



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

IGN

INSTITUT NATIONAL  
DE L'INFORMATION  
GÉOGRAPHIQUE  
ET FORESTIÈRE

CHANGER  
D'ÉCHELLE



# IGN MAG

#109 – ÉTÉ 2024

## LE TERRITOIRE VU DE L'ESPACE

EN COMPLÉMENT DES AUTRES SOURCES,  
LA DONNÉE SATELLITAIRE AMÉLIORE  
ET ACCÉLÈRE L'OBSERVATION  
DE LA TERRE ET DES CHANGEMENTS  
AU SEIN DES TERRITOIRES.

# SOMMAIRE

## P.04 EN IMAGES

- MER DE GLACE
- ÎLE DE MAYOTTE

## P.08 DONNÉES CLÉS

- GÉOPOSITIONNEMENT ET OBSERVATION DE LA TERRE

## P.11 OBSERVATION DU TERRITOIRE

- COUP DE BOOSTER POUR LE SPATIAL
- LA GÉODÉSIE DANS LES SCIENCES DU CLIMAT
- L'INVENTAIRE DES PLANS D'EAU

## P.17 VIGIE DE LA FORÊT

- LA FORÊT SOUS L'ŒIL DES SATELLITES

## P.22 GÉOCOMMUNS

- LA CONSTELLATION DE L'INNOVATION

## P.26 DÉFIS TECHNOLOGIQUES

- L'IMAGERIE SPATIALE, UN NOUVEAU DÉFI POUR L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE
- L'INTERFÉROMÉTRIE RADAR : SURVEILLER LA TERRE DEPUIS L'ESPACE
- L'ENSG À LA CONQUÊTE DE L'ESPACE



Fusion de 3 images de Paris fournies par les satellites Pléiades Neo, TerraSAR-X mises à disposition par Airbus et de la BD TOPO de l'IGN

© DLR e.V. Distribution Airbus DS © Airbus DS © IGN

RETROUVEZ  
LA VERSION NUMÉRIQUE

IGN MAGAZINE ADAPTÉ  
POUR UNE LECTURE SUR ÉCRAN.



WWW.IGNMAG



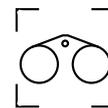
Magazine de l'Institut national de l'information géographique et forestière -  
73, avenue de Paris, 94160 Saint-Mandé. Tél. : 01 43 98 80 00. ISSN : 1624-9305  
Directeur de la publication : Sébastien Soriano. Directrice de la rédaction : Dominique  
Jeandot. Directeur adjoint de la rédaction : Matthieu Ravaut.  
Rédacteur en chef : Éric Bonneau. Comité de rédaction : David Perlberg, Anna Cristofol,  
Olivier Jamet, Valentine Bruyère, Frank Fuchs, Stéphanie Wurpillot, Emilie Pourquery,  
Valérie Derégnaucourt.

Ont participé à la rédaction : A. Attali, P. de Brem, O. Constant, G. Tixier.  
Conception éditoriale et graphique : Citizen Press. Illustrations : iStock  
Impression : IGN. Dépôt légal : Été 2024



ABONNEZ-VOUS GRATUITEMENT EN CONTACTANT  
LA RÉDACTION : ABONNEMENT@IGN.FR

ÉDITO



# “ LE SPATIAL TIENT UNE PLACE À PART DANS LE MIXTE TECHNOLOGIQUE DE L'IGN ”

PAR LA RÉDACTION

— **Après s'être éclipsé le temps de se réinventer, votre magazine est de retour**, paré de nouveaux atours et de rubriques tout aussi neuves : « Observation du territoire », « Vigie de la forêt », « Géocommuns », « Défis technologiques »... Pour le moins originale, cette structure fait sens, plus que jamais.

Face au dérèglement climatique, l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) s'est en effet donné pour mission d'outiller la Nation pour comprendre son territoire et ses évolutions rapides, et l'aider ainsi à piloter l'indispensable transition écologique. Cette entreprise exigeante implique de produire et de diffuser, quasiment en continu, les données de description de ses contrées, et notamment de ses forêts qui jouent un rôle si important pour notre avenir.

C'est donc ce à quoi s'emploie sans relâche l'IGN, qui est aujourd'hui l'un des grands opérateurs de data de la République. Mais il ne saurait

y parvenir seul ! C'est pourquoi il fédère tout un écosystème d'acteurs publics comme privés pour créer des communs numériques liés à l'information géolocalisée – les fameux géocommuns. Il n'y parviendrait pas non plus sans relever en permanence des défis technologiques majeurs. Il s'agit rien moins que de croiser différentes sources de données allant du sol à l'espace, d'accélérer les traitements grâce à l'IA et de mettre sur pied des visualisations innovantes.

Une fois ne sera pas coutume, ce numéro est entièrement dédié à une seule thématique, une des rares à couvrir aisément toutes ces rubriques : le spatial. Il est vrai que celui-ci a, par nature, particulièrement besoin d'espace. Mais le spatial, historiquement affaire de collaboration et d'innovation, tient surtout une place à part et grandissante au sein du « mixte technologique » de l'IGN. Ce dernier entretient depuis plus de trente ans une expertise

pointue dans le domaine de l'exploitation des données satellitaires, avec notamment ses services de l'imagerie spatiale (Toulouse) et de géodésie et de métrologie (Saint-Mandé), deux centres reconnus au plan international. Cette expertise, catalysée par de nombreux partenariats, avec le Centre national d'études spatiales (CNES) notamment, se révèle particulièrement précieuse aujourd'hui, à l'heure de l'anthropocène, car le spatial offre un point de vue sans équivalent sur le territoire et ses évolutions. Ce numéro vous invite à prendre de la hauteur pour en découvrir, aux côtés des experts de l'IGN et de ses partenaires, tous les enjeux pour la transition écologique. Bon vol et bonne lecture !

# EN IMAGES

## LE RECU D'UNE MER

OBSERVATION, PAR PRISES DE VUE AÉRIENNES ET SPATIALES, DU RECU DU GLACIER DE LA MER DE GLACE, VALLÉE DE CHAMONIX, HAUTE-SAVOIE. LA POINTE DE COULEUR DÉSIGNE L'EXTRÉMITÉ DU GLACIER PAR ANNEE.



ortho historique®, © IGN 2015



Pléiades © CNES 2012, distribution Airbus DS



**2003**

Image satellite SPOT 5 du 19/08/2003

SPOT 5 © CNES 2003



**2023**

Image satellite Pléiades du 20/08/2023

Pléiades © CNES 2023, distribution Airbus DS

# EN IMAGES

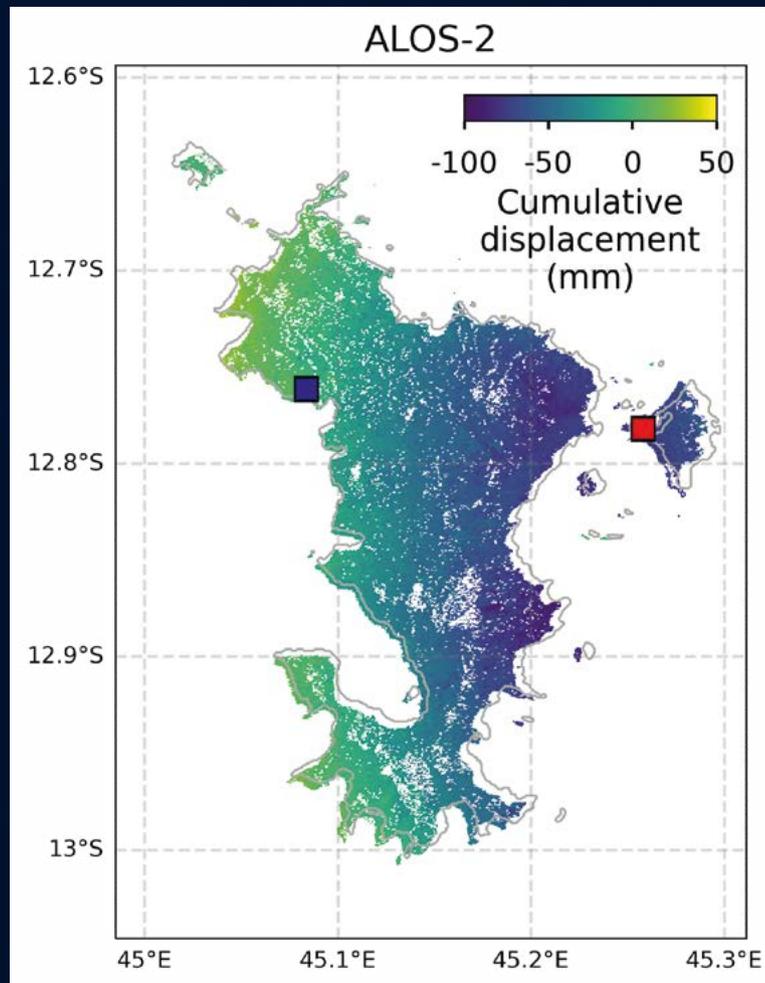
## LA DÉFORMATION D'UNE ÎLE

ASSEMBLAGE D'ORTHOS  
IMAGES DE L'ÎLE DE MAYOTTE  
PRISES PAR LE SATELLITE  
PLÉIADES EN 2018.

