

## ➤ Les pales d'éolienne recyclables de Siemens Gamesa

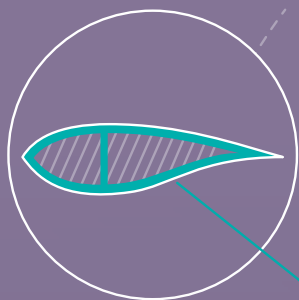
**Dans le développement important de l'éolien en mer en cours depuis des années, la fin de vie des turbines est un facteur important de la durabilité des solutions proposées par les constructeurs de matériels aux opérateurs. Le recyclage des pales composites qui vient d'être annoncé par Siemens Gamesa vient remplir un manque manifeste et favoriser ainsi le développement de ces systèmes performants.**

Cet article décrit une innovation qui constitue une étape décisive vers l'objectif ambitieux de Siemens Gamesa de rendre ses turbines entièrement recyclables d'ici 2040 : l'entreprise lance et commercialise la première pale d'éolienne au monde entièrement recyclable, dénommée « *RecyclableBlade* ».

### Développement Technologique

De nombreux composants d'une éolienne, tels que ceux du mât et de la nacelle, ont des pratiques de recyclage établies. Jusqu'à présent les matériaux composites utilisés dans les pales des éoliennes étaient plus difficiles à recycler. Construite à partir de processus fiables et éprouvés, la pale recyclable

Les pales d'éoliennes sont moulées à partir de fibres de verre et de carbone, un matériau de base comme le bois ou le polyéthylène téréphtalate (PET), et un système de résine.



Après le durcissement de la résine, tous les composants se lient entre eux. Lors du démantèlement, le défi de la fin de vie consiste à séparer la résine des autres composants afin de recycler ces derniers.

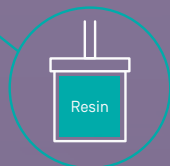


Figure 1 : Quel est le défi à relever pour obtenir des pales recyclables ?  
©Siemens Gamesa.

de Siemens Gamesa est la première de son genre permettant le recyclage à la fin de son cycle de vie, et ouvre la voie à un avenir où la recyclabilité totale des projets sera une exigence du marché.

Les pales des éoliennes sont fabriquées à partir d'une combinaison de matériaux coulés ensemble avec de la résine pour former une structure légère, solide et flexible, comme l'indique le schéma de la figure 1.

La structure chimique de la nouvelle résine utilisée permet de séparer efficacement celle-ci des autres composants à la fin de la vie de la pale, cette résine pouvant être dissoute dans un acide chauffé à un peu moins de 100 °C. Ce processus doux protège les propriétés des matériaux de la pale, contrairement aux autres méthodes existantes de recyclage des pales d'éoliennes conventionnelles. Les matériaux peuvent ensuite être réutilisés dans de nouvelles applications après leur séparation, comme l'explique le schéma de la figure 2.

### Une innovation déjà disponible pour les clients

Les six premières RecyclableBlades de 81 m de long ont déjà été produites dans l'usine de fabrication de pales de Siemens Gamesa à Aalborg, au Danemark. « *C'est une innovation importante mais simple qui ne nécessite pas de changer le mode de production et offre les mêmes garanties de performance et de durée de vie* » explique Filippo Cimitan, président de Siemens Gamesa France. Lorsque la demande le nécessitera, toutes les usines du groupe employant 26 000 personnes, dont celle du Havre en France, pourront en produire. Siemens Gamesa a déjà conclu des accords avec trois de ses principaux clients :

- RWE pour installer et maintenir les pales recyclables innovantes pour le parc éolien offshore de Kaskasi en Allemagne, prévu pour produire de l'électricité à partir de 2022 ;
- EDF Renewables dans le but de déployer plusieurs ensembles de RecyclableBlade dans un futur projet éolien en mer ;
- wpd dans l'intention d'installer des ensembles de la RecyclableBlade dans l'un de leur futurs parcs éoliens offshore.

Sven Utermöhlen, PDG de la division offshore de RWE Renewable déclare ainsi : « *nous sommes heureux que notre parc éolien offshore de Kaskasi soit en mesure de fournir un environnement idéal pour innover ; sur ce parc, nous nous préparons à tester des colliers en acier spéciaux et utiliser une méthode d'installation améliorée pour les fondations. Le site*

La pale recyclable est fabriquée de la même manière qu'une pale standard et repose sur le même processus de fabrication IntegralBlade®. La seule différence est l'utilisation d'un nouveau type de résine qui permet de la séparer efficacement des autres composants à la fin de la vie utile de la pale. Cela permet aux matériaux d'être recyclés pour de nouvelles applications.



#### 1. Démantèlement après la fin de vie

Démontage des pales de la turbine et les préparer pour le processus de recyclage.

#### 2. Plonger dans une solution acide douce

Les parties sectionnées de la pale seront immergées dans une solution acide douce chauffée, qui va séparer la résine de la fibre de verre, du plastique, du bois et des métaux.

#### 3. Récupérer les composants séparés

Les matériaux séparés peuvent alors être récupérés de la solution et préparés pour une utilisation secondaire, c'est-à-dire le rinçage et le séchage.

#### 4. Réutilisation

Les matériaux sont maintenant prêts à être utilisés pour de nouvelles applications dans de nouveaux produits, par exemple pour l'industrie automobile, les biens de consommation comme les coffres d'avion ou les boîtiers d'écran plat correspondants aux propriétés techniques des matériaux.



