doschek, G. A. et al. (Sept. 2007). "Nonthermal Velocities in Solar Active Regions Observed with the Extreme-Ultraviolet Imaging Spectrometer on Hinode". In: *Astrophysical Journal, Letters* 667.1, pp. L109–L112. DOI: [10.1086/522087](https://doi.org/10.1086/522087).
- Dudík, J. et al. (Apr. 2014). "Slipping Magnetic Reconnection during an X-class Solar Flare Observed by SDO/AIA". In: *Astrophysical Journal* 784.2, 144, p. 144. DOI: [10.1088/0004-637X/784/2/144](https://doi.org/10.1088/0004-637X/784/2/144). arXiv: [1401.7529](https://arxiv.org/abs/1401.7529) [astro-ph.SR].
- Dudík, Jaroslav et al. (May 2016). "Slipping Magnetic Reconnection, Chromospheric Evaporation, Implosion, and Precursors in the 2014 September 10 X1.6-Class Solar Flare". In: *Astrophysical Journal* 823.1, 41, p. 41. DOI: [10.3847/0004-637X/823/1/41](https://doi.org/10.3847/0004-637X/823/1/41). arXiv: [1603.06092](https://arxiv.org/abs/1603.06092) [astro-ph.SR].
- Dumbović, M. et al. (July 2011). "Cosmic ray modulation by solar wind disturbances". In: *Astronomy and Astrophysics* 531, A91, A91. DOI: [10.1051/0004-6361/201016006](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201016006).
- Dungey, J. W. (Jan. 1953). "The motion of magnetic fields". In: *Monthly Notices of the RAS* 113, p. 679. DOI: [10.1093/mnras/113.6.679](https://doi.org/10.1093/mnras/113.6.679).
- Démoulin, P., J. C. Henoux, and C. H. Mandrini (May 1994). "Are magnetic null points important in solar flares?" In: *Astronomy and Astrophysics* 285, pp. 1023–1037.
- Démoulin, P., E. Pariat, and M. A. Berger (Jan. 2006). "Basic Properties of Mutual Magnetic Helicity". In: *Solar Physics* 233.1, pp. 3–27. DOI: [10.1007/s11207-006-0010-z](https://doi.org/10.1007/s11207-006-0010-z).

- Démoulin, P. et al. (Apr. 1993). "Evidence for magnetic reconnection in solar flares". In: *Astronomy and Astrophysics* 271, p. 292.
- Démoulin, P. et al. (Apr. 1996). "Quasi-Separatrix layers in solar flares. I. Method." In: *Astronomy and Astrophysics* 308, pp. 643–655.
- Démoulin, P. et al. (Sept. 1997). "Quasi-separatrix layers in solar flares. II. Observed magnetic configurations." In: *Astronomy and Astrophysics* 325, pp. 305–317.
- Eddy, J. A. (Aug. 1974). "A Nineteenth-century Coronal Transient". In: *Astronomy and Astrophysics* 34, p. 235.
- Emslie, A. G. et al. (Nov. 2005). "Refinements to flare energy estimates: A followup to "Energy partition in two solar flare/CME events" by A. G. Emslie et al." In: *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 110.A11, A11103, A11103. DOI: [10.1029/2005JA011305](https://doi.org/10.1029/2005JA011305).
- Farrugia, C. J. et al. (June 2011). "Multiple, distant (40°) in situ observations of a magnetic cloud and a corotating interaction region complex". In: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 73.10, pp. 1254–1269. DOI: [10.1016/j.jastp.2010.09.011](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.09.011).
- Fenimore, E. E. (Jan. 1980). "Solar wind flows associated with hot heavy ions". In: *Astrophys. J.* 235, pp. 245–257. DOI: [10.1086/157628](https://doi.org/10.1086/157628).
- Fisher, R., C. J. Garcia, and P. Seagraves (June 1981). "On the coronal transient-eruptive prominence of 1980 August 5". In: *Astrophysical Journal, Letters* 246, pp. L161–L164. DOI: [10.1086/183575](https://doi.org/10.1086/183575).
- Fletcher, L. et al. (Sept. 2011). "An Observational Overview of Solar Flares". In: *Space Science Reviews* 159.1-4, pp. 19–106. DOI: [10.1007/s11214-010-9701-8](https://doi.org/10.1007/s11214-010-9701-8). arXiv: [1109.5932](https://arxiv.org/abs/1109.5932) [astro-ph.SR].
- Forbes, T. G. and L. W. Acton (Mar. 1996). "Reconnection and Field Line Shrinkage in Solar Flares". In: *Astrophysical Journal* 459, p. 330. DOI: [10.1086/176896](https://doi.org/10.1086/176896).
- Forbush, S. E. (June 1937). "On the Effects in Cosmic-Ray Intensity Observed During the Recent Magnetic Storm". In: *Physical Review* 51.12, pp. 1108–1109. DOI: [10.1103/PhysRev.51.1108.3](https://doi.org/10.1103/PhysRev.51.1108.3).
- Forbush, Scott E. (Dec. 1954). "World-Wide Cosmic-Ray Variations, 1937-1952". In: *Journal of Geophysical Research* 59.4, pp. 525–542. DOI: [10.1029/JZ059i004p00525](https://doi.org/10.1029/JZ059i004p00525).
- Freiherr von Forstner, Johan L. et al. (Mar. 2020). "Comparing the Properties of ICME-Induced Forbush Decreases at Earth and Mars". In: *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 125.3, e27662, e27662. DOI: [10.1029/2019JA027662](https://doi.org/10.1029/2019JA027662). arXiv: [2003.03157](https://arxiv.org/abs/2003.03157) [physics.space-ph].
- Good, S. W. et al. (July 2019). "Self-Similarity of ICME Flux Ropes: Observations by Radially Aligned Spacecraft in the Inner Heliosphere". In: *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 124.7, pp. 4960–4982. DOI: [10.1029/2019JA026475](https://doi.org/10.1029/2019JA026475). arXiv: [1905.07227](https://arxiv.org/abs/1905.07227) [physics.space-ph].
- Gopalswamy, N. (Dec. 2016). "History and development of coronal mass ejections as a key player in solar terrestrial relationship". In: *Geoscience Letters* 3, 8, p. 8. DOI: [10.1186/s40562-016-0039-2](https://doi.org/10.1186/s40562-016-0039-2). arXiv: [1602.03665](https://arxiv.org/abs/1602.03665) [astro-ph.SR].
- Gorbachev, V. S. and B. V. Somov (Mar. 1988). "Photospheric Vortex Flows as a Cause for Two-Ribbon Flares - a Topological Model". In: *Solar Physics* 117.1, pp. 77–88. DOI: [10.1007/BF00148574](https://doi.org/10.1007/BF00148574).
