

Projet ANR-17-CE31-0006

COROSHOCK

Programme JCJC CE31 AAPG 2017

A	IDENTIFICATION	2
B	RESUME CONSOLIDE PUBLIC	2
B.1	Instructions pour les résumés consolidés publics	2
B.2	Résumé consolidé public en français	3
B.3	Résumé consolidé public en anglais	6
C	MEMOIRE SCIENTIFIQUE	10
C.1	Résumé du mémoire	11
C.2	Enjeux et problématique, état de l'art	11
C.3	Approche scientifique et technique	12
C.4	Résultats obtenus	13
C.5	Exploitation des résultats	14
C.6	Discussion	15
C.7	Conclusions	15
C.8	Références	15
D	LISTE DES LIVRABLES	17
E	IMPACT DU PROJET	17
E.1	Indicateurs d'impact	17
E.2	Liste des publications et communications	18
E.3	Liste des éléments de valorisation	21
E.4	Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires)	23

Ce document est à remplir par le coordinateur en collaboration avec les partenaires du projet. L'ensemble des partenaires doit avoir une copie de la version transmise à l'ANR.

Ce modèle doit être utilisé uniquement pour le compte-rendu de fin de projet.

A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	COROSHOCK
Titre du projet	EVALUER LE ROLE DU CHOC COMME ACCELERATEUR DE PARTICULES SOLAIRES
Coordinateur du projet (société/organisme)	Université de Toulouse III Paul Sabatier
Période du projet (date de début – date de fin)	01/10/2017-30/04/2022
Site web du projet, le cas échéant	http://storms-service.irap.omp.eu/projects/coroshock

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	Mr Alexis Rouillard
Téléphone	+33561558869
Adresse électronique	arouillard@irap.omp.eu
Date de rédaction	20/09/2022

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	
---	--

B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

Ce résumé est destiné à être diffusé auprès d'un large public pour promouvoir les résultats du projet, il ne fera donc pas mention de résultats confidentiels et utilisera un vocabulaire adapté mais n'excluant pas les termes techniques. Il en sera fourni une version française et une version en anglais. Il est nécessaire de respecter les instructions ci-dessous.

B.1 INSTRUCTIONS POUR LES RESUMES CONSOLIDES PUBLICS

Les résumés publics en français et en anglais doivent être structurés de la façon suivante.

Titre d'accroche du projet (environ 80 caractères espaces compris)

Titre d'accroche, si possible percutant et concis, qui résume et explicite votre projet selon une logique grand public : il n'est pas nécessaire de présenter exhaustivement le projet mais il faut plutôt s'appuyer sur son aspect le plus marquant.

Les deux premiers paragraphes sont précédés d'un titre spécifique au projet rédigé par vos soins.

Titre 1 : situe l'objectif général du projet et sa problématique (150 caractères max espaces compris)

Paragraphe 1 : (environ 1200 caractères espaces compris)

Le paragraphe 1 précise les enjeux et objectifs du projet : indiquez le contexte, l'objectif général, les problèmes traités, les solutions recherchées, les perspectives et les retombées au niveau technique ou/et sociétal

Titre 2 : précise les méthodes ou technologies utilisées (150 caractères max espaces compris)

Paragraphe 2 : (environ 1200 caractères espaces compris)

Le paragraphe 2 indique comment les résultats attendus sont obtenus grâce à certaines méthodes ou/et technologies. Les technologies utilisées ou/et les méthodes permettant de surmonter les verrous sont explicitées (il faut éviter le jargon scientifique, les acronymes ou les abréviations).

Résultats majeurs du projet (environ 600 caractères espaces compris)

Faits marquants diffusables en direction du grand public, expliciter les applications ou/et les usages rendus possibles, quelles sont les pistes de recherche ou/et de développement originales, éventuellement non prévues au départ.

Préciser aussi toute autre retombée= partenariats internationaux, nouveaux débouchés, nouveaux contrats, start-up, synergies de recherche, pôles de compétitivités, etc.

Production scientifique et brevets depuis le début du projet (environ 500 caractères espaces compris)

Ne pas mettre une simple liste mais faire quelques commentaires. Vous pouvez aussi indiquer les actions de normalisation

Illustration

Une illustration avec un schéma, graphique ou photo et une brève légende. L'illustration doit être clairement lisible à une taille d'environ 6cm de large et 5cm de hauteur. Prévoir une résolution suffisante pour l'impression. Envoyer seulement des illustrations dont vous détenez les droits.

Informations factuelles

Rédiger une phrase précisant le type de projet (recherche industrielle, recherche fondamentale, développement expérimental, exploratoire, innovation, etc.), le coordonnateur, les partenaires, la date de démarrage effectif, la durée du projet, l'aide ANR et le coût global du projet, par exemple « Le projet XXX est un projet de recherche fondamentale coordonné par xxx. Il associe aussi xxx, ainsi que des laboratoires xxx et xxx). Le projet a commencé en juin 2006 et a duré 36 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de xxx € pour un coût global de l'ordre de xxx € »

B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS

Suivre impérativement les instructions ci-dessus.

Comment le Soleil produit-il des particules très énergétiques ?

Les événements à particules solaires : des menaces difficilement prévisibles pour l'activité humaine dans l'espace

Les mécanismes physiques produisant les particules énergétiques solaires (SEP) et le rayonnement électromagnétique de haute énergie comme les rayons gamma sont encore mal compris et débattus. Un processus d'accélération de particules proposé implique des interactions répétées entre les particules et le front d'un orage solaire qui peut développer une onde de choc lorsque l'orage se déplace à grande vitesse. Ces particules très énergétiques représentent une menace pour l'activité humaine dans l'espace car elles peuvent détruire certains composants électroniques à bord des satellites de télécommunication ainsi que nuire sérieusement à la santé des astronautes durant des vols habités par exemple vers la Lune ou Mars. Dans ce contexte, le projet COROSHOCK avait pour objectif de mieux comprendre comment les particules très énergétiques et les émissions électromagnétiques très intenses sont produites au Soleil en se focalisant sur le rôle des ondes de choc. Le projet visait à développer des modèles numériques avancés pour tester différentes théories d'accélération de particules en les confrontant aux observations de téledétection de la couronne solaire et des mesures in situ de particules dans le milieu interplanétaire, notamment obtenues par les missions Parker Solar Probe et Solar Orbiter.

Mieux comprendre les événements à particules solaires : modélisation des ondes de chocs et de l'accélération des particules

Le projet COROSHOCK s'est donc consacré à évaluer le rôle du choc coronal dans l'accélération des particules. Il s'est appuyé sur une stratégie d'analyse des observations multipoints et multi-instrumentales fournies par la flotte de sondes spatiales en orbite autour du Soleil. Ceci a permis de comparer de manière systématique la formation des ondes de chocs dans la couronne, de modéliser leur évolution tridimensionnelle par des techniques développées durant le projet avec les particules accélérées et mesurées in situ plus loin dans le milieu interplanétaire. Grâce à des nouvelles techniques de modélisation tridimensionnelle des ondes de chocs l'évolution dynamique des propriétés des chocs (nombre de Mach, géométrie) a pu être dérivée pour plus de quarante événements dont certains observés pour la première fois par les sondes Parker Solar Probe et Solar Orbiter. Le projet a contribué de manière significative aux premiers articles de ces missions. Les propriétés des ondes de choc ont ensuite été exploitées dans un modèle d'accélération et de transport des particules développé durant le projet qui a permis d'étudier les mécanismes possibles d'accélération de particules.