Figure 2 : Cycle des opérations permettant la réutilisation d'une pale recyclable. © Siemens Gamesa.

de Kaskasi est prêt à devenir le premier projet en Allemagne à déployer la pale d'éolienne recyclable de Siemens Gamesa. Il s'agit d'une étape importante pour faire passer la durabilité des éoliennes à un niveau supérieur. »

Même intérêt manifesté par le PDG d'EDF Renouvelables, qui voit dans cette collaboration avec Siemens Gamesa un moyen de faire avancer les solutions de recyclage dans le secteur de l'énergie éolienne. Cet accord s'inscrit dans la raison d'être du groupe EDF : concilier la production d'une électricité bas carbone bénéfique pour le climat et la réduction des impacts environnementaux locaux.

## Une éolienne entièrement recyclable d'ici 2040

Ainsi Siemens Gamesa met en œuvre des technologies innovantes pour satisfaire l'objectif ambitieux annoncé plus haut: rendre les turbines entièrement recyclables d'ici 2040, et les pales entièrement recyclables d'ici 2030.

Dans ce cadre, Gregorio Acero, responsable de la gestion de la qualité de la santé, la sécurité et de l'environnement de cette société a déclaré : « *notre aspiration est de produire des éoliennes qui peuvent générer de l'électricité renouvelable pendant 20 à 30 ans. Lorsqu'elles atteignent la fin de leur vie utile, nous pouvons séparer les matériaux et les utiliser pour de nouvelles applications. La RecyclableBlade est un grand pas dans cette direction et bien en avance sur notre objectif de 2040.* »

Il sera intéressant de mesurer l'effet d'entraînement de cette innovation majeure dans le marché des éoliennes, tant parmi les fournisseurs des turbines qu'au sein de leurs acheteurs, notamment en France. ■ FG

## Orange lance à Lannion un réseau expérimental fondé sur les technologies du Cloud

Orange a procédé au lancement en juillet 2021 d'un réseau expérimental 5G mettant en œuvre les technologies les plus avancées sur lesquelles peut s'appuyer la 5G afin d'évaluer leur apport tant à la qualité de l'expérience offerte à ses clients qu'aux performances de l'exploitation du réseau lui-même.

### Les objectifs de l'expérimentation

L'architecture des réseaux 5G a été conçue pour pouvoir s'appuyer sur des infrastructures informatiques standard et en tirer profit pour lui donner une grande souplesse dans sa configuration et pour automatiser, notamment via des outils d'intelligence artificielle, les tâches de gestion et de maintenance du réseau.

Ces caractéristiques ouvrent des perspectives complètement nouvelles pour les opérateurs de réseaux : on peut imaginer des réseaux qui modifient leur configuration de façon dynamique en fonction du trafic à écouler ou des pannes qu'ils subissent : les interventions humaines devraient être moins nombreuses et, asymptotiquement, on pourrait envisager des

- réseaux pour lesquels aucune intervention humaine ne serait plus nécessaire, réseaux connus dans la littérature sous le nom de « *zero touch network* ». En ce qui concerne les services offerts aux clients ces technologies devraient faciliter leur évolution rapide et la personnalisation des services notamment vis-à-vis des entreprises grâce au « *network slicing* ». Ces possibilités ne sont pas, aujourd'hui, couramment utilisées pour les déploiements à grande échelle de la 5G où les opérateurs s'appuient sur des produits plus classiques offerts par des industriels qui assurent le rôle d'ensembliers.

Le déploiement expérimental que fait Orange dans la région de Lannion – où Orange dispose de laboratoires de R&D – vise à tester les apports d'un réseau entièrement fondé sur le logiciel et mesurer l'impact sur l'organisation de l'exploitation de l'opérateur de ces technologies et de l'intelligence artificielle en particulier. En effet, l'automatisation potentielle de l'exploitation pose un grand nombre de questions nouvelles : quelles sont les compétences nécessaires pour assurer l'exploitation d'un tel réseau ? quel volume de personnel serait nécessaire ? Comment faire face à des pannes logicielles et reprendre le contrôle du réseau ? ...

Le projet dénommé Pikeo, est prévu pour durer deux ans et devrait concerner jusqu'à plusieurs centaines d'utilisateurs.

### Les partenaires du projet

Orange pour ce projet fait appel à des partenaires qui ne sont pas les fournisseurs traditionnels d'équipements de réseau mais à de nouveaux acteurs qui tirent profit des possibilités que leur ouvre la virtualisation des fonctions de réseau <sup>1</sup> pour proposer des éléments logiciels assurant une partie des fonctions du réseau 5G.

Concernant le réseau d'accès radio, c'est l'américain Mavenir qui fournit le logiciel de l'Open RAN : il permettra à Orange de tester opérationnellement un réseau de ce type et de vérifier son interopérabilité avec un cœur de réseau (en mode *stand alone*) fourni par la société américaine Casa Systems. L'ensemble devrait permettre de tester les services de « *network slicing* » permettant de faire coexister et de gérer dynamiquement plusieurs types de service sur la même infrastructure de réseau.

Les fonctions de gestion des données client (SDM, *subscriber data management*) sont fournies par Hewlett-Packard Entreprise. Concernant l'infrastructure informatique sur laquelle s'exécuteront les fonctions de réseau, c'est Dell qui a été retenu. Des solutions *open source*, comme la plate-forme ONAP, sont utilisées pour automatiser la gestion du réseau et des ser-

<sup>1</sup> Pour plus d'information sur la virtualisation des fonctions de réseau, voir l'article de Bruno Chatras dans REE 2021-3, p.48

vices. Orange conduit l'intégration et le déploiement en mode continu en s'appuyant sur des outils également *open source*. Xiaomi fournira les terminaux.

Les fonctions de réseau sont nativement conçues pour le *cloud*, constituées de micro-services et opèrent sur une infrastructure de type à conteneurs orchestrés par Kubernetes.