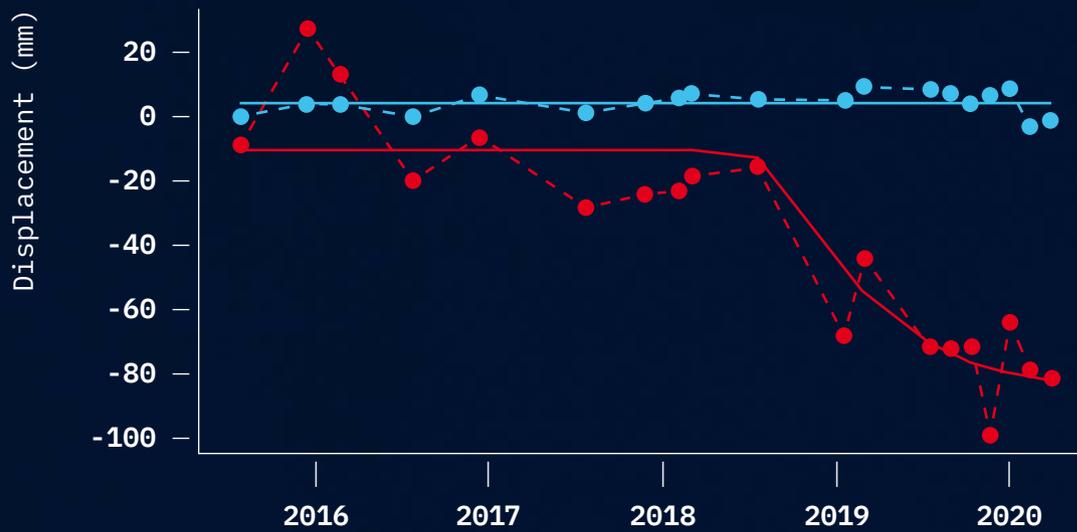


ALOS-2 © Japan Space Exploration Agency – © IGP

La naissance d'un volcan sous-marin à 50 km à l'est de Mayotte en 2018 a provoqué un déplacement et des déformations de l'île. Le déplacement cumulé relatif déterminé par l'IPGP à partir d'imagerie spatiale radar montre ces déformations par rapport à un point de référence arbitraire, choisi ici à l'ouest de l'île. Les courbes illustrent les mouvements relatifs d'un point sur Petite Terre (rouge) et d'un point voisin du point de référence (bleu).



© Raphaël Grandin, IPGP



## DONNÉES CLÉS

L'observation spatiale en un coup d'œil



**50** ANS  
C'EST L'ÂGE DU  
RADIOPOSITIONNEMENT  
EN FRANCE

LES PREMIÈRES EXPLOITATIONS DU SYSTÈME TRANSIT PAR L'IGN REMONTENT À 1974.

AUJOURD'HUI, LES TECHNIQUES DE GÉODÉSIE SPATIALE PERMETTENT DE LOCALISER UN POINT AU CM PRÈS SUR TOUTE LA TERRE.

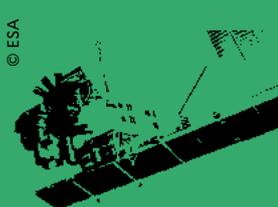
## DES MISSIONS D'OBSERVATION DE LA TERRE



© CNES

### SPOT

Famille de 7 satellites français d'observation de la Terre, lancés de 1986 à 2002 pour les cinq premiers, puis en 2012 et 2014 pour les deux derniers. En 2015, l'IGN publie sur le géoportail la première couverture complète de la France métropolitaine à partir d'images satellitaires SPOT 6 de 1,50 m de résolution.



© ESA

### ENVISAT

De 2002 à 2012, ce satellite de l'Agence spatiale européenne mesurait avec une dizaine d'instruments l'atmosphère, l'océan, les terres émergées et les glaces de la Terre.



© ESA

### GOCE

Satellite de l'Agence spatiale européenne lancé en 2009 afin de mesurer, avec une résolution de 2 cm, le champ gravitationnel de la Terre (Géoïde).

## D'HIER À AUJOURD'HUI

### LE GÉOPOSITIONNEMENT SPATIAL

> **1964** >

La marine américaine développe le système de radiopositionnement Transit.

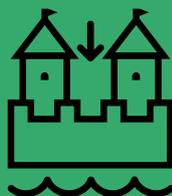
> **1974** >

L'IGN initie un programme de recherche et développement de géodésie spatiale Doppler, acquiert 6 récepteurs Transit et réalise ses premières observations.



# 6 200 000 KM<sup>2</sup>

SOIT UN PEU PLUS DE 11 X LA SUPERFICIE DE LA FRANCE, C'EST LA SURFACE D'ORTHO-IMAGES PRODUITES PAR L'IGN POUR LA DÉFENSE, À PARTIR DES PHOTOGRAPHIES EN PROVENANCE DES CONSTELLATIONS DE SATELLITES SPOT, PLÉIADES ET PLÉIADES NEO. LA PRODUCTION D'IMAGERIE CIVILE REPRÉSENTE 707 000 KM<sup>2</sup> SOIT 1,3 X LA SUPERFICIE DE LA FRANCE.



# 1 MM

## /AN

C'EST LA VITESSE DE SUBSIDENCE MESURÉE AU PORT DE SAINT-MALO PAR GNSS (SERVICE D'OBSERVATION SONEL, UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE), C'EST À DIRE LA VITESSE À LAQUELLE LE QUAI DU TERMINAL FERRY MALOUIN S'ENFONCE DANS LE SOL.

© ESA



### SENTINELS

Satellites du programme européen d'observation de la Terre, Copernicus, qui succèdent à Envisat pour la surveillance de la Terre, du milieu marin, de l'atmosphère et du climat. Les images de Sentinel-2 alimentent la base de données Forêt de l'IGN.

© Airbus Intelligence



### PLÉIADES

Lancés en 2011 et 2012, les deux satellites d'imagerie spatiale haute résolution développés par le CNES sont désormais relayés par la constellation Pléiades Neo, dont les deux premiers satellites ont été mis sur orbite en 2021. L'IGN réalise grâce à Pléiades une couverture image annuelle des Antilles, de la Réunion et de Mayotte.

© CNES



### SWOT

Lancé fin 2022, ce satellite réalise, pour le CNES et la NASA, la topographie des eaux de surface, des océans et des zones côtières.

© ESA



### BIOMASS

Ce satellite de l'Agence spatiale européenne va évaluer le volume global de la biomasse tropicale de la planète afin d'estimer les stocks et les flux de carbone. Lancement prévu en 2024.

# 1994



# 1995



# 2020



# 2022

L'IGN devient centre global de données de l'International GNSS Service. (IGS), le service international de géolocalisation et de navigation par satellites (GNSS).

Les systèmes globaux de navigation par satellites GPS (États-Unis) et Glonass (Russie) sont opérationnels.

Mise en service du système global de navigation par satellites BeiDou (Chine).

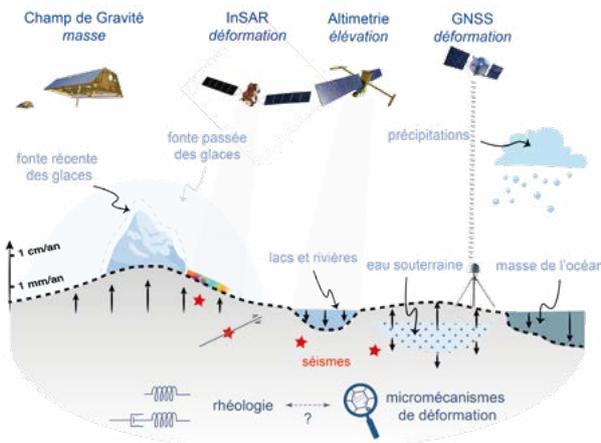
Le système global de navigation par satellites Galileo (Union européenne) est opérationnel.

## LA GÉOPLATEFORME... UNE RÉALITÉ !

— Après 24 ans de service, le Géoportail cède la place à la Géoplateforme. Le monde de la donnée géographique connaît une véritable révolution. Le besoin en données explose, les changements environnementaux s'accroissent. Rien qu'à l'IGN, avec la précision et la fréquence croissante des données, le volume double tous les trois ans. La Géoplateforme est une infrastructure ouverte et mutualisée pour l'hébergement, la mise à jour collaborative et le partage des données territoriales. Elle est portée en partenariat avec des industriels tels que OVH Cloud, Worldline, Oslandia ou Living Data. Depuis avril, toutes les données de l'IGN y sont hébergées. Les Géoservices ont aussi basculé sur la Géoplateforme. Elle héberge à ce jour environ 1 pétaoctet de données et répond déjà à 300 millions de requêtes par jour. Le Géoportail va être remplacé par une nouvelle interface : [cartes.gouv.fr](https://cartes.gouv.fr).



## KRISTEL CHANARD RÉCOMPENSÉE POUR SES RECHERCHES EN GÉODÉSIE



— Kristel Chanard, géophysicienne de l'IGN dans l'équipe de géodésie de l'Institut de physique du globe de Paris, est médaillée 2024 du CNRS. Spécialiste d'hydrogéodésie, Kristel Chanard utilise des observations géodésiques pour analyser la réponse de la Terre solide aux variations hydrologiques. Elle explore également les implications plus larges des déformations d'origine hydrologiques pour le système Terre. En particulier, elle s'intéresse à l'influence du forçage hydrologique sur les séismes.

## CARTES IGN UNE APPLI POUR DECOUVRIR LE TERRITOIRE

— Depuis le 15 mai, l'application mobile Cartes IGN est téléchargeable sur les stores pour smartphones. Pour tous ceux qui veulent découvrir le territoire, ses évolutions et s'y repérer, la nouvelle appli gratuite de service public rassemble une sélection inédite de cartes et de données. À l'heure de la transition écologique, l'application propose aux citoyens une hauteur de vue pour comprendre les mutations du territoire, au plus proche de leurs lieux de vie ou centres d'intérêt. L'IGN réunit avec cette application de nombreuses données produites par l'institut et ses partenaires, allant des ministères chargés de l'Écologie, de l'Agriculture et de la

Forêt aux collectivités territoriales, en passant par OpenStreetMap, les Services départementaux d'incendie et de secours, l'Office national des forêts ou encore les Parcs régionaux et nationaux.





## OBSERVATION DU TERRITOIRE

LE BASSIN D'ARCACHON  
vu par Sentinel-2

# COUP DE BOOSTER POUR LE SPATIAL

Et si, en s'appuyant davantage sur l'observation spatiale, il devenait possible de réaliser des cartes à la fois précises et fréquemment mises à jour? Combinée à celle d'autres sources comme l'aérien, la donnée satellitaire devient essentielle pour les autorités publiques soucieuses de mieux gérer les transitions.



