

Un système de contrôle auto-adaptatif de l'orientation de faisceaux d'ondes térahertz à partir de métasurfaces intelligentes

Les métasurfaces font l'objet de recherches importantes et sont utilisées dans diverses applications en raison de leur capacité à manipuler les ondes électromagnétiques dans les fréquences micro-ondes et optiques. En exploitant une transition du VO_2 , des équipes chinoises viennent de démontrer la faisabilité d'un système auto-adaptatif à base de métasurfaces « intelligentes » permettant la mise en forme de faisceaux en transmission et en réflexion dans la gamme des THz, une première démonstration à ces fréquences.

Introduction

Le développement des communications sans fil de nouvelle génération a entraîné des besoins croissants en conformation de faisceau (*beamforming*). Une solution prometteuse pour reconfigurer l'environnement de la propagation d'une onde électromagnétique est constituée par ce qu'on désigne sous le vocable de *surface intelligente reconfigurable* (SIR), la reconfiguration s'effectuant grâce au contrôle des coefficients de réflexion complexes des différents éléments qui composent cette surface.

Ces métasurfaces qui font appel à des matériaux artificiels structurés en multicouches planes (métalliques ou réalisées à partir de gravures diélectriques) d'épaisseur inférieure à la longueur d'onde, présentent beaucoup d'avantages pratiques : légèreté, facilité de

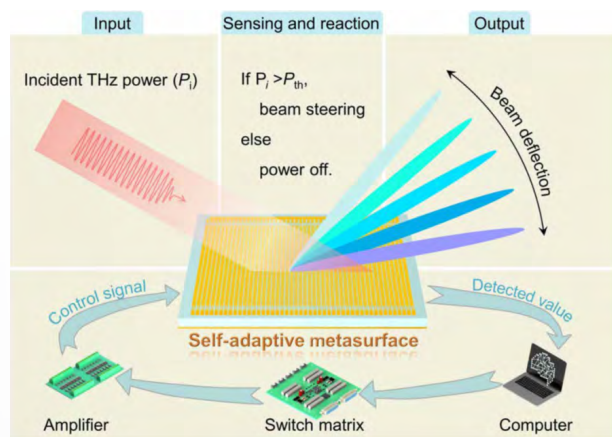


Figure 1 : Schéma de principe du fonctionnement d'un système auto-adaptatif à base de métasurface intelligente dans la gamme du THz. Source : Référence citée en note 1.

fabrication et capacité à contrôler la propagation des ondes à la fois sur la surface et dans l'espace libre environnant. Les métasurfaces programmables intègrent ces structures artificielles (d'où le préfixe 'méta') avec des commutateurs électroniques. En contrôlant le profil de phases en surface, une telle métasurface peut fonctionner en réseau phasé à faible coût permettant la configuration du faisceau réfléchi, une condition essentielle pour améliorer les liaisons dans les zones blanches et éliminer les interférences entre canaux de transmission en bordure de cellules. Plus récemment on est passé de surfaces programmables à des métasurfaces dites « intelligentes » capables grâce à l'adjonction de capteurs d'ajuster leur fonctionnalité en fonction de l'environnement électromagnétique.

Malgré l'intérêt que présente l'utilisation de fréquences plus élevées pour atteindre des débits de données très supérieurs, la plupart de ces surfaces intelligentes fonctionnaient jusqu'à présent dans le domaine des gigahertz (GHz). En effet, au-delà (THz), le développement de telles structures se trouve limité du fait du manque de capteurs ou de modulateurs de phase bas coût à l'échelle élémentaire.

Une avancée chinoise en forme de « preuve de concept »

C'est dans ce contexte que l'article publié dans *Sciences Advances* en octobre dernier par des équipes de l'université de Nanjing et de l'université de Hubei (Wu Han) ¹ est à signaler car il rapporte des résultats qui annoncent une faisabilité de *beamforming* en régime THz.

Parmi la large gamme de matériaux accordables utilisables pour une intégration monolithique de capteurs dans la gamme du THz, les auteurs ont choisi l'oxyde de vanadium connu pour le changement radical de conductivité au voisinage de la transition isolant-métal de ce matériau.

Dans un premier temps, ils ont réalisé une métasurface auto-adaptative capable de capter l'environnement électromagnétique de la surface et d'orienter en conséquence les faisceaux THz réfléchis, en alternant les distributions spatiales de la phase de l'onde. Puis à partir de ce dispositif de base, ils ont construit un système autonome capable de capter les ondes THz puis d'orienter le faisceau réfléchi automatiquement sans intervention humaine.

La figure 1 illustre le mode de fonctionnement d'un tel démonstrateur.

¹ « *Electrically addressable integrated intelligent terahertz metasurface* » Benwen Chen, Xinru Wang², Weili Li, Chun Li, Zhaosong Wang, Hangbin Guo, Jingbo Wu, Kebin Fan, Caihong Zhang, Yunbin He, Biaobing Jin, Jian Chen, Peihong Wu *Sci. Adv.* 8, eadd1296 (2022) 12 October 2022.

La métasurface utilisée comprend des sous-réseaux 1 x 48, chacun d'eux fonctionnant à la fois comme un modulateur THz en mode réfléchi et comme micro-bolomètre sous une tension appropriée. Le système complet est constitué de la surface auto-adaptative, d'une matrice de commutateurs programmable, d'un amplificateur de puissance multicanal et d'un processeur sur lequel des algorithmes ont été préalablement implémentés. Au départ, le système détecte la puissance qui atteint la métasurface et lorsque celle-ci dépasse une puissance seuil, il commence à défléchir le faisceau THz dans la direction prédéfinie.