En 2021, les utilisateurs de ce réseau expérimental seront des employés d'Orange ; l'année suivante, il pourrait être étendu géographiquement et des utilisateurs externes seront ajoutés, notamment des utilisateurs entreprises pour tester en particulier l'apport de certains services comme le *network slicing* dynamique. La mesure de l'impact de l'IA sur l'exploitation des réseaux sera évidemment un objectif permanent du projet. ■ PC

## Le captage direct de CO<sub>2</sub> dans l'air et son stockage : une usine mise en service en Islande



■ Installation de captage de CO<sub>2</sub> à l'usine d'Orka, Islande.  
© Climeworks.

**En septembre dernier, la société suisse Climeworks a annoncé le lancement d'Orca, la plus grande installation de captage et de stockage direct de l'air au monde, qui élimine définitivement le CO<sub>2</sub> de l'air. La centrale est située à proximité de la centrale géothermique Hellisheidi près de Reykjavik, en Islande.**

### Le captage et le stockage du CO<sub>2</sub> : des techniques complémentaires à la réduction des émissions

La réduction du taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère passe d'abord, à l'évidence, par la réduction drastique des émissions de CO<sub>2</sub> ; c'est l'objet principal des politiques qui sont

menées : décarbonation de la production d'électricité, substitution de cette électricité verte aux hydrocarbures partout où cela est possible et économiquement réaliste, modification de process industriels, etc. Toutefois certains process continueront à être émetteurs de CO<sub>2</sub> et, de plus, cette transition s'étendra nécessairement sur une durée trop longue, à l'aune de l'« urgence climatique » à laquelle nous sommes confrontés. On ne peut pas se contenter de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> ; il faut aussi agir pour éliminer le CO<sub>2</sub> qui continue d'être produit.

Il faut réussir à « capter » le carbone, ce qui se fait en général à la sortie des cheminées d'usines fortement émettrices. C'est ainsi qu'Air Liquide, Boréal, Esso, TotalEnergies et Yara - cinq des plus gros émetteurs industriels français - planchent sur un projet de captage de CO<sub>2</sub> dans les fumées industrielles pour aller le réinjecter ensuite dans des cavités sous-marines au Nord de l'Europe. Ils viennent ainsi de signer un protocole d'accord pour travailler au développement d'une infrastructure de captage et stockage du CO<sub>2</sub> contribuant ainsi à la décarbonation du bassin industriel normand. Les entreprises signataires de ce protocole d'accord collaboreront pour évaluer la faisabilité technique et économique de la mise en œuvre d'une chaîne de captage et de stockage de CO<sub>2</sub>, depuis leurs activités industrielles jusqu'au stockage final en mer du Nord.

### Capter le CO<sub>2</sub> dans l'air : un défi audacieux

Le projet lancé par Climeworks et son partenaire Carbfix représente une étape complémentaire, a priori bien plus difficile car il s'agit de capturer le CO<sub>2</sub> dans l'air, où sa concentration est extrêmement faible.

Au sein de l'usine Orca, douze ventilateurs équipés de filtres, dont l'énergie est fournie par la centrale d'électricité renouvelable voisine, aspirent l'air pour en isoler le gaz carbonique. Le CO<sub>2</sub> est ensuite mélangé à l'eau de la centrale avant d'être injecté à 1 000 mètres de profondeur dans le basalte où il se pétrifie pour toujours.

Cette technique reproduit en accéléré - deux ans seulement - un processus naturel appelé la *minéralisation* qui peut prendre plusieurs milliers d'années. Une réaction chimique du gaz avec le calcium, le magnésium et le fer contenus dans le basalte permet au CO<sub>2</sub> de s'insérer dans la roche brune et poreuse sous la forme de cristaux blancs calcaires.

La capture et le stockage du CO<sub>2</sub> dans le sous-sol terrestre sont encouragés par le GIEC (Groupe d'experts inter-gouvernemental sur l'évolution du climat) ; quant à la capture directe du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, même si le projet paraît extrêmement audacieux, elle suscite de plus en plus d'intérêt, pour récupérer le CO<sub>2</sub> mais aussi pour disposer d'une source de CO<sub>2</sub> non fossile qui puisse être utilisée à différentes fins, notamment

pour la fabrication de carburants de synthèse renouvelables, par réaction avec de l'hydrogène. La commission européenne en parle à présent dans ses rapports. Néanmoins, les critiques en pointent un coût très élevé et une efficacité contestable, et soulignent que des décennies pourraient être nécessaires pour opérer à grande échelle. Comme la technologie n'a pas encore été démontrée à cette échelle, le coût futur de la capture directe de l'air est incertain. Les estimations des coûts de capture rapportées dans la littérature sont larges, allant généralement de 100 USD/t à 1 000 USD/t.

Mais cela ne freine pas les ambitions de Climeworks qui disposait jusqu'ici d'une petite unité pilote de 50 tonnes qui avait été installée en 2017. Le projet est en effet amené à se développer pour offrir de plus grandes capacités dans les années qui viennent.

Quinze usines de captage direct de l'air sont actuellement opérationnelles en Europe, aux États-Unis et au Canada. La plupart de ces usines sont petites et vendent le CO<sub>2</sub> capturé pour une utilisation particulière, les boissons carbonatées, par exemple. Une usine plus importante est toutefois en cours de développement aux États-Unis. ■ JH

### WAAM, un procédé de technologie additive adapté à la fabrication de grandes pièces

**Les procédés de fabrication additive se sont développés de manière significative ces dernières années, offrant des opportunités de fabrication de composants et de fonctionnalités élargies par rapports aux procédés dits classiques ou soustractifs (usinage).**

**Mines Saint-Etienne se dote d'une plate-forme FAB-WAAM pour concevoir et réaliser des prototypes industriels.**

Outre la réduction des temps de conception, de développement et d'industrialisation des nouveaux produits, les procédés de fabrication additive sont une opportunité pour le développement de nouveaux matériaux métalliques adaptés à l'élaboration directe par fusion puis solidification au moment de l'impression matière. Sa compétence en design d'alliages (y compris mise en forme par laminage de fils) positionne de manière optimale Mines Saint-Etienne pour le développement de la technologie WAAM<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> WAAM: Wire Arc Additive Manufacturing - Fabrication additive par fusion à l'arc d'un fil métallique.

