



Figure 1 : Lancement d'un vol Apollo. Crédits NASA.

➤ Mission Artemis : on va remarquer sur la Lune

Artemis II sera la deuxième mission du programme Artemis. La mission doit amener un équipage d'astronautes américains et canadiens jusqu'à l'orbite lunaire avant de revenir sur Terre, tout comme Apollo 8 il y a plus de cinquante ans.

Les ambitions de la décennie 70

Le 21 juillet 1969, l'homme faisait ses premiers pas sur la Lune. Le monde entier suivait ce grand pas pour l'humanité. La route était ouverte et on envisageait déjà une installation permanente un peu à l'image de ce qu'est aujourd'hui la Station spatiale internationale ou la base polaire Concordia. Il n'y avait aucun doute là-dessus... La Lune et Mars étaient à notre portée immédiate.

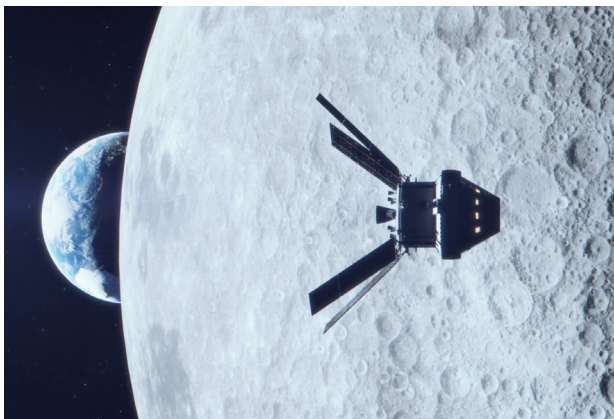
La mission Apollo 8, lancée le 21 Décembre 1968, fut le premier vol habité à quitter l'orbite terrestre pour la Lune. Les dirigeants de la NASA redoutaient un coup d'éclat des Soviétiques pour la fin de l'année et décidèrent de courir le risque. Les astronautes firent au total dix révolutions autour de la Lune. Durant ce vol, ils réalisèrent de nombreux clichés de la Lune dont le premier lever de Terre. Apollo 8 a permis pour la première fois à un homme d'observer directement la face cachée de la Lune.

En 1975, la mission Apollo 17 transporta Eugene Cernan et Harrison Schmitt, qui seront les derniers hommes à avoir foulé le sol lunaire.

La pression politique a suivi le même chemin descendant que l'économie, et les projets martiens et lunaires ont été reportés de plusieurs décennies. Les équipes furent dispersées et le savoir-faire oublié.

Saturn un lanceur d'une puissance inégalée pour l'époque

Les débuts de la famille de lanceurs spatiaux Saturn sont antérieurs au programme Apollo (figure 1) et à la création de la NASA. Au début de 1957, le ministère américain de la Défense (DOD) identifie un besoin pour un lanceur lourd, permettant de placer en orbite basse des satellites de reconnaissance et de télécommunications pesant jusqu'à 18 tonnes. L'armée de terre lui demande de concevoir un lanceur permettant de répondre à la demande du DOD. Von Braun propose un engin, qu'il baptise « Super-Jupiter », dont le premier étage, constitué de 8 étages regroupés en fagot autour d'un étage Jupiter, fournit les 680 tonnes de poussée nécessaires pour lancer les satellites lourds. La course à l'espace, qui débute fin 1957, décide le DOD, après examen de projets concurrents, à financer en août 1958 le développement de ce nouveau premier étage rebaptisé Juno V puis finalement Saturn. Dernier représentant de la famille de fusées Saturn, Saturn V est le troisième lanceur mettant en œuvre des moteurs brûlant le mélange cryogénique performant d'hydrogène et d'oxygène liquides. Cinquante ans après avoir été



■ Figure 2 : Vue d'artiste du module Orion autour de la Lune . Crédits NASA.

utilisé, il demeure le plus puissant lanceur jamais développé au monde, malgré les efforts développés en secret par les Soviétiques avec la fusée N-1, alors qu'ils cherchaient à envoyer l'un des leurs sur la Lune avant leurs rivaux américains.

Les vaisseaux du programme Apollo furent envoyés vers la Lune par le lanceur géant Saturn V. Lourde d'un peu plus de 3 000 tonnes, haute de 110,6 m et large de 10,1 m à sa base, cette fusée était capable de placer 140 tonnes en orbite terrestre basse avec une charge utile de 45 tonnes vers la Lune, soit le poids cumulé du module lunaire, du module de commande et du module de service.