- Gosling, J. T. (Jan. 1997). "Coronal mass ejections: An overview". In: *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series* 99, pp. 9–16. DOI: [10.1029/GM099p0009](https://doi.org/10.1029/GM099p0009).
- Gosling, J. T. et al. (Feb. 1975). "Direct Observations of a Flare Related Coronal and Solar Wind Disturbance". In: *Solar Physics* 40.2, pp. 439–448. DOI: [10.1007/BF00162390](https://doi.org/10.1007/BF00162390).

- Gosling, J. T. et al. (1987). "Bidirectional solar wind electron heat flux events". In: *J. Geophys. Res* 92, pp. 8519–8535.
- Gou, Tingyu et al. (Apr. 2016). "Stereoscopic Observation of Slipping Reconnection in a Double Candle-flame-shaped Solar Flare". In: *Astrophysical Journal, Letters* 821.2, L28, p. L28. DOI: [10.3847/2041-8205/821/2/L28](#). arXiv: [1604.01457 \[astro-ph.SR\]](#).
- Green, L. M., B. Kliem, and A. J. Wallace (Feb. 2011). "Photospheric flux cancellation and associated flux rope formation and eruption". In: *Astronomy and Astrophysics* 526, A2, A2. DOI: [10.1051/0004-6361/201015146](#). arXiv: [1011.1227 \[astro-ph.SR\]](#).
- Gulisano, A. M. et al. (Dec. 2005). "Magnetic clouds: A statistical study of magnetic helicity". In: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 67, pp. 1761–1766. DOI: [10.1016/j.jastp.2005.02.026](#).
- Hanaoka, Yoichiro et al. (July 2014). "Coronal Mass Ejections Observed at the Total Solar Eclipse on 13 November 2012". In: *Solar Physics* 289.7, pp. 2587–2599. DOI: [10.1007/s11207-014-0476-z](#). arXiv: [1309.3718 \[astro-ph.SR\]](#).
- Harra, L. K. et al. (Apr. 2008). "Outflows at the Edges of Active Regions: Contribution to Solar Wind Formation?" In: *Astrophysical Journal, Letters* 676.2, p. L147. DOI: [10.1086/587485](#).
- Harra, Louise K. et al. (Aug. 2016). "The Characteristics of Solar X-Class Flares and CMEs: A Paradigm for Stellar Superflares and Eruptions?" In: *Solar Physics* 291.6, pp. 1761–1782. DOI: [10.1007/s11207-016-0923-0](#).
- Harten, Ronald and Kenn Clark (Feb. 1995). "The Design Features of the GGS Wind and Polar Spacecraft". In: *Space Sci. Rev.* 71.1-4, pp. 23–40. DOI: [10.1007/BF00751324](#).
- Henoux, J. C. and B. V. Somov (Oct. 1987). "Generation and structure of the electric currents in a flaring activity complex". In: *Astronomy and Astrophysics* 185.1-2, pp. 306–314.
- Hesse, M. and K. Schindler (June 1988). "A theoretical foundation of general magnetic reconnection". In: *Journal of Geophysical Research* 93.A6, pp. 5559–5567. DOI: [10.1029/JA093iA06p05559](#).
- Hirayama, T. (Feb. 1974). "Theoretical Model of Flares and Prominences. I: Evaporating Flare Model". In: *Solar Physics* 34.2, pp. 323–338. DOI: [10.1007/BF00153671](#).
- Hirshberg, J., J. R. Asbridge, and D. E. Robbins (June 1971). "The Helium-Enriched Interplanetary Plasma from the Proton Flares of August/September, 1966". In: *Solar Physics* 18.2, pp. 313–320. DOI: [10.1007/BF00145946](#).
- Howard, R. A. (Oct. 2006). "A Historical Perspective on Coronal Mass Ejections". In: *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series* 165, p. 7. DOI: [10.1029/165GM03](#).
- Howard, Timothy A. and Richard A. Harrison (July 2013). "Stealth Coronal Mass Ejections: A Perspective". In: *Solar Physics* 285.1-2, pp. 269–280. DOI: [10.1007/s11207-012-0217-0](#).
- Hu, Qiang et al. (Sept. 2014). "Structures of Interplanetary Magnetic Flux Ropes and Comparison with Their Solar Sources". In: *Astrophysical Journal* 793.1, 53, p. 53. DOI: [10.1088/0004-637X/793/1/53](#). arXiv: [1408.1470 \[astro-ph.SR\]](#).
- Hudson, H. S. (Mar. 2000). "Implosions in Coronal Transients". In: *Astrophysical Journal, Letters* 531.1, pp. L75–L77. DOI: [10.1086/312516](#).
- Janssen, M. (Jan. 1868). "On the Solar Protuberances". In: *Proceedings of the Royal Society of London Series I* 17, pp. 276–277.
- Janvier, M., P. Démoulin, and S. Dasso (2013). "Global axis shape of magnetic clouds deduced from the distribution of their local axis orientation". In: *Astron. Astrophys.* 556, A50, A50. DOI: [10.1051/0004-6361/201321442](#).
- (2014a). "Are There Different Populations of Flux Ropes in the Solar Wind?" In: *Solar Phys.* 289, pp. 2633–2652. DOI: [10.1007/s11207-014-0486-x](#).

- Janvier, M., P. Démoulin, and S. Dasso (2014b). "In situ properties of small and large flux ropes in the solar wind". In: *J. Geophys. Res* 119, pp. 7088–7107. DOI: [10.1002/2014JA020218](#). arXiv: [1408.5520 \[astro-ph.SR\]](#).
- (2014c). "Mean shape of interplanetary shocks deduced from in situ observations and its relation with interplanetary CMEs". In: *Astron. Astrophys.* 565, A99, A99. DOI: [10.1051/0004-6361/201423450](#).
- Janvier, M., Y. Kishimoto, and J. Li (Aug. 2011a). "Critical parameters for the nonlinear destabilization of double tearing modes in reversed shear plasmas". In: *Nuclear Fusion* 51.8, 083016, p. 083016. DOI: [10.1088/0029-5515/51/8/083016](#).
- Janvier, M., Y. Kishimoto, and J. Q. Li (Nov. 2011b). "Structure-Driven Nonlinear Instability as the Origin of the Explosive Reconnection Dynamics in Resistive Double Tearing Modes". In: *Physical Review Letters* 107.19, 195001, p. 195001. DOI: [10.1103/PhysRevLett.107.195001](#).