Résultats principaux du projet

Les résultats obtenus durant le projet ont permis d'évaluer de manière quantitative le rôle du choc dans l'accélération des particules. Le projet a obtenu de nombreux résultats :

- Création et mise à disposition en ligne d'un catalogue complet des propriétés des ondes de chocs triangulées et modélisées dans la couronne solaire (Kouloumvakos et al. 2019).
- Mise en évidence d'un lien statistique significatif entre le nombre de Mach des ondes de chocs de la couronne et l'intensité du flux de particules qui s'en échappent (Kouloumvakos et al. 2019)
- Première analyse démontrant un lien étroit entre l'évolution d'une onde de choc et le flux de rayonnement gamma mesuré par Fermi-LAT (Kouloumvakos et al. 2020).
- Application des techniques développées dans COROSHOCK aux premières analyses des données obtenues par Parker Solar Probe (Howard et al. 2019, Nature, McComas et al., 2019 Nature, Rouillard et al. 2020)
- Première modélisation des jets coronaux et leurs liens avec les événements à particules impulsifs de Parker Solar Probe (Kouloumvakos et al. 2022).
- Nouvelle interprétation de l'origine du rayonnement X dur observé durant les orages solaires comme le résultat d'un double miroir magnétique des particules entre le front de choc et la surface solaire (Wu et al. 2021).
- Mise évidence de l'association entre le déclenchement des types II radio décamétriques avec le passage des ondes de choc au travers des boucles magnétiques (Kouloumvakos et al. 2021).
- Exploitation des techniques et modèles développés dans COROSHOCK pour analyser les premières données de Solar Orbiter (Kouloumvakos et al. 2022).

Production scientifique et techniques, logiciels

- 1 catalogue d'ondes de choc fournissant l'évolution 3-D des propriétés des chocs de la couronne (Mach, géométrie, vitesse)
- 41 présentations orales ou posters dans des conférences internationales et 6 au niveau national. Co-organisation de plusieurs sessions

- 22 articles publiés dans des revues internationales, 10 publiés en premier auteur (par Kouloumvakos, Wu ou Rouillard).
- Développement et mise en place disposition d'un outil de prévision des propriétés des orages solaires et des ondes de choc (SHOCK TOOL). Cet outil de prévision tourne 24/24 7/7 sur le site du centre de météorologie de l'espace STORMS : <http://connect-tool.irap.omp.eu/>
- Développement d'un mis à disposition de la communauté permettant aux chercheurs de modéliser eux-mêmes les ondes de choc : <https://github.com/AthKouloumvakos/PyThea>

Développement d'un mis à disposition de la communauté permettant aux chercheurs de modéliser eux-mêmes les ondes de choc : <https://github.com/AthKouloumvakos/HDPmt>

Fiche d'identité du projet

Le projet COROSHOCK (EVALUER LE ROLE DU CHOC COMME ACCELERATEUR DE PARTICULES SOLAIRES, <http://storms-service.irap.omp.eu/projects/coroshock>) est un projet financé par le programme Jeune Chercheuses/Jeune Chercheur de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Il a été coordonné par Alexis Rouillard (alexis.rouillard@irap.omp.eu) de l'IRAP Toulouse. Le projet COROSHOCK est un projet de recherche fondamental, il a débuté en octobre 2017 et s'est déroulé sur 50 mois pour se finir fin mars 2022. Il a bénéficié d'un soutien de 294 k€ de la part de l'ANR.

Illustration

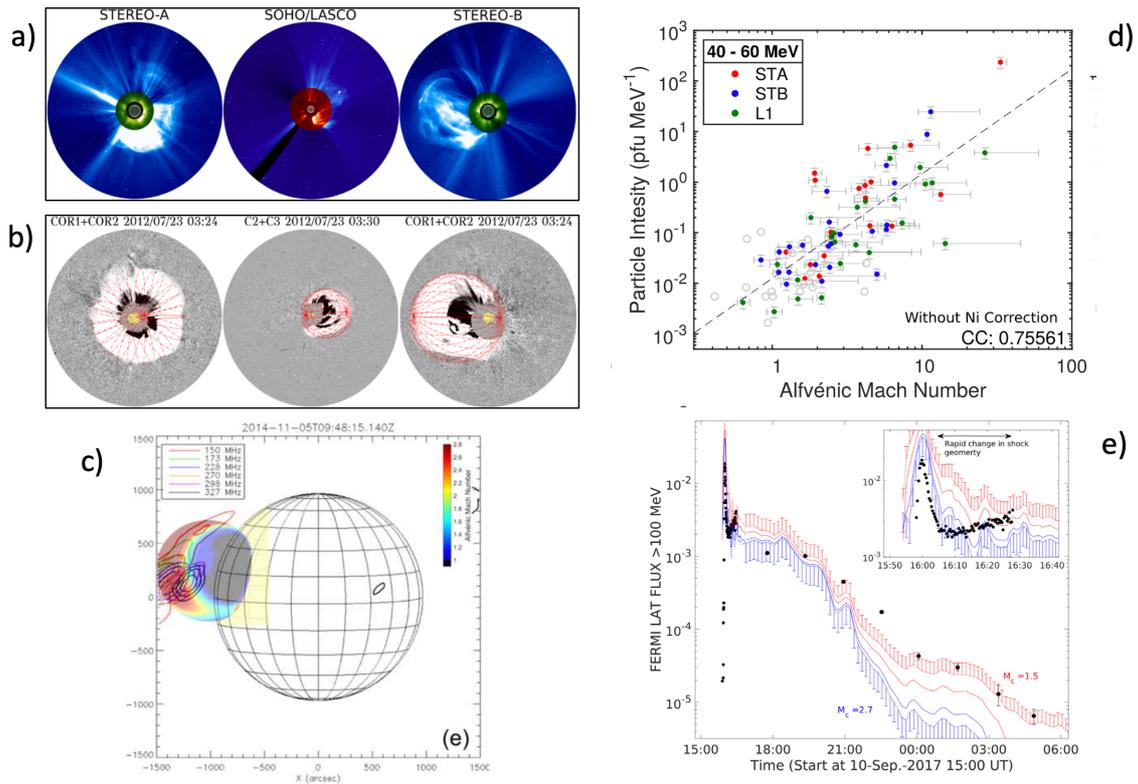


Figure 1. Description : (a,b) Observations coronographiques d'un orage solaire et de son onde de choc le 23 juillet 2012 par STA (gauche), SOHO/LASCO (milieu) et STB (droite), vers 03:24UT. Les panneaux de la rangée a) sont des images coronographiques directes et ceux de la rangée b) sont des images différenciées. Le sphéroïde en rouge montre la localisation du front de choc obtenue par triangulation des observations coronographiques (a). Dans c) nous montrons en couleur la distribution 3D des paramètres du choc issus de la modélisation 3-D avec les sources d'émission radio solaires imagées par le radiohéliographe de Nançay (lignes de niveaux). d) Comparaisons entre le nombre de Mach des ondes de choc du catalogue COROSHOCK avec les pics d'intensités des particules mesurées in situ durant chaque évènement à particule associé à chaque choc. e) Comparaison entre une simulation du flux de particules impactant la surface du Soleil (rouge et bleu) et capable de produire des émissions gamma et de l'émission observée de rayons $\gamma > 100$ MeV par l'instrument gamma (en noir).

B.3 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

Suivre impérativement les instructions ci-dessus.

How does the Sun produce highly energetic particles?

Solar particle events: difficult-to-predict threats to human activity in space

The physical mechanisms producing solar energetic particles (SEP) and high energy electromagnetic radiation such as gamma rays are still poorly understood and debated. One proposed particle acceleration process involves repeated interactions between the particles and the front of a solar storm that can develop a shock wave as the storm moves at high speed. These highly energetic particles represent a threat to human activity in space as they can destroy some electronic components on board telecommunication satellites as well as seriously affect the health of astronauts during manned flights to the Moon or Mars for example. In this context, the COROSHOCK project aimed to better understand how very energetic particles and very intense electromagnetic emissions are produced on the Sun by focusing on the role of shock waves. The project aimed at developing advanced numerical models to test different particle acceleration theories by confronting them with remote sensing observations of the solar corona and in situ measurements of particles in the interplanetary medium, notably obtained by the Parker Solar Probe and Solar Orbiter missions.

Better understanding of solar particle events: modeling of shock waves and particle acceleration

The COROSHOCK project has therefore focused on evaluating the role of the coronal shock in the acceleration of particles. It was based on a strategy of analysis of multi-point and multi-instrument observations provided by the fleet of space probes orbiting the Sun. This allowed to systematically compare the formation of shock waves in the corona, to model their three-dimensional evolution by techniques developed during the project with the accelerated particles and measured in situ further in the interplanetary medium. Thanks to new techniques of three-dimensional modeling of the shock waves, the dynamic evolution of the shock properties (Mach number, geometry) could be derived for more than forty events, some of them observed for the first time by the Parker Solar Probe and Solar Orbiter probes. The project contributed significantly to the first papers of these missions. The properties of the shock waves were then exploited in a particle acceleration and transport model developed during the project which allowed to study the possible mechanisms of particle acceleration.