© IGN



IMAGE D'UN VÉHICULE STÉRÉOPOLIS



**JUSQU'ICI, NOUS UTILISONS LE SATELLITE SURTOUT POUR DÉCRIRE LE TERRITOIRE HORS FRANCE, POUR DES BESOINS MILITAIRES ET SCIENTIFIQUES.**

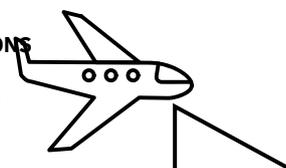


VINCENT CAILLARD, IGN



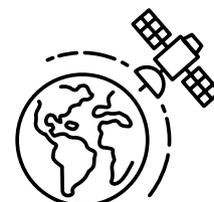
**3**

**C'EST LE NOMBRE D'AVIONS DONT DISPOSE L'IGN POUR PHOTOGRAPHER L'ENSEMBLE DU TERRITOIRE NATIONAL.**



**7**

**C'EST LE NOMBRE DE SATELLITES OPTIQUES DONT L'IGN EXPLOITE LES MOYENS D'OBSERVATION.**



— **Avis de tempête sur l'Hexagone.** Les crises anthropocènes (climatique, écologique et énergétique) nécessitent une connaissance approfondie et actualisée de l'état du territoire. « *Les autorités publiques demandent des informations à la fois plus précises, plus fréquemment mises à jour et plus adaptées à leurs besoins* », indique François Chirié. Cet expert de l'IGN a apporté son appui à la récente Mission sur le mixte technologique de l'acquisition de données menée en 2023 par Magali Stoll, alors directrice générale adjointe de l'IGN : « *Nous nous sommes demandé quelles données acquérir pour mieux répondre aux besoins des politiques publiques.* » Par exemple, celles nécessaires pour mesurer l'artificialisation des sols.

La Mission s'est penchée sur les drones d'acquisition de données : « *Ces appareils sont soumis à des contraintes réglementaires fortes, de sorte qu'ils ne peuvent prati-*

*quement pas opérer au-dessus d'une zone habitée, note François Chirié. De plus, leur rayon d'action est souvent trop faible pour nos besoins : il n'est pas envisageable d'acquérir tout un département avec des drones, par exemple.* »

### Mixer les sources

Du côté des véhicules terrestres, l'IGN a conçu un véhicule expérimental baptisé Stéréopolis. Bardés de capteurs, ces véhicules sont capables de produire des vues immersives, en 3 D et à hauteur d'homme. « *C'est un apport essentiel pour la description des zones urbaines* », souligne François Chirié.

Pour l'IGN, l'aérien et le spatial sont deux sources d'information essentielles et complémentaires. « *On ne pourrait pas réaliser une carte annuelle de la métropole avec les seuls moyens aériens, même avec une flotte de 10 à 15 avions* »,



## LE CROISEMENT DES SOURCES DE DONNÉES VA ENRICHIR NOTRE CONNAISSANCE DU TERRITOIRE ET DE SES COMPOSANTES.



FRANÇOIS CHIRIÉ, IGN



précise Vincent Caillard. Pour assurer un trafic aérien aussi fluide que possible, leurs vols sont en effet autorisés en nombre limité. De son côté, le satellite possède un atout fondamental : sa capacité de « revisite » très élevée, ainsi on peut obtenir chaque jour une image d'un même point du territoire national. Du fait de leurs résolutions proches (20 centimètres pour la BD Ortho actuelle, 30 centimètres avec les satellites Pléiades Neo d'Airbus), il est envisageable de mixer images aériennes et satellitaires pour, par exemple, alimenter la BD Ortho.

### Des changements structurels

Le segment spatial sera donc davantage sollicité. D'autant que certains satellites observent le sol à différentes longueurs d'ondes, par exemple dans le multispectral : « Cette richesse spectrale donne des informations précieuses pour le suivi de certaines thématiques, insiste Vincent Caillard. Pour la gestion des forêts, on peut à la fois reconnaître les espèces végétales depuis l'espace, estimer le stress hydrique et évaluer la qualité de la photosynthèse. »

Grâce aux informations combinées du spatial et de l'aérien, l'IGN détectera les changements d'une image à l'autre de façon automatique. L'évolution de l'expansion des zones urbaines, des niveaux des plans d'eau ou du développement des algues sargasses aux Antilles seront mesurés plus aisément et plus souvent, et les référentiels géographiques plus rapidement mis à jour. Ces évolutions vont entraîner des changements structurels. « À l'avenir, nos chaînes de production devront devenir "agnostiques", note François Chirié, c'est-à-dire capables de traiter indifféremment des données issues de différentes sources. » Une direction des sources va ainsi être créée à l'IGN, tandis qu'une autre, en aval, sera chargée de l'exploitation des données. ■

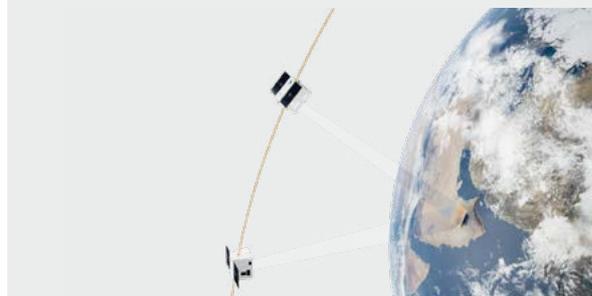


**REPÈRES**  
COMMENT ON FAIT  
DES CARTES À PARTIR  
DES PRISES DE VUE  
AÉRIENNES

## 40 ANS DE SUCCÈS AVEC LE CNES

— C'est en 1973 qu'a commencé le partenariat entre le CNES, agence spatiale française, et l'IGN, lorsqu'ils ont créé ensemble une structure de formation, le Groupement pour le développement de télédétection aérospatiale. En 33 ans, elle a formé 5 000 spécialistes de 144 pays. L'IGN a activement contribué au succès de la filière de satellites d'observation de la Terre SPOT grâce à son expertise en photogrammétrie et en géopositionnement. L'institut a notamment participé aux recettes en vol (tests de validation) des SPOT 1 à 5, entre 1986 et 2002. Et a été coactionnaire de la célèbre société SPOT image, destinée au traitement de données et à la valorisation des données spatiales.

Une collaboration fructueuse a démarré en 2019 entre le CNES et l'ENSG-Géomatique (l'École nationale des sciences géographiques de l'IGN) avec pour but d'améliorer l'adoption par les utilisateurs des données et des produits Copernicus (le programme d'observation de la Terre par satellite de l'Union européenne). Depuis 2020, l'IGN apporte son soutien au CNES pour le développement de la chaîne image d'un futur satellite d'observation, CO3D. Un appareil original puisqu'il prendra des images stéréoscopiques synchrones afin de réaliser des modèles en trois dimensions avec une résolution d'un mètre.



CO3D © Airbus 2019

# LA GÉODÉSIE FAIT IRRUPTION DANS LES SCIENCES DU CLIMAT

**Surplombant notre planète, les satellites de géodésie observent en permanence la manière dont la forme de la Terre évolue. En cause : le changement climatique.**

— **Aussi étonnant que cela paraisse, le changement climatique modifie la forme de la Terre.** Que l'on pense aux glaciers qui, en fondant, quittent les montagnes qu'ils occupaient depuis des temps immémoriaux pour devenir rivière, mer, nuage, au sol et dans l'atmosphère... De sorte que, à l'inverse, «*la géodésie, qui étudie la géométrie de notre planète, permet de mieux connaître les paramètres fondamentaux du changement climatique*», explique Jonathan Chenal, chargé de mission au Service de géodésie et de métrologie de l'IGN.

L'outil spatial a révolutionné cette discipline ces dernières décennies. Il est devenu possible de mesurer la fonte des glaciers grâce aux deux satellites Grace-FO de la NASA, par exemple. Ces appareils, qui se suivent sur la même

“ **LA GÉODÉSIE ATTEINT UNE PRÉCISION MILLIMÉTRIQUE SUR LA TERRE, SOIT LA TAILLE D'UN ATOME SUR UN BALLON DE FOOT.** ”

JONATHAN CHENAL

orbite, mesurent avec finesse la distance qui les sépare. «*Que le premier s'approche d'une montagne et, sous l'effet de son attraction gravitationnelle, il accélérera par rapport au second, et d'autant plus que cette montagne sera couverte de glace et de neige, donc massive*», décrit Benoît Meyssignac, climatologue et géodésien du CNES.

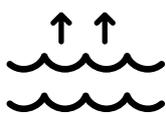
## Un facteur 100

Dans les prochaines années, Grace-FO pourrait recevoir le renfort d'une mission européenne comparable, NGGM (Next generation gravity mission). En combinant leurs travaux, leurs observations gagneront un facteur 100 en précision et la connaissance fine de la fonte des calottes polaires sera à portée. «*Les calottes polaires sont proches d'un point de bascule, s'alarme Benoît Meyssignac, au-delà duquel leur disparition progressive ne pourra plus être stoppée.*» En quelques centaines à milliers d'années, les océans pourraient s'élever d'une dizaine de mètres.

## Une précision millimétrique

En attendant cette perspective lointaine, la dilatation de ces mêmes océans sous l'effet du réchauffement climatique peut aussi être mesurée grâce à des missions spatiales d'altimétrie telles que Jason 1, 2 et 3 (de la NASA et du CNES) ou Sentinel 6 (de l'Agence spatiale européenne). Leurs radars scrutent avec précision ce gonflement qui atteint 1 à 1,2 mm/an.

Grâce à cette mesure de l'élévation du niveau des océans, il devient possible de se préparer aux submersions des terres, à l'érosion du littoral ou à la perte de biodiversité qui en résulteront. Mais il y a plus. Elle fournit aussi des informations sur le système climatique lui-même. Car le gonflement des mers est proportionnel à la quantité d'énergie absorbée par les océans.

