

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

NOSTRADAMUS



Le centre français de recherche aérospatiale

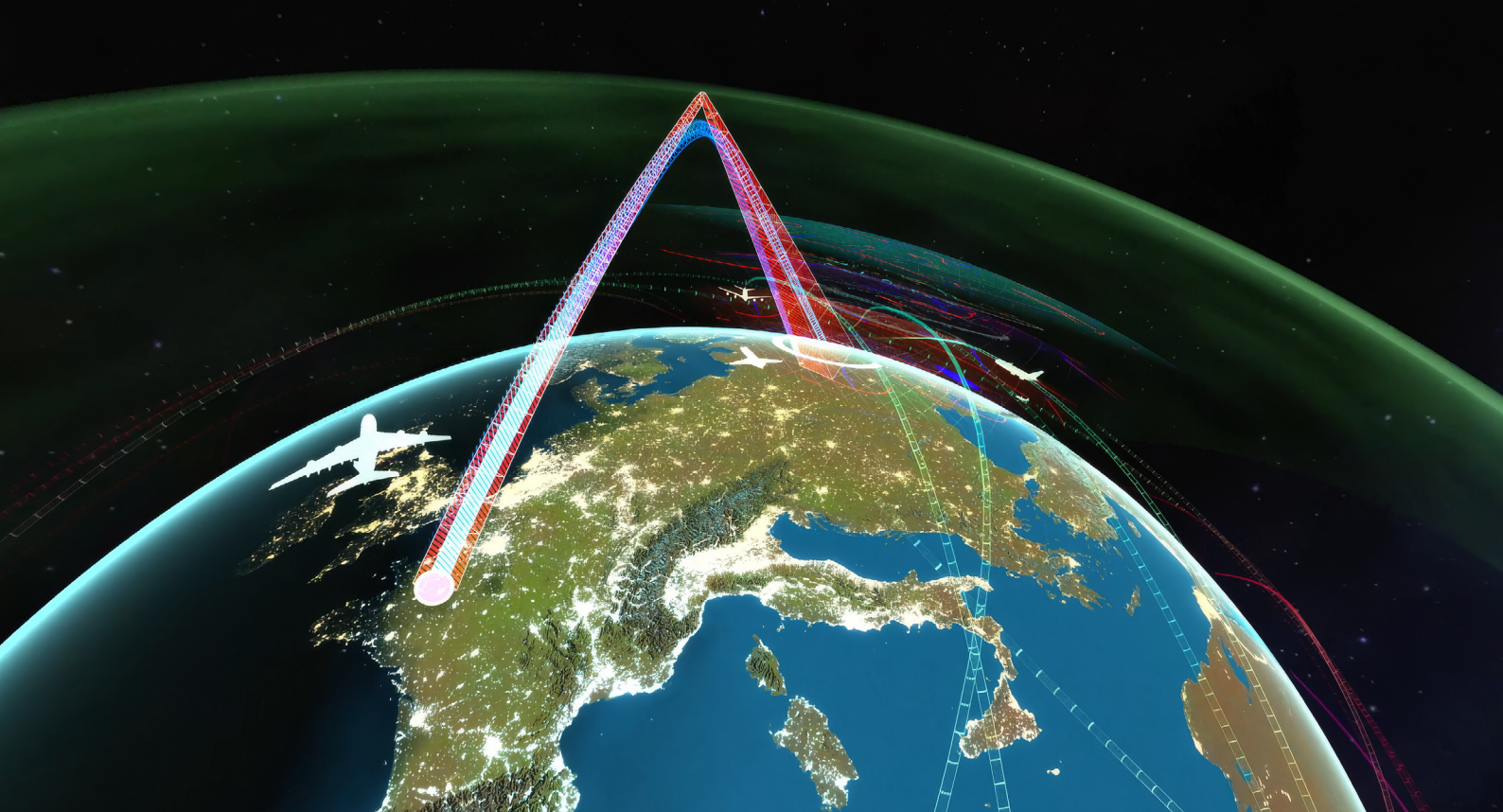


L'ONERA, acteur central de la recherche aéronautique et spatiale, emploie plus de 2200 personnes. Placé sous la tutelle du ministère des Armées, il dispose d'un budget de 336 millions d'euros (2024), dont plus de la moitié provient de contrats d'études, de recherches et d'essais.