Main results of the project

In general, the results obtained during the project allowed to evaluate in a quantitative way the role of the shock in the acceleration of the particles. The project obtained many results:

- Created and made available online a comprehensive catalog of triangulated and modeled shock wave properties in the solar corona (Kouloumvakos et al. 2019).
- Evidence of a statistically significant relationship between the Mach number of corona shock waves and the intensity of the particle flux escaping from them (Kouloumvakos et al. 2019)

- First analysis demonstrating a strong link between the evolution of a shock wave and the gamma-ray flux measured by Fermi-LAT (Kouloumvakos et al. 2020).
- Application of techniques developed in COROSHOCK to the first analyses of data obtained by Parker Solar Probe (Howard et al. 2019, Nature, McComas et al., 2019 Nature, Rouillard et al. 2020)
- First modeling of coronal jets and their links to impulsive particle events from Parker Solar Probe (Kouloumvakos et al. 2022).
- New interpretation of the origin of the hard X-ray radiation observed during solar storms as the result of a magnetic double mirror of particles between the shock front and the solar surface (Wu et al. 2021).
- Evidence for the association between HF radio type II triggering with the passage of shock waves through magnetic loops (Kouloumvakos et al. 2021).
- Exploitation of techniques and models developed in COROSHOCK to analyze early Solar Orbiter data (Kouloumvakos et al. 2022).

Scientific and technical production, software

- 1 shock wave catalogue providing the 3-D evolution of the properties of the corona shocks (Mach, geometry, velocity)
- 41 oral or poster presentations in international conferences and 6 at national level. Co-organization of several sessions
- 22 papers published in international journals, 10 published as first author (by Kouloumvakos, Wu or Rouillard).
- Development and provision of a prediction tool for solar storm and shock wave properties (SHOCK TOOL). This forecasting tool runs 24/24 7/7 on the STORMS space weather center site: <http://connect-tool.irap.omp.eu/>
- Development of a tool made available to the community allowing researchers to model shock waves themselves: <https://github.com/AthKouloumvakos/PyThea>
- Development of a tool made available to the community allowing researchers to propagate disturbances in: <https://github.com/AthKouloumvakos/HDPmt>

Identity sheet of the project

The COROSHOCK project (EVALUATE THE ROLE OF SHOCK AS A SOLAR PARTICLE ACCELERATOR, <http://storms-service.irap.omp.eu/projects/coroshock>) is a project financed by the Agence Nationale de la Recherche (ANR) Young Researcher program. It was coordinated by Alexis Rouillard (alexis.rouillard@irap.omp.eu) from IRAP Toulouse. The project started in October 2017 and ran for 50 months to end in March 2022. It received a support of 294 k€ from the ANR.

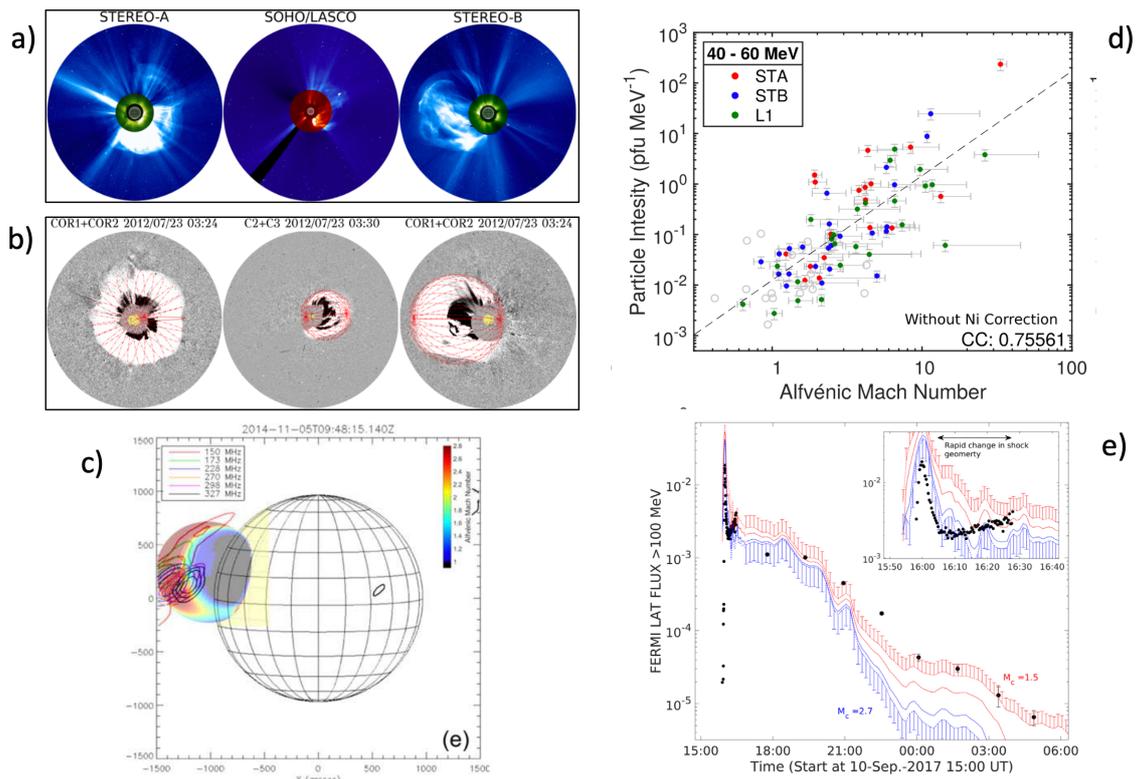


Figure 1. Description: (a,b) Coronagraphic observations of a solar storm and its shock wave on July 23, 2012 by STA (left), SOHO/LASCO (middle), and STB (right), around 03:24 UT taken from Kouloumvakos et al. (2019). The panels in row (a) are direct coronagraphic images and those in row (b) are differentiated images. The spheroid in red shows the location of the shock front obtained by triangulation of the coronal observations (a). In c) we show in color the 3D distribution of the shock parameters from the 3-D modeling with the solar radio emission sources imaged by the Nançay radioheliograph (level lines) (Kouloumvakos et al. 2022). d) Comparisons between the Mach number of the shock waves from the COROSHOCK catalog with the peak intensities of the particles measured in situ during each particle event associated with each shock (Kouloumvakos et al. 2019). e) Comparison between a simulation of the particle flux impacting the surface of the Sun (red and blue) and capable of producing gamma-ray emission and the observed emission of γ -rays >100 MeV shown as black dots (Kouloumvakos et al. 2020).

C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

Maximum 5 pages. On donne ci-dessous des indications sur le contenu possible du mémoire. Ce mémoire peut être accompagné de rapports annexes plus détaillés.

Le mémoire scientifique couvre la totalité de la durée du projet. Il doit présenter une synthèse auto-suffisante rappelant les objectifs, le travail réalisé et les résultats obtenus mis en perspective avec les attentes initiales et l'état de l'art. C'est un document d'un format semblable à celui des articles scientifiques ou des monographies. Il doit refléter le caractère collectif de l'effort fait par les partenaires au cours du projet. Le coordinateur prépare ce rapport sur la base des contributions de tous les partenaires. Une version préliminaire en est soumise à l'ANR pour la revue de fin de projet.

Un mémoire scientifique signalé comme confidentiel ne sera pas diffusé. Justifier brièvement la raison de la confidentialité demandée. Les mémoires non confidentiels seront susceptibles d'être diffusés par l'ANR, notamment via les archives ouvertes <http://hal.archives-ouvertes.fr>.