- Janvier, M. et al. (Oct. 2011). "Role of the pressure force in the explosive dynamics of magnetic islands in double tearing modes". In: *Physics of Plasmas* 18.10, 102112, p. 102112. DOI: [10.1063/1.3646396](#).
- Janvier, M. et al. (July 2013). "The standard flare model in three dimensions. III. Slip-running reconnection properties". In: *Astronomy and Astrophysics* 555, A77, A77. DOI: [10.1051/0004-6361/201321164](#). arXiv: [1305.4053 \[astro-ph.SR\]](#).
- Janvier, M. et al. (June 2014). "Electric Currents in Flare Ribbons: Observations and Three-dimensional Standard Model". In: *Astrophysical Journal* 788.1, 60, p. 60. DOI: [10.1088/0004-637X/788/1/60](#). arXiv: [1402.2010 \[astro-ph.SR\]](#).
- Janvier, M. et al. (2015). "Comparing generic models for interplanetary shocks and magnetic clouds axis configurations at 1 AU". In: *J. Geophys. Res* 120, pp. 3328–3349. DOI: [10.1002/2014JA020836](#). arXiv: [1503.06128 \[astro-ph.SR\]](#).
- Janvier, M. et al. (July 2016). "Evolution of flare ribbons, electric currents, and quasi-separatrix layers during an X-class flare". In: *Astronomy and Astrophysics* 591, A141, A141. DOI: [10.1051/0004-6361/201628406](#). arXiv: [1604.07241 \[astro-ph.SR\]](#).
- Janvier, Miho (Feb. 2017). "Three-dimensional magnetic reconnection and its application to solar flares". In: *Journal of Plasma Physics* 83.1, 535830101, p. 535830101. DOI: [10.1017/S0022377817000034](#). arXiv: [1612.06513 \[astro-ph.SR\]](#).
- Janvier, Miho, Yasuaki Kishimoto, and Jiquan Li (Jan. 2010a). "Investigation of Trigger Mechanism in the Explosive Nonlinear Growth of the Double Tearing Mode". In: *Plasma and Fusion Research* 5, S2056, S2056. DOI: [10.1585/pfr.5.S2056](#).
- (Jan. 2010b). "Mechanism of Structure-Driven Nonlinear Instability of Double Tearing Mode in Reversed Magnetic Shear Plasmas". In: *Plasma and Fusion Research* 5, 038, p. 038. DOI: [10.1585/pfr.5.038](#).
- Janvier, Miho et al. (Feb. 2019). "Generic Magnetic Field Intensity Profiles of Interplanetary Coronal Mass Ejections at Mercury, Venus and Earth from Superposed Epoch Analyses". In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 124.2, pp. 812–836. ISSN: 2169-9380, 2169-9402. DOI: [10.1029/2018JA025949](#). arXiv: [1901.09921](#).
- Janvier, Miho et al. (2021). "The two-step Forbush decrease: a tale of two substructures modulating galactic cosmic rays within coronal mass ejections." In: *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 116.A11, A11103, A11103. DOI: [10.1029/2011JA016791](#).
- Joshi, Navin Chandra et al. (Feb. 2019). "Generalization of the Magnetic Field Configuration of Typical and Atypical Confined Flares". In: *Astrophysical Journal* 871.2, 165, p. 165. DOI: [10.3847/1538-4357/aaf3b5](#). arXiv: [1811.01228 \[astro-ph.SR\]](#).
- Kahler, S. W. (Jan. 1992). "Solar flares and coronal mass ejections." In: *Annual Review of Astron and Astrophys* 30, pp. 113–141. DOI: [10.1146/annurev.aa.30.090192.000553](#).

- Kahler, S. W., E. Hildner, and M. A. I. Van Hollebeke (Apr. 1978). "Prompt solar proton events and coronal mass ejections." In: *Solar Physics* 57.2, pp. 429–443. DOI: [10.1007/BF00160116](#).
- Kilpua, E. K. J. et al. (June 2015). "Properties and drivers of fast interplanetary shocks near the orbit of the Earth (1995-2013)". In: *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 120.6, pp. 4112–4125. DOI: [10.1002/2015JA021138](#).
- Kilpua, Emilia, Hannu E. J. Koskinen, and Tuija I. Pulkkinen (Nov. 2017). "Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space". In: *Living Reviews in Solar Physics* 14.1, 5, p. 5. DOI: [10.1007/s41116-017-0009-6](#).
- Kilpua, Emilia K. J. et al. (Sept. 2020). "Magnetic field fluctuation properties of coronal mass ejection-driven sheath regions in the near-Earth solar wind". In: *Annales Geophysicae* 38.5, pp. 999–1017. DOI: [10.5194/angeo-38-999-2020](#).
- Kishimoto, Yasuaki and Miho Janvier (2013). "Interaction of two magnetic reconnections – Structure-driven nonlinear instability and the origin of explosive magnetic reconnection". In: *Plasma and Fusion Research* 89, 774, p. 774.
- Klein, L. W. and L. F. Burlaga (1982). "Interplanetary Magnetic Clouds At 1 AU". en. In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 87.A2, pp. 613–624. ISSN: 2156-2202. DOI: [10.1029/JA087iA02p00613](#).
- Kliem, B. and T. Török (June 2006). "Torus Instability". In: *Physical Review Letters* 96.25, 255002, p. 255002. DOI: [10.1103/PhysRevLett.96.255002](#). arXiv: [physics/0605217 \[physics.plasm-ph\]](#).
- Kliem, B. et al. (Dec. 2013). "Magnetohydrodynamic Modeling of the Solar Eruption on 2010 April 8". In: *Astrophysical Journal* 779.2, 129, p. 129. DOI: [10.1088/0004-637X/779/2/129](#). arXiv: [1304.6981 \[astro-ph.SR\]](#).
- Ko, Yuan-Kuen et al. (Sept. 2003). "Dynamical and Physical Properties of a Post-Coronal Mass Ejection Current Sheet". In: *Astrophysical Journal* 594.2, pp. 1068–1084. DOI: [10.1086/376982](#).
- Koller, Florian et al. (Feb. 2021). "Search for flares and associated CMEs on late-type main-sequence stars in optical SDSS spectra". In: *Astronomy and Astrophysics* 646, A34, A34. DOI: [10.1051/0004-6361/202039003](#). arXiv: [2012.00786 \[astro-ph.SR\]](#).
- Kontogiannis, Ioannis et al. (Nov. 2017). "Non-neutralized Electric Currents in Solar Active Regions and Flare Productivity". In: *Solar Physics* 292.11, 159, p. 159. DOI: [10.1007/s11207-017-1185-1](#). arXiv: [1708.07087 \[astro-ph.SR\]](#).