Expert étatique, l'ONERA prépare la défense de demain, répond aux enjeux aéronautiques et spatiaux du futur, et contribue à la compétitivité de l'industrie aérospatiale. Il maîtrise toutes les disciplines et technologies du domaine.

Tous les grands programmes aérospatiaux civils et militaires en France et en Europe portent une part de l'ADN de l'ONERA : Ariane, Airbus, Falcon, Rafale, missiles, hélicoptères, moteurs, radars...

Reconnus à l'international et souvent primés, ses chercheurs forment de nombreux doctorants.



Principe de fonctionnement du radar transhorizon NOSTRADAMUS. (© ONERA - Activ'company)

VERS UNE SURVEILLANCE TRÈS LONGUE PORTÉE DE LA TRÈS HAUTE ALTITUDE

Le ministre des Armées, Sébastien Lecornu, a dévoilé, le 17 juin 2025, durant le Salon du Bourget la stratégie française de très haute altitude (THA), un espace compris entre 20 et 100 km d'altitude, devenu un nouvel enjeu de conflictualité. Cette dernière s'articule autour de trois objectifs : détecter, intercepter et opérer. Pour le volet détection, le ministère relance ses capacités d'alerte avancée. Le programme Nostradamus, radar transhorizon expérimental développé par l'ONERA pour le compte du ministère des Armées, sera modernisé dès 2025. Grâce à ses 12 hectares d'antennes en Normandie, il permettra la détection d'objets évoluant dans la THA, qu'ils soient hypervéloces ou au contraire très lents, comme les ballons stratosphériques.

Depuis de nombreuses années, l'ONERA (Office national d'études et de recherches aérospatiales), étudie les technologies qui permettent de voir très loin, (plusieurs milliers de km) et dans la très haute altitude (THA). Ces radars, dits « transhorizons » car ils permettent de voir au-delà de l'horizon radioélectrique, utilisent les propriétés de réflexion des ondes électromagnétiques sur les couches ionosphériques (jusqu'à 250 km altitude) pour détecter tous types d'aéronefs y compris les aéronefs furtifs et hypersoniques. Ils permettent d'accéder à des zones complémentaires des radars classiques de défense aérienne et des systèmes satellitaires.

Le fonctionnement optimal de ces radars nécessite une connaissance fine des propriétés de l'ionosphère. Dans ce domaine, l'ONERA a acquis une expertise rare et internationalement reconnue.

La construction du démonstrateur Nostradamus débute dans les années 2000 avec le soutien de la DGA. Il est constitué de 3 branches de 400 mètres, de 3 tunnels de 140 mètres et de 300 antennes de 7 mètres par 6 mètres. En s'appuyant dans sa version bistatique, sur un émetteur de TDF, ce moyen a

donné à l'ONERA un outil unique en Europe pour travailler sur la technologie HF. La modernisation entreprise ces dernières années, sur fonds propres ONERA, va permettre, grâce au passage d'une architecture analogique à une architecture numérique, d'accroître les performances du système.

La version analogique avait déjà démontré des résultats suffisamment convaincants pour répondre à la question posée. L'ONERA a ainsi proposé au ministère des Armées une phase d'expérimentation qui permettra de valider les nouvelles capacités, face à des menaces de référence (ballon, missiles hypersoniques, avions furtifs etc...). Nostradamus possède l'avantage d'être disponible et utilisable dans des délais courts.

Il est à noter que ces techniques HF se développent fortement à travers le monde, notamment en Europe, comme en atteste le projet du Fond Européen de Défense iFURTHER permettant d'étudier la mise en réseau de systèmes actifs et passifs HF. L'ONERA est le leader technique de ce projet.

A l'instar du système de détection et d'analyse satellitaires GRAVES, qui a démontré la capacité de l'ONERA à fournir et faire évoluer des outils spécifiques au profit des armées, Nostradamus devrait suivre la même stratégie de développement.

NOSTRADAMUS : VOIR TRÈS LOIN, DE LA BASSE À LA TRÈS HAUTE ALTITUDE

Le radar NOSTRADAMUS est un radar transhorizon à ondes de ciel. Il a été développé par l'ONERA (Office national d'études et de recherches aérospace) grâce au soutien de la DGA. NOSTRADAMUS est principalement destiné à la surveillance aérienne et balistique à très longue distance. Il s'agit d'un démonstrateur technologique conçu pour étudier et valider les technologies de détection lointaine et est utilisé à des fins de recherche. Il a été pensé et est géré par le département Électromagnétisme et Radar (DEMR) de l'ONERA. Le projet est d'un grand intérêt stratégique pour la souveraineté nationale, car il permet de disposer d'un système de détection précoce totalement autonome et a permis de renforcer l'expertise française dans le domaine des radars haute fréquence (HF).

