

CNES MAG



ESPACE • INNOVATION • SOCIÉTÉ

#81
Août 2019

LE VENT ET LES VAGUES

UN COUPLE ÉNIGMATIQUE



• • • **cnes** • • •
CENTRE NATIONAL
D'ÉTUDES SPATIALES



SOMMAIRE



05 ÉDITORIAL

06 L'ESSENTIEL

Records de CFOSat, préparation de Swot, bulletins d'Eumetsat... Le point sur toutes les facettes de l'océanographie spatiale

12 #COMMUNAUTÉ

Les followers du CNES scrutent eux aussi les océans

13 GRAND ORAL

Explorateur aguerri, Jean-Louis Étienne détaille ses projets actuels

16 EN IMAGES

Poissons et tourbillons : enjeux spatiaux

18 EN CHIFFRES

Espace et océans : les données qui en disent long

19 LE CNES EN ACTIONS

L'altimétrie spatiale change d'échelle

27 MATIÈRE

L'altimètre à large faucée

28 INSTANTS T

Swot à la loupe

30 RENCONTRES

- Patrick Castellan, chef de projet CFOSat au CNES
- Marina Lévy, directrice adjointe du département Océans, climat et ressources de l'IRD, directrice de recherche au CNRS
- Christophe Guinet, écologue marin au centre d'études biologiques de Chizé du CNRS

33 ESPACE ÉTHIQUE

Appareiller, par Jacques Arnould

34 EN VUE

Les événements et ouvrages à ne pas manquer

36 TRANSFERT

Cartographier la symphonie océane

PARTENAIRES

Sont cités dans ce numéro : p. 6/9/20/22/29/35 l'agence spatiale américaine (NASA); p. 21/22/25/26/30 l'agence spatiale chinoise (CNSA); p. 8/9/26 l'agence spatiale européenne (ESA); p. 29 l'agence spatiale canadienne (CSA); p. 29, l'agence spatiale britannique (UKSA); p. 6/21/25 Thales Alenia Space; p. 9/10/15/36 Mercator Océan International; p. 8/35 la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA); p. 9/11/25/35 Eumetsat; p. 11/15/25 l'Ifremer; p. 16/18 CLS; p. 17 l'institut des géosciences de l'environnement (IGE); p. 20 le groupe de recherche de géodésie spatiale (GRGS).

En couverture : © Getty Images/iStockphoto



WWW.CNES.FR

Découvrez les contenus en ligne de ce nouveau numéro sur cnes.fr/cnesmag



CNESfrance