Mémoire scientifique confidentiel : non

C.1 RESUME DU MEMOIRE

Les mécanismes physiques produisant les particules énergétiques solaires (SEP) et le rayonnement électromagnétique de haute énergie comme les rayons gamma sont encore mal compris et débattus. Un processus d'accélération de particules proposé implique des interactions répétées entre les particules et le front d'un orage solaire qui peut développer une onde de choc lorsque l'orage se déplace à grande vitesse. Ces particules très énergétiques représentent une menace pour l'activité humaine dans l'espace car elles peuvent détruire certains composants électroniques à bord des satellites de télécommunication ainsi que nuire sérieusement à la santé des astronautes durant des vols habités par exemple vers la Lune ou Mars. Dans ce contexte, le projet COROSHOCK avait pour objectif de mieux comprendre comment les particules très énergétiques et les émissions électromagnétiques très intenses sont produites au Soleil en se focalisant sur le rôle des ondes de choc. Le projet visait à développer des modèles numériques avancés pour tester différentes théories d'accélération de particules en les confrontant aux observations de téledétection de la couronne solaire et des mesures in situ de particules dans le milieu interplanétaire, notamment obtenues par les missions Parker Solar Probe et Solar Orbiter. Le projet COROSHOCK s'est concentré principalement sur l'évaluation du rôle des chocs en tant que puissant accélérateur des particules énergétiques qui forment les SEPs mesurées in situ près de 1AU et les radiations électromagnétiques de haute énergie observées près du Soleil. Les questions fondamentales traitées durant le projet étaient donc les suivantes :

Q1 : La variabilité et la longue durée des événements de rayons gamma sont-elles contrôlées par l'évolution tridimensionnelle des ondes de choc ?

Q2 : L'accélération des particules et les chocs coronaux peuvent-ils expliquer simultanément les propriétés des SEPs et des LDGRFs ?

C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

Le projet COROSHOCK a donc abordé l'une des grandes questions non résolues en physique solaire : comment les particules solaires sont-elles accélérées à haute énergie? L'origine des SEPs et des émissions électromagnétiques de haute énergie telles que les rayons gamma est encore très débattue. Les CMEs très énergétiques peuvent atteindre des vitesses de plusieurs milliers de kilomètres par seconde. Le front de ces CMEs se propage rapidement depuis les régions actives (où les orages intenses se forment) au travers de structures très complexes de la couronne solaire comme les streamers et peuvent former des fronts de choc dont les propriétés sont très variables durant leur propagation. Ces chocs sont susceptibles d'accélérer des particules, nous savons par exemple qu'ils accélèrent de manière efficace les électrons en produisant des émissions radio caractéristiques appelées des types II (également étudiés durant le projet : Zucca et al. 2018, Jebaraj et al. 2021, Kouloumvakos et al. 2021). Les principaux mécanismes d'accélération des particules dans la couronne sont l'accélération au choc sur le front des CMEs et la reconnexion magnétique qui se produit dans les éruptions solaires situées sous les CMEs et qui est probablement impliquée dans le processus de formation des CMEs et leurs cordes de flux. La comparaison des mesures in situ près de 1AU et des observations de la couronne par téledétection montre que l'accélération des particules à haute énergie (> 1 GeV) se produit dans les premières dizaines de minutes lors de l'initiation d'une CME dans la couronne solaire quelque part en dessous de 5 rayons solaires (Rs), une région qui n'est pas encore accessible aux mesures in situ. Lors du déclenchement d'une CME, on observe fréquemment des ondes en imagerie solaire dans l'ultraviolet qui se propagent le long de la surface solaire loin de la région source des CMEs. Des études passées ont examiné la relation entre les vitesses des CMEs (observées en lumière blanche) et l'intensité des SEPs mais elles souffraient toutes de l'incertitude associée aux problèmes de projections inhérents aux observations du milieu optiquement mince en lumière blanche.

Une technique a donc dû être mise au point pour localiser les zones de formation des ondes de choc dans la couronne solaire et **en déduire des quantités physiques indispensables à l'analyse de l'impact de ces ondes de choc sur l'accélération des particules**. Cette tâche fut entreprise **avant** le projet COROSHOCK au travers d'une série de travaux et notamment d'études de cas sur deux

événements remarquables celui du 21 Mars 2011 (Rouillard et al., 2012) et du 17 mai 2012 (Rouillard et al., 2016), le modèle développé SHOCK3D permet pour la première fois de suivre l'évolution des paramètres physiques des chocs en 3-D. L'imagerie combinée à des techniques de reconstruction géométrique montre que les ondes de pressions observées en lumière blanche peuvent être triangulées en 3-D et localisées d'un point de vue géométrique (Rouillard et al., 2012; Kwon, Zhang et Vourlidas, 2015; Rouillard et al., 2016). Une exploitation de modèles numériques de la couronne permet ensuite de déduire où une onde de choc peut se former dans la couronne (Rouillard et al., 2016). **Le projet COROSHOCK a donc débuté avec la poursuite des développements du modèle de choc SHOCK3D (entrepris par Athanasios Kouloumvakos, postdoc recruté sur le projet)** exploitant l'imagerie coronale dans différentes longueurs d'onde pour localiser et cartographier l'expansion 3D très variable dans le temps des ondes de chocs (Kouloumvakos et al. 2019).

Le projet a permis de grandes avancées méthodologiques sur cette approche par le (1) le développement de nouveaux modules permettant d'obtenir le rapport de densité sur le front de choc, (2) l'adaptation des outils à l'analyse de données d'imagerie de Parker Solar Probe et Solar Orbiter, (3) le développement de modules d'accélération et de transport des particules couplés au modèle de choc.

Grâce à tous ces développements nous avons pu entreprendre une série d'articles **sur l'origine des SEPs, mais aussi des émissions radio, X dur et gamma**. Le déclenchement des émissions en rayons X dur et gamma solaires se produit pendant les premières dizaines de minutes d'un événement solaire c'est-à-dire lorsque le choc peut être modélisé de manière fiable par SHOCK3D. Les rayons gamma sont produits par les ions et électrons accélérés au Soleil et ils fournissent notre seule connaissance directe (bien que secondaire) sur les propriétés du ou des accélérateurs. Dans COROSHOCK nous avons évalué l'hypothèse selon laquelle les rayons gamma mesurés depuis la Terre **pourraient être produits par des particules accélérées par le choc se propageant vers le Soleil et impactant la chromosphère solaire visible depuis la Terre (Kouloumvakos et al. 2020)**. Nous avons également évalué de manière quantitative par une modélisation poussée à la fois de l'onde de choc mais aussi du processus d'accélération des particules, **l'hypothèse originale selon laquelle des électrons très énergétiques accélérés par le choc et ensuite piégés le long de boucles magnétiques pourraient également produire des émissions en X dur (Wu et al. 2021)**. Une autre énigme concerne l'origine des éruptions gamma de longue durée (LDGRF) qui peuvent durer plusieurs heures à plusieurs jours bien après la phase impulsive des éruptions solaires et à des moments où la CME associée est déjà loin du Soleil. Les LDGRF suggèrent qu'un mécanisme d'accélération des particules fonctionne pendant plusieurs heures voir plusieurs jours pour produire des protons énergétiques qui se dirigent et impactent la surface solaire. Les chocs coronaux sont générés pendant plusieurs jours par le mouvement vers l'extérieur des CMEs et pourraient être la source des SEPs mesurées in situ et des LDGRFs en libérant des particules sur les lignes de champ magnétique vers le Soleil et vers l'anti-Soleil (Cliver et al. 1996). **Cependant, ce scénario soulevait un certain nombre de défis et de questions scientifiques fondamentales qui ont pu être abordées durant le projet COROSHOCK**. Par exemple, si les particules sont accélérées à haute énergie dans la haute couronne par un choc, il n'est pas évident que ces particules puissent se diriger vers le Soleil en surmontant le champ magnétique turbulent et croissant pour produire les LDGRFs. Pour étudier l'origine des LDGRFs, nous avons analysé de manière novatrice l'évolution des chocs dans la couronne et la propagation des particules vers la surface solaire.