Artemis : Retourner sur la surface lunaire et y maintenir une présence humaine continue

Ce programme Artemis¹, reprend certes du déjà fait. Mais la principale différence est la sécurité de vol pour les passagers. La contrainte internationale a poussé le programme Apollo à accélérer le processus et à effectuer des vols dans des conditions de sécurité réduites. On se souvient de l'alunissage d'Apollo 11. L'ordinateur de bord avait une puissance de calcul inférieure à celle d'un smartphone bas de gamme, et Neil Armstrong a repris le pilotage en mode manuel pour finir sur un site non repéré au préalable. Le programme Artemis, pour lequel la concurrence internationale est moins pressante se fait dans des conditions de sécurité draconiennes.

Un lancement à nouveau réussi

Artemis 1 est le premier test en vol des systèmes d'exploration de l'espace lointain de la NASA. Il comprend le vaisseau spatial Orion (figure 2), le lanceur Space Launch Système (SLS) et les systèmes

de contrôle au sol situés au Centre spatial Kennedy en Floride. Il constitue le premier maillon d'une série de missions de plus en plus complexes. Artemis I est un essai en vol sans équipage qui fournira une base de données pour les missions humaines à suivre.

Cette première mission est partie le 16 novembre 2022 depuis le « Kennedy Space Center » en Floride, pour une durée de 25 jours, 10 heures et 53 minutes. Après avoir parcouru 2,3 millions de kilomètres, le module Orion s'est posé dans l'océan Pacifique le 11 décembre 2022.

Après le lancement, les deux boosters à propergol solide sont retombés dans l'océan Atlantique à environ 225 km au large de la côte de la Floride. Ensuite, l'étage central et l'adaptateur d'étage du lanceur sont retombés dans l'océan Pacifique à l'est d'Hawaï. Enfin, l'étage de propulsion cryogénique intérimaire s'est placé en orbite solaire après s'être séparé du vaisseau spatial Orion. Vers la fin de la mission, le module de service européen attaché à Orion s'est séparé du module d'équipage avant d'entrer dans l'atmosphère terrestre et se consumer lors de la rentrée au-dessus de l'océan Pacifique.

Le module Orion

Le vaisseau spatial Orion (figure 3) est conçu pour transporter quatre astronautes dans l'espace et est actuellement le seul engin spatial capable de voler avec un équipage et revenir du voisinage de la Lune. Orion est composé de trois éléments principaux et de divers sous-systèmes. Les éléments principaux sont :

- le module d'équipage, qui est l'endroit où les astronautes vivent et travaillent ;
- le module de service, fourni par l'Agence Spatiale Européenne, qui fournit l'énergie, la propulsion, et le contrôle thermique ;



■ Figure 3 : Le vaisseau Orion en cours d'assemblage. Crédits NASA.

¹ Le lecteur se référera au Gros Plan sur Artemis réalisé dans la REE 2020-5. Le programme Artemis : regain d'intérêt des puissances spatiales pour l'exploration de la Lune (S.Debaille).

- le système de sauvetage d'urgence, qui peut porter l'engin spatial et l'équipage en sécurité dans le cas d'un accident pendant le lancement ou la montée en orbite.

Le système de lancement (SLS).

Le système de lancement spatial SLS (Space Launch System) de la NASA est actuellement le lanceur plus puissant au monde. Il est constitué des éléments suivants :

- un étage central qui abrite les réservoirs de propergol, les moteurs et les systèmes de pilotage ;
- quatre propulseurs à ergols liquides alimentés par de l'hydrogène liquide et de l'oxygène liquide ;
- deux propulseurs d'appoint à combustible solide qui fournissent la majorité de la poussée et de la direction de la fusée pendant les deux premières minutes de vol ;
- un étage intermédiaire alimenté par de l'hydrogène liquide et de l'oxygène liquide pour la propulsion dans l'espace après séparation de l'étage central.

Le SLS est conçu spécifiquement pour les missions habitées dans l'espace lointain et particulièrement pour propulser le vaisseau spatial Orion vers la Lune, soit à une distance environ 1 000 fois supérieure à la distance nécessaire pour rejoindre la Station spatiale internationale si l'on compare la distance Terre-Lune et l'altitude orbitale de l'ISS.