Comme on peut le voir sur la figure 1, en appliquant diverses séquences de codage, la métasurface a pu dévier les faisceaux THz sur une plage d'angles de 42,8 °, ce qui semble-t-il n'avait pas encore été obtenu dans cette gamme de fréquences.

Si ce démonstrateur passe l'étape de la preuve de concept pour donner lieu à une plate-forme à coût raisonnable, cette percée pourra ouvrir la voie à une mise en forme de faisceau automatique pour les liaisons à très haut débit. ■ AB

➤ La future constellation Meteosat en déploiement

Plus de 40 ans après le démarrage des programmes Meteosat, la mise sur orbite de la 3^{ème} génération de cette famille de satellites a commencé à la fin de l'année 2022. La nouvelle génération de capteurs embarqués permettra d'atteindre des résolutions spatiale et temporelle inédites. Et pour la première fois, les événements de foudre seront enregistrés depuis l'espace.

Un premier lancement réussi

Le premier satellite Meteosat de la troisième génération (MTG ou *Meteosat Third Generation*), a été lancé le 13 décembre 2022 par une fusée Ariane 5 depuis le port spatial européen de Kourou en Guyane française. Cette troisième génération de satellites météorologiques garantira non seulement la continuité des données de prévisions météorologiques pour les deux prochaines décennies, mais elle offrira également une amélioration significative de la puissance d'imagerie en temps réel, ce qui constitue une nouvelle capacité pour les satellites météorologiques européens.

Cette nouvelle série européenne de satellites Meteosat améliore ce qu'était la précision des prévisions météorologiques depuis plus de 40 ans. Le premier Meteosat a été lancé le 23



Figure 1 : Lancement de Meteosat 3 – Source : ESA.

novembre 1977 par un lanceur Delta depuis Cap Canaveral aux États-Unis. Il est entré dans l'histoire comme la première mission d'observation de la Terre de l'Agence Spatiale Européenne (ESA).

Le système MTG est très différent des deux premières générations de satellites Meteosat. Les satellites MTG utilisent désormais l'état de l'art de l'instrumentation sur une plate-forme stabilisée à trois axes, ce qui signifie que l'orientation des satellites reste fixe par rapport à la Terre, avec des charges utiles regardant continuellement la surface de celle-ci.

Depuis des orbites géostationnaires, les satellites Meteosat fournissent un flux continu d'images de l'ensemble du globe terrestre pour acquérir les données météorologiques au-dessus de l'Europe, de l'Afrique et de certaines parties de l'océan Atlantique et de l'océan Indien.

Une constellation de six satellites

MTG-I est le premier des six satellites qui forment le système MTG complet. Il fournira des données critiques pour la détection précoce et à court terme des événements météorologiques extrêmes au cours des 20 prochaines années. En opération, la



Figure 2 : Intégration du satellite MTG-I sur son support de lancement – Source : ESA.

- mission comprendra quatre satellites MTG Imaging (MTG-I) et deux satellites MTG Sounding (MTG-S) travaillant en liaison. Ils utilisent une plate-forme satellitaire stabilisée commune.

Les satellites MTG-I augmenteront la fréquence et la résolution des images actuelles des systèmes météorologiques de deuxième génération de Meteosat. En plus d'une résolution d'image avancée, les 16 canaux de l'imageur combiné flexible porteront l'imagerie multispectrale à un niveau jamais atteint. En outre, les satellites offriront des informations entièrement nouvelles sur la foudre. Les capacités de sondage infrarouge hyperspectral rapide du MTG-S fourniront des profils verticaux de température et d'humidité atmosphériques toutes les 30 minutes au-dessus de l'Europe, ce qui constitue une première mondiale. La mission Copernicus Sentinel-4 embarquée sur les satellites MTG-S offre des mesures liées à la qualité de l'air telles que le dioxyde d'azote et le dioxyde de soufre toutes les 60 minutes.

Les satellites MTG-I transportent deux instruments entièrement nouveaux, un imageur flexible et le premier imageur de foudre d'Europe. Ceci afin de produire des données de haute qualité pour de meilleures prévisions météorologiques à court terme.

L'imageur de foudre sera capable de capturer des événements de foudre individuels dans le ciel, aussi bien de jour que de nuit. C'est la première fois qu'un satellite météorologique géostationnaire a la capacité de détecter la foudre en Europe, en Afrique et dans les eaux environnantes. Il surveillera en permanence plus de 80 % du globe terrestre pour détecter les décharges de foudre, qui auront lieu aussi bien entre les nuages qu'entre les nuages et le sol.

L'imageur combiné utilisera deux systèmes de numérisation pour créer une image des événements en évolution rapide. Grâce à ce service, l'imageur capturera l'ensemble du globe terrestre en seulement 10 minutes. Grâce au service de balayage rapide, l'imageur balayera l'Europe et l'Afrique du Nord toutes les 2,5 minutes.

Les données acquises dans 16 bandes spectrales différentes fournissent des informations précises sur un ensemble allant des nuages à la vapeur d'eau, en passant par les océans et les incendies locaux. Les images permettront de prévoir plus tôt les phénomènes météorologiques violents, d'améliorer les prévisions et d'améliorer les systèmes météorologiques essentiels liés à l'environnement.

Les satellites MTG-I transportent également deux charges utiles plus petites pour la collecte de données à partir de balises scientifiques éloignées pour la recherche et le sauvetage en détectant les balises de détresse. Ces tout nouveaux instruments permettront de détecter les tempêtes violentes à un stade précoce et seront donc essentiels pour émettre des alertes en temps opportun.