C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

COROSHOCK a donc débuté par une refonte complète de l'algorithme de triangulation des ondes de choc SHOCK3D développé par Rouillard et al. (2016). Cette refonte menée par A. Kouloumvakos durant les six premiers mois du projet nous a permis d'accélérer de manière significative l'analyse d'un événement solaire donné ce qui nous a permis d'analyser TOUS les orages solaires intenses ayant produits des particules énergétiques observés par les sondes NASA STEREO. Ce travail considérable a produit un catalogue de plus de 40 événements triangulés (un exemple est donné en Figure 1) et

modélisés avec à la clé l'évolution spatio-temporelle 3-D de la vitesse, du nombre de Mach (Alfvénique, magnéto-sonique), du rapport de densité et de la géométrie de l'onde de choc (Kouloumvakos et al. 2019). De nouveaux modules plus rapides que ceux développés par Rouillard et al. (2016), et exploitant également des modèles MHD héliosphérique, nous ont permis d'estimer comment toutes les sondes mesurant in situ des particules de hautes énergies sont connectées à chacune des ondes de choc (Kouloumvakos et al. 2019). Durant cette phase de développement numérique nous avons également mis en place de nouveaux modules capables d'exploiter les données de Parker Solar Probe et de Solar Orbiter. Grâce à ces nouveaux outils **le projet COROSHOCK pu contribuer de manière significative aux premiers papiers de la sonde Parker Solar Probe publiés dans Nature** où notre travail de triangulation est exploité pour déduire des premiers résultats importants (Howard et al. 2019, McComas et al. 2019). Nous avons ainsi pu profiter de l'âge d'or en cours en héliophysique avec d'autres missions lancées durant le projet COROSHOCK, telles que ESA Solar Orbiter (2020) et ESA-JAXA Bepi-Colombo (2018). **Notre catalogue de choc ainsi que nos outils de modélisation des ondes de chocs ont été mis à disposition de la communauté scientifique sous diverse forme par des interfaces en ligne et par des codes rendus open source.**

En parallèle des développements lancés sur la modélisation des ondes de chocs, nous avons adaptés nos sorties pour qu'elles puissent être exploitées par des codes d'accélération et de transport de particules développé par des collègues collaborateurs sur le projet (Afanasiev et al. 2019). Dans la propale de COROSHOCK nous avons exclu le développement de codes d'accélération de particules et nous avons proposé de plutôt paramétriser la production de particules sur le front de choc puis de propager les particules soit vers le Soleil pour étudier les émissions électromagnétiques, soit vers le milieu interplanétaire pour étudier les SEPs. **Nous avons finalement décidé de développer un nouveau code d'accélération de particules (approche Monte Carlo) pour calculer le gain en énergie de chaque pseudo-particule par interaction répétée avec le front de choc (Wu et al. 2021).** Ce nouveau code mis en place par Shirley Wu (également postdoc sur le projet) nous a permis de calculer de manière quantitative la production d'électrons très énergétiques sur le front de choc et de comparer nos flux de particules accélérés avec les émissions solaires en rayons X dur.

C.4 RESULTATS OBTENUS

Dans une série d'articles, nous avons re-examiné les relations entre l'évolution des ondes de choc dans la couronne et l'intensité des particules énergétiques mesurées in situ (Kouloumvakos et al. 2019, Kollhoff, Kouloumvakos et al. 2022). Le catalogue d'ondes de chocs modélisées mis en place par Kouloumvakos et al. (2019) a permis d'analyser les corrélations entre les propriétés des SEPs et les paramètres de choc pertinents pour tester la théorie d'accélération des particules au choc. Notre échantillon comprenait des chocs modélisés et des événements SEP détectés pendant le cycle solaire 24 sur une large gamme de longitudes héliocentriques. En modélisant l'évolution de la connectivité magnétique des sondes avec les chocs nous avons pu en déduire la variation spatio-temporelle des paramètres des chocs le long des lignes de champ connectées aux sondes. Cette approche corrige ainsi de manière systématique les effets de projection associés aux observations de télédétection et constitue l'étude la plus complète à ce jour des ondes de choc dans la couronne et leur relation avec les SEPs mesurés in situ. **Nous avons trouvé lors cette étude une forte corrélation entre le flux maximum de SEPs et le Mach Alfvénique des zones du choc connectées magnétiquement aux sondes mesurant des protons (Kouloumvakos et al., 2019) et des électrons (Dresing et al. 2021)** ainsi qu'un bon accord entre le temps de connexion magnétique d'une onde de choc avec une sonde et le temps d'injection des particules le long de cette ligne de champ magnétique (Kouloumvakos et al. 2019). Nous avons pu aussi interpréter des études passées qui déduisaient notamment que les CMEs ont typiquement atteint une distance héliocentrique d'environ 2-3 Rs quand les particules les plus énergétiques ($>1\text{GeV}$) sont produites (Gopalswamy et al., 2012). Comme nous l'avons vu la modélisation avec SHOCK3D (Kouloumvakos et al., 2019) montre que cette distance héliocentrique correspond à la zone de formation du choc super-critique ($M_{FM} > 3$). Ceci pourrait expliquer le délai quasi-systématique entre le déclenchement d'une CME et le temps d'injection des particules les plus énergétiques (au dessus d'un GeV, par ex. Rouillard et al. 2016, Papaioannou et al. 2022) car un choc

super critique est nécessaire pour déclencher de manière efficace le processus d'accélération diffusive. Nous avons illustré cet effet du processus d'accélération dans une étude théorique au tout début du projet COROSHOCK en exploitant la variation temporelle des propriétés d'un choc le long d'une série de ligne de champ magnétique pour calculer de manière auto-consistante le gain en énergie des particules par accélération diffusive (DSA) tenant compte de l'amplification des ondes d'Alfvén (Afanasiev et al., 2018). Cette étude montre que les particules les plus énergétiques sont produites sur le front de choc là où le Mach Alfvénique augmente de manière significative car il traverse des streamers solaires. **Ceci avait été suggéré dans une étude de cas (Rouillard et al. 2016) mais de manière statistique par le projet COROSHOCK dans Kouloumvakos et al. (2019).**

Les événements SEPs intenses sont aussi associés à des émissions radio, X et même gamma. Nous avons donc effectué plusieurs études visant à tester l'hypothèse que l'onde de choc serait un accélérateur important des émissions gamma et X dur. La plupart des événements γ débutent moins de dix minutes après l'apparition d'une CME ce qui d'après nos études est concomitant avec la formation du choc super-critique devant la CME (Kouloumvakos et al., 2019). Dans cette étude précédent le projet (Plotnikov et al. 2017) nous montrions que le déclenchement du rayonnement gamma correspond au moment où l'onde de choc était suffisamment étendue pour être connectée par des lignes de champ magnétique au disque visible. Cette première étude conclua que les protons et les électrons de haute énergie produisant les rayonnements intenses en gamma et en X dur pourraient avoir une origine au choc. Nous avons donc analysé l'origine possible du rayonnement X dur mesuré le 1 Septembre 2014 par le satellite Fermi GBM en modélisant le processus d'accélération des électrons lorsque le choc se propageait au travers des boucles magnétiques se connectant au disque visible. Pour cela nous avons développé un nouveau code Monte Carlo permettant de simuler les processus d'accélération et de transport des particules. Les processus d'accélération supposés dans l'étude furent l'accélération par dérive (SDA) à la surface du choc et la DSA. Dans les deux scénarios, nous démontrons de manière quantitative avec notre modèle que lorsqu'un choc se propage dans les grandes boucles du streamers, les particules accélérées par le choc se retrouvent piégées entre deux miroirs magnétiques induits par le front de choc et le pied de la boucle magnétique. Ceci induit des rebonds de plus en plus fréquents qui forcent les particules à interagir avec le choc par SDA plusieurs fois pendant le passage du choc dans la boucle. Ce processus est suffisant pour accélérer les électrons à très haute énergie. **En comparant le nombre d'électrons accélérés avec ceux déduits des observations de Fermi GBM nous concluons que les électrons doivent également diffuser le long de la boucle par DSA pour maintenir une accélération plus soutenue (Wu et al. 2021).** Nous sommes en train de répéter cette étude pour les protons afin de déterminer s'ils peuvent aussi être accélérés et produire des gammas.