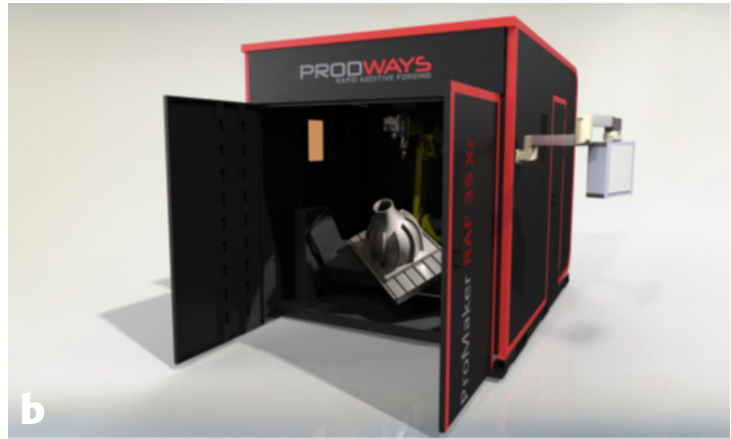


Figure 1 : Exemple de système d'impression pilote « FLEX WAAM » de Mines Saint-Etienne (a) et de la future machine pour prototypage de composants industriels (b).

- Le procédé WAAM, permet le dépôt de fil métallique fondu à l'aide d'un arc électrique en contrôlant les trajectoires de dépôt, couche par couche, et permet d'accéder à l'élaboration de géométrie de composants complexes sans besoin (ou presque) d'usinage et par voie de conséquence avec très peu de perte de matière. Le procédé se met en œuvre par un robot qui active une tête appelée torche projetant des gouttes de métal liquide de tailles contrôlées.

Avec cette technologie ultramoderne, il devient possible de fabriquer de manière rentable des pièces brutes de haute qualité et proches du contour final.

Différentes technologies de torches sont disponibles dont le TIG (*Tungsten Inert Gas*) choisie par Mines Saint-Etienne pour l'investissement de sa machine de prototypage WAAM qui sera fournie par la société Prodways. Cet investissement, réalisé par Mines Saint-Etienne, l'IMT et la région AURA est de l'ordre du million d'euros.

Cette technologie permet dans la famille des procédés additifs :

- l'accès à des tailles maximales de composants de l'ordre du mètre. En effet les procédés de type fusion laser de lit de poudre ne permettent d'accéder qu'à des pièces de taille inférieure à quelques dizaines de centimètres.
- l'obtention de vitesses de fabrication supérieures, de l'ordre de la dizaine de  $\text{dm}^3$  par heure (du fait des tailles de fils d'apport potentiellement élevées : supérieures à 3 ou 4 mm de diamètre).

Les marchés visés par cette technologie sont le transport aéronautique et naval : Airbus, Thales, Naval Group (pièces de structures), l'énergie : Framatome (échangeurs thermiques), etc.

La dynamique autour de ce procédé est accompagnée par les structurations régionale (INITIATIVE 3D) et nationale, ainsi que par les agences et grands opérateurs nationaux dont notamment le CNRS, le CEA, le CETIM, l'ANDRA, l'ONERA...

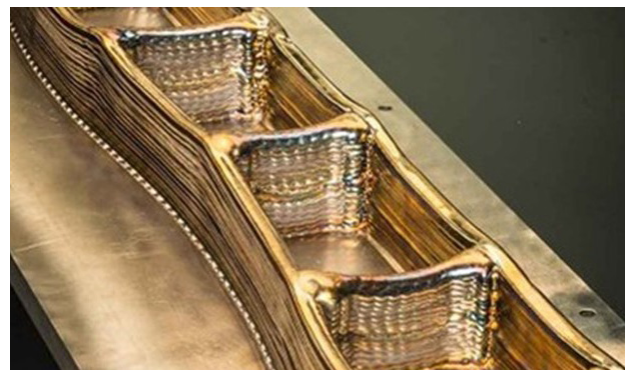


Figure 2 : Exemples de composants aéronautiques imprimés directement par la technologie WAAM.

Le procédé WAAM vient compléter la gamme très large des procédés de fabrication additive en cours de développement mais qui ne permettaient pas la réalisation de pièces de taille supérieure à quelques dizaines de centimètres. Un marché plus large s'ouvre ainsi avec cette nouvelle technologie dont le déploiement par le biais de plateformes technologiques comme FAB-WAAM devra permettre de répondre à l'ensemble des spécifications des donneurs d'ordre concernant les applications visées, et éveiller l'intérêt dans ce domaine pour l'entrepreneuriat et la création d'emploi. ■ DM

L'auteur remercie Christophe Desrayaud, directeur du Centre Sciences des Matériaux et des Structures de Mines Saint-Etienne pour les informations communiquées.

## ➤ Les aurores boréales sur Jupiter enfin expliquées

**La cause des aurores en rayonnement X sur Jupiter a enfin été résolue par une observation continue de l'ensemble du processus par les missions XMM de l'ESA et Juno de la NASA.**

C'est à une question posée depuis plus de 40 ans, la cause des aurores boréales observées sur Jupiter, que les astronomes ont pu répondre en ce mois de juillet 2021. Ce phénomène semble bien pouvoir se reproduire dans d'autres parties de l'univers.

Mais avant tout, il importe de faire quelques rappels sur les champs magnétiques planétaires et particulièrement celui de Jupiter.