Les objectifs d'Artemis 1

Cette première mission Artemis 1 a permis de valider les performances du module Orion et du lanceur SLS et de démontrer la possibilité d'orbiter autour de la Lune puis de revenir sur Terre (figure 4). Ce vol ouvre la voie à de futures missions dans le voisinage lunaire et sur la surface.

Au cours de la mission Artemis 1, les systèmes de navigation et les communications d'Orion ont été testés avec succès. La mission a également permis de valider, lors d'un retour de la Lune, les capteurs de rayonnement, le blindage extérieur de protection du champ magnétique terrestre qui s'avère être le plus grand bouclier thermique du monde.

La prochaine étape : l'envoi de trois passagers

Artemis 2 sera la deuxième mission du programme Artemis. La mission doit amener un équipage d'astronautes américains et canadiens jusqu'à l'orbite lunaire avant de revenir sur Terre. L'objectif est de tester le fonctionnement du vaisseau spatial Orion qui sera mis en orbite par le lanceur lourd SLS.

Ce premier vol avec équipage est prévu vers mai 2024. Au cours de cette mission, le vaisseau Orion accomplira une trajectoire circumlunaire. Elle sera ainsi la première mission avec un équipage lancé vers la Lune depuis Apollo 17 en décembre 1972, il y a plus de 50 ans.

La mission doit être suivie par Artemis 3, dont l'objectif est de déposer deux astronautes à la surface de la Lune en 2025. ■ AD