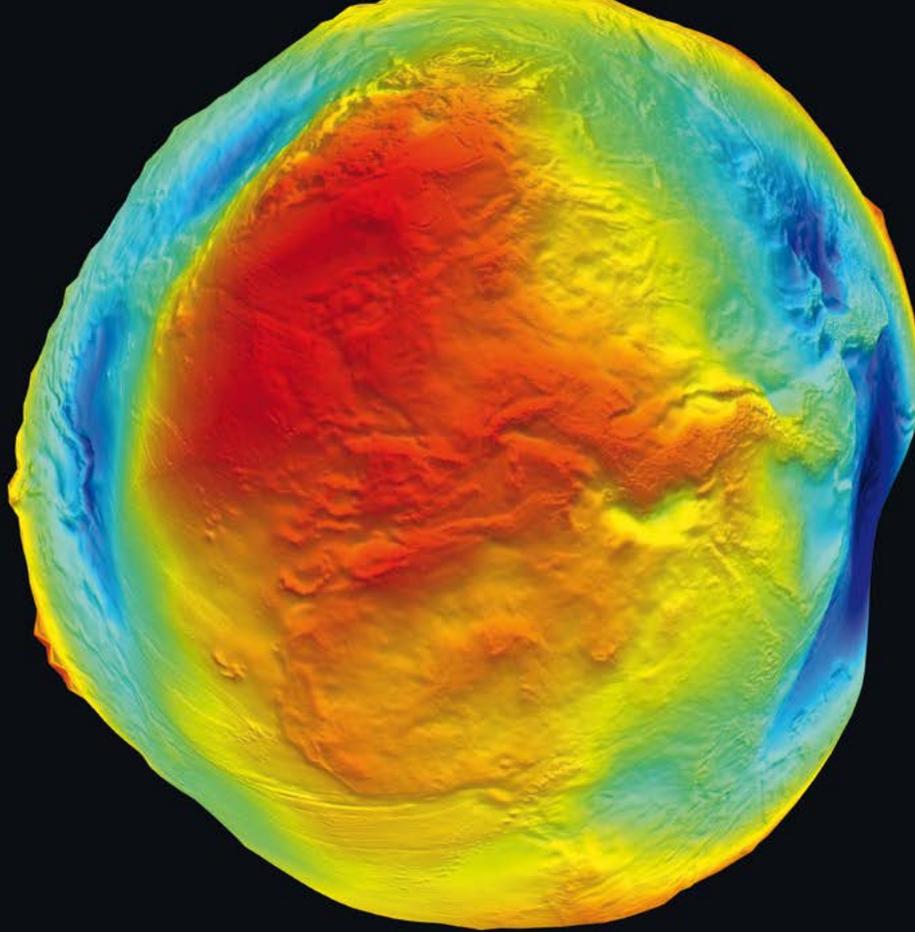


# 2,33

**MM/AN,**

C'EST LA VITESSE À LAQUELLE  
LES OcéANS SE SONT ÉLEVÉS  
ENTRE 1971 ET 2018 (INCLUANT  
L'EFFET DE DILATATION)

Le géoïde est une surface fictive qui se confond avec la surface moyenne des océans que l'on aurait prolongée sous les continents. De -120 mètres en bleu à +85 mètres en rouge. (Dans cette illustration l'effet 3D est exagéré d'un facteur 12 000).



© IGN

## GÉODÉSIE : UNE NOUVELLE INSTITUTION POUR COORDONNER LES EFFORTS

— Le 29 mars 2023, un centre d'excellence de niveau mondial consacré à la géodésie a été inauguré en Allemagne. Une excellente initiative pour Olivier Jamet, chef adjoint du service de géodésie et de métrologie à l'IGN, car « la communauté scientifique constate une dégradation des infrastructures déterminant l'ITRF », le système international de référence terrestre grâce auquel des positionnements précis sont possibles. Ainsi, le réseau de

télescopes laser qui tirent sur les satellites Lageos, essentiel pour la détermination du centre de la Terre, pâtit d'un manque de maintenance et de financement. Créé sous l'égide de l'ONU, le Centre mondial d'excellence en géodésie (GGCE) sensibilisera les États membres à ce sujet et aidera à la mise sur pied coordonnée d'infrastructures dédiées, y compris dans les pays de l'hémisphère sud. « Pour suivre des phénomènes évolutifs comme la fonte

des glaces, nous avons besoin de déterminer les repères fondamentaux avec une précision millimétrique contre 5 millimètres aujourd'hui », estime Olivier Jamet.



**OLIVIER JAMET,**  
CHEF ADJOINT  
DU SERVICE  
DE GÉODÉSIE ET  
DE MÉTROLOGIE  
À L'IGN

© Lionel Pagès, IGN

Or c'est l'océan qui stocke plus de 90 % de l'excès d'énergie absorbée par le système climatique en raison des émissions de gaz à effet de serre. « En mesurant le déséquilibre énergétique de la planète, la géodésie est devenue essentielle aux sciences du climat », estime Jonathan Chenal. ■



**REPÈRES**  
OBSERVER  
LA TERRE  
DEPUIS  
L'ESPACE

# L'INVENTAIRE DES PLANS D'EAU EST À PRÉSENT COMPLET

La France compte plus de 846 000 plans d'eau hors Guyane.

— Il devenait indispensable de recenser l'ensemble des plans d'eau en France en raison des enjeux écologiques, de biodiversité, de gestion quantitative de l'eau, de réglementation ou encore d'adaptation au changement climatique. « Ce besoin prégnant s'inscrivait dans une approche globale autour de la connaissance sur l'eau », indique Barbara Freidman, chargée de relations institutionnelles à l'IGN.

« L'inventaire national des plans d'eau, réalisé par l'IGN et l'Igedd après le Varenne agricole de l'eau début 2022, sur la base de la couche "surfaces en eau" de la BD Topo, recense un total de 846 147 plans d'eau en France hors Guyane », précise Pascal Kosuth, membre de l'Inspection générale de l'environnement (Igedd) au sein du ministère chargé de l'Écologie.

Avec l'aide du Centre national d'études spatiales, les satellites Sentinel de l'Agence spatiale européenne sont utilisés pour suivre le fonctionnement des plans d'eau : leur superficie est mesurée chaque semaine et traduite en volume stocké, la relation entre superficie et volume étant déduite du modèle numérique de terrain RGE ALTI. ■

“ **LES 846 000 PLANS D'EAU COUVRENT 1 % DU TERRITOIRE FRANÇAIS HORS GUYANE.** ”



PASCAL KOSUTH



Lac Dziani, Mayotte.

© IGN

## COMMENT MESURER LE MANTEAU NEIGEUX

— Difficile d'estimer les quantités de neige qui s'accumulent sur les montagnes de France : « Il n'existe pas d'instrument satellitaire dédié à cette mission », regrette Simon Gascoin, chercheur CNRS en hydrologie au Cesbio. De nombreuses rivières et fleuves, comme le Rhône et la Garonne, dépendent pourtant de cette eau au printemps pour la navigation, la production d'énergie ou pour le maintien de leur biodiversité. « C'est pourquoi nous multiplions les méthodes de mesure », explique Simon Gascoin.

Le satellite Sentinel-2 du programme européen Copernicus est capable de fournir une vision fine de l'enneigement. Pour évaluer les volumes de neige accumulés, les capacités stéréoscopiques des satellites Pléiades sont employées de manière à réaliser des modèles numériques de terrain avec et sans neige. Prévu pour être lancé en 2025, le satellite franco-indien Trishna observera la température de la surface terrestre tous les trois jours : la mesure de l'inertie thermique du manteau neigeux pourrait être utilisée pour évaluer sa masse.



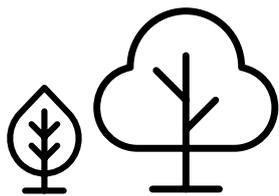
## VIGIE DE LA FORÊT

© CNES/Distribution Airbus DS, 2021

# LA FORÊT SOUS L'ŒIL DES SATELLITES

Parce qu'ils repassent rapidement à la verticale des mêmes points et produisent des images sur un large spectre électromagnétique, les satellites d'observation de la Terre sont de bons candidats au suivi temporel des milieux et, parmi eux, de la forêt. Ils peuvent détecter un changement soudain de végétation, faciliter l'identification des essences, améliorer la précision des cartes ou l'évaluation de la ressource en bois.

LA COMMUNE DE GRAND-SANTI, EN GUYANE,  
vue par le satellite Pléiades, le 8 août 2021.



50 À  
**150**  
ANS

UN ARBRE MET  
DE 50 À 150 ANS  
POUR ARRIVER À  
L'ÂGE DE LA RÉCOLTE.

© Thierry Bélouard – INRAE



— Si, dans les faits, les satellites demeurent encore peu utilisés, l'accélération de la transformation de la forêt consécutive au changement climatique leur promet une place croissante dans la boîte à outils de ses gestionnaires, publics comme privés. En progrès continu depuis son plus bas historique au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, la forêt française semblait avoir tout son temps... Au point qu'à sa création, en 1958, l'Inventaire forestier national pouvait donner à ses agents douze ans pour boucler leur premier tour de France. À raison. Selon les essences, un arbre met de 50 à 150 ans pour arriver à l'âge de la récolte.

Ce n'est donc pas tous les matins qu'un peuplement est coupé. Mais le dérèglement du climat et son cortège de sécheresses, d'incendies, de tempêtes et de bio-agressions, ces dernières résultant aussi de l'intensification des échanges internationaux, a fait basculer la forêt dans un temps nouveau, au moment même où l'on mesure l'étendue des services qu'elle rend, à commencer par la séquestration du carbone. Soucieux de les préserver, voire de les développer, les décideurs publics comme privés expriment un besoin croissant de



Peuplement d'épicéas scolytés.

données aussi précises que récentes. Il s'est manifesté dans le lancement, en 2023, de l'Observatoire des forêts françaises. « Pour l'instant, nous relevons le défi en rassemblant des données jusqu'ici éparses, produites par les meilleurs observateurs de la forêt, agents de l'inventaire, cartographes, forestiers, chercheurs..., explique Antoine Colin, chef du département d'analyse des forêts à l'IGN et coordinateur du projet. Elles ont l'avantage de reposer sur des sources éprouvées, parmi lesquelles les relevés de terrain et les photographies aériennes occupent la plus grande place. Ces sources restent irremplaçables mais, devant la forme d'urgence en train de se faire jour, nous ne pouvons pas éluder la question de leur élargissement aux satellites d'observation qui survolent à tout moment la Terre, avec des intervalles de revisite de quelques jours seulement. »



Site illégal d'orpaillage  
dans la forêt guyanaise.