Alors que les études mentionnées précédemment se sont focalisées sur l'origine du déclenchement et du maximum des rayonnements gamma et X durs durant des flares occultées, nous avons dans Kouloumvakos et al. (2020a) cherché à comprendre l'origine des émissions gamma de longue durée (LDGR). Une explication possible est que l'accélération des protons par le choc se poursuit dans le milieu interplanétaire et que les particules parviennent à retourner au Soleil pour impacter le disque visible. À partir d'une modélisation détaillée de l'onde de choc et de ces paramètres de choc, nous avons donc examiner la connexion magnétique de l'onde avec disque solaire visible sur plusieurs dizaine d'heures. **Dans cette étude nous avons trouvé un bon accord entre l'évolution temporelle des rayons gamma et des flux de protons impactant la surface déduit d'un modèle basique de l'accélération des protons aux chocs et de leur transport au Soleil en incluant les effets du miroir magnétique (cf Figure 1).** Cette première étude devra être approfondie en incluant plusieurs effets négligés comme par exemple la topologie de la gaine derrière le choc par où la connectivité magnétique s'établie entre le choc et la surface solaire.

C.5 EXPLOITATION DES RESULTATS

Les avancées méthodologiques et les outils mis en place durant le projet COROSHOCK ont été exploités dans d'autres projets de recherche collaboratifs au niveau européen comme EUHFORIA 2.0 et SERPENTINE. **Ces outils sont devenus très utilisés dans l'analyse des premières mesures**

obtenues par Parker Solar Probe et Solar Orbiter avec des premières avancées majeures obtenues grâce à l'exploitation de ces sondes révolutionnaires.

Au-delà des avancées scientifiques du projet, COROSHOCK a apporté de nouveaux outils renforçant les prévisions en météorologie de l'espace en améliorant notre compréhension 3-D de la relation entre les CMEs en éruption et l'occurrence des événements SEP et mettant de nouveaux outils mis à disposition de la communauté qui les exploite pour analyser les données de Parker Solar Probe et Solar Orbiter. Une modélisation améliorée des événements de particules énergétiques solaires est absolument essentielle pour les prévisions météorologiques spatiales, car ces particules énergétiques sont susceptibles de nuire à l'avionique, les satellites en orbite autour de la Terre et potentiellement entraîner la mort de membres d'équipage à bord de missions habitées vers la lune (y compris le tourisme) et d'autres planètes. Les ondes de choc qui ont été modélisées dans le cadre du projet peuvent fortement modifier l'état de l'ionosphère et entraîner une augmentation des courants induits par le sol qui affectent la transmission et la distribution de l'énergie au sol.

C.6 DISCUSSION

Le projet COROSHOCK a été très productif et nous a permis d'approfondir notre travail sur l'évolution des ondes de chocs et leurs effets. **La quasi-totalité des nombreux objectifs du projet ont pu être accomplis grâce au travail remarquable de l'équipe dont la très grande productivité (>20 articles de rang A publiés, >40 présentations) en témoigne, en dépit des circonstances très difficiles infligées par la pandémie.** Nous souhaitons dans le futur poursuivre nos travaux sur la modélisation de l'accélération et du transport des particules aux chocs en exploitant nos catalogues de modélisation des chocs développés comme condition limite au code d'accélération et de transport des particules. Nous l'avons déjà fait pour les particules confinées dans la couronne solaire dans les boucles (Wu et al., 2021), il s'agit maintenant d'adapter le code d'accélération et de transport de particule pour le champ magnétique ouvert au milieu interplanétaire et de modifier le code de transport de particules dans le champ turbulent du milieu interplanétaire. Dans cette approche, les particules accélérées au front de choc seront propagées le long des lignes de champ magnétique reliées aux sondes mesurant des SEPs. Nous comptons terminer ces développements durant COROSHOCK mais cela n'a pas été possible mais les pierres angulaires nécessaires sont déjà développées. Nous avons développé avec Shirley Wu un modèle de transport de particules basé sur les équations stochastiques pour tenir compte de la diffusion et de la focalisation des particules dans le milieu interplanétaire (Wu et al., 2021).

C.7 CONCLUSIONS

Ce projet a été une expérience extraordinaire pour le meneur du projet mais aussi pour l'équipe et nous remercions l'ANR pour la confiance qu'elle nous accordée. Les avancées méthodologiques ont permis aux chercheurs impliqués dans le projet de travailler sur de nombreux sujets et d'apporter de nouvelles perspectives sur l'évolution des ondes de choc dans la couronne solaire et leurs effets sur les particules énergétiques. C'est aussi un apport important pour la communauté Solar Orbiter et Parker Solar Probe mais aussi la communauté météorologie de l'espace qui peuvent profiter des nombreux outils et modèles développés durant le projet.

C.8 REFERENCES

Afanasiev, A., Vainio, R., Rouillard, A.P., 2018, Astronomy and Astrophysics, 614, A4, 10.1051/0004-6361/201731343,

Dresing, N., Kouloumvakos, A., Vainio, R., et al. 2022, *Astrophysical Journal Letters*, 925, L21, doi:10.3847/2041-8213/ac4ca7,

Giacone, J., Mitchell, D.-G., Allen, R.-C., et al. 2020, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 246, 29. doi:10.3847/1538-4365/ab5221

Hess, P., Rouillard, A.-P., Kouloumvakos, A., et al. 2020, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 246, 25. doi:10.3847/1538-4365/ab4ff0

Howard, R.-A., Vourlidas, A., Bothmer, V., et al. 2019, *Nature*, 576, 232. doi:10.1038/s41586-019-1807-x,

Jebaraj, I.C., Kouloumvakos, A., Magdalenic, J., et al. 2021, *Astronomy and Astrophysics*, 654, A64. doi:10.1051/0004-6361/202141695

Kollhoff, A., Kouloumvakos, A., Lario, D., et al. 2021, *Astronomy and Astrophysics*, 656, A20. doi:10.1051/0004-6361/202140937

Korreck, K.E., Szabo, A., Nieves Chinchilla, T., et al. 2020, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 246, 69. doi:10.3847/1538-4365/ab6ff9

Kouloumvakos, A., Rouillard, A.-P., Wu, Y., et al. 2019, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 876, 80. doi:10.3847/1538-4357/ab15d7

Kouloumvakos, A., Vourlidas, A., Rouillard, A.P., et al. 2020a, *Astrophysical Journal*, 899, 107. doi:10.3847/1538-4357/aba5a1

Kouloumvakos, A., Rouillard, A.P., Share, G.H., et al. 2020b, *apj*, 893, 76. doi:10.3847/1538-4357/ab8227

Kouloumvakos, A., Rouillard, A.P., Warmuth, A., et al. 2021, *Astrophysical Journal*, 913, 99. doi:10.3847/1538-4357/abf435

Kouloumvakos, A., Kwon, R.-Y., Rodriguez-Garcia, L., et al., 2022, *Astronomy and Astrophysics*, 660, A84. doi:10.1051/0004-6361/202142515

McComas, D.-J., Christian, E.R., Cohen, C.M.S., et al. 2019, *Nature*, 576, 223. doi:10.1038/s41586-019-1811-1,

Papaioannou, A., Kouloumvakos, A., Mishev, A., et al. \ 2022, *Astronomy and Astrophysics*, 660, L5. doi:10.1051/0004-6361/202142855

Poirier, N., Kouloumvakos, A., Rouillard, A.P., et al. 2020, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 246, 60. doi:10.3847/1538-4365/ab6324

Rouillard, A.-P., Pinto, R.-F., Vourlidas, A., et al. 2020, *Astronomy and Astrophysics*, 642, A2. doi:10.1051/0004-6361/201935305

Rouillard, A.P., Poirier, N., Lavarra, M., et al. 2020a, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 246, 72. doi:10.3847/1538-4365/ab6610

Rouillard, A.P., Kouloumvakos, A., Vourlidas, A., et al. 2020b, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 246, 37. doi:10.3847/1538-4365/ab579a

Wu, Y., Rouillard, A.-P., Kouloumvakos, A., et al. 2021, *Astrophysical Journal*, 909, 163. doi:10.3847/1538-4357/abdc20

Zucca, P., Morosan, D.E., Rouillard, A.P., Fallows, R., Gallagher, P.T., Magdalenic, J., and, ...: 2018, *Astronomy and Astrophysics*, 615, A89. doi:10.1051/0004-6361/201732308,

D LISTE DES LIVRABLES

Quand le projet en comporte, reproduire ici le tableau des livrables fourni au début du projet. Mentionner l'ensemble des livrables, y compris les éventuels livrables abandonnés, et ceux non prévus dans la liste initiale.