### Quelques mots sur les champs magnétiques planétaires

Le champ magnétique terrestre est majoritairement dipolaire, et peut être représenté comme un aimant situé au centre

de la Terre dont les pôles sont alignés avec les pôles terrestres, et dont les lignes magnétiques émergent du pôle sud et entrent par le pôle nord. Il existe également quelques rares composantes non-dipolaires réparties uniformément autour des hémisphères. C'est grâce à l'existence de ce champ magnétique que la vie a pu apparaître et se maintenir sur terre. Les particules à haute énergie émises par le soleil sont capturées par ce champ magnétique et ne rejoignent pas la surface du sol. Une bonne partie de ces particules sont capturées et constituent ce que l'on appelle la ceinture de Van Halen, une autre partie est déviée. Seule une faible partie du spectre des énergies arrive au sol. Mais lors des émissions importantes, une partie s'engage dans les cornets polaires situés aux pôles, où les lignes se referment comme indiqué sur la figure 1. « *Solar cup* » en anglais.

Mais pour Jupiter, la situation est totalement différente. Les lignes magnétiques émergent d'une large région de l'hémisphère nord, bouclant aux environs du pôle sud, ainsi que dans une région magnétique très intense située au sud de l'équateur, appelée la « Grande tache bleue » qui serait la source d'une sorte de deuxième champ magnétique. Au fil des années, les missions d'observation ont pu constater les propriétés nouvelles du champ magnétique de Jupiter. Bien que le diamètre de cette dernière ne soit que 11 fois supé- ●●●

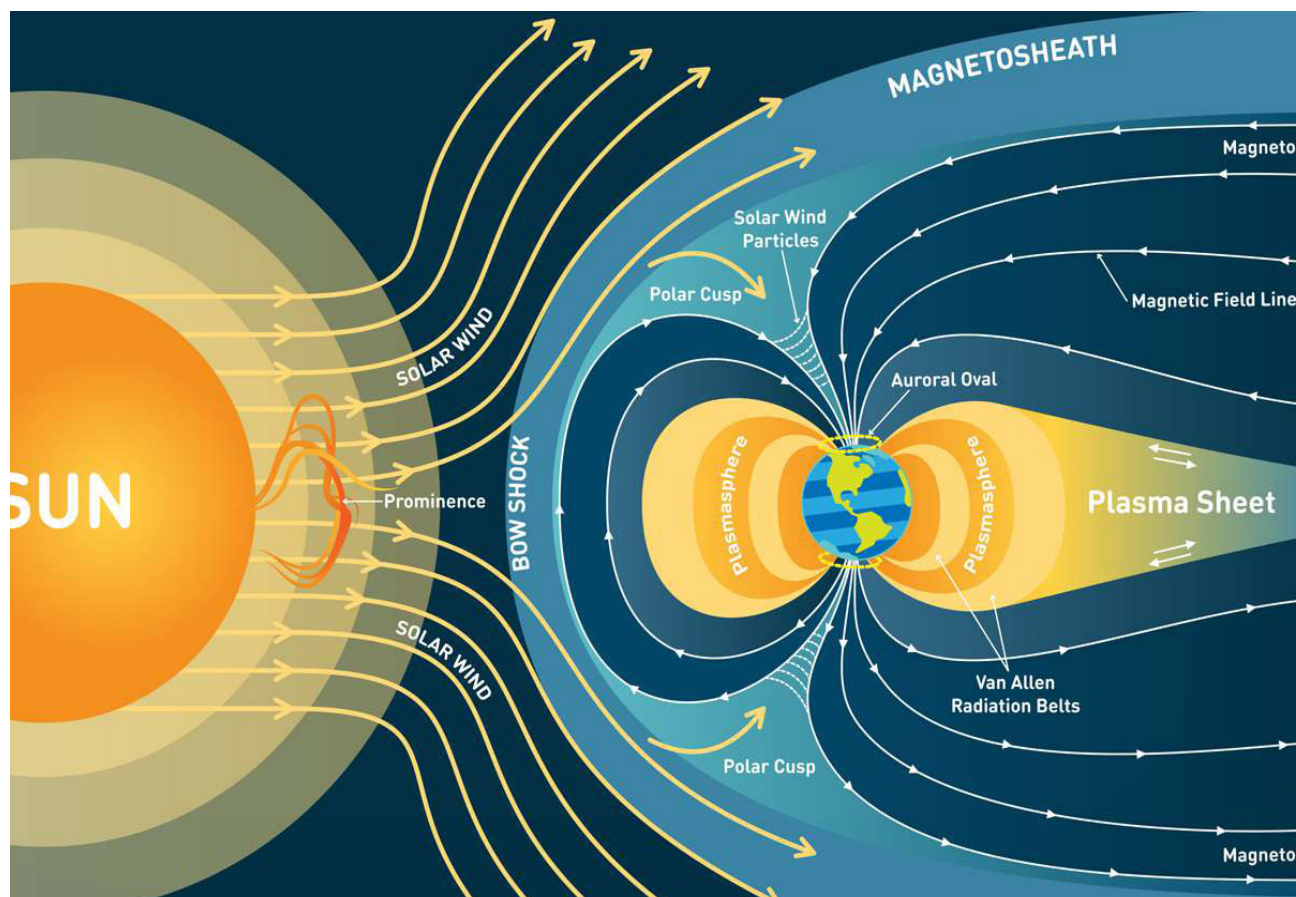


Figure 1 : Le champ magnétique terrestre – Source : neozone.