CAPABLE DE DÉTECTER UNE CIBLE MOBILE AU-DELÀ DE L'HORIZON

Contrairement aux radars classiques qui sont limités en portée par la courbure de la terre (quelques centaines de km), NOSTRADAMUS utilise la bande HF (3 à 30 MHz), qui présente une caractéristique intéressante en permettant aux ondes de se réfléchir sur l'ionosphère. Ce phénomène, appelé propagation par "onde de ciel", permet au radar de détecter des cibles bien au-delà de l'horizon, sur plusieurs milliers de kilomètres. On peut comparer cela au billard où les ondes électromagnétiques sont comme des boules de billard qui rebondissent sur l'ionosphère comme sur une bande et permettent la détection jusqu'à plusieurs milliers de kilomètres.

NOSTRADAMUS permet la **surveillance en continu d'un très vaste volume aérien**, pouvant atteindre plusieurs centaines de milliers de km². Il est capable de détecter des cibles mobiles même très rapides à grande distance. Ce radar dispose de deux modes : monostatique ou bistatique.

NOSTRADAMUS a une portée de plusieurs milliers de kilomètres. La détection se fait à toute altitude, y compris très basse ou très haute. Grâce à sa loi d'éclairement qui évite la courbure terrestre, il illumine les objets d'intérêt par le haut de manière permanente, permettant des détections sur les couches de la haute altitude et offrant un outil complémentaire pour la détection de véhicules hypersoniques ou à très haute altitude.

Le radar détecte les cibles mobiles en utilisant le filtrage Doppler pour gérer le fort écho de fouillis provenant du sol ou de la mer.

DEUX MODES DE FONCTIONNEMENT COMPLÉMENTAIRES

NOSTRADAMUS a été conçu pour fonctionner en radar monostatique ou bistatique, avec des antennes d'émission et de réception séparées.

Mode Monostatique : les parties émettrices et réceptrices du radar sont situées au même endroit. Le démonstrateur NOSTRADAMUS est principalement un radar monostatique, implanté sur un site militaire en région Centre-Val de Loire. Sa portée atteint plusieurs milliers de kilomètres.

Mode Bistatique : les sites d'émission et de réception ne sont pas au même endroit. Le système bistatique associé à NOSTRADAMUS est appelé PEAS. PEAS se compose d'une partie émettrice située dans l'Indre (utilisant l'antenne Alliss, gérée par TDF) et d'une partie réceptrice qui correspond au radar NOSTRADAMUS situé dans le Centre Val de Loire. L'utilisation de l'antenne Alliss en mode bistatique allonge considérablement la portée du radar PEAS, qui peut observer bien plus loin que NOSTRADAMUS en mode monostatique.

Les versions monostatique (NOSTRADAMUS seul) et bistatique (PEAS) peuvent fonctionner simultanément, ce qui permet d'obtenir une **couverture extrêmement importante**. Des expérimentations ont montré la capacité de NOSTRADAMUS à observer toute l'activité aérienne en Europe (360°) en mode monostatique, et l'utilisation du mode bistatique (PEAS) a permis de surveiller des zones au-delà de l'Europe.

NOSTRADAMUS AU CŒUR DU PROJET EUROPÉEN iFURTHER

Les technologies développées avec NOSTRADAMUS s'inscrivent dans une vision stratégique d'envergure européenne. La France est en pointe dans le développement des réseaux HF, et NOSTRADAMUS constitue le cœur du projet iFURTHER – A Cognitive Network of HF Radars for Europe Defence.

Ce projet européen traite de la détection à longue portée (au-delà de l'horizon) aérienne et maritime en développant de nouvelles technologies destinées à être intégrées dans un réseau d'infrastructures HF fonctionnant de manière collaborative.

L'objectif est de contribuer au développement d'une capacité de défense européenne persistante et à très large couverture, pour surveiller les domaines aérien et maritime en fournissant des solutions concrètes et évolutives.