© Jérôme Delaunay, iStock

## Halte aux orpailleurs

Leur utilisation n'est cependant pas nouvelle. En Guyane, la reprise de l'orpaillage dans les années 1990 fait courir à la forêt équatoriale un risque non négligeable. L'extraction de l'or exige le défrichage de larges surfaces qui en ressortent durablement appauvries et polluées. Dans les 30 000 km<sup>2</sup> de jungle du «croissant aurifère», les raids des garimpeiros, ces chercheurs clandestins venus du Brésil, sont difficiles à détecter, et donc à arrêter, à temps. À partir de 2005, l'accès des Guyanais aux images des satellites SPOT change la donne.

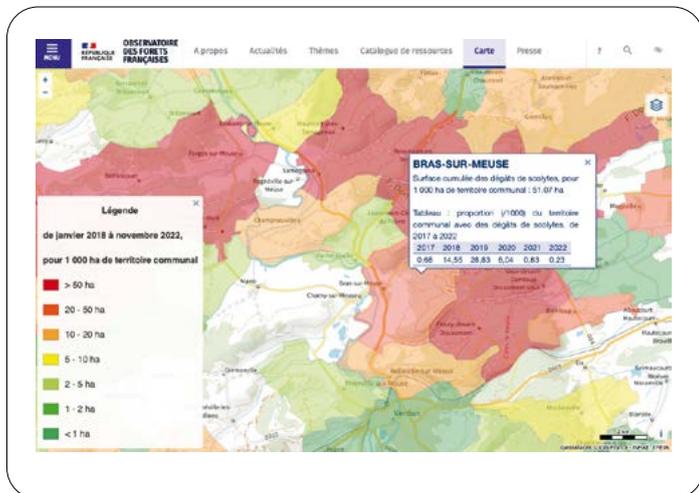
À l'initiative de l'Office national des forêts, un protocole est mis au point pour les utiliser. Il aboutit, en 2008, à la création de l'Observatoire de l'activité minière, ou OAM, qui oriente les interventions des importantes forces engagées par l'État dans le cadre de l'opération Harpie. Le résultat est spectaculaire : les surfaces illégalement défrichées passent en un an de plus de 1 500 à moins de 500 hectares, seuil sous lequel elles se maintiennent. Les agents de l'ONF utilisent désormais les images du satellite Sentinel-2 avec la même

efficacité. « La plupart des détections sont faites sur des secteurs déjà exploités qui demeurent sous surveillance de nos forces de police, précise Sébastien Linares, chef du projet à l'état-major de lutte contre l'orpaillage et la pêche illicites de la Préfecture de Guyane. Le dispositif Sentinel a pour principal intérêt de pouvoir les alerter rapidement sur l'émergence de nouveaux sites. À ce sujet, j'ai l'habitude de citer cet exemple, très parlant : le 15 mai 2019, nous recevons une image Sentinel, le 20 mai, nous y repérons une activité suspecte et le 27 mai, la gendarmerie démantèle le campement et interpelle les 12 garimpeiros. Pour arriver à ce résultat, un agent de l'ONF consacre quand même la moitié de son temps de travail à traiter les images d'une largeur au sol de 290 km et qui se renouvellent tous les cinq jours... »

## Les scolytes attaquent

Plus récemment, la télédétection satellitaire a montré la même efficacité dans le suivi des ravages dus aux scolytes – plus précisément les typographes – dans les peuplements d'épicéas. Ce petit coléoptère pond sous leur écorce et, si l'opération réussit, il émet des phéromones qui attirent ses congénères, créant un phénomène de concentration à l'origine d'un foyer de mortalité. Ses larves peuvent tuer un arbre en moins d'un mois en dévorant ses tissus qui acheminent la sève. Elles deviennent alors adultes et sont prêtes à prendre leur vol pour pondre dans le suivant. Les épicéas en pleine santé se défendent en produisant de la résine. Depuis 2018, la multiplication des sécheresses et le réchauffement des températures les ont affaiblis et désarmés, tout en augmentant le nombre de générations possibles de leurs agresseurs.

De l'ordre de 110 000 hectares sont ainsi morts sur pied dans un grand quart nord-est de la métropole. Or, les coupables signent leur méfait sur les images des satellites Sentinel-2, dont le spectre étendu jusqu'à l'infrarouge caractérise finement la teneur en eau de la végétation. En repassant au même endroit tous les cinq jours, elles peuvent fournir, en léger différé, le film des attaques à mesure que les épicéas se dessèchent. Ces images constituent un outil d'autant plus précieux pour appréhender les dynamiques à l'œuvre que leur résolution – 10 mètres sur 10 mètres – est suffisante pour procéder à des vérifications sur le terrain. « Il nous faut trois acquisitions pour poser un diagnostic d'attaque, ce qui prend 10 jours sans couvert nuageux intempestif,



Suivi des dégâts de scolytes sur l'Observatoire des forêts françaises.



# 35 % DES DÉGÂTS

DES SCOLYTES PASSERAIENT « SOUS LES RADARS ».

explique Thierry Bélouard, expert référent national santé des forêts pour le ministère chargé de l'Agriculture. Ensuite, il faut faire parler les images. Pour cela, l'Inrae a mis au point une chaîne de traitement automatisée nommée Fordead qui compare leur indice spectral – je simplifie – avec celui des images prises au même endroit et à la même période de l'année mais en 2016 ou en 2017, avant la crise des scolytes. C'est impressionnant de voir les valeurs s'écarter de la référence à mesure que l'attaque se développe.»

## La feuille abat ses cartes

Encore faut-il disposer d'une carte suffisamment précise pour être sûr de se trouver sur le peuplement attendu, chaque essence ayant sa signature spectrale bien à elle.

Or la BD Forêt V2 de l'IGN, utilisée par Thierry Bélouard et l'Inrae, méconnaît une partie des peuplements d'épicéa quand ils sont mélangés à d'autres espèces. 35 % des dégâts des scolytes passeraient ainsi « sous les radars ». Heureusement, ce défaut pourrait être corrigé dès sa prochaine version grâce... au satellite. Car ce qui est valable pour les aiguilles des épicéas l'est aussi pour les feuilles des autres arbres : leurs nuances de vert s'apprécient plus facilement dans l'infrarouge.

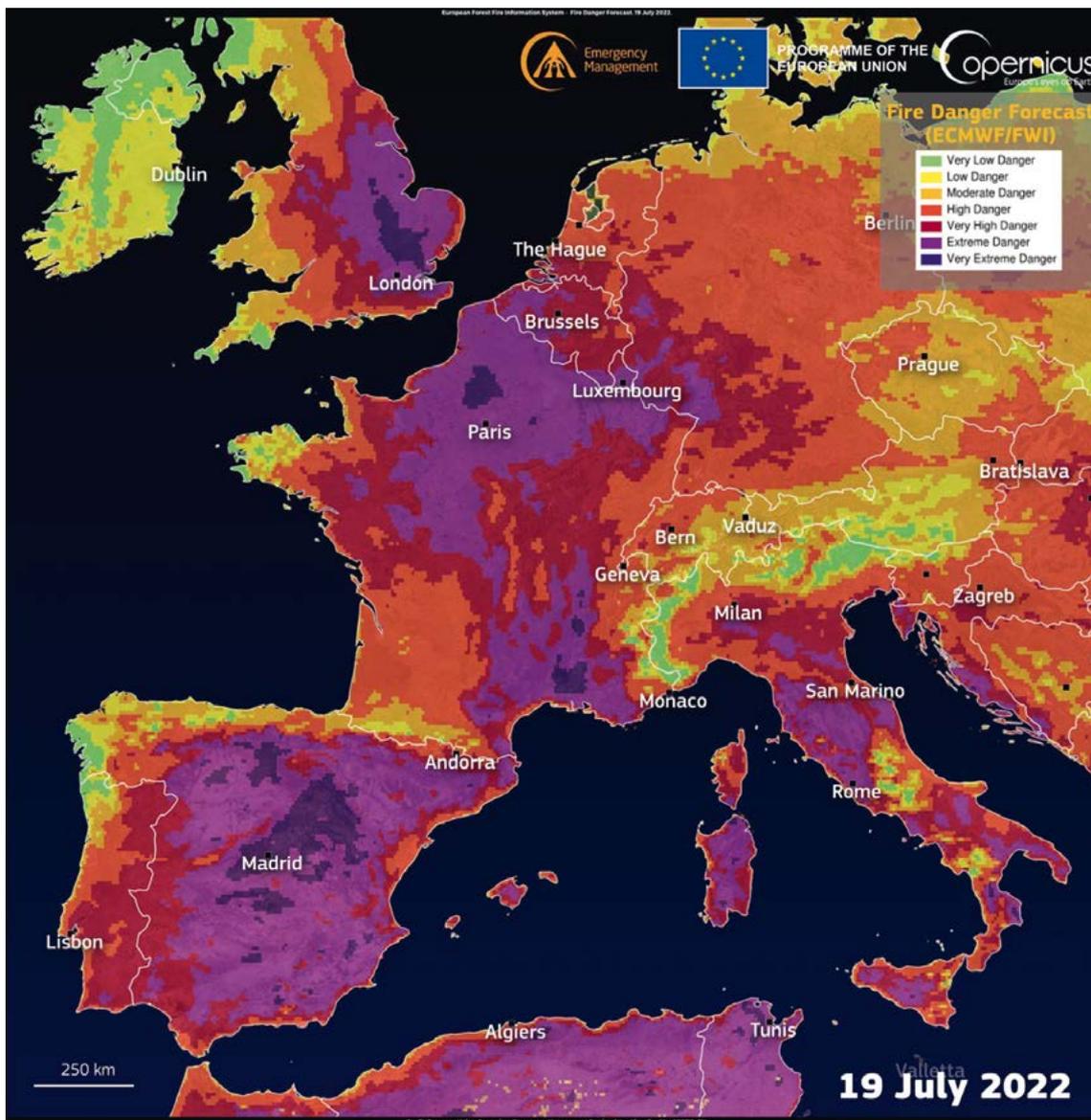
« Les images Sentinel-2 n'ont pas la précision des orthophotographies aériennes, qui restent la base de notre travail cartographique, tempère Timothée Royer, responsable des produits forêt-environnement-agriculture à l'IGN. Mais elles vont améliorer l'identification des essences en mettant en évidence leur cycle végétatif. Un réveil à telle date dans tel secteur indique très sûrement à quel arbre on a affaire. Surtout quand on peut s'appuyer sur une base déjà fiable, et la BD Forêt V2 l'est assurément. » Une équipe d'ingénieurs est à pied d'œuvre pour finaliser un modèle informatique capable d'agréger les informations spectrales et temporelles provenant des cartes, images satellitaires et photos aériennes.