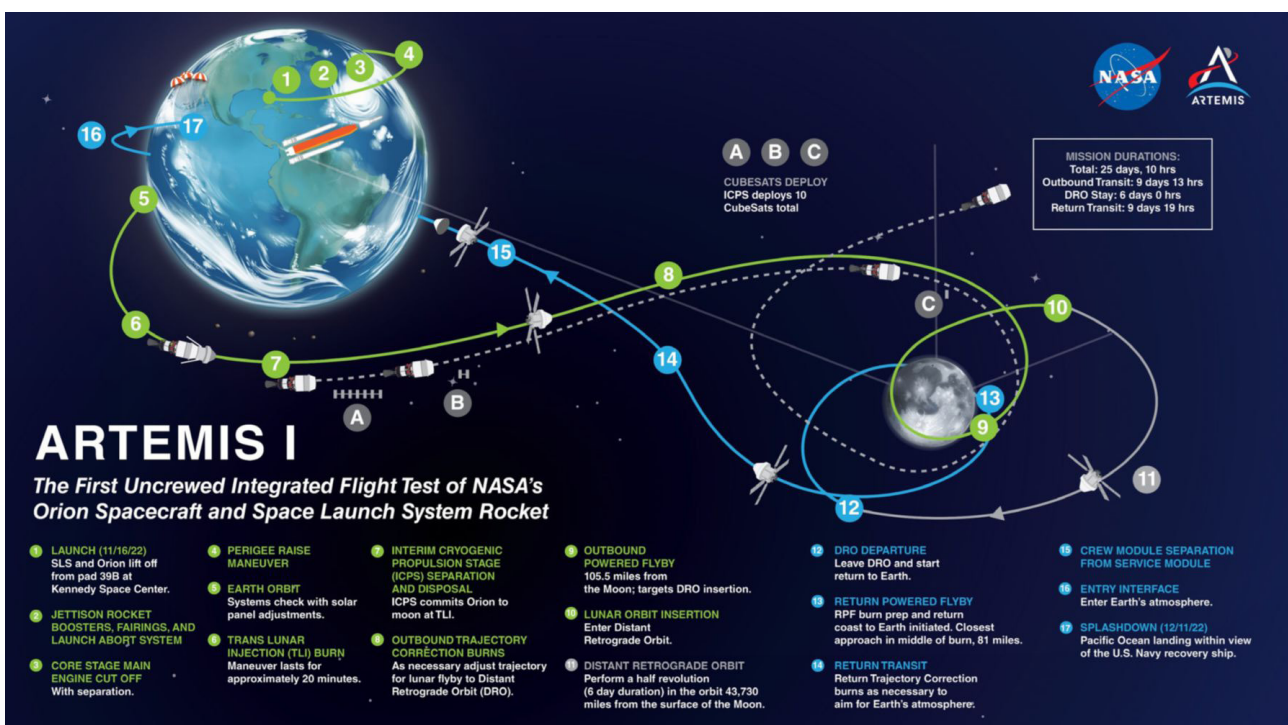
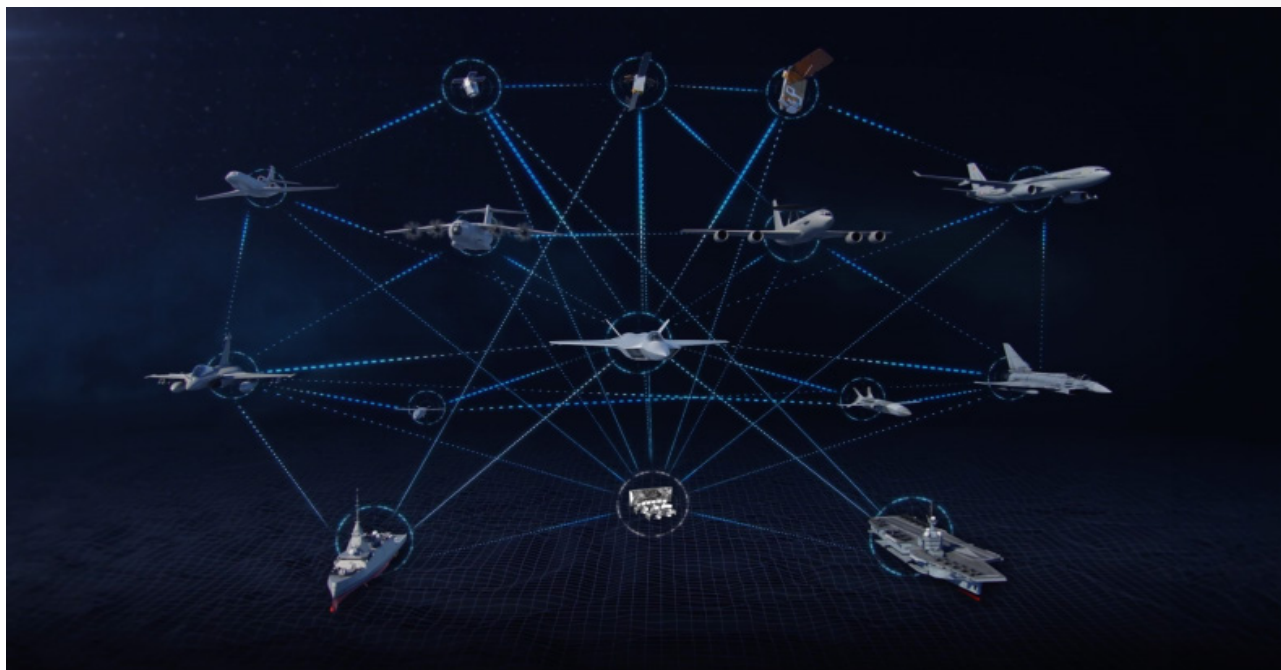


Figure 4 : Plan de vol de la mission Artemis 1. Crédits : NASA.



➤ Notification d'une nouvelle phase du projet SCAF

Dassault et Airbus ont signé le 1^{er} décembre l'accord pour la conception d'un démonstrateur pour l'avion de combat du futur.

Accumulation des retards du programme

Nous avons, il y a un an, consacré une actualité au futur système de combat européen dont nous allons rappeler dans ce qui suit quelques étapes. Le 13 juillet 2017 un Conseil des ministres franco-allemand se tient à Paris et entérine l'intention politique. La France et l'Allemagne conviennent de développer un système de combat aérien européen, sous la direction des deux pays, pour remplacer leurs flottes actuelles d'avions de combat sur le long terme. À l'époque ni les industriels, ni les militaires de part et d'autre du Rhin ne sont dans la boucle.