La mission MTG est une coopération entre EUMETSAT (Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques) et l'ESA. L'ESA est responsable du développement et de l'acquisition des six satellites MTG. EUMETSAT définit les exigences du système, développe les systèmes au sol, fournit les services de lancement, exploite les satellites et met les données à la disposition des utilisateurs.



Figure 3 : Vue d'artiste d'un satellite Meteosat-3 – Source ESA.

Les satellites MTG sont construits par un vaste consortium d'industries européennes, dirigé par Thales Alenia Space en coopération avec OHB. L'imageur de foudre innovant est développé par Leonardo en Italie. Telespazio fournit à EUMETSAT des services au sol de lancement et en orbite.

Un succès pour l'avenir

Les satellites Meteosat de troisième génération constituent une réussite européenne. L'objectif de cet investissement de plusieurs milliards d'euros est de fournir aux services météorologiques une quantité considérablement accrue d'informations dont la communauté des sciences de la Terre a de plus en plus besoin. ■ AD

Blue Solutions s'associe à deux laboratoires universitaires pour concevoir les batteries automobiles de demain

Le 30 novembre 2022, on apprenait officiellement que Blue Solutions, la filiale batteries du groupe Bolloré allait créer deux laboratoires communs avec des partenaires universitaires grenoblois et nantais. L'objectif est d'accélérer le développement des nouvelles batteries LMP® (Lithium Métal Polymère) destinées aux véhicules électriques avec l'ambition d'une mise en production dès 2028.

Le contexte

L'Union européenne a annoncé la fin de la commercialisation des véhicules neufs à moteur thermique pour 2035 (la date suscite encore quelques discussions). Le passage à une flotte automobile tout électrique amène à de nombreux challenges. L'installation sur tout le territoire d'un nombre suffisant de bornes de recharge rapide en est un. Accroître l'autonomie et la sécurité des batteries tout en maîtrisant les coûts de fabrication et de recyclage en est un autre.

Les constructeurs de batteries doivent donc passer à la vitesse supérieure aussi bien en recherche et développement (R&D) qu'en capacités de production. On dénombre pas moins de 35 projets de Gigafactory en Europe. Même si le prix des batteries a été divisé par 5 en quelques années pour passer de 1000 \$/kWh à 200 \$/kWh, il n'en reste pas moins une des composantes majeures du coût de revient d'un véhicule (à titre indicatif, les batteries équipant les toutes dernières Renault Zoé ont une capacité de 50 kWh environ). La technologie la plus répandue actuellement est celle des batteries lithium-ion mais elle a désormais ses limites, en matière de densité d'énergie disponible notamment. Les batteries représentent à elles seules 300 à 400 kg pour une automobile ; cette proportion dans la masse totale d'un véhicule ne peut pas augmenter indéfiniment.

La création de laboratoires communs (ou LabComs)

Blue Solutions travaille depuis le début des années 2000 sur des technologies de batterie dites LMP® pour Lithium Métal Polymère. Ces batteries équipent déjà des véhicules de transport en commun. Les travaux de R&D ont été l'occasion de nombreuses collaborations, via des contrats de recherche, avec des laboratoires universitaires. Mais dès 2020, il est apparu nécessaire d'aller plus loin et la décision a été prise de créer des laboratoires communs, c'est-à-dire des structures avec des intérêts communs, des moyens humains et financiers communs et une gouvernance commune. A ce jour, Blue Solutions est impliqué dans la création de 2 Labcoms :

- Le laboratoire Li² (Laboratoire Lithium & Interface) dont le partenaire universitaire est le LEPMI¹ (Laboratoire d'Electrochimie et de Physicochimie des Matériaux et des Interfaces) basé en région grenobloise. Ce laboratoire a été inauguré le 23 Novembre 2022².
- Le Laboratoire IMN Blue Lab dont le partenaire universitaire est l'Institut des Matériaux Jean Rouxel³ basé à Nantes. Ce laboratoire a été inauguré le 30 Novembre 2022⁴.

Les enjeux technologiques

Le principe d'une batterie lithium-ion classique est représenté sur la figure 1.

1 <https://lepmi.grenoble-inp.fr/>

2 <https://www.youtube.com/watch?v=M70NNsigAR4>

3 <https://www.cnrs-imn.fr/>

4 https://www.youtube.com/watch?v=WOqG-_UGl_4

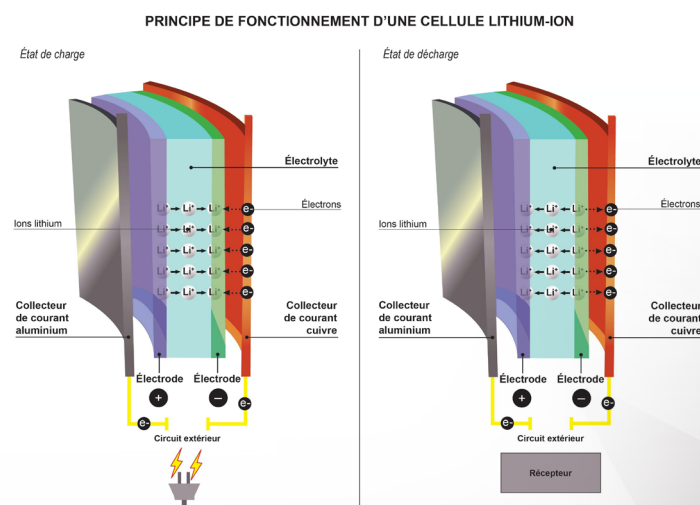


Figure 1 : Schéma de principe du fonctionnement d'une cellule lithium-ion (Source : site planète-énergies.com).