- Kopp, R. A. and G. W. Pneuman (Oct. 1976). "Magnetic reconnection in the corona and the loop prominence phenomenon." In: *Solar Physics* 50.1, pp. 85–98. DOI: [10.1007/BF00206193](#).
- Kumar, A. and Badruddin (June 2014). "Interplanetary Coronal Mass Ejections, Associated Features, and Transient Modulation of Galactic Cosmic Rays". In: *Solar Physics* 289, pp. 2177–2205. DOI: [10.1007/s11207-013-0465-7](#).
- Lanabere, V. et al. (Mar. 2020). "Magnetic twist profile inside magnetic clouds derived with a superposed epoch analysis". In: *Astron. Astrophys.* 635, A85, A85. DOI: [10.1051/0004-6361/201937404](#). arXiv: [2002.10606 \[physics.space-ph\]](#).
- Lavraud, B. et al. (Aug. 2016). "A small mission concept to the Sun-Earth Lagrangian L5 point for innovative solar, heliospheric and space weather science". In: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 146, pp. 171–185. DOI: [10.1016/j.jastp.2016.06.004](#).
- Lemen, James R. et al. (Jan. 2012). "The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO)". In: *Solar Physics* 275.1-2, pp. 17–40. DOI: [10.1007/s11207-011-9776-8](#).

- Lepping, R. P., L. F. Burlaga, and J. A. Jones (1990). "Magnetic field structure of interplanetary magnetic clouds at 1 AU". In: *J. Geophys. Res* 95, pp. 11957–11965. DOI: [10.1029/JA095iA08p11957](https://doi.org/10.1029/JA095iA08p11957).
- Lepping, R. P. and C. C. Wu (2010). "Selection effects in identifying magnetic clouds and the importance of the closest approach parameter". In: *Annales Geophysicae* 28, pp. 1539–1552. DOI: [10.5194/angeo-28-1539-2010](https://doi.org/10.5194/angeo-28-1539-2010).
- Li, Jiquan et al. (Sept. 2009). "Finite frequency zonal flows in multi-scale plasma turbulence including resistive MHD and drift wave instabilities". In: *Nuclear Fusion* 49.9, 095007, p. 095007. DOI: [10.1088/0029-5515/49/9/095007](https://doi.org/10.1088/0029-5515/49/9/095007).
- Li, Ting and Jun Zhang (May 2015). "Quasi-periodic Slipping Magnetic Reconnection During an X-class Solar Flare Observed by the Solar Dynamics Observatory and Interface Region Imaging Spectrograph". In: *Astrophysical Journal, Letters* 804.1, L8, p. L8. DOI: [10.1088/2041-8205/804/1/L8](https://doi.org/10.1088/2041-8205/804/1/L8). arXiv: [1504.01111](https://arxiv.org/abs/1504.01111) [astro-ph.SR].
- Lin, J. and T. G. Forbes (Feb. 2000). "Effects of reconnection on the coronal mass ejection process". In: *Journal of Geophysical Research* 105.A2, pp. 2375–2392. DOI: [10.1029/1999JA900477](https://doi.org/10.1029/1999JA900477).
- Lionello, Roberto et al. (Nov. 2013). "Magnetohydrodynamic Simulations of Interplanetary Coronal Mass Ejections". In: *Astrophysical Journal* 777.1, 76, p. 76. DOI: [10.1088/0004-637X/777/1/76](https://doi.org/10.1088/0004-637X/777/1/76).
- Liu, Rui et al. (Dec. 2010). "Sigmoid-to-flux-rope Transition Leading to a Loop-like Coronal Mass Ejection". In: *Astrophysical Journal, Letters* 725.1, pp. L84–L90. DOI: [10.1088/2041-8205/725/1/L84](https://doi.org/10.1088/2041-8205/725/1/L84). arXiv: [1011.1181](https://arxiv.org/abs/1011.1181) [astro-ph.SR].
- Lockyer, J. Norman (Jan. 1868). "Notice of an Observation of the Spectrum of a Solar Prominence, by J. N. Lockyer, Esq". In: *Proceedings of the Royal Society of London Series I* 17, pp. 91–92.
- Loureiro, N. F. et al. (Apr. 2012). "Magnetic reconnection and stochastic plasmoid chains in high-Lundquist-number plasmas". In: *Physics of Plasmas* 19.4, pp. 042303–042303. DOI: [10.1063/1.3703318](https://doi.org/10.1063/1.3703318). arXiv: [1108.4040](https://arxiv.org/abs/1108.4040) [astro-ph.SR].
- Low, B. C. (May 1994). "Magnetohydrodynamic processes in the solar corona: Flares, coronal mass ejections, and magnetic helicity". In: *Physics of Plasmas* 1.5, pp. 1684–1690. DOI: [10.1063/1.870671](https://doi.org/10.1063/1.870671).
- Lugaz, N. et al. (May 2010). "Determining the Azimuthal Properties of Coronal Mass Ejections from Multi-Spacecraft Remote-Sensing Observations with STEREO SECCHI". In: *Astrophysical Journal* 715.1, pp. 493–499. DOI: [10.1088/0004-637X/715/1/493](https://doi.org/10.1088/0004-637X/715/1/493). arXiv: [1004.0945](https://arxiv.org/abs/1004.0945) [astro-ph.SR].
- Lugaz, Noé et al. (Sept. 2018). "On the Spatial Coherence of Magnetic Ejecta: Measurements of Coronal Mass Ejections by Multiple Spacecraft Longitudinally Separated by 0.01 au". In: *Astrophysical Journal, Letters* 864.1, L7, p. L7. DOI: [10.3847/2041-8213/aad9f4](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aad9f4). arXiv: [1812.00911](https://arxiv.org/abs/1812.00911) [physics.space-ph].
- Lundquist, S. (1950). "Magnetohydrostatic fields". In: *Ark. Fys.* 2, pp. 361–365.
- Luoni, M. L. et al. (Dec. 2005). "Tracing magnetic helicity from the solar corona to the interplanetary space". In: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 67, pp. 1734–1743. DOI: [10.1016/j.jastp.2005.07.003](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.07.003).
- Mackay, D. H. and A. A. van Ballegoijen (Apr. 2006). "Models of the Large-Scale Corona. I. Formation, Evolution, and Liftoff of Magnetic Flux Ropes". In: *Astrophysical Journal* 641.1, pp. 577–589. DOI: [10.1086/500425](https://doi.org/10.1086/500425).