C'était une annonce purement politique : il fallait trouver une annonce forte avec l'Allemagne. Ce fut une surprise car la France était, depuis 2014, engagée dans un autre programme avec le Royaume-Uni. Depuis, le Brexit et les difficultés budgétaires britanniques ne favorisaient pas ce programme, mais les deux entreprises Dassault Aviation et BAE avaient signé un accord pour développer un drone de combat, à partir de leurs propres démonstrateurs Neuron et Taramis. Il a fallu faire converger politiques, industriels et militaires des deux, puis des trois pays même si l'Espagne qui est arrivée après pesait moins lourd. La situation était bloquée depuis août 2021, lorsque Paris, Berlin et Madrid s'étaient mis d'accord pour financer, à hauteur de

3,6 milliards, une nouvelle phase (dite 1B) des études de développement d'un démonstrateur. Mais, pour aller de l'avant, il fallait un accord entre industriels. Or Le Scaf n'est pas seulement un projet d'avion de combat. C'est, comme son nom l'indique, un système qui comprendra plusieurs éléments opérant ensemble, un avion piloté (*next generation fighter*, NGF), des drones capteurs, des missiles et enfin des liaisons dites de combat cloud. Du fait de son expertise aéronautique, la France est en position de leader, notamment le NGF dont Dassault est le maître d'œuvre. Airbus Defence & Space, Safran, Thales, MBDA, MTU sont également impliqués. Mais beaucoup de désaccords industriels entre les parties allemandes et françaises ont provoqué trois à quatre ans de retard sur le planning initial. En juillet 2022, Eric Trappier PDG de Dassault Aviation indiquait que le différend entre Dassault et Airbus sur la répartition des responsabilités au sein du programme d'avion de combat de nouvelle génération (NGF), pilier central du Système de combat aérien du futur (Scaf), devait se régler d'ici à la fin de l'année 2022. Les trois pays avaient désigné Dassault Aviation comme le maître d'œuvre du NGF, reconnaissant son leadership, ses compétences et ses soixante-dix ans d'expérience dans le développement d'avions de combat. La coopération s'est enrayée à cause des commandes de vol du NGF, véritable système nerveux de l'avion qui assure sa manœuvrabilité. Une spécialité de Dassault Aviation que prouve la manœuvrabilité du Rafale, alors qu'Airbus souhaite un partage complet du travail dans ce domaine ultrasensible, ce qui n'était pas acceptable pour Dassault Aviation.

Signature de la nouvelle phase en décembre

La nouvelle étape industrielle a donc été franchie. Dassault et Airbus ont signé le 1^{er} décembre 2022, l'accord pour la phase dite



- 1B de la conception d'un démonstrateur pour l'avion de combat du futur. Politiquement et symboliquement, elle donne de l'air à la coopération franco-allemande, malmenée depuis plusieurs mois en particulier à cause de la guerre en Ukraine qui a révolutionné la politique allemande en matière d'armement. L'Allemagne en particulier envisage d'acquérir des F-35 de Lockheed. Ce qui a débloqué cette nouvelle phase, hormis les volontés politiques, c'est que Dassault a obtenu satisfaction sur trois points fondamentaux. Dassault se voit ainsi garantir son rôle de maître d'œuvre du NGF, il conservera la propriété industrielle de ses technologies en particulier celles des commandes de vol et il pourra exporter librement l'avion avec l'accord de l'État. La phase 1B durera deux à trois ans et ce n'est qu'alors, en 2025, qu'un nouveau contrat décidera du développement puis de la construction d'un démonstrateur. Il faudra ensuite entre quinze et vingt ans pour mettre au point l'ensemble du système, pour une entrée en service opérationnel vers le milieu des années 2040.

Les visions différentes de la France et de l'Allemagne

La France défend deux impératifs dans le projet du Scaf : pouvoir emporter l'armement nucléaire et pouvoir apponter sur le porte-avions qui succédera au Charles de Gaulle. L'Allemagne n'est pas concernée par la version navale de l'avion et les armes nucléaires américaines stationnées sur son territoire seront embarquées sur des F-35 américains, dont elle a signé la commande. Malgré cela, l'accord conclu autour du Scaf devrait remettre un peu de confiance dans une relation bilatérale au plus bas. Outre les différends économiques liés à la crise énergétique, la France avait constaté avec déception l'abandon de projets franco-allemands de défense, comme ceux de l'hélicoptère Tigre standard 3 ou du patrouilleur maritime MAWS. La proposition de Berlin le mois dernier de soutenir un bouclier antimissile européen sans inclure la France avait rajouté à la déception.