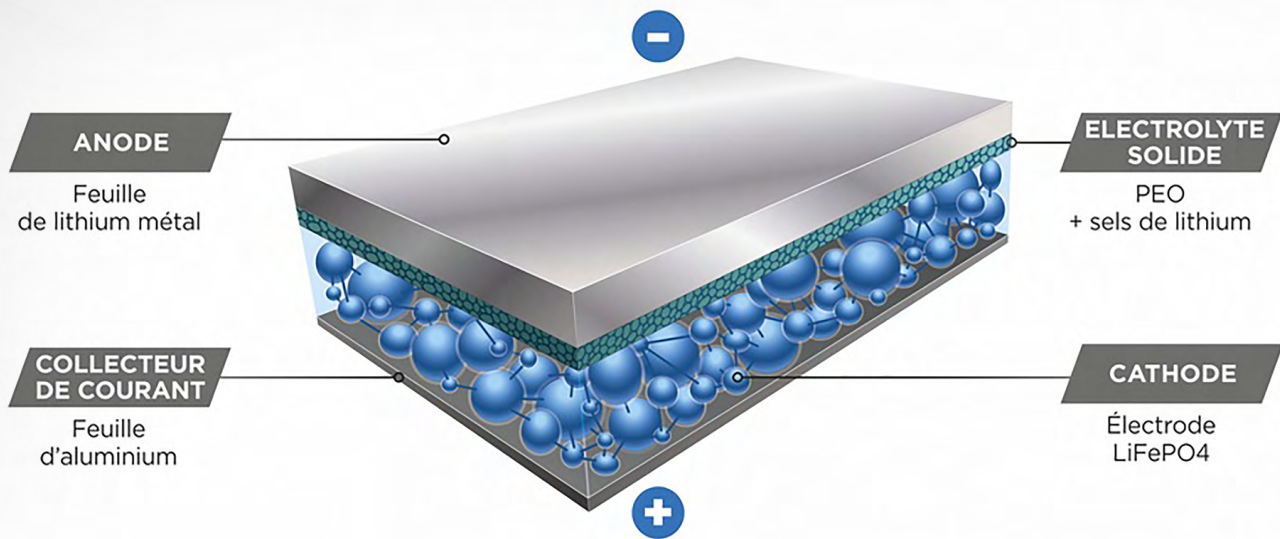


Figure 2 : Schéma de principe d'une batterie lithium-métal (Source : site blue-solutions.com).

- L'électrode positive est souvent formée à partir d'oxydes contenant du cobalt, du nickel du manganèse, tandis que l'électrode négative est faite de graphite. L'électrolyte est constitué de sels de lithium dans un solvant organique et contient donc des ions lithium en grande quantité. D'où l'appellation batterie lithium-ion.

Les batteries lithium-ion ont atteint les limites physiques des matériaux et les gains en énergie seront limités. En outre l'utilisation d'électrolyte organique liquide inflammable induit des problèmes de sécurité. Quant au cobalt c'est un métal dont les gisements connus sont essentiellement présents en République démocratique du Congo où les conditions de son exploitation soulèvent de nombreuses critiques ⁵.

Dans les batteries LMP® (cf. figure 2), telles que les développe déjà Blue Solutions, l'électrode négative est constituée de lithium métal qui peut échanger 10 fois plus d'électrons par kg que le graphite. Mais actuellement ces batteries ont besoin d'être chauffées à environ 80 °C pour fonctionner, ce qui signifierait un long temps de recharge avant de démarrer un véhicule qui serait resté stationné pendant plusieurs jours (problème beaucoup moins critique avec les bus qui, eux, fonctionnent de façon plus continue).

Les défis technologiques à relever se résument schématiquement ainsi :

- Abaisser la température de fonctionnement de la batterie à 20 °C ;
- Choisir le « bon » électrolyte et veiller à la qualité des interfaces ;

⁵ <https://www.monde-diplomatique.fr/2020/07/BELKAID/61982>

- Trouver la bonne structure pour l'électrode positive en abandonnant ou en limitant l'utilisation du cobalt et si-possible celle du nickel.

Les ambitions, les moyens et les atouts

Le LabCom Li² sera plus particulièrement chargé de :

- Comprendre les mécanismes d'oxydation et de réduction du lithium métal ;
- Analyser les modes de défaillance des électrodes en lithium métal ;
- Modéliser numériquement le fonctionnement de l'électrode en lithium métal ;
- Comprendre l'ensemble des mécanismes aux interfaces ;
- Optimiser le transfert de charge au sein d'une batterie tout solide ;
- L'analyse et la compréhension des modes de défaillances.

Quant au LabCom IMN Blue, ses tâches identifiées concernent :

- La protection de la matière active de l'électrode de la batterie contre les réactions indésirables ;
- La stabilisation en température des matériaux utilisés dans la batterie ;
- L'identification de la meilleure composition pour permettre des performances durables en charge et décharge rapides ;
- L'analyse et la compréhension des modes de défaillances.

Dans chacun des deux laboratoires, les équipes de chercheurs déjà en place ont été renforcées par l'embauche en CDI par Blue Solutions de plusieurs chercheurs dédiés spécifiquement au projet et ont bénéficié d'investissements qui se chiffrent à plusieurs millions d'euros. Les équipes pourront évidemment utiliser les

matériels déjà présents dans les laboratoires (microscopes à balayage électronique par exemple) mais pourront aussi compter sur l'utilisation des locaux quimpérois de Blue Solutions pour des tests « grandeur nature ».