- Mackay, Duncan H., C. Richard DeVore, and Spiro K. Antiochos (Apr. 2014). "Global-scale Consequences of Magnetic-helicity Injection and Condensation on the Sun". In: *Astrophysical Journal* 784.2, 164, p. 164. DOI: [10.1088/0004-637X/784/2/164](https://doi.org/10.1088/0004-637X/784/2/164).
- Maehara, Hiroyuki et al. (May 2012). "Superflares on solar-type stars". In: *Nature* 485.7399, pp. 478–481. DOI: [10.1038/nature11063](https://doi.org/10.1038/nature11063).

- Mandrini, C. H. et al. (Oct. 1991). "Evidence for the interaction of large scale magnetic structures in solar flares." In: *Astronomy and Astrophysics* 250, pp. 541–547.
- Mandrini, C. H. et al. (Mar. 2004). "Magnetic Helicity Budget of Solar-Active Regions from the Photosphere to Magnetic Clouds". In: *Astrophysics and Space Science* 290.3, pp. 319–344. DOI: [10.1023/B:ASTR.0000032533.31817.0e](https://doi.org/10.1023/B:ASTR.0000032533.31817.0e).
- Masías-Meza, J. J. et al. (Aug. 2016). "Superposed Epoch Study of ICME Sub-Structures near Earth and Their Effects on Galactic Cosmic Rays". en. In: *Astronomy & Astrophysics* 592, A118. ISSN: 0004-6361, 1432-0746. DOI: [10.1051/0004-6361/201628571](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628571).
- McComas, D. J. et al. (July 1998). "Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor (SWEPAM) for the Advanced Composition Explorer". In: *Space Sci. Rev.* 86, pp. 563–612. DOI: [10.1023/A:1005040232597](https://doi.org/10.1023/A:1005040232597).
- Mignone, A. et al. (May 2007). "PLUTO: A Numerical Code for Computational Astrophysics". In: *Astrophysical Journal, Supplement* 170.1, pp. 228–242. DOI: [10.1086/513316](https://doi.org/10.1086/513316). arXiv: [astro-ph/0701854](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0701854) [astro-ph].
- Morrison, P. (Feb. 1956). "Solar Origin of Cosmic-Ray Time Variations". In: *Physical Review* 101.4, pp. 1397–1404. DOI: [10.1103/PhysRev.101.1397](https://doi.org/10.1103/PhysRev.101.1397).
- Möstl, C. et al. (July 2017). "Modeling observations of solar coronal mass ejections with heliospheric imagers verified with the Heliophysics System Observatory". In: *Space Weather* 15.7, pp. 955–970. DOI: [10.1002/2017SW001614](https://doi.org/10.1002/2017SW001614). arXiv: [1703.00705](https://arxiv.org/abs/1703.00705) [astro-ph.SR].
- Möstl, Christian et al. (May 2015). "Strong coronal channelling and interplanetary evolution of a solar storm up to Earth and Mars". In: *Nature Communications* 6, 7135, p. 7135. DOI: [10.1038/ncomms8135](https://doi.org/10.1038/ncomms8135). arXiv: [1506.02842](https://arxiv.org/abs/1506.02842) [astro-ph.SR].
- Nakwacki, M. S. et al. (Nov. 2011). "Dynamical evolution of a magnetic cloud from the Sun to 5.4 AU". In: *Astronomy and Astrophysics* 535, A52, A52. DOI: [10.1051/0004-6361/201015853](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201015853). arXiv: [1108.0951](https://arxiv.org/abs/1108.0951) [astro-ph.SR].
- Namekata, Kosuke et al. (Dec. 2017). "Statistical Studies of Solar White-light Flares and Comparisons with Superflares on Solar-type Stars". In: *Astrophysical Journal* 851.2, 91, p. 91. DOI: [10.3847/1538-4357/aa9b34](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa9b34). arXiv: [1710.11325](https://arxiv.org/abs/1710.11325) [astro-ph.SR].
- Nishizuka, N. et al. (Feb. 2015). "Particle Acceleration in Plasmoid Ejections Derived from Radio Drifting Pulsating Structures". In: *Astrophysical Journal* 799.2, 126, p. 126. DOI: [10.1088/0004-637X/799/2/126](https://doi.org/10.1088/0004-637X/799/2/126). arXiv: [1412.7904](https://arxiv.org/abs/1412.7904) [astro-ph.SR].
- Nogami, Daisaku et al. (Apr. 2014). "Two sun-like superflare stars rotating as slow as the Sun". In: *Publications of the ASJ* 66.2, L4, p. L4. DOI: [10.1093/pasj/psu012](https://doi.org/10.1093/pasj/psu012). arXiv: [1402.3772](https://arxiv.org/abs/1402.3772) [astro-ph.SR].
- Okamoto, Soshi et al. (Jan. 2021). "Statistical Properties of Superflares on Solar-type Stars: Results Using All of the Kepler Primary Mission Data". In: *Astrophysical Journal* 906.2, 72, p. 72. DOI: [10.3847/1538-4357/abc8f5](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abc8f5). arXiv: [2011.02117](https://arxiv.org/abs/2011.02117) [astro-ph.SR].
- Pariat, E. and P. Démoulin (May 2012). "Estimation of the squashing degree within a three-dimensional domain". In: *Astronomy and Astrophysics* 541, A78, A78. DOI: [10.1051/0004-6361/201118515](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201118515).
- Parker, E. N. (Dec. 1957a). "Sweet's Mechanism for Merging Magnetic Fields in Conducting Fluids". In: *Journal of Geophysical Research* 62.4, pp. 509–520. DOI: [10.1029/JZ062i004p00509](https://doi.org/10.1029/JZ062i004p00509).
- Parker, Eugene N. (July 1957b). "The Gross Dynamics of a Hydromagnetic Gas Cloud." In: *Astrophysical Journal, Supplement* 3, p. 51. DOI: [10.1086/190032](https://doi.org/10.1086/190032).
- Peter, H. et al. (Jan. 2021). "Magnetic Imaging of the Outer Solar Atmosphere (MI-mOSA): Unlocking the driver of the dynamics in the upper solar atmosphere". In: *arXiv e-prints*, arXiv:2101.01566, arXiv:2101.01566. arXiv: [2101.01566](https://arxiv.org/abs/2101.01566) [astro-ph.SR].

- Polito, V. et al. (May 2017). "Analysis and modelling of recurrent solar flares observed with Hinode/EIS on March 9, 2012". In: *Astronomy and Astrophysics* 601, A39, A39. DOI: [10.1051/0004-6361/201629703](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629703). arXiv: [1612.03504](https://arxiv.org/abs/1612.03504) [astro-ph.SR].