Les visions différentes des industriels

L'une des questions les plus débattues chez les industriels, politiques et militaires impliqués est de déterminer quel est l'élément central du Scaf, l'avion (NGF) en lui-même ou le cloud de combat, c'est-à-dire les communications intelligentes qui permettront au système de fonctionner en reliant différents objets volants ou au sol. Du point de vue de Dassault, c'est évidemment l'avion. La cohérence du système de mission passe par l'intégration de l'ensemble des capteurs à l'intérieur de la cellule du NGF. Côté Airbus et dans d'autres cercles, y compris militaires, on croit au contraire que l'enjeu principal est celui du cloud de combat et des très hauts débits de communications, notamment pour l'imagerie. L'efficacité du Scaf ne reposera pas essentiellement sur celle de l'avion NGF. Il est évidemment difficile de trancher ce débat d'autant qu'en 2040 il est très probable que les menaces aériennes auront évolué et le projet global devra en tenir compte. ■ ML

➤ Radars pour l'automobile : Des (r)évolutions technologiques se préparent.

La start-up Greenerwave (mais est-ce encore réellement une start-up ?) et l'équipementier Plastic Omnium ont annoncé à la fin de l'année 2022 qu'ils s'associaient pour concevoir et produire une nouvelle génération de radars automobiles permettant des résolutions de plusieurs dizaines de fois supérieures à celles des radars actuels. La mise sur le marché est actuellement prévue pour 2026.

Un secteur automobile en pleine mutation

Les évolutions des radars pour l'automobile avaient fait l'objet, à la fin de l'année 2020, d'un article de synthèse dans la REE ². Les innovations présentées par Greenerwave viennent bousculer encore un peu plus un secteur automobile en pleine mutation. Les enjeux économiques sont importants puisqu'il est probable qu'à terme tous les véhicules mis sur le marché devront être équipés de radars.

L'histoire de Greenerwave

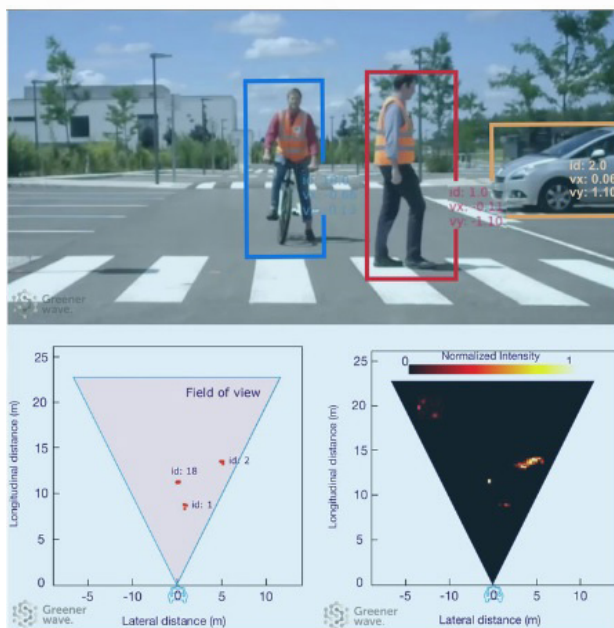
Mais revenons un peu sur l'histoire de Greenerwave qui est celle d'une belle « success story » qui plus est « made in France ». Greenerwave a été fondée en 2015 par Mathias Fink, physicien auréolé de nombreuses et prestigieuses distinctions et récompenses ³, et Geoffroy Lerosey ancien chercheur au CNRS. Tous les deux sont issus de l'Institut Langevin ⁴, né en 2009 de la fusion de deux laboratoires de l'ESPCI Paris : le laboratoire « Ondes et Acoustique » et le laboratoire d'Optique Physique.

L'ambition qui a présidé à ce rapprochement était de réunir dans un même Institut des chercheurs intéressés par tous les types d'ondes possibles : ondes mécaniques (ondes acoustiques, élastiques et sismiques, vagues), ondes électromagnétiques (radiofréquences, micro-ondes, TéraHertz) et optique (infrarouge et visible). L'objectif affiché est de comprendre les mécanismes de propagation de ces différents types d'ondes dans les milieux les plus complexes et de tirer parti de cette meilleure compréhension pour concevoir des instruments originaux pour la manipulation de ces ondes et l'imagerie de ces milieux. L'institut Langevin s'est doté d'un pôle Innovation qui accompagne les chercheurs dans leurs démarches de valorisation. Celles-ci trouvent notamment leur traduction dans le dépôt de brevets et la création de start-ups. Les dix entreprises nées des recherches menées à l'Institut emploient plus de 350 personnes. Greenerwave est l'une d'elles.