Dans un secteur où la concurrence internationale est très rude, Blue Solutions présente l'atout de s'être intéressé depuis des années aux batteries lithium-métal ce qui lui permet notamment de savoir réaliser des dépôts ultrafins sur les électrodes, d'utiliser des process industriels sans solvants et surtout de parfaitement maîtriser les techniques d'extrusion.

A court terme (5 ans), l'objectif espéré est d'atteindre des densités d'énergie de 320 Wh/kg contre 260 Wh/kg pour les meilleures batteries lithium-ion actuelles, soit une augmentation de près de 25 %. C'est un véritable challenge scientifique et industriel, avec des ambitions encore plus fortes à horizon 10 ans et 15 ans.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à Renaud Bouchet, professeur à Grenoble-INP Phelma ⁶ et directeur du nouveau laboratoire Li² qui, par ses réponses à nos questions, a contribué à la rédaction de cet article. ■ JC

➤ Neoliner premier cargo roulier à voiles

L'armateur français Neoline a annoncé, en janvier 2023, la construction de son premier cargo roulier à voiles qui sera livré mi-2025 et permettra selon lui de réduire son empreinte carbone de 80 %. Avec les cargos à voile, nous entrons dans une nouvelle ère du transport maritime alliant la propulsion traditionnelle et les technologies de pointe.

Un cap important pour Neoline

Neoline a bouclé le budget de son premier cargo-voilier grâce au support de CMA CGM. La CMA CGM, figurant parmi les leaders mondiaux du transport maritime, est en effet entrée au capital de la compagnie nantaise via son nouveau fonds « spécial énergies » doté d'1,5 Md€, destiné à accélérer la transition énergétique du transport et de la logistique.

Grâce à cet investisseur majeur, la compagnie maritime nantaise devrait pouvoir lancer la construction de son navire, après plus de 10 ans de recherche, pour une mise en service prévue en 2025.

⁶ <https://phelma.grenoble-inp.fr/>

D'un budget supérieur à 60 millions d'euros, ce projet, porté par Neoline Développement, allie des financeurs privés et publics (CMA CGM, Corsica Ferries, Louis Hardy SAS, ADEME Investissement, région Pays-de-la-Loire, Banque des territoires...).

Les enjeux

Dans un marché d'échanges mondialisé hautement concurrentiel et face à l'accélération des exigences environnementales et réglementaires, le transport maritime doit entreprendre un effort inédit d'adaptation de ses modes d'exploitation.

Le transport maritime qui représente à lui seul 7 % de la consommation mondiale de pétrole est tout particulièrement concerné par la réduction des émissions polluantes et à effet de serre et ce d'autant plus que les carburants utilisés à ce jour sont polluants en raison notamment de leur teneur en dioxyde de soufre (SOX).

Face à cet enjeu, les acteurs internationaux du transport maritime conventionnel se sont engagés à réduire les émissions CO₂ du secteur de 50 % à l'horizon 2050. Plus immédiatement, ils doivent satisfaire, depuis le 1^{er} janvier 2020, à une réduction de la teneur en soufre de leurs carburants (celle-ci doit passer de 3,5 % à 0,5 %). Avec cette nouvelle norme, conjuguée à l'augmentation des prix du pétrole, les armateurs font face à une envolée de leur budget carburant. Quant aux solutions d'adaptation des navires (gigantisme, vitesse réduite, GNL, ...) elles sont coûteuses, restent limitées et engendrent, pour certaines, de nouvelles formes de pollution.

Dans ce contexte la solution retenue par Neoline de recourir à la propulsion éolienne, fondée sur l'exploitation d'une énergie inépuisable et propre, prend tout son sens.

Le voilier-cargo le plus imposant du marché

Construit par le chantier naval turc RMK Marine, long de 136 mètres et doté d'un gréement solide fourni par les Chantiers de l'Atlantique (voile Solid Sail), le navire de charge "Neoliner" sera mis en service sur une ligne transatlantique reliant Saint-Nazaire à Baltimore (USA). ●●●



■ Figure 1 : Vue d'artiste de la maquette du Neoliner avec le pont de Saint-Nazaire en toile de fond (Source : Neoline).

- La construction de la coque du premier Neoliner sera sous-traitée en Turquie mais au moins 30 % des éléments du bateau seront fabriqués en France.

Il s'agira alors du voilier-cargo le plus imposant du marché. Le Neoliner prévoit en effet de transporter jusqu'à 5300 tonnes de marchandises dont 50 % en conteneurs, soit environ 280 conteneurs. Mais il transportera aussi des objets « hors normes » comme les navires du groupe Beneteau ou les engins de manutention de l'entreprise Manitou.

Les cargos à voile déjà en service

La propulsion vélique est devenue un sujet raisonnable et beaucoup d'acteurs se lancent dans des projets de navires à zéro émission de carbone. Abandonnée au début du 20^{ème} siècle, la voile de travail suscite à nouveau l'intérêt du monde maritime.

Aujourd'hui, seul un voilier-cargo est en service. Mais sa taille est beaucoup plus modeste. Le navire Grain de Sail, long de 24 mètres, traverse l'Atlantique depuis 2020 et charge à son bord environ 50 tonnes de vin, grains de café et cacao. Un second navire devrait bientôt le rejoindre.

L'entreprise Zéphyr et Borée, qui a conçu un cargo à voile de 121 mètres pour transporter la fusée Ariane 6, devrait mettre à l'eau son bateau d'ici la fin de l'année 2023. Enfin, la société Towt fait construire ses deux premiers cargos de 81 mètres de long, capables de transporter 1100 tonnes de marchandises, et envisage la mise en service du premier en 2023.