- Pontin, D. I. et al. (Mar. 2017). "Observable Signatures of Energy Release in Braided Coronal Loops". In: *Astrophysical Journal* 837.2, 108, p. 108. DOI: [10.3847/1538-4357/aa5ff9](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa5ff9).
- Potgieter, Marius S. (June 2013). "Solar Modulation of Cosmic Rays". In: *Living Reviews in Solar Physics* 10.1, 3, p. 3. DOI: [10.12942/lrsp-2013-3](https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-3). arXiv: [1306.4421](https://arxiv.org/abs/1306.4421) [physics.space-ph].
- Priest, E. R. and P. Démoulin (Dec. 1995). "Three-dimensional magnetic reconnection without null points. 1. Basic theory of magnetic flipping". In: *Journal of Geophysical Research* 100.A12, pp. 23443–23464. DOI: [10.1029/95JA02740](https://doi.org/10.1029/95JA02740).
- Priest, E. R., D. W. Longcope, and M. Janvier (Aug. 2016). "Evolution of Magnetic Helicity During Eruptive Flares and Coronal Mass Ejections". In: *Solar Physics* 291.7, pp. 2017–2036. DOI: [10.1007/s11207-016-0962-6](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0962-6). arXiv: [1607.03874](https://arxiv.org/abs/1607.03874) [astro-ph.SR].
- Qiu, Jiong et al. (May 2007). "On The Magnetic Flux Budget In Low-corona Magnetic Reconnection And Interplanetary Magnetic Flux Ropes". In: *American Astronomical Society Meeting Abstracts* #210. Vol. 210. American Astronomical Society Meeting Abstracts, p. 29.27.
- Regnault, F. (Nov. 2021). "PhD Thesis". In: DOI: TBD.
- Regnault, F. et al. (Nov. 2020). "20 Years of ACE Data: How Superposed Epoch Analyses Reveal Generic Features in Interplanetary CME Profiles". In: *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 125.11, e28150, e28150. DOI: [10.1029/2020JA028150](https://doi.org/10.1029/2020JA028150). arXiv: [2011.05050](https://arxiv.org/abs/2011.05050) [astro-ph.SR].
- Richardson, I. G. and H. V. Cane (2010). "Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 23 (1996 - 2009): Catalog and Summary of Properties". In: *Solar Phys.* 264, pp. 189–237. DOI: [10.1007/s11207-010-9568-6](https://doi.org/10.1007/s11207-010-9568-6).
- Rodriguez, L. et al. (Aug. 2016). "Typical Profiles and Distributions of Plasma and Magnetic Field Parameters in Magnetic Clouds at 1 AU". In: *Solar Physics* 291.7, pp. 2145–2163. ISSN: 0038-0938, 1573-093X. DOI: [10.1007/s11207-016-0955-5](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0955-5).
- Rouillard, A. P. et al. (May 2008). "First imaging of corotating interaction regions using the STEREO spacecraft". In: *Geophysics Research Letters* 35.10, L10110, p. L10110. DOI: [10.1029/2008GL033767](https://doi.org/10.1029/2008GL033767).
- Rouillard, A. P. et al. (Oct. 2020). "Models and data analysis tools for the Solar Orbiter mission". In: *Astronomy and Astrophysics* 642, A2, A2. DOI: [10.1051/0004-6361/201935305](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935305).
- Ruffenach, A. et al. (2012). "Multispacecraft observation of magnetic cloud erosion by magnetic reconnection during propagation". In: *J. Geophys. Res.* 117.A16, A09101, A09101. DOI: [10.1029/2012JA017624](https://doi.org/10.1029/2012JA017624).
- Ruffenach, A. et al. (Jan. 2015). "Statistical study of magnetic cloud erosion by magnetic reconnection". In: *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 120, pp. 43–60. DOI: [10.1002/2014JA020628](https://doi.org/10.1002/2014JA020628).
- Russell, A. J. B., P. J. A. Simões, and L. Fletcher (Sept. 2015). "A unified view of coronal loop contraction and oscillation in flares". In: *Astronomy and Astrophysics* 581, A8, A8. DOI: [10.1051/0004-6361/201525746](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525746). arXiv: [1506.07716](https://arxiv.org/abs/1506.07716) [astro-ph.SR].
- Savcheva, A. S. et al. (Nov. 2012). "Photospheric Flux Cancellation and the Build-up of Sigmoidal Flux Ropes on the Sun". In: *Astrophysical Journal* 759.2, 105, p. 105. DOI: [10.1088/0004-637X/759/2/105](https://doi.org/10.1088/0004-637X/759/2/105).
- Savcheva, Antonia and Adriaan van Ballegooijen (Oct. 2009). "Nonlinear Force-free Modeling of a Long-lasting Coronal Sigmoid". In: *Astrophysical Journal* 703.2, pp. 1766–1777. DOI: [10.1088/0004-637X/703/2/1766](https://doi.org/10.1088/0004-637X/703/2/1766).

- Scherrer, P. H. et al. (Jan. 2012). "The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO)". In: *Solar Physics* 275.1-2, pp. 207–227. DOI: [10.1007/s11207-011-9834-2](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9834-2).
- Schindler, K., M. Hesse, and J. Birn (June 1988). "General magnetic reconnection, parallel electric fields, and helicity". In: *Journal of Geophysical Research* 93.A6, pp. 5547–5557. DOI: [10.1029/JA093iA06p05547](https://doi.org/10.1029/JA093iA06p05547).
- Sheeley N. R., Jr. et al. (Jan. 1985). "Coronal mass ejections and interplanetary shocks". In: *Journal of Geophysical Research* 90.A1, pp. 163–176. DOI: [10.1029/JA090iA01p00163](https://doi.org/10.1029/JA090iA01p00163).
- Sheeley, N. R. et al. (Nov. 1999). "Continuous tracking of coronal outflows: Two kinds of coronal mass ejections". In: *Journal of Geophysical Research* 104.A11, pp. 24739–24768. DOI: [10.1029/1999JA900308](https://doi.org/10.1029/1999JA900308).
- Shen, Yuandeng et al. (Nov. 2019). "Round-trip Slipping Motion of the Circular Flare Ribbon Evidenced in a Fan-spine Jet". In: *Astrophysical Journal, Letters* 885.1, L11, p. L11. DOI: [10.3847/2041-8213/ab4cf3](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab4cf3). arXiv: [1910.05472](https://arxiv.org/abs/1910.05472) [astro-ph.SR].
- Shibata, Kazunari et al. (June 2013). "Can Superflares Occur on Our Sun?" In: *Publications of the ASJ* 65, 49, p. 49. DOI: [10.1093/pasj/65.3.49](https://doi.org/10.1093/pasj/65.3.49). arXiv: [1212.1361](https://arxiv.org/abs/1212.1361) [astro-ph.SR].