² <https://see.asso.fr/evolution-des-radars-pour-les-vehicules-automobiles/>

³ https://fr.wikipedia.org/wiki/Mathias_Fink

⁴ <https://www.institut-langevin.espci.fr/home>



■ Figure 1 : Illustration des performances attendues en matière de résolution (source : site internet de Greenerwave).

Utilisation de métamatériaux et métasurfaces

Greenerwave a donc pu bénéficier dès son origine des compétences scientifiques de ses créateurs sur des domaines scientifiquement complexes mais porteurs d'innovations tels que les techniques de retournement temporel et l'utilisation des métamatériaux et métasurfaces. Greenerwave affirme sur son site internet ⁵ que : « *Les solutions conventionnelles en ondes millimétriques reposent sur des circuits RF à faibles rendements. Tirant parti du contrôle des ondes et de l'électronique standard, nous révolutionnons la formation de faisceaux, atteignant des performances inégalées à faible puissance et ouvrant la voie à une connectivité haut débit omniprésente.* »

Parmi les premières réalisations notables de Grennerwave figurent des antennes plates orientables intelligentes pour les liaisons satellites. Ces premières réalisations ont été soutenues financièrement par la DGA (Direction Générale de l'Armement) et l'AID (Agence de l'Innovation de Défense). La technologie d'antenne développée, basée sur des métasurfaces électroniquement reconfigurables, a été transposée de la bande 5 GHz du premier prototype de laboratoire en 2018 à la bande Ka émission, 27-31 GHz. Une antenne plate reconfigurable de 30cm*30cm*3cm a été développée, avec une électronique de commutation de faisceau à 100kHz. Cette antenne, aux propriétés uniques (bande passante, polarisation, nombre de faisceaux, pilotage logiciel) a finalement été testée sur le site de Bruz de la DGA-MI, avec succès. Une première liaison satellite a été effectuée. Dans le rapport d'essai, il a été souligné la facilité d'utilisation de l'antenne et la vérification de nombreuses

propriétés telles que la possibilité de formation de faisceaux électroniquement reconfigurables.

Ces développements peuvent aussi trouver des applications pour la conception de nouvelles antennes en bande millimétrique pour les réseaux 5G. La mise au point de radars imageurs 4D pour l'automobile en est une autre.

Radars automobiles 4D

Les radars automobiles actuels sont plutôt des radars 3D : ils mesurent distance, direction et éventuellement la vitesse radiale par effet Doppler. Dans les radars 4D on va ajouter l'information sur la hauteur des objets détectés. On obtient donc un capteur capable de concurrencer les lidars en termes de performances, mais fonctionnant par tous les temps et économiquement plus compétitif. Grâce à la maîtrise de la formation de faisceaux multiples et auto-adaptatifs, les performances annoncées pour ce futur radar sont les suivantes : champ de vision à 180°, résolution angulaire inférieure à 0,5° et portée de 300 m avec un fonctionnement dans la bande des 77-81 GHz dédiée aux radars automobiles depuis l'année 2015 (figure 1).

L'alliance avec l'équipementier Plastic Omnium semble donc toute naturelle, compte tenu du savoir-faire de cette entreprise en matière de réalisation de grandes pièces telles que des pare-chocs. Le radar développé par Greenerwave d'une longueur de 60 cm sera inséré dans les futurs pare-chocs (figure 2). Les tests d'intégration ont déjà commencé. Plastic Omnium va apporter en outre sa connaissance de l'écosystème des constructeurs automobiles dans un domaine où la concurrence internationale sera rude et où la moindre supériorité technologique doit être savamment entretenue.

Pour en savoir plus, nous vous suggérons de visionner les deux vidéos ⁶ (mentionnées dans la note de bas de page) où Geoffroy Lerosey intervient avec beaucoup de pédagogie pour présenter cette innovation. ■ JC

⁶ https://www.youtube.com/watch?v=NG4FOkm_NbE et <https://www.dailymotion.com/video/x8c7rmw>



■ Figure 2 : Le nouveau radar en cours de tests (source : Photo publiée par Ouest France le 24/11/2022).

⁵ <https://greenerwave.com/>