Le 11 janvier 2023, Orient Express, filiale du groupe hôtelier Accor, a annoncé passer commande auprès des Chantiers de l'Atlantique de deux voiliers de croisière inspirés du projet Silenseas mené par ces chantiers.

Anticiper la taxation carbone

La société Neoline espère, elle aussi, construire un navire jumeau. Ses deux cargos à voiles relieront ensuite Saint-Nazaire à Baltimore une fois par semaine, et desserviront Saint-Pierre-et-Miquelon et Halifax, sur un axe maritime favorisé par les alizés. Ils permettront d'économiser entre 80 % et 90 % de la consommation de fuel, tout en assurant un service compétitif et efficace

A l'horizon 2030, Neoline prévoit d'aller encore plus loin en proposant une palette élargie de solutions de transport maritime qui soient en mesure de répondre à des besoins diversifiés.

Plusieurs grandes entreprises se sont déjà engagées à transporter leurs marchandises avec ce mode de transport ver-

teux sur cette nouvelle ligne France-Amérique du Nord, les groupes Manitiou et Béneteau déjà cités mais aussi Renault, Michelin, Jas Hennessy & Co, Clarins, Longchamp ou Rémy Cointreau.

Pour les armateurs, l'intérêt de prendre des parts dans ce type de projet est d'être « aux premières loges » du transport décarboné. Via cette prise de participation, CMA-CGM anticipe également la mise en place de la taxation carbone. Car, progressivement, entre 2023 et 2026, les armateurs seront obligés d'acheter des crédits carbone pour compenser leurs émissions de gaz à effet de serre ; rappelons qu'ils devront également diviser leurs émissions par deux d'ici à 2050. ■ SD

Le satellite SWOT pour étudier l'eau

Le premier satellite capable d'étudier la quasi-totalité de l'eau sur Terre a été lancé en décembre dernier par la société Space X. Il permettra d'évaluer les réserves en eau et de prévoir les précipitations avec une précision jamais atteinte. Il s'agit d'une mission fondamentale compte tenu des sécheresses à répétition qui se profilent.

Un lancement réussi par Space X

SWOT, pour *Surface Water and Ocean Topography* est un satellite scientifique d'hydrologie franco-américain. Il va réaliser des mesures d'altimétrie pour déterminer le niveau d'eau des océans, des lacs et des rivières sur l'ensemble de la planète.

Il a été lancé avec succès le 16 décembre 2022 à bord d'un lanceur Falcon 9 de la société Space X depuis la base de Vandenberg en Californie.

Avec une orbite de 890 km, SWOT repasse au-dessus d'un même point du globe tous les 21 jours. Il est le premier satellite à étudier presque toute l'eau à la surface de la Terre, mer, fleuves, rivières, lacs, etc.

Il représente le satellite d'altimétrie le plus sophistiqué jamais conçu. A la charge du CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) et de la NASA (National Aeronautic and Space Administration), assemblé par Thales Alenia Space, ce programme marque une rupture dans le domaine de la mesure de la hauteur de la surface des vagues et des océans, nécessaire à la compréhension de l'évolution du climat.

Le système a été conçu avec une durée de vie minimum de trois ans et demi. Une partie de son carburant lui permettra, au terme de sa mission, de faire une rentrée contrôlée dans l'atmosphère afin de limiter les débris spatiaux.

Le coût total de la mission s'élève à 1,2 milliard de dollars, dont deux tiers environ sont supportés par la NASA et le tiers restant par le CNES. Le coût du lancement par la société Space X est évalué à un peu plus de 110 millions d'euros.

Mesurer le niveau de l'eau sur l'ensemble du globe terrestre...

On peut s'interroger sur la possibilité de mesurer des hauteurs d'eau sur des lieux aussi différents qu'un océan et un étang situé au milieu de terres distantes de plusieurs milliers de kilomètres de l'océan.

Pour ce qui est des océans, en utilisant une résolution dix fois supérieure aux systèmes altimétriques de la génération précédente, SWOT va permettre aux océanographes comme aux hydrographes, de travailler à des échelles beaucoup plus précises. Il sera possible d'observer des phénomènes sur des superficies pouvant aller de 10 kilomètres à 100 mètres de côté, mal observées à ce jour. Les transferts verticaux d'énergie, la dynamique des tourbillons et les impacts sur les zones côtières pourront également être finement évalués.

Concernant les eaux continentales, l'instrument permettra d'étudier des lacs d'une dimension d'environ 250 mètres par 250 mètres et

les rivières d'une largeur comprise entre 50 mètres et 100 mètres. En mesurant à la fois la topographie des eaux de surface et la pente des fleuves, il sera possible d'en déduire le débit. La connaissance des débits et des quantités d'eau disponibles intéresseront les opérateurs de parcs nucléaires pour le refroidissement de leurs centrales, les agriculteurs pour optimiser leur irrigation, les pouvoirs publics pour faire face aux éventuelles sécheresses, et bien d'autres utilisateurs.

...par une technologie innovante

La mesure est opérée par une méthode d'interférométrie radar. Cette solution repose sur différentes mesures ultraprécises de temps aller-retour d'un signal envoyé depuis l'antenne du satellite vers la surface de la terre et renvoyé en écho. Le principal progrès technologique réside en la précision de la mesure du temps de parcours du faisceau.

Les deux pays partenaires ont apporté une contribution majeure, en concevant un système d'interférométrie spatiale inédit.