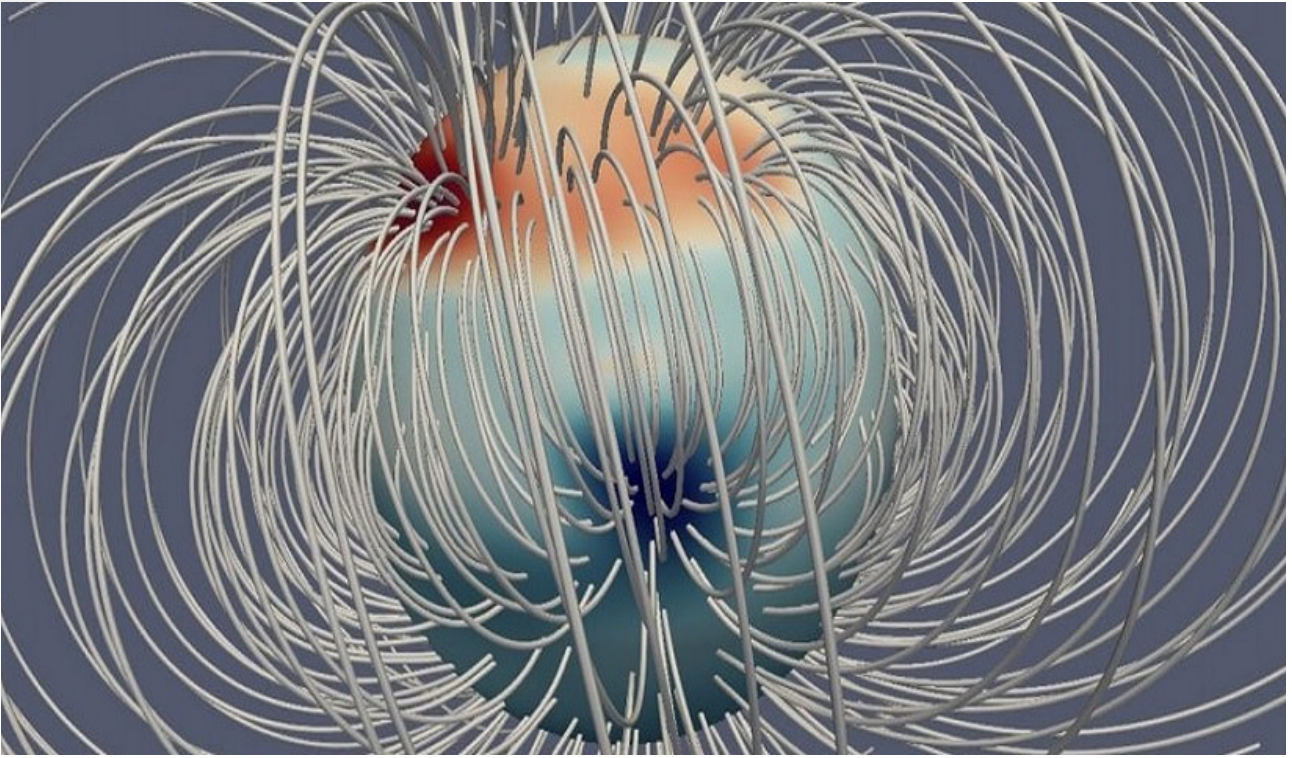


Figure 2 : Champ magnétique calculé de Jupiter - Source : Nature.

- rieur à celui de la Terre, son champ magnétique est 20 000 fois plus intense. Mais surtout sa configuration montre des structures extrêmement complexes et ramifiées sans aucune commune mesure avec notre planète. Cette complexité pourrait être liée à la rotation rapide de la géante gazeuse et de son intérieur composé d'hydrogène métallique liquide. Cette différence fondamentale explique pourquoi les aurores sont théoriquement différentes sur les deux planètes. La cartographie de Jupiter, débutée avec les sondes Pioneer puis précisée par la sonde Juno, a révélé plusieurs surprises. Bien différente de celle de la Terre actuelle, elle se caractérise par exemple par un second pôle sud juste sous l'équateur de Jupiter et on sait maintenant que ce champ évolue dans le temps comme pour celui de la Terre.

Mais aussi quelques mots sur le phénomène d'aurore.

### Le phénomène d'aurore

Lors d'un orage magnétique faisant suite à une éruption solaire, un afflux de particules chargées entre en collision avec le bouclier que constitue la magnétosphère. Des particules électrisées à haute énergie peuvent alors être captées et canalisées par les lignes du champ magnétique terrestre du côté nuit de la magnétosphère et aboutir dans une zone appelée « ovale auroral ». Ces particules ionisées excitent ou ionisent les atomes de la haute atmosphère dans le ciel à des altitudes comprises entre 80 et 1 000 km.

Depuis la terre, les aurores polaires ne sont en général observables qu'entre 65 et 80 degrés de latitude, c'est-à-dire à proximité des cornets polaires. A ces latitudes les lignes de champ terrestres se referment, créant ainsi une continuité. Au-delà, les lignes de champ magnétique terrestre sont connectées au champ magnétique solaire véhiculant les particules chargées du vent solaire interdisant toute génération d'aurores, elles sont appelées lignes ouvertes.



Figure 3 : Une aurore polaire terrestre vue depuis la navette Discovery - Source : NASA.

Pour Jupiter, toutes les lignes de champ sont ouvertes, il n'est théoriquement pas possible que des aurores se produisent.

### Alors pourquoi des aurores sur Jupiter ?

Ce sont les données conjointes du télescope spatial XMM de l'ESA et de la plateforme spatiale Juno de la NASA qui ont permis de lever le doute. Le télescope XMM observe Jupiter depuis une orbite terrestre, donc à l'extérieur du champ magnétique de Jupiter. Alors que la plateforme Juno observe cette planète depuis une orbite jovienne, donc depuis l'intérieur du champ magnétique. Pour la première fois, il a pu être observé les trajectoires des particules chargées suivre les lignes du champ magnétique de Jupiter, à la limite de son atmosphère. Mais elles sont invisibles à l'œil, car ce sont des aurores de rayons X.