Il utilise les dernières avancées de l'intelligence artificielle et améliore ses prédictions en se basant sur des vérités de terrain, vérifiées par les photo-interprètes de l'IGN. Grâce à lui, la production de la BD Forêt V3 pourrait être achevée dès 2027 avec, en ligne de mire, des mises à jour régulières.

« Cette solution est un bon compromis technique, mais aussi économique, poursuit Timothée Royer. Rattachées au programme européen Copernicus, les images Sentinel sont en accès libre et illimité. Avec leur résolution de 30 centimètres, celles de la nouvelle constellation Pléiades Neo, opérée par Airbus Defense and Space, pourraient compléter les orthophotographies aériennes pour améliorer nos capacités d'observation. Mais elles ne sont pas gratuites et leur disponibilité est conditionnée à d'autres missions, civiles et militaires. Peut-être les utiliserons-nous en complément de l'aérien pour cartographier des secteurs à enjeux. Mais, pour l'heure, les images aériennes apportent plus de garanties. »

## Biomasse sur le pas de tir

Rompu au multisource, l'Inventaire forestier n'utilise pourtant pas de satellites pour évaluer, sur la base de données ayant désormais 2,5 ans en moyenne, la



© Copernicus Emergency Management Service, EU2022

ressource nationale en bois. Parmi les techniques récentes, il s'intéresse beaucoup au lidar, un scanner en 3D, qu'il utilise déjà au sol et en aérien pour affiner ses modèles statistiques de calcul des volumes. Son utilisation dans l'espace fait bien l'objet de travaux de recherche, mais ils n'en sont encore qu'à leurs débuts. Ce qui n'empêche pas quelques rencontres ponctuelles entre ces modèles et l'imagerie spatiale. Très peu de temps après les immenses incendies de Gironde, en 2022, il a été possible de « cuber » le bois perdu en identifiant depuis l'espace les surfaces dénudées. « Par contre, nous comptons bien utiliser en routine le satellite Biomass que l'ESA, l'Agence spatiale européenne, va lancer très bientôt, ajoute Magali Jover, chargée de relations partenariales et institutionnelles sur la forêt à l'IGN. Il répondrait uniquement à un besoin spécifique, non comblé à ce jour : suivre le volume de la biomasse de la forêt tropicale, pour nous la forêt guyanaise. Elle joue un rôle majeur dans le cycle du carbone, qui joue lui-même un rôle majeur dans la mécanique du changement climatique. » ■

## LE DISPOSITIF EUROPÉEN D'ALERTE INCENDIES

— Le système européen d'informations sur les feux de forêt (Effis) fournit des informations historiques et instantanées sur les feux de forêt en Europe, au Moyen-Orient et en Afrique du Nord. Il utilise les images des satellites Sentinel pour localiser les événements en cours. Il y ajoute des modules de prévisions météorologiques et d'évaluation des risques. Tous les acteurs impliqués peuvent ainsi anticiper, optimiser et coordonner leurs interventions d'urgence, de prévention ou de réparation. Ici, une cartographie du risque d'incendie au 1<sup>er</sup> août 2022.



© iMrSquid, iStock

# LA CONSTELLATION DE L'INNOVATION

Rassembler experts publics et privés de la donnée géographique, de l'imagerie satellitaire ou de l'intelligence artificielle en appui aux politiques publiques de la planification écologique : voici l'ambition de Datalliance.



## AVEC DATALLIANCE, L'IGN RAPPROCHE LES ÉCOSYSTÈMES D'INNOVATION PUBLICS ET PRIVÉS POUR DÉVELOPPER DES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES EN APPUI AUX POLITIQUES PUBLIQUES DE TRANSITION ÉCOLOGIQUE.

VALENTINE BRUYERRE



— «*Pour répondre aux besoins croissants de données et outils afin de caractériser les phénomènes affectant le territoire national (artificialisation des sols, santé des forêts et recul de la biodiversité, risques naturels liés aux inondations, etc.), Datalliance propose un réseau alliant le meilleur des technologies et capacités des secteurs publics et privés en matière de géodonnée. La stratégie Datalliance est née du désir de l'IGN de collaborer plus étroitement avec les acteurs privés de la géodata pour renforcer ses capacités et répondre aux besoins des politiques publiques. Avec IGNfab, nous aidions déjà les entrepreneurs à développer des projets innovants. Avec Datalliance, l'enjeu est le passage à l'échelle*», résume Valentine Bruyère, responsable du réseau Datalliance.

### Passer à l'échelle

En janvier 2021, l'IGN est passé à l'open data en mettant à disposition ses données dans des formats accessibles et réutilisables. De producteur de données, l'IGN a évolué en animateur de communautés d'utilisateurs, qui s'appuient sur ces données ouvertes pour développer des outils et services innovants. Datalliance est née de cette opportunité. «*Nous avons commencé par identifier des start-up et des PME porteuses de solutions innovantes éprouvées localement. Il ne s'agit en aucun cas de leur offrir un accès privilégié aux marchés publics. Nous cherchons avant tout à constituer un réseau et un cadre de confiance afin de rapprocher les expertises, publiques et privées, les besoins et les solutions. Des applications qui fonctionnent localement peuvent répondre à des enjeux nationaux*», précise Valentine Bruyère.

Des rendez-vous thématiques du réseau, les «*Rencontres Datalliance*», rassemblent commanditaires et financeurs publics aux côtés de start-up et experts publics du réseau. En juillet 2024, les membres du réseau Datalliance concernés par la thématique biomasse se réuniront avec des experts de l'IGN, des représentants du GIS Biomasse (Groupement d'intérêt scientifique) dont font partie l'Ademe, l'Inrae et France Agrimer, et des porteurs de politiques publiques comme des directions d'administration centrale (ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, ministère de l'Agriculture).

### Coconstruire

Des projets communs IGN et start-up peuvent naître de cette stratégie de collaboration entre acteurs. «*L'IGN a toujours noué des partenariats industriels, essentiellement à travers la recherche. Datalliance s'inscrit dans cette tradition, avec l'ambition pour l'IGN de renforcer ses partenariats industriels et coconstruire avec les membres du réseau. Les avantages sont multiples : l'IGN bénéficie de l'agilité des entreprises et explore des applications inédites pour les géodonnées. Pour les start-up, être associées à l'IGN donne du crédit et de la visibilité à leurs solutions. Enfin, en associant nos capacités, nous pouvons produire des solutions fiables, performantes et souveraines et faire face aux géants privés du numérique pour produire le meilleur service public possible*», souligne Valentine Bruyère.

Constitué à son lancement, en juin 2023, d'une dizaine de start-up et d'entreprises de la géodonnée, le réseau poursuit son développement. À l'occasion de sa présence sur le Pavillon numérique de l'État lors du salon Vivatech 2024, l'IGN a annoncé deux nouveaux membres, Netcarbon et TerraNIS. L'occasion aussi de réaffirmer l'intérêt de ces synergies public-privé pour le développement, par exemple, de modèles souverains d'intelligence artificielle et d'articulation de données d'origines multiples : spatiales, aériennes, terrains... ■



IGN  
VALENTINE  
BRUYERRE PRÉSENTE  
DATALLIANCE

Partenaires de la première heure ou nouveaux dans le réseau, ces membres de Datalliance croisent données IGN, imagerie satellitaire et intelligence artificielle pour aider leurs clients à limiter les impacts du changement climatique.

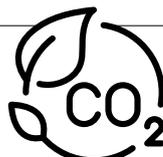


### NAMR : ACCÉLÉRER LA TRANSITION VERS UN HABITAT DURABLE



— Depuis 2017, la société namR développe une base de données pour caractériser les 34 millions de bâtiments français afin d'identifier leur besoin de rénovation

énergétique, leur potentiel photovoltaïque ou encore leur vulnérabilité face au changement climatique. « Les données de l'IGN sont notre matière première : les orthophotographies aériennes alimentent nos modèles d'intelligence artificielle. Il est essentiel pour nous de comprendre comment le référentiel bâtiment de la BD ortho est réalisé ou comment croiser les données IGN avec celles du cadastre. Nos échanges ont abouti à notre adhésion à Datalliance dès la constitution du réseau. Très rapidement, nous nous sommes retrouvés sur un projet : l'identification de parcs photovoltaïques au sol. Nos modèles d'IA sont capables d'identifier les panneaux en toiture, nous les avons adaptés pour identifier les parcs solaires terrestres et contribuer ainsi à mesurer l'impact de ces installations sur l'artificialisation des sols. Dans le cadre de Datalliance, l'IGN a procédé à une forme d'audit de notre technologie et a validé la qualité de notre processus de production de données. Quand le producteur de données de référence vous remercie pour la qualité du travail fourni, la fierté est immense! », raconte Annelise Castres Saint Martin, directrice produit chez namR.

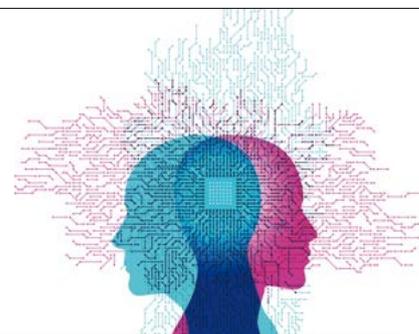


### NETCARBON : STOCKER LE CO2 DANS LES PLANTES



— Grâce aux données des satellites associées à l'intelligence artificielle, Netcarbon mesure et optimise la séquestration du carbone dans la biomasse.