Pas de livrables proposés dans le projet. Néanmoins nous avons produit un catalogue de chocs et deux outils disponibles à la communauté présentés en dessous.

E IMPACT DU PROJET

Ce rapport rassemble des éléments nécessaires au bilan du projet et plus globalement permettant d'apprécier l'impact du programme à différents niveaux.

E.1 INDICATEURS D'IMPACT

Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)

Comptabiliser séparément les actions monopartenaire, impliquant un seul partenaire, et les actions multipartenaires résultant d'un travail en commun.

Attention : éviter une inflation artificielle des publications, mentionner uniquement celles qui résultent directement du projet (postérieures à son démarrage, et qui citent le soutien de l'ANR et la référence du projet).

		Publications multipartenaires	Publications monopartentaires
International	Revue à comité de lecture	22	
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)		
France	Revue à comité de lecture		
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)		
Actions de diffusion	Articles vulgarisation	2	
	Conférences vulgarisation	41 Conférences Internationales	
	Autres		

Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)

Ce tableau dénombre et liste les brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet, du savoir faire, des retombées diverses en précisant les partenariats éventuels. Voir en particulier celles annoncées dans l'annexe technique).

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
Brevets internationaux obtenus	
Brevet internationaux en cours d'obtention	
Brevets nationaux obtenus	
Brevet nationaux en cours d'obtention	
Licences d'exploitation (obtention / cession)	

Créations d'entreprises ou essaimage	
Nouveaux projets collaboratifs	Les outils COROSHOCK ont été exploités dans deux projets européens H2020 en cours (EUHFORIA 2.0 : http://connect-tool.irap.omp.eu/shock-tool et SERPENTINE https://serpentine-h2020.eu/).
Colloques scientifiques	
Autres (préciser) Logiciels	Logiciel pour trianguler les chocs : https://github.com/AthKouloumvakos/PyThea Prévisions 7/7 24/24 des ondes de choc de la couronne : http://connect-tool.irap.omp.eu/shock-tool

E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

*Répertorier les publications résultant des travaux effectués dans le cadre du projet. On suivra les catégories du premier tableau de la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** en suivant les normes éditoriales habituelles. En ce qui concerne les conférences, on spécifiera les conférences invitées.*

Liste des 22 publications à comité de lecture publiées par l'équipe COROSHOCK et exploitant directement les outils issus du projet COROSHOCK:

Papayioannou, A., Kouloumvakos, A., Mishev, A., et al. \ 2022, Astronomy and Astrophysics, 660, L5. doi:10.1051/0004-6361/202142855

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022A%26A...660L...5P/abstract>

Kouloumvakos, A., Kwon, R.-Y., Rodriguez-Garcia, L., et al., 2022, Astronomy and Astrophysics, 660, A84. doi:10.1051/0004-6361/202142515

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022A%26A...660A..84K/abstract>

Dresing, N., Kouloumvakos, A., Vainio, R., et al. 2022, Astrophysical Journal Letters, 925, L21, doi:10.3847/2041-8213/ac4ca7,

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022ApJ...925L..21D/abstract>

Kollhoff, A., Kouloumvakos, A., Lario, D., et al. 2021, Astronomy and Astrophysics, 656, A20. doi:10.1051/0004-6361/202140937,

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021A%26A...656A..20K/abstract>

Jebaraj, I.C., Kouloumvakos, A., Magdalenic, J., et al. 2021, Astronomy and Astrophysics, 654, A64. doi:10.1051/0004-6361/202141695

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021A%26A...654A..64J/abstract>

Kouloumvakos, A., Rouillard, A.P., Warmuth, A., et al. 2021, Astrophysical Journal, 913, 99.

doi:10.3847/1538-4357/abf435 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021ApJ...913...99K/abstract>

Wu, Y., Rouillard, A.-P., Kouloumvakos, A., et al. 2021, Astrophysical Journal, 909, 163.

doi:10.3847/1538-4357/abdc20 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021ApJ...909..163W/abstract>

Rouillard, A.~P., Pinto, R.~F., Vourlidas, A., et al. 2020, *Astronomy and Astrophysics*, 642, A2. doi:10.1051/0004-6361/201935305

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020A%26A...642A...2R/abstract>

Kouloumvakos, A., Vourlidas, A., Rouillard, A.P., et al. 2020, *Astrophysical Journal*, 899, 107. doi:10.3847/1538-4357/aba5a1 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020ApJ...899..107K/abstract>

Kouloumvakos, A., Rouillard, A.P., Share, G.H., et al. \ 2020, \apj, 893, 76. doi:10.3847/1538-4357/ab8227 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020ApJ...893...76K/abstract>

Griton, L., Pinto, R.~F., Poirier, N., et al. \ 2020, \apj, 893, 64. doi:10.3847/1538-4357/ab7b76 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020ApJ...893...64G/abstract>

Rouillard, A.P., Poirier, N., Lavarra, M., et al. \ 2020, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 246, 72. doi:10.3847/1538-4365/ab6610

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020ApJS..246...72R/abstract>

Korreck, K.E., Szabo, A., Nieves Chinchilla, T., et al. 2020, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 246, 69. doi:10.3847/1538-4365/ab6ff9

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020ApJS..246...69K/abstract>

Poirier, N., Kouloumvakos, A., Rouillard, A.P., et al. 2020, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 246, 60. doi:10.3847/1538-4365/ab6324

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020ApJS..246...60P/abstract>

Rouillard, A.P., Kouloumvakos, A., Vourlidas, A., et al. 2020, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 246, 37. doi:10.3847/1538-4365/ab579a

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020ApJS..246...37R/abstract>

Giacalone, J., Mitchell, D.~G., Allen, R.~C., et al. 2020, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 246, 29. doi:10.3847/1538-4365/ab5221

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020ApJS..246...29G/abstract>

Hess, P., Rouillard, A.~P., Kouloumvakos, A., et al. 2020, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 246, 25. doi:10.3847/1538-4365/ab4ff0

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020ApJS..246...25H/abstract>

Kouloumvakos, A., Rouillard, A.~P., Wu, Y., et al. 2019, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 876, 80. doi:10.3847/1538-4357/ab15d7

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019ApJ...876...80K/abstract>

Afanasiev, A., Vainio, R., Rouillard, A.P., 2018, *Astronomy and Astrophysics*, 614, A4, 10.1051/0004-6361/201731343,

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018A%26A...614A...4A/abstract>

Howard, R.-A., Vourlidis, A., Bothmer, V., et al. 2019, Nature, 576, 232. doi:10.1038/s41586-019-1807-x, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019Natur.576..232H/abstract>

McComas, D.-J., Christian, E.R., Cohen, C.M.S., et al. 2019, Nature, 576, 223. doi:10.1038/s41586-019-1811-1, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019Natur.576..223M/abstract>

Zucca, P., Morosan, D.E., Rouillard, A.P., Fallows, R., Gallagher, P.T., Magdalenic, J., and, ...: 2018, Astronomy and Astrophysics, 615, A89. doi:10.1051/0004-6361/201732308, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018A%26A...615A..89Z/abstract>

Présentations orales dans des conférences internationales (41 présentations):

Pinto, R., Linker, J., Arge, C., et al. \ 2022, 44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July, 44, 3504

Jebaraj, I., Magdalenic, J., Kouloumvakos, A., et al. \ 2022, 44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July, 44, 1548

Magdalenic, J., Jebaraj, I., Pavai Valliappan, S., et al. \ 2022, 44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July, 44, 1523

Dresing, N., Asvestari, E., Balmaceda, L., et al. \ 2022, 44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July, 44, 1519

Rouillard, A., Kouloumvakos, A., Poirier, N., et al. \ 2022, 44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July, 44, 1360

Dresing, N., Kouloumvakos, A., Vainio, R., et al. \ 2022, 44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July, 44, 1251

Kouloumvakos, A., Dalmasse, K., Papaioannou, A., et al. \ 2022, 44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July, 44, 1180

Kouloumvakos, A. \ 2022, 44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July, 44, 1175

Jarry, M., Rouillard, A., Kouloumvakos, A., et al. \ 2022, 44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July, 44, 1160