La NASA a développé un système d'antennes innovant. C'est la première fois que l'on va faire de l'interférométrie avec deux antennes sur un même satellite. Ces deux antennes sont distantes l'une de l'autre d'environ 10 mètres. Cette performance a été rendue possible grâce à la réalisation d'un mât porteur articulé ultra-stable, qui se déploie une fois le satellite sur son orbite. Le positionnement des antennes est maintenu avec une stabilité de l'ordre du micron. Ce concept permet de mettre en œuvre une très grande largeur de fais-



Figure 1 : Le lancement de SWOT – Source : Space X.



Figure 2 : L'intégration de SWOT sur son anneau de libération. Source : NASA.

- ceau pour recueillir des données. Plutôt que de faire des mesures juste sous la trace du satellite, SWOT aura des bandes de mesures d'environ 150 kilomètres de large sur la surface terrestre, ce qui permettra de couvrir la quasi-totalité du globe en 21 jours.

Côté français, c'est Thales Alenia Space qui fournit la technologie du radar, le RFU (*Radio Frequency Unit*). Les mesures seront à la fois plus précises avec une amélioration de 40 % dans l'erreur de mesure, et avec une résolution pouvant aller jusqu'à quelques dizaines de mètres carré. Les missions précédentes (Jason 1, 2 et 3) avaient une résolution de quelques kilomètres carré.

Le module NADIR est constitué des mêmes instruments que ceux des satellites JASON, parmi lesquels l'altimètre à double fréquence Poséidon fabriqué par Thales Alenia Space. Le module NADIR embarque par ailleurs 3 systèmes qui permettent de déterminer avec précision l'orbite de SWOT : le système DORIS, fabriqué par Thales, la charge utile de localisation GPSP (*GPS Payload*) et un ensemble de réflecteurs lasers LRA (*Laser Retro-reflector Array*) réalisés par le JPL (*Jet Propulsion Laboratory*). Il est complété par un radiomètre micro-ondes AMR (*Advanced Microwave Radiometer*) pour déterminer les conditions atmosphériques pendant les mesures et ainsi corriger ces dernières en fonction de divers paramètres dont l'humidité, le vent, la salinité.

L'instrument principal s'appelle KaRIn (Ka-band Radar Interferometer) ; il est fabriqué par le JPL. C'est un radar interférométrique à large fauchée qui comporte deux antennes SAR en bande Ka éloignées de 10 mètres l'une de l'autre, offrant une observation bi-dimensionnelle de 120 km de large constituée de deux fauchées de 60 km de large chacune, de part et d'autre de la verticale. La résolution horizontale est de l'ordre de 50 à 100 m, programmable de part et d'autre de la trace. La mesure d'altimétrie est déduite du déphasage entre les signaux reçus par les 2 réflecteurs. Ces deux fauchées assurent ainsi une couverture des lacs, des rivières, réservoirs et océans de la Terre à raison de deux fois tous les 21 jours.

Un flot de données à traiter et à stocker

La mission n'est pas simplement innovante dans sa dimension spatiale. SWOT va produire un flux de données considérable à la fois en précision et en quantité. Le satellite fonctionnera en effet comme une usine à données spatiales. Le centre de traitement de Toulouse du CNES recevra 8 téraoctets de données brutes par jour qui, une fois décompressées, représenteront un volume de 20 téraoctets par jour.

L'objectif final est de formater ces données pour les rendre plus accessibles et exploitables par les acteurs scientifiques et institutionnels, mais aussi par des utilisateurs privés, qui pourront les utiliser pour des applications et des services commerciaux. Plutôt que faire appel aux plateformes d'acteurs tiers comme Amazon, l'Agence spatiale française a préféré exploiter sa propre infrastructure informatique. Les premières données du satellite SWOT véritablement calibrées seront accessibles environ six mois après son lancement.

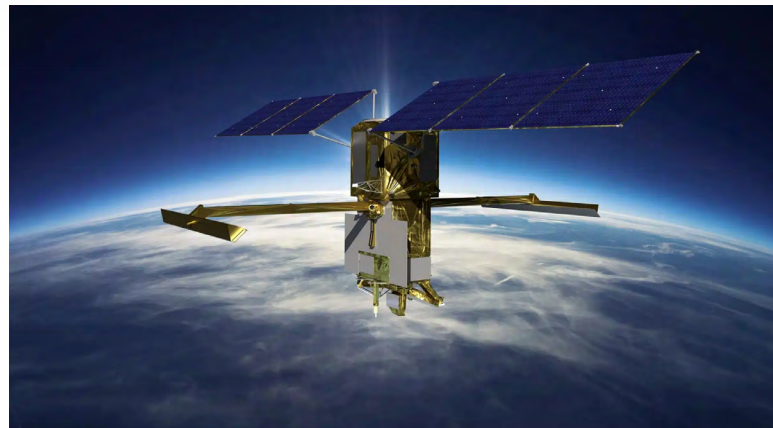


Figure 3 : Vue d'artiste du satellite SWOT en position d'observation. Source : CNES.

Une mission pour l'avenir

Après un lancement réussi, SWOT est entré dans une phase de mise à poste suivie d'une calibration des instruments afin de vérifier la précision des mesures. SWOT est la première mission spatiale qui étudiera la quasi-totalité de l'eau à la surface de la Terre. Cette mission contribuera à faciliter les décisions en matière de gestion de l'eau et fournira également de nouvelles informations sur le cycle de l'eau sur Terre. Les données du satellite aideront à mieux comprendre la montée du niveau des océans et l'évolution des côtes dans un climat en pleine mutation. ■ AD

Le TGV-M : la SNCF réalise les essais du TGV de nouvelle génération

Depuis décembre 2022, la SNCF a démarré la série d'essais conduisant à l'acceptation des nouveaux TGV baptisés TGV-M, prévue pour mi-2024. Ces nouveaux trains sont d'une conception entièrement inédite et atteignent un objectif de progrès technique ambitieux.