« Notre tâche principale consiste à combiner les données de l'occupation des sols à grande échelle (OCS GE) produites par l'IGN avec celles issues de différents capteurs satellitaires : données infrarouges thermiques ou images très haute résolution. Nous produisons ainsi un état des lieux du stockage carbone, de la végétation, de l'artificialisation et des îlots de chaleur urbains. Puis, pour aller au-delà du constat, notre application simule des scénarios de renaturation en quelques clics. Enfin, nous réalisons le monitoring et la valorisation de ces projets de renaturation dès leur déploiement en nous appuyant sur des méthodes éprouvées facilitant l'intégration dans des plans climat pour les collectivités et des bilans carbone, décrit Basile Goussard, fondateur de Netcarbon. Nos échanges avec l'IGN autour de l'OCS GE ont mis en évidence une synergie forte entre l'expertise de l'IGN et nos solutions. L'IGN dispose de retours utilisateurs sur ses produits et nous pouvons imaginer ensemble de nouveaux traitements et données pour répondre aux enjeux climatiques. Datalliance, c'est donc de la coopération et l'accès à des experts passionnés en traitement de données géospatiales. Nous sommes très heureux de participer à la construction d'un collectif déterminé à avoir un impact. »



## SPACESENSE : IMAGERIE SATELLITE ET AGRICULTURE



— « Pour nos premiers projets de recherche et développement, nous utilisons la BD ortho. Avec l'IGN, la France est le seul pays d'Europe à disposer de données d'une telle qualité. Aussi, quand l'IGN nous

a contactés pour nous demander de rejoindre le réseau Datalliance, nous n'avons pas hésité même si, aujourd'hui, la plupart de nos clients sont hors de France», témoigne Sami Yacoubi, cofondateur de SpaceSense. Depuis 2019, SpaceSense analyse des images satellites avec l'intelligence artificielle pour des usages essentiellement agricoles. « Nos IA sont entraînées et leurs modèles sont validés sur des données terrain qui proviennent de 400 000 agriculteurs partout dans le monde. Ce qui nous offre à la fois une vision globale des phénomènes et la capacité d'être précis très localement », souligne Sami Yacoubi. L'IA détecte les facteurs liés à la croissance végétale comme le niveau de biomasse ou d'humidité à la parcelle. « Nous proposons trois types de solution : le suivi d'une parcelle pour accompagner l'agriculteur, le suivi des cultures à grande échelle pour les industriels et enfin le suivi d'agriculture régénérative – les pratiques agricoles (labour, rotation de culture, couverts intermédiaires...) nécessaires pour bénéficier de crédits carbone ou d'aides de la PAC », détaille Sami Yacoubi, qui compte sur Datalliance pour échanger avec d'autres experts de l'intelligence artificielle, de l'imagerie satellite ou de l'observation de l'agriculture.



## TERRANIS : MESURER LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES



— TerraNIS croise imagerie satellitaire et géodonnées pour mettre l'observation de la Terre au service du développement durable des territoires.

« Selon les besoins, on s'appuiera sur des images Sentinel d'une résolution de 10 ou 20 m ou sur les très hautes résolutions de SPOT 6, voire de Pléiades Neo, de l'ordre de 30 cm. Nous utilisons couramment les données de l'IGN, cartes de couverture du sol par intelligence artificielle (Cosia), BD du référentiel à grande échelle... Nous fournissons des services à l'agriculture, la viticulture, la forêt mais aussi aux territoires urbains et périurbains. Une de nos expertises est l'étude et le suivi des effets de la végétation en ville. Nous sommes ainsi capables, non seulement de dresser une cartographie de la végétalisation, mais aussi de chiffrer précisément ses effets, à l'échelle du pâté de maison ou d'une commune entière », décrit David Hello, directeur de TerraNIS qui a postulé à Datalliance à l'issue d'une première collaboration avec l'IGN, au sein d'un projet cofinancé par le CNES et l'OFB : EagleHedges. « Il s'agissait de cartographier les haies en combinant des images satellites haute résolution et de la BD ortho de l'IGN, avec un traitement IA automatisé, et de caractériser leurs services écosystémiques », se souvient David Hello. « EagleHedges a démontré l'efficacité d'une synergie entre acteurs publics et privés. Au sein de Datalliance, producteurs et utilisateurs de données entretiennent un dialogue constructif pour que celles-ci répondent au mieux aux usages », conclut-il.

LE MONT SAINT-MICHEL,  
vu par Pléiades Neo

# INNOVATIONS SPATIALES

Comment craquer les verrous technologiques pour tirer le meilleur parti de l'observation spatiale et de l'intelligence artificielle? Suivi de l'occupation des sols, surveillance de l'affaissement de la surface terrestre... les chercheurs de l'IGN et les jeunes diplômés de l'ENSG développent aujourd'hui les expertises de demain.



# L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE AU DÉFI DE L'IMAGERIE SPATIALE

Après avoir développé avec succès un modèle d'intelligence artificielle détectant l'occupation des sols à partir d'ortho-images aériennes, l'IGN explore le potentiel de l'IA sur les images satellitaires.

— Réduire la consommation des espaces naturels, agricoles et forestiers dans les projets d'aménagement urbain pour atteindre Zéro artificialisation nette (ZAN) en 2050 : c'est la trajectoire fixée par la loi Climat et résilience du 22 août 2021. Pour piloter et mesurer leur progression, les territoires disposeront bientôt d'un outil unique : l'OCS GE<sup>(1)</sup>, un référentiel décrivant la couverture et l'usage des sols, produit par l'IGN à partir d'ortho-images aériennes combinées à d'autres bases de données (topographie, forêts, parcelles agricoles...). « Cette loi a joué le rôle d'un catalyseur pour le développement des méthodes IA à l'IGN, estime Sébastien Giordano, ingénieur d'études au service Innovation, Maturation et Valorisation. En effet, pour couvrir l'ensemble du territoire national d'ici à 2025, conformément à nos engagements vis-à-vis de l'État, nous devons aller vite. Et pour cela, nous avons développé un modèle d'intelligence artificielle afin d'automatiser la classification des images aériennes. »

## Nouveaux usages

Devant le succès de ce modèle, capable de distinguer précisément 16 classes d'occupation du sol (culture, peuplement de conifères et/ou de feuillus, bâtiment, surface d'eau...) et pouvant être généralisé à tout type

## FINISTÈRE SUD (PENMARC'H, GUILVINEC).

Prédiction d'occupation du sol réalisée par un processus automatisé reposant sur l'intelligence artificielle, à partir d'une image satellitaire fournie par la constellation Pléiades Neo.



© IGN/Airbus DS 2022

de paysage, l'IGN a poussé plus loin l'exploration du potentiel de l'IA en l'appliquant à l'imagerie satellitaire. « Ce qui nous intéresse, c'est d'aller vers une couverture annuelle en combinant images aériennes et satellitaires, explique Sébastien Giordano. C'est possible grâce à la fréquence de passage des satellites. Dans un premier temps, ces mises à jour bénéficieraient au produit CoSIA<sup>(2)</sup>, qui regroupe des cartes générées automatiquement grâce à l'IA. Ces dernières servent aujourd'hui de donnée d'entrée dans la conception de l'OCS GE, mais d'autres besoins existent. »

L'Institut Paris Région fait partie des partenaires de l'IGN intéressés par ces données brutes issues de l'IA. « En tant qu'agence d'urbanisme pour la Région Île-de-France, nous produisons régulièrement un inventaire

(1) Occupation du sol à grande échelle.

(2) Couverture du sol par IA.

“

**UN MODÈLE IA PEUT ÊTRE ENTRAÎNÉ À RÉALISER DES TÂCHES DIFFÉRENTES SANS REPARTIR DE ZÉRO ET AVEC PEU DE DONNÉES D'APPRENTISSAGE EN ENTRÉE.**

**SÉBASTIEN GIORDANO,**  
INGÉNIEUR D'ÉTUDES INNOVATION

”



**23**  
**IMAGES,**

ONT SUFFI POUR ADAPTER LE MODÈLE IA ENTRAÎNÉ SUR ORTHO-IMAGES AÉRIENNES À L'ANALYSE D'IMAGES SATELLITAIRES PLÉIADES NEO.

© IGN/L'Institut Paris Region 2021



#### DE L'ORTHOPHOTO AU MOS FRANCILIEN.

Le Mode d'occupation du sol (Mos) est réalisé par l'Institut Paris Région à partir de prises de vues de l'IGN couvrant les 12 000 km<sup>2</sup> de l'espace régional francilien.

numérique de l'occupation du sol francilien, le Mos<sup>(3)</sup>, réalisé à partir des orthophotographies aériennes de l'IGN, explique Laurie Gobled, directrice du département Systèmes d'information de l'institut. Mais nous savons que ces dernières sont de plus en plus complexes à acquérir en raison des autorisations de survol à obtenir ou, tout simplement, des conditions météorologiques. En outre, elles ne sont renouvelées que tous les trois ans. C'est pourquoi nous suivons de près les travaux de l'IGN sur l'imagerie satellitaire. Si la technologie est prête, nous aimerions l'exploiter pour produire le prochain millésime du Mos. Par ailleurs, nous détectons des objets par IA à partir d'orthophotographies, par exemple pour identifier des gisements solaires sur les parkings franciliens. Nous pourrions le faire à un rythme plus fréquent grâce aux images satellitaires et étendre ces détections à d'autres éléments comme les arbres ou les plans d'eau.»

#### Apprentissage par transfert

Pour l'heure, l'IGN a fait un premier grand pas en adaptant le modèle d'apprentissage automatique développé pour l'orthophotographie aérienne aux images satellitaires à très haute résolution spatiale issues de la constellation Pléiades Neo. « Le modèle initial ne pouvait être réutilisé tel quel, détaille Sébastien Giordano. Mais l'un des atouts de l'IA, c'est qu'elle est apprenante. En particulier, la méthode d'apprentissage par transfert consiste à transposer des connaissances acquises dans un domaine vers un autre domaine partageant des similitudes. Ce qui est le cas des images aériennes de l'IGN et des images satellitaires Pléiades Neo, dont la résolution spatiale, les canaux spectraux et la radiométrie sont proches. Cela évite de repartir de zéro, ce qui représente un gain de temps... et d'argent! »

L'IGN a ainsi réussi à entraîner le modèle IA existant pour lui apprendre à analyser des images satellitaires Pléiades Neo... avec 30 fois moins de données d'apprentissage! « La comparaison entre le modèle initial et son dérivé montre qu'ils sont aussi performants en termes d'exactitude et d'exhaustivité, souligne Sébastien Giordano. La prochaine étape sera de vérifier que les prédictions IA sur les images Pléiades Neo sont exploitables pour la production de l'OCS GE. Nous allons aussi améliorer la méthode de transfert et l'appliquer à d'autres référentiels, comme les bases de données Forêt ou Haies. Enfin, on peut imaginer dans le futur développer des modèles IA multisources en ajoutant des séries temporelles d'images optiques et radar Sentinel, des nuages de points lidar... » ■

(3) Mode d'occupation du sol.