- Simões, P. J. A. et al. (Nov. 2013). "Implosion of Coronal Loops during the Impulsive Phase of a Solar Flare". In: *Astrophysical Journal* 777.2, 152, p. 152. DOI: [10.1088/0004-637X/777/2/152](https://doi.org/10.1088/0004-637X/777/2/152). arXiv: [1309.7090](https://arxiv.org/abs/1309.7090) [astro-ph.SR].
- Smith, C. W. et al. (1998). "The ACE Magnetic Fields Experiment". In: *Space Science Reviews* 86, pp. 613–632. DOI: [10.1023/A:1005092216668](https://doi.org/10.1023/A:1005092216668).
- Sobotka, M. et al. (Nov. 2016). "Slipping reconnection in a solar flare observed in high resolution with the GREGOR solar telescope". In: *Astronomy and Astrophysics* 596, A1, A1. DOI: [10.1051/0004-6361/201527966](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527966). arXiv: [1605.00464](https://arxiv.org/abs/1605.00464) [astro-ph.SR].
- Solomon, S. C. et al. (Aug. 2007). "MESSENGER Mission Overview". In: *Space Sci. Rev.* 131, pp. 3–39. DOI: [10.1007/s11214-007-9247-6](https://doi.org/10.1007/s11214-007-9247-6).
- Sonett, C. P. et al. (Aug. 1964). "Evidence for a Collision-Free Magnetohydrodynamic Shock in Interplanetary Space". In: *Phys. Rev. Lett.* 13 (5), pp. 153–156. DOI: [10.1103/PhysRevLett.13.153](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.153). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.13.153>.
- Sonnerup, Bengt U. Å. et al. (Sept. 2006). "Grad-Shafranov reconstruction: An overview". In: *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 111.A9, A09204, A09204. DOI: [10.1029/2006JA011717](https://doi.org/10.1029/2006JA011717).
- Sonnerup, Bengt U. Ö. and Maureen Scheible (Jan. 1998). "Minimum and Maximum Variance Analysis". In: *ISSI Scientific Reports Series* 1, pp. 185–220.
- Spice Consortium et al. (Oct. 2020). "The Solar Orbiter SPICE instrument. An extreme UV imaging spectrometer". In: *Astronomy and Astrophysics* 642, A14, A14. DOI: [10.1051/0004-6361/201935574](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935574). arXiv: [1909.01183](https://arxiv.org/abs/1909.01183) [astro-ph.IM].
- Stone, E. C. et al. (July 1998). "The Advanced Composition Explorer". In: *Space Sci. Rev.* 86, pp. 1–22. DOI: [10.1023/A:1005082526237](https://doi.org/10.1023/A:1005082526237).
- Sturrock, P. A. (Aug. 1966). "Model of the High-Energy Phase of Solar Flares". In: *Nature* 211.5050, pp. 695–697. DOI: [10.1038/211695a0](https://doi.org/10.1038/211695a0).
- Sweet, P. A. (1956). "Proceedings of the International Astronomical Union Symposium on Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics". In: *IAU Symposium* unpublished.
- Takasao, Shinsuke et al. (Jan. 2012). "Simultaneous Observation of Reconnection Inflow and Outflow Associated with the 2010 August 18 Solar Flare". In: *Astrophysical Journal, Letters* 745.1, L6, p. L6. DOI: [10.1088/2041-8205/745/1/L6](https://doi.org/10.1088/2041-8205/745/1/L6). arXiv: [1112.1398](https://arxiv.org/abs/1112.1398) [astro-ph.SR].

- Tandberg-Hanssen, Einar (1995). *The nature of solar prominences*. Vol. 199. DOI: [10.1007/978-94-017-3396-0](https://doi.org/10.1007/978-94-017-3396-0).
- Titov, D. V. et al. (July 2006). "Venus Express: Scientific goals, instrumentation, and scenario of the mission". In: *Cosmic Research* 44.4, pp. 334–348. ISSN: 1608-3075. DOI: [10.1134/S0010952506040071](https://doi.org/10.1134/S0010952506040071). URL: <https://doi.org/10.1134/S0010952506040071>.
- Titov, V. S. et al. (Aug. 2014). "A Method for Embedding Circular Force-free Flux Ropes in Potential Magnetic Fields". In: *Astrophysical Journal* 790.2, 163, p. 163. DOI: [10.1088/0004-637X/790/2/163](https://doi.org/10.1088/0004-637X/790/2/163).
- Titov, Vyacheslav S., Gunnar Hornig, and Pascal Démoulin (Aug. 2002). "Theory of magnetic connectivity in the solar corona". In: *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 107.A8, 1164, p. 1164. DOI: [10.1029/2001JA000278](https://doi.org/10.1029/2001JA000278).
- Toriumi, Shin and Haimin Wang (May 2019). "Flare-productive active regions". In: *Living Reviews in Solar Physics* 16.1, 3, p. 3. DOI: [10.1007/s41116-019-0019-7](https://doi.org/10.1007/s41116-019-0019-7). arXiv: [1904.12027](https://arxiv.org/abs/1904.12027) [astro-ph.SR].
- Tousey, R., R. A. Howard, and M. J. Koomen (Mar. 1974). "The Frequency and Nature of Coronal Transient Events Observed by OSO-7". In: *Bulletin of the American Astronomical Society*. Vol. 6, p. 295.
- Uchida, Y. (Jan. 1960). "On the Exciters of Type II and Type III Solar Radio Bursts". In: *Publications of the ASJ* 12, p. 376.
- Valori, Gherardo et al. (Nov. 2016). "Magnetic Helicity Estimations in Models and Observations of the Solar Magnetic Field. Part I: Finite Volume Methods". In: *Space Science Reviews* 201.1-4, pp. 147–200. DOI: [10.1007/s11214-016-0299-3](https://doi.org/10.1007/s11214-016-0299-3). arXiv: [1610.02193](https://arxiv.org/abs/1610.02193) [astro-ph.SR].
- van Driel-Gesztelyi, L. et al. (Mar. 2003). "The Long-Term Evolution of AR 7978: The Scalings of the Coronal Plasma Parameters with the Mean Photospheric Magnetic Field". In: *Astrophysical Journal* 586.1, pp. 579–591. DOI: [10.1086/367633](https://doi.org/10.1086/367633).
- van Driel-Gesztelyi, Lidia and Lucie May Green (Sept. 2015). "Evolution of Active Regions". In: *Living Reviews in Solar Physics* 12.1, 1, p. 1. DOI: [10.1007/lrsp-2015-1](https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-1).