Ce programme vise à créer un réseau cognitif de radars HF combinant radars transhorizons, radars passifs et systèmes ROS (radar à ondes de surface), afin d'assurer une surveillance large, autonome et résiliente. NOSTRADAMUS, en tant que démonstrateur technologique de référence, joue un rôle central dans l'expérimentation et la validation des briques technologiques de ce futur réseau européen. L'évolution vers des radars « cognitifs », capables de s'adapter en temps réel grâce à l'intelligence artificielle, s'inscrit pleinement dans cette trajectoire technologique portée par l'ONERA.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Le radar NOSTRADAMUS est un radar unique à plusieurs titres et constitue une infrastructure impressionnante, installée dans le Centre Val de Loire sur un site de l'armée de l'air et de l'espace. NOSTRADAMUS constitue un démonstrateur technologique unique, illustrant la maîtrise par l'ONERA des technologies des radars transhorizons HF et de leur mise en œuvre à grande échelle.



Champs d'antennes de NOSTRADAMUS à Crucey (ONERA - Quentin BAUDUIN)

Antennes : Le radar repose sur un ensemble de 288 antennes biconiques fixes de grandes dimensions (7 m x 6 m), réparties au sol sur une surface de 12 hectares. Elles forment un réseau surfacique (2D) organisé selon une architecture en étoile à trois bras, chacun long de 400 mètres. Cette configuration permet un pointage électronique du faisceau radar en azimuth sur 360°, sans mouvement mécanique. Les antennes assurent une couverture omnidirectionnelle et permettent une formation de faisceaux par traitement numérique.

Émetteurs et récepteurs : Le système comprend 96 émetteurs de puissance couplés à des générateurs de signaux arbitraires et 96 récepteurs numériques multi-canaux logés dans les 3 galeries techniques qui parcourent les bras du système. À cela s'ajoutent 192 récepteurs numériques multi-canaux installés dans 45 fosses réparties sur le site, permettant un échantillonnage précis du signal reçu.

Traitement du signal : NOSTRADAMUS intègre des capacités avancées de traitement numérique du signal développées par l'ONERA, essentielles pour extraire les échos d'intérêt dans un environnement très bruité et gérer les forts retours du sol ou de la mer via le filtrage Doppler.

Calibration et sondage ionosphérique : Le système est capable de s'auto-calibrer sans sondes externes. Il dispose également d'une capacité unique de sondage autonome de l'ionosphère, qui en fait le seul radar HF 3D connu à ce jour intégrant cette fonctionnalité.

Structure physique : Les antennes et équipements sont répartis autour de trois galeries techniques, véritables tunnels accessibles à pied, qui abritent l'infrastructure de commande et de traitement. Les postes de contrôle sont implantés à distance pour superviser l'ensemble du système.

L'ONERA : DES SAVOIR-FAIRE UNIQUES AU MONDE

L'ONERA avec son département électromagnétisme et radar (DEMR) possède une expertise de pointe dans le domaine du radar, couvrant la recherche, la modélisation, le développement de systèmes et la simulation. Ses compétences incluent la conception d'antennes, le traitement du signal, l'imagerie radar (SAR), la détection et le suivi de cibles, ainsi que la discrétion radar (furtivité). L'ONERA, expert étatique au profit de la DGA et de l'AID, intervient aussi bien sur les radars aéroportés, terrestres que spatiaux, en appui aux industriels de la défense, de l'aéronautique et du spatial.

L'ONERA est l'acteur clé du développement du **système GRAVES** (Grand Réseau Adapté à la VEille Spatiale), en service au sein de l'Armée de l'Air et de l'Espace. Ce système, opérationnel depuis 2005, a été conçu par l'ONERA pour surveiller les objets en orbite basse autour de la Terre. Il s'agit d'un radar bistatique capable de détecter et de suivre de manière autonome les satellites en orbite basse. L'ONERA possède une expertise unique en traitement du signal radar, modélisation des trajectoires orbitales et en veille spatiale, faisant de GRAVES un outil stratégique pour la défense et la souveraineté spatiale française.

De plus, l'ONERA dispose d'une expertise reconnue dans **l'étude de l'ionosphère**, en particulier pour ses effets sur les systèmes de télécommunications, de navigation par satellite (GNSS) et de surveillance spatiale. Ses travaux portent sur la modélisation, la prévision et la caractérisation des perturbations ionosphériques, notamment celles induites par l'activité solaire. L'ONERA développe également des outils et capteurs pour mesurer les conditions ionosphériques et améliorer la résilience des systèmes dépendants de l'environnement spatial.