Une 6^{ème} génération

Le TGV-M est de fait la 6^{ème} génération de matériel depuis la version Paris Sud Est (PSE) de 1981, le TGV Atlantique de 1989, le TGV « Duplex » (à étage) de 1995, si l'on compte également l'Eurostar de 1994, le Thalys (PBKA - Paris Bruxelles Köln Amsterdam 1995) et le POS franco-allemand (Paris Ost Frankreich Süd Deutschland) de 2007.

C'est dire que cette version intègre à la fois les progrès techniques et industriels faits au long de ces 40 années d'une exploitation commerciale intensive (les rames Ouigo peuvent parcourir jusqu'à 700 000 km/an) et la moisson des records de vitesse successifs (380, 515, 574 km/h en 1981, 1989, 2007 ...).

Portant des objectifs ambitieux ...

De service avec des performances techniques permettant 320 km/h de vitesse commerciale. La signalisation nouvelle de standard européen ERTMS autorisera de porter par étapes le nombre de trains par heure de 12 aujourd'hui à 20 ;

De capacité portée à 700 voyageurs par rame en version haute densité, contre 640 pour Ouigo ou 540 pour le Duplex, ;

De flexibilité du design, le rendant plus apte à l'exportation (la moitié déjà du matériel à très grande vitesse au monde - hors Chine - est de conception française).

Voilà l'explication du « M » de ce TGV-M, pour « Modulaire » aussi en trafic « domestique » : en une journée à deux opérateurs on peut transformer une voiture de 1^o classe en 2^o et inversement. On passe d'une conception figée à une conception modulable à un rythme lent.

Un partenariat industriel renouvelé

Le paysage industriel a bien changé depuis la commande au groupe Alstom - Francorail MTE des 106 rames PSE : consolidation industrielle des constructeurs de matériel ferroviaire, extension obligatoire des appels d'offres au niveau européen.

Un concours a donc été ouvert pour construire un partenariat entre la SNCF donneur d'ordre et les fournisseurs industriels.

Alstom en a été le gagnant et dès lors un plateau commun constitué avec la SNCF s'est mis au travail pour transformer les idées « nice to have » en ingénierie et a traduit les deux feuilles de « souhaits » émises par chacune des parties en architecture d'un nouveau matériel.

L'enjeu financier est à la hauteur de celui lancé en 1976 pour le TGV PSE : 115 rames, un marché de plus de 1,5 Mrd€.

L'industriel doit livrer un matériel 30 % moins cher que le matériel TGV actuel, consommant 20 % d'énergie en moins, avec un coût de maintenance réduit lui aussi de 20 %.

Des progrès techniques multiples

Se fixer de tels objectifs aura été rendu possible par la conjonction de multiples améliorations :

- Travaux d'optimisation de l'aérodynamisme menés dans le sillage des mesures faites au cours des records de vitesse de 1989 et surtout 2007, des observations faites lors de freinages opérés à plus de 500 km/h, des performances de la chaîne de traction qui fait appel désormais à des moteurs électriques asynchrones sans balais, à de nouveaux composants électroniques de puissance et à une com-



Figure 1 : Rame de TGV-M (Source : aunistv/corentin.cousin).

mande nouvelle des moteurs de traction (la masse de ces derniers est passée des 1515 kg pour développer 530 kW du premier TGV à 1000 kg pour 1000 kW ...). La rame TGV-M est donc plus légère, ce qui améliore son rendement énergétique.

- Progrès dans la conversion de courant pour les auxiliaires (climatisation, éclairage, commande des portes ...), leurs performances et leur réduction de volume permettant de rendre chaque remorque indépendante de la voisine et de simplifier leur structure. Pour arriver à n'avoit au « catalogue » que trois standards pour le « squelette mécanique de ces « caisses » voyageurs. Le ferroviaire s'approche ainsi du concept automobile de « plateforme » de production et s'adapte mieux pour l'exportation aux besoins diversifiés des clients tels que des trains plus courts à 7 ou plus longs à 9 voitures. Ainsi ne sera-t-on pas étonné de retrouver outre Atlantique une architecture parente de celle du TGV-M dans les rames « Acela » du Corridor Boston – Washington des Etats Unis qu'Alstom livrera cette année.

- Au nombre des fruits de la standardisation aussi, un bilan carbone du trajet ramené à la place réduit de 35 %. De plus grâce aux processus de fabrication mieux automatisables, l'ensemble est fabriqué à partir de matériaux recyclables à 97 %.

- La numérisation enfin est à l'œuvre, qui permet la multiplication des capteurs, analysant en permanence les fonctions essentielles. La quantité de données stockée dans les mémoires est impressionnante, plusieurs giga-octets par heure de fonctionnement. Leur traitement améliorera la fiabilité d'exploitation, mais surtout autorisera le passage d'une maintenance déjà préventive à une maintenance prédictive.

L'atteinte de tous ces objectifs est en cours de vérification et d'homologation depuis l'automne 2022 sur l'anneau d'essai de Velim en Tchéquie, permettant déjà 200 km/h sur sa boucle de 13 kilomètres, avant des essais à venir sur le réseau français lui-même. Complétés par des parcours « d'endurance » cette fois, pour atteindre, avant la mise en service commerciale de la série prévue mi-2024, un total proche d'un million de kilomètres cumulés...

L'auteur remercie Jean-Marie METZLER pour son aide et ses précieuses informations. ■ DM