Les longueurs d'ondes émises par ce rayonnement auroral montrent qu'il est produit par des ions qui pénètrent dans l'atmosphère de Jupiter. Mais la dynamique de ce phénomène est restée jusqu'ici inconnue. Les aurores de rayons X de Jupiter semblent incompatibles avec sa structure magnétique. Elles existent au pôle nord de la ceinture aurorale principale, oscillent régulièrement et peuvent parfois être différentes au pôle nord et au pôle sud. Ce sont des caractéristiques typiques d'un champ magnétique fermé.

En utilisant des simulations informatiques, le planétologue Zhonghua Yao et ses collègues de l'Académie des sciences chinoise avaient précédemment découvert que les aurores de rayons X pulsés pourraient être liées à des champs ma-

gnétiques fermés qui sont générés à l'intérieur de Jupiter. Les 16 et 17 juillet 2017, le télescope spatial XMM-Newton a observé Jupiter en continu pendant 26 heures et a vu des aurores de rayons X osciller toutes les 27 minutes. Simultanément, la mission Juno avait orbité depuis une distance comprise entre 62 et 68 rayons de Jupiter. C'est exactement le domaine que les simulations de l'équipe avaient avancé comme produisant l'effet déclencheur de ces aurores. L'équipe a donc recherché dans les données Juno tous les processus magnétiques qui se produisaient au même rythme.

Ils ont découvert que les aurores de rayons X pulsés sont causées par des fluctuations du champ magnétique de Jupiter. Lorsque la planète tourne, elle entraîne autour d'elle son champ magnétique. Le champ magnétique est frappé par les particules du vent solaire et comprimé, c'est le même phénomène sur la Terre (figure 1). Mais ces zones comprimées chauffent les particules qui sont piégées dans le champ magnétique de Jupiter. Cela déclenche un phénomène appelé ondes cyclotron ioniques électromagnétiques (EMIC), dans lequel les particules sont dirigées le long des lignes de champ.

Les planétologues pensent que les magnétosphères intenses associées au Soleil et à des géantes gazeuses, comme Jupiter et Saturne, sont toutes produites par l'effet de dynamo, bien qu'il y ait des différences. Le plasma à l'intérieur du Soleil n'est pas semblable à l'alliage de fer-nickel liquide composant le noyau de la Terre, et encore moins que l'hydrogène liquide qui devient même un métal conducteur soumis à de hautes pressions dans les entrailles de Jupiter.

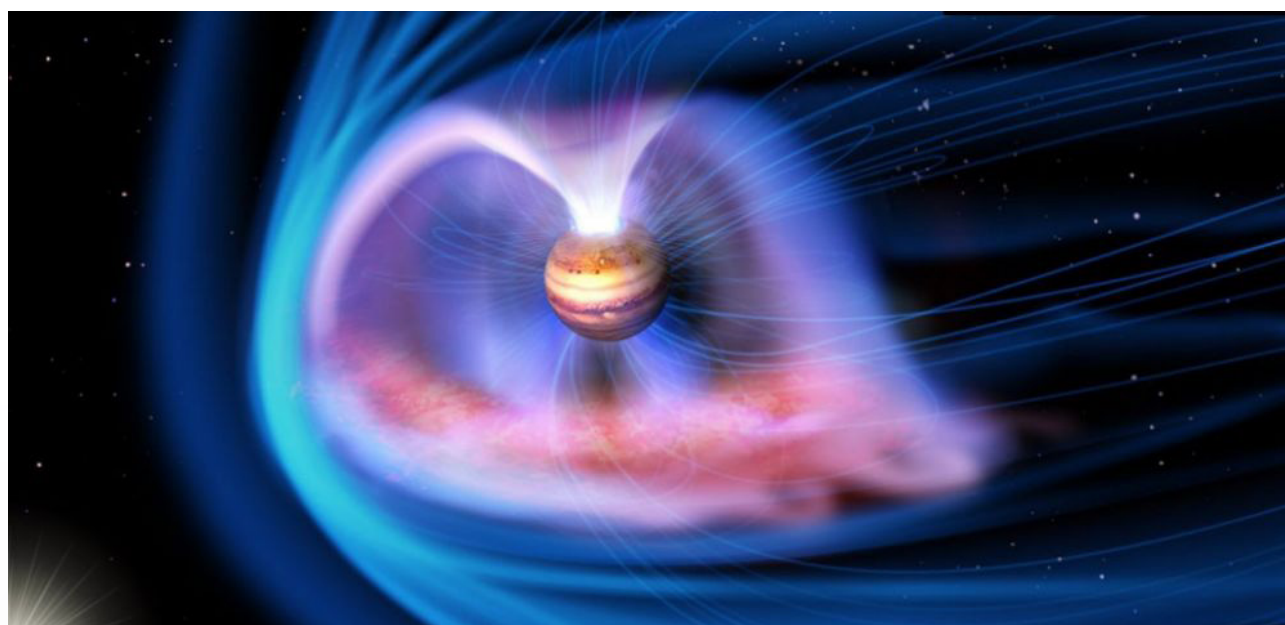


Figure 4 : Le champ magnétique mesuré de Jupiter - Source : NASA.