Pinto, R., Poirier, N., Kouloumvakos, A., et al. \ 2022, 44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July, 44, 1079

Papaioannou, A., Kouloumvakos, A., Mishev, A., et al. \ 2022, 44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July, 44, 1064

Jebaraj, I., Kouloumvakos, A., Magdalenic, J., et al. \ 2021, AGU Fall Meeting Abstracts

Kouloumvakos, A. \ & Vainio, R. \ 2021, AGU Fall Meeting Abstracts

Pinto, R., Poirier, N., Kouloumvakos, A., et al. \ 2021, AGU Fall Meeting Abstracts

Kollhoff, A., Kouloumvakos, A., Lario, D., et al. \ 2021, AGU Fall Meeting Abstracts

Pinto, R., Poirier, N., Kouloumvakos, A., et al. \ 2021, EGU General Assembly Conference Abstracts. doi:10.5194/egusphere-egu21-13552

Jebaraj, I.-C., Kouloumvakos, A., Magdalenic, J., et al. \ 2021, EGU General Assembly Conference Abstracts. doi:10.5194/egusphere-egu21-10997

Pinto, R., Rouillard, A., Reville, V., et al. \ 2021, 43rd COSPAR Scientific Assembly. Held 28 January - 4 February

Fargette, N., Lavraud, B., Rouillard, A.-P., et al. \ 2020, AGU Fall Meeting Abstracts

Rouillard, A.-P., Griton, L., Louarn, P., et al. \ 2020, AGU Fall Meeting Abstracts

Lavarra, M., Pinto, R., Rouillard, A., et al. \ 2020, EGU General Assembly Conference Abstracts. doi:10.5194/egusphere-egu2020-17669

Kouloumvakos, A. \& Rouillard, A.-P. \ 2020, EGU General Assembly Conference Abstracts. doi:10.5194/egusphere-egu2020-11889

Poirier, N., Kouloumvakos, A., Rouillard, A.-P., et al. \ 2020, EGU General Assembly Conference Abstracts. doi:10.5194/egusphere-egu2020-11552

Hess, P., Howard, R., Vourlidas, A., et al. \ 2020, \aas

Wu, Y., Rouillard, A.-P., Kouloumvakos, A., et al. \ 2019, AGU Fall Meeting Abstracts

Hess, P., Colaninno, R.-C., Rouillard, A.-P., et al. \ 2019, AGU Fall Meeting Abstracts

Giacalone, J., Mitchell, D.-G., Szalay, J.-R., et al. \ 2019, AGU Fall Meeting Abstracts

Lavraud, B., Fargette, N., Bale, S.-D., et al. \ 2019, AGU Fall Meeting Abstracts

Korreck, K.-E., Szabo, A., Nieves-Chinchilla, T., et al. \ 2019, AGU Fall Meeting Abstracts

Poirier, N., Rouillard, A.-P., Kouloumvakos, A., et al. \ 2019, AGU Fall Meeting Abstracts

Rouillard, A.-P., Kouloumvakos, A., Vourlidas, A., et al. \ 2019, AGU Fall Meeting Abstracts

Pinto, R., Rouillard, A.-P., Kouloumvakos, A., et al. \ 2019, AGU Fall Meeting Abstracts

Howard, R.-A., Vourlidas, A., Bothmer, V., et al. \ 2019, AGU Fall Meeting Abstracts

Wu, Y., Rouillard, A.-P., Kouloumvakos, A., et al. \ 2019, \aas

Wu, Y., Rouillard, A.-P., Kouloumvakos, A., et al. \ 2019, Solar Heliospheric and INterplanetary Environment (SHINE 2019)

Pinto, R., Rouillard, A., Kouloumvakos, A., et al. \ 2019, EGU General Assembly Conference Abstracts

Poirier, N., Rouillard, A., Lavarra, M., et al. \ 2019, EGU General Assembly Conference Abstracts

Rouillard, A., Kouloumvakos, A., Warmuth, A., et al. \ 2019, EGU General Assembly Conference Abstracts

Rouillard, A., Kouloumvakos, A., Kwon, R.-K., et al. \ 2018, Solar Heliospheric and INterplanetary Environment (SHINE 2018)

Kouloumvakos, A., Rouillard, A.-P., Vainio, R., et al. \ 2018, Solar Heliospheric and INterplanetary Environment (SHINE 2018)

Kouloumvakos, A., Rouillard, A.-P., Vainio, R., et al. \ 2018, Solar Heliospheric and INterplanetary Environment (SHINE 2018)

E.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

*La liste des éléments de valorisation inventorie les retombées (autres que les publications) décomptées dans le deuxième tableau de la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** On détaillera notamment :*

- *brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet.*
- *logiciels et tout autre prototype*
- *actions de normalisation*
- *lancement de produit ou service, nouveau projet, contrat,...*

- le développement d'un nouveau partenariat,
- la création d'une plate-forme à la disposition d'une communauté
- création d'entreprise, essaimage, levées de fonds
- autres (ouverture internationale,..)

Elle en précise les partenariats éventuels. Dans le cas où des livrables ont été spécifiés dans l'annexe technique, on présentera ici un bilan de leur fourniture.

- Création et mise à disposition d'un logiciel permettant aux chercheurs de fitter directement les ondes de choc dans la couronne : <https://github.com/AthKouloumvakos/PyThea>
- Création dans le cadre de COROSHOCK d'un outil de prévision des ondes de chocs de la couronne solaire opérationnel 24/24 7/7 et mis à disposition par le service national d'observation STORMS : <http://connect-tool.irap.omp.eu/shock-tool> . Cet outil est en cours d'intégration dans le portail de météorologie de l'espace de l'agence spatiale Européenne.

E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Ce tableau dresse le bilan du projet en termes de recrutement de personnels non permanents sur CDD ou assimilé. Renseigner une ligne par personne embauchée sur le projet quand l'embauche a été financée partiellement ou en totalité par l'aide de l'ANR et quand la contribution au projet a été d'une durée au moins égale à 3 mois, tous contrats confondus, l'aide de l'ANR pouvant ne représenter qu'une partie de la rémunération de la personne sur la durée de sa participation au projet.

Les stagiaires bénéficiant d'une convention de stage avec un établissement d'enseignement ne doivent pas être mentionnés.

Les données recueillies pourront faire l'objet d'une demande de mise à jour par l'ANR jusqu'à 5 ans après la fin du projet.

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)

Aide pour le remplissage

- (1) **Adresse email** : indiquer une adresse email la plus pérenne possible
- (2) **Poste dans le projet** : post-doc, doctorant, ingénieur ou niveau ingénieur, technicien, vacataire, autre (préciser)
- (3) **Durée missions** : indiquer en mois la durée totale des missions (y compris celles non financées par l'ANR) effectuées sur le projet
- (4) **Devenir professionnel** : CDI, CDD, chef d'entreprise, encore sur le projet, post-doc France, post-doc étranger, étudiant, recherche d'emploi, sans nouvelles
- (5) **Type d'employeur** : enseignement et recherche publique, EPIC de recherche, grande entreprise, PME/TPE, création d'entreprise, autre public, autre privé, libéral, autre (préciser)
- (6) **Type d'emploi** : ingénieur, chercheur, enseignant-chercheur, cadre, technicien, autre (préciser)
- (7) **Lien au projet ANR** : préciser si l'employeur est ou non un partenaire du projet
- (8) **Valorisation expérience** : préciser si le poste occupé valorise l'expérience acquise pendant le projet.

Les informations personnelles recueillies feront l'objet d'un traitement de données informatisées pour les seuls besoins de l'étude anonymisée sur le devenir professionnel des personnes recrutées sur les projets ANR. Elles ne feront l'objet d'aucune cession et seront conservées par l'ANR pendant une durée maximale de 5 ans après la fin du projet concerné. Conformément à la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée, relative à l'Informatique, aux Fichiers et aux Libertés, les personnes concernées disposent d'un droit d'accès, de rectification et de suppression des données personnelles les concernant. Les personnes concernées seront informées directement de ce droit lorsque leurs coordonnées sont renseignées. Elles peuvent exercer ce droit en s'adressant l'ANR (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Contact>).