# L'INTERFÉROMÉTRIE RADAR : SURVEILLER LA TERRE DEPUIS L'ESPACE

Capable de révéler les déformations du sol, l'imagerie radar satellitaire ouvre de nouvelles perspectives pour l'entretien de l'infrastructure géodésique de l'IGN, mais aussi pour la surveillance des risques naturels.



© ESA/ATG medialab

— 330 000 : c'est le nombre de repères de nivellement que compte le réseau altimétrique français, dont l'altitude est connue avec précision. S'y ajoutent quelque 80 000 points géodésiques identifiés par leurs coordonnées tridimensionnelles, sans oublier les repères gravimétriques mesurant le champ de pesanteur et le réseau GNSS<sup>(1)</sup> permanent qui enregistre les données satellites pour la géolocalisation. L'ensemble de cette infrastructure relève de la responsabilité de l'IGN.

« Toute la difficulté consiste à entretenir ces réseaux, souligne Thomas Donal, chef de projet au service Géodésie et Métrologie (SGM) de l'IGN. Certains repères peuvent disparaître à l'occasion de projets d'aménagement ou encore être déplacés en raison d'un affaissement du sol,

“ LA TECHNOLOGIE INSAR S'AFFRANCHIT DES CONTRAINTES NOCTURNES ET MÉTÉOROLOGIQUES ET OFFRE UNE PRÉCISION DE DÉPLACEMENT MILLIMÉTRIQUE. ”

THOMAS DONAL,

CHEF DE PROJET AU SERVICE GÉODÉSIE ET MÉTROLOGIE DE L'IGN.

# 4

CM/AN



© DR

par exemple. Il faut alors se rendre sur le terrain pour actualiser leurs coordonnées. Pour cibler les besoins et prioriser les campagnes d'intervention, nous avons eu l'idée d'utiliser l'imagerie radar satellitaire, et plus précisément l'analyse interférométrique de l'imagerie radar, ou InSAR<sup>(2)</sup>. »

## Précision millimétrique

Le principe de l'InSAR est en effet de capter les ondes électromagnétiques émises par un satellite radar et réfléchies par la surface de la Terre afin de mesurer la distance parcourue par le signal. En répétant cette mesure au cours du temps, on peut détecter d'éventuelles déformations du sol au millimètre près. « L'arrivée récente de données abondantes et gratuites via le programme Copernicus et ses satellites Sentinel-1 rend possible une application à large échelle de cette technologie, explique Thomas Donal. C'est le cas du service européen de surveillance des mouvements EGMS<sup>(3)</sup> sur lequel nous nous appuyons : l'idée est d'examiner la cartographie des mouvements terrestres fournie par EGMS pour estimer quels repères de notre infrastructure seraient affectés par des déplacements du sol significatifs nécessitant un entretien prioritaire. »

Encore à l'étude, le projet va se poursuivre avec l'objectif de qualifier les données InSAR afin d'envisager l'hybridation de cette technique avec les autres mesures géodésiques pour une amélioration des référentiels géométriques et altimétriques. Il est également envisagé d'équiper certaines antennes GNSS de réflecteurs radar pour une meilleure combinaison des mesures.

## Suivre la subsidence d'Hô Chi Minh-Ville

La technologie InSAR recèle aussi de nombreux usages externes auxquels l'IGN prend part dans des collaborations de recherche : étude du niveau de la mer, observation des eaux littorales ou encore analyse de la subsidence. C'est dans ce contexte que Marc Poupée, enseignant en télédétection à l'ENSG-Géomatique, a monté un projet de formation et d'échange avec l'université polytechnique d'Hô Chi Minh-Ville<sup>(4)</sup>, dans le cadre des appels à projets du programme Copernicus. « L'objectif était de former des étudiants et chercheurs vietnamiens aux outils et données InSAR afin de les aider à traiter des problématiques locales, indique-t-il. En l'occurrence, le

C'EST LA VITESSE MOYENNE DES DÉPLACEMENTS DE SURFACE OBSERVÉE PAR L'ÉTUDIANTE KIM TUYÊN ÂN HỒNG SUR CERTAINS QUARTIERS D'HÔ CHI MINH-VILLE VIA LA MÉTHODE INSAR.

*suivi de la subsidence d'Hô Chi Minh-Ville, agglomération dont la croissance s'accompagne de taux d'affaissement du sol importants et d'un risque accru d'immersion des eaux côtières. »*

Dans un premier temps, une étudiante vietnamienne en géomatique, Kim Tuyên Ân Hồng, s'est formée aux fondamentaux de l'InSAR lors d'un stage de plusieurs mois à l'ENSG et à l'Université Gustave-Eiffel. « Elle a produit deux cartes de vitesse moyenne de déplacements de surface à Hô Chi Minh-Ville et observé des déformations de l'ordre de 4 cm/an confirmant des études plus anciennes, note Bénédicte Fruneau, maîtresse de conférence à l'Université Gustave-Eiffel. Il s'agit cependant de résultats préliminaires, qui doivent être confrontés au terrain. »

Le projet comprenait également l'organisation d'une école d'été à l'université polytechnique d'Hô Chi Minh-Ville, à laquelle Kim Tuyên Ân Hồng a pris part pour faciliter la transmission des savoirs : « J'ai partagé les connaissances acquises au cours de mon stage avec les étudiants présents et traduit certains enseignements en vietnamien, ce qui a rendu la technique plus accessible à tous. » Aujourd'hui diplômée, la jeune femme travaille dans une entreprise spécialisée dans les données géospatiales appliquées à l'environnement. « Nous espérons reconduire ce programme tous les deux à trois ans, annonce Marc Poupée. En effet, les besoins en formation sur le potentiel des capteurs SAR sont très importants au Vietnam en vue de l'arrivée de LOTUSat-1, le premier satellite vietnamien d'observation radar de la Terre, qui devrait être mis en orbite sous peu<sup>(5)</sup>. » ■

(1) Global navigation satellite system.

(2) Interférométrie SAR (Synthetic Aperture Radar).

(3) European Ground Motion Service.

(4) En partenariat avec le CNES et avec l'appui du service Relations internationales de l'ENSG.

(5) Entre décembre 2024 et février 2025.



# L'ENSG À LA CONQUÊTE DE L'ESPACE

Télédétection, traitement d'images satellitaires... L'enseignement de l'ENSG fait la part belle à l'analyse spatiale. Pour le plus grand intérêt des étudiants, qu'ils poursuivent ensuite une carrière en entreprise ou dans la recherche. Témoignages.



© Iris de Gelis

“ VOIR LA TERRE D'EN HAUT M'A TOUJOURS IMPRESSIONNÉE !

IRIS DE GELIS,  
INGÉNIEURE  
DE RECHERCHE, ESTELLUS.



— « Après mon diplôme d'ingénieur à l'ENSG, j'ai continué à me spécialiser en télédétection avec un deuxième master, avant de réaliser une thèse de doctorat sur la détection de changements dans les nuages de points 3D grâce à l'apprentissage profond. Aujourd'hui, je mets toutes ces connaissances à contribution en tant qu'ingénieure de recherche dans une société spécialisée dans l'observation de la Terre par micro-ondes passives. Je travaille plus spécifiquement sur la modélisation de l'émissivité de la neige en fonction de variables géophysiques grâce à des réseaux de neurones. Je m'appuie pour l'instant sur des données satellites existantes, mais l'enjeu de mes recherches est de contribuer à la conception du futur satellite Sentinel-11 du programme Copernicus, qui doit être lancé à l'horizon 2029 pour le suivi des pôles en mesurant de nombreux paramètres, par exemple liés à la banquise. Je garde ainsi un pied dans le monde de la recherche, en lien avec l'Observatoire de Paris et le laboratoire Lerma<sup>(1)</sup>. »

(1) Laboratoire d'études du rayonnement et de la matière en astrophysique et atmosphères, unité mixte de recherche CNRS/Observatoire de Paris/Sorbonne Université/Cergy Paris Université.

— « J'ai effectué mon stage de 2<sup>e</sup> année au NERSC<sup>(1)</sup>, en Norvège, sur la classification de la glace de mer à des fins de navigation ou de prévisions météorologiques. Mon maître de stage avait développé quelques années plus tôt un modèle de classification automatique des glaces marines à partir de données satellites radars utilisant les réseaux de neurones convolutifs (CNN<sup>(2)</sup>), une technique d'apprentissage profond faisant partie de l'intelligence artificielle. J'ai créé des programmes pour comparer ces classifications basées sur l'IA avec les cartographies de deux instituts spécialisés. J'ai également repris un modèle CNN développé par d'anciens stagiaires de l'ENSG et je l'ai entraîné avec un autre jeu de données. Cette expérience m'a donné à voir le potentiel des technologies spatiales. J'approfondis actuellement ces sujets en 3<sup>e</sup> année puisque j'ai choisi de me spécialiser dans la filière Photogrammétrie, Positionnement et Mesure de Déformations (PPMD). »

(1) Nansen Environmental and Remote Sensing Center.  
(2) Convolutional Neural Network.



© Louise Redinger

“ L'IMAGERIE SATELLITAIRE OFFRE UNE RÉOLUTION TEMPORELLE INTÉRESSANTE POUR SUIVRE DES PHÉNOMÈNES NATURELS.

MALO DE LACOUR,  
ÉTUDIANT EN 3<sup>E</sup> ANNÉE  
DE CYCLE INGÉNIEUR.



# DÉCOUVREZ LA FRANCE AUTREMENT AVEC L'APPLICATION MOBILE CARTES IGN