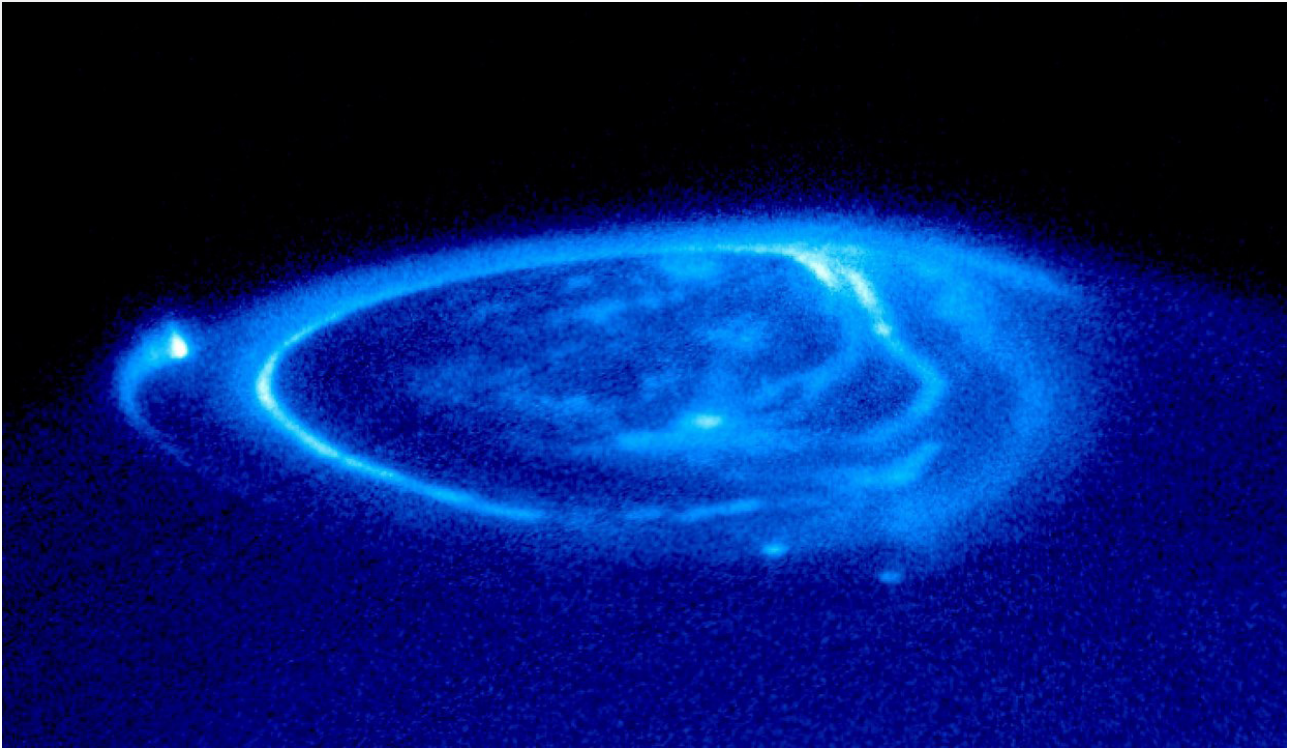


Figure 5 : Vue en ultra-violet d'une aurore sur Jupiter. Source : NASA.

- On devait donc s'attendre à observer des variations dans le temps des magnétosphères de ces objets et c'est bien ce qui vient d'être confirmé dans le cas de Jupiter par un article publié dans le journal « *Nature Astronomy* ».

Les changements mis en évidence dans la magnétosphère de Jupiter sur une période de presque 40 ans sont faibles mais ils sont bien réels et ils permettent déjà de poser des contraintes sur ce qui se passe à l'intérieur de la géante et même d'apporter un début d'explication sur leur dynamique.

Selon les spécialistes, ils sont en relation avec les vents propres à Jupiter, bien visibles avec ces bandes nuageuses caractéristiques. Ces vents s'enfonceraient profondément, jusqu'à 3 000 km sous la surface de Jupiter, c'est-à-dire justement aux profondeurs où l'hydrogène se comporte comme un liquide métallique conducteur. Il se produit alors des phénomènes de magnétohydrodynamique bien connus où les lignes de champ magnétiques se fixent, c'est-à-dire qu'elles deviennent liées aux mouvements de la matière conductrice qui va les déformer en fonction de son écoulement.

Remarquablement, c'est au niveau du troisième pôle magnétique de Jupiter (la Grande tache bleue), que les astrophysiciens ont découvert l'évolution temporelle du champ magnétique la plus importante.

Ce qui apparaît clairement dans les données de Juno est bien cette synchronisation de phénomènes. Nous pouvons obser-

ver la compression, nous voyons l'onde EMIC déclenchée, nous voyons les ions, puis une impulsion d'ions se déplacer le long de la ligne de champ. Puis quelques minutes plus tard, XMM observe une rafale de rayons X.

Maintenant que le processus responsable des aurores de rayons X de Jupiter a été identifié pour la première fois, cela ouvre une multitude de possibilités pour savoir à quel endroit un tel phénomène pourrait être étudié par la suite. Par exemple sur Jupiter le champ magnétique est rempli d'ions soufre et oxygène qui sont crachés par les volcans sur son satellite Io. Sur Saturne, la lune Encelade rejette de l'eau dans l'espace, remplissant le champ magnétique de Saturne d'ions du groupe de l'eau.

Il existe une similitude avec les aurores ioniques qui se produisent ici sur Terre. Dans le cas de la Terre, l'ion responsable est un proton qui provient d'un atome d'hydrogène et le processus n'est pas assez énergétique pour créer des rayons X. Pourtant, le processus de base est le même. Ainsi, l'aurore de rayons X de Jupiter est fondamentalement une aurore ionique, bien qu'à une énergie beaucoup plus élevée que l'aurore proton sur Terre.

Il se pourrait que les ondes EMIC jouent un rôle important dans le transfert d'énergie d'un endroit à un autre de l'espace intergalactique. Pour Jupiter l'étude de ses aurores se poursuivra avec la mission Juice de l'ESA. Prévu pour arriver d'ici 2029, Juice étudiera l'atmosphère de la planète, la magnétosphère et l'effet des quatre plus grandes lunes de Jupiter sur les aurores. ■ AD