- von Forstner, Johan L. Freiherr et al. (Feb. 2021). "Radial Evolution of the April 2020 Stealth Coronal Mass Ejection between 0.8 and 1 AU – A Comparison of Forbush Decreases at Solar Orbiter and Earth". In: *arXiv e-prints*, arXiv:2102.12185, arXiv:2102.12185. arXiv: [2102.12185](https://arxiv.org/abs/2102.12185) [astro-ph.SR].
- Vourlidas, A. et al. (May 2000). "Large-Angle Spectrometric Coronagraph Measurements of the Energetics of Coronal Mass Ejections". In: *Astrophysical Journal* 534.1, pp. 456–467. DOI: [10.1086/308747](https://doi.org/10.1086/308747).
- Vourlidas, A. et al. (Oct. 2010). "Comprehensive Analysis of Coronal Mass Ejection Mass and Energy Properties Over a Full Solar Cycle". In: *Astrophysical Journal* 722.2, pp. 1522–1538. DOI: [10.1088/0004-637X/722/2/1522](https://doi.org/10.1088/0004-637X/722/2/1522). arXiv: [1008.3737](https://arxiv.org/abs/1008.3737) [astro-ph.SR].
- Wang, Shuo et al. (Feb. 2012). "Response of the Photospheric Magnetic Field to the X2.2 Flare on 2011 February 15". In: *Astrophysical Journal, Letters* 745.2, L17, p. L17. DOI: [10.1088/2041-8205/745/2/L17](https://doi.org/10.1088/2041-8205/745/2/L17). arXiv: [1112.3948](https://arxiv.org/abs/1112.3948) [astro-ph.SR].
- Warren, Harry P., Casey M. O'Brien, and Jr. Sheeley Neil R. (Dec. 2011). "Observations of Reconnecting Flare Loops with the Atmospheric Imaging Assembly". In: *Astrophysical Journal* 742.2, 92, p. 92. DOI: [10.1088/0004-637X/742/2/92](https://doi.org/10.1088/0004-637X/742/2/92). arXiv: [1109.2474](https://arxiv.org/abs/1109.2474) [astro-ph.SR].
- Webb, David F. and Edward W. Cliver (Apr. 1995). "Evidence for magnetic disconnection of mass ejections in the corona". In: *Journal of Geophysical Research* 100.A4, pp. 5853–5870. DOI: [10.1029/94JA02731](https://doi.org/10.1029/94JA02731).
- Webb, David F. and Timothy A. Howard (June 2012). "Coronal Mass Ejections: Observations". In: *Living Reviews in Solar Physics* 9.1, 3, p. 3. DOI: [10.12942/lrsp-2012-3](https://doi.org/10.12942/lrsp-2012-3).

- Wimmer-Schweingruber, R. F. et al. (2006). "Understanding Interplanetary Coronal Mass Ejection Signatures. Report of Working Group B". In: *Space Sci. Rev.* 123.1-3, pp. 177–216. DOI: [10.1007/s11214-006-9017-x](https://doi.org/10.1007/s11214-006-9017-x).
- Winslow, Reka M. et al. (Aug. 2015). "Interplanetary coronal mass ejections from MESSENGER orbital observations at Mercury". In: *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 120.8, pp. 6101–6118. DOI: [10.1002/2015JA021200](https://doi.org/10.1002/2015JA021200).
- Wood, B. E. et al. (Oct. 2009). "Reconstructing the 3D Morphology of the 17 May 2008 CME". In: *Solar Physics* 259.1-2, pp. 163–178. DOI: [10.1007/s11207-009-9391-0](https://doi.org/10.1007/s11207-009-9391-0).
- Yamada, Masaaki et al. (May 2015). "Study of energy conversion and partitioning in the magnetic reconnection layer of a laboratory plasma". In: *Physics of Plasmas* 22.5, 056501, p. 056501. DOI: [10.1063/1.4920960](https://doi.org/10.1063/1.4920960).
- Yermolaev, Yu I. et al. (2015). "Dynamics of Large-Scale Solar Wind Streams Obtained by the Double Superposed Epoch Analysis". In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 120.9, pp. 7094–7106. ISSN: 2169-9402. DOI: [10.1002/2015JA021274](https://doi.org/10.1002/2015JA021274).
- Zhang, Jie, Xin Cheng, and Ming-De Ding (Mar. 2012). "Observation of an evolving magnetic flux rope before and during a solar eruption". In: *Nature Communications* 3, 747, p. 747. DOI: [10.1038/ncomms1753](https://doi.org/10.1038/ncomms1753). arXiv: [1203.4859](https://arxiv.org/abs/1203.4859) [astro-ph.SR].
- Zhang, Mei, Natasha Flyer, and Boon Chye Low (June 2006). "Magnetic Field Confinement in the Corona: The Role of Magnetic Helicity Accumulation". In: *Astrophysical Journal* 644.1, pp. 575–586. DOI: [10.1086/503353](https://doi.org/10.1086/503353). arXiv: [astro-ph/0603011](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0603011) [astro-ph].
- Zhang, T. L. et al. (Nov. 2006). "Magnetic field investigation of the Venus plasma environment: Expected new results from Venus Express". In: *Planetary Space Science* 54.13-14, pp. 1336–1343. DOI: [10.1016/j.pss.2006.04.018](https://doi.org/10.1016/j.pss.2006.04.018).
- Zouganelis, I. et al. (Oct. 2020). "The Solar Orbiter Science Activity Plan. Translating solar and heliospheric physics questions into action". In: *Astronomy and Astrophysics* 642, A3, A3. DOI: [10.1051/0004-6361/202038445](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038445). arXiv: [2009.10772](https://arxiv.org/abs/2009.10772) [astro-ph.SR].
- Zuccarello, F. P., G. Aulanier, and S. A. Gilchrist (Dec. 2015). "Critical Decay Index at the Onset of Solar Eruptions". In: *Astrophysical Journal* 814.2, 126, p. 126. DOI: [10.1088/0004-637X/814/2/126](https://doi.org/10.1088/0004-637X/814/2/126). arXiv: [1510.03713](https://arxiv.org/abs/1510.03713) [astro-ph.SR].
- Zurbuchen, T. H. and I. G. Richardson (2006). "In-Situ Solar Wind and Magnetic Field Signatures of Interplanetary Coronal Mass Ejections". In: *Space Sci. Rev.* 123, pp. 31–43. DOI: [10.1007/s11214-006-9010-4](https://doi.org/10.1007/s11214-006-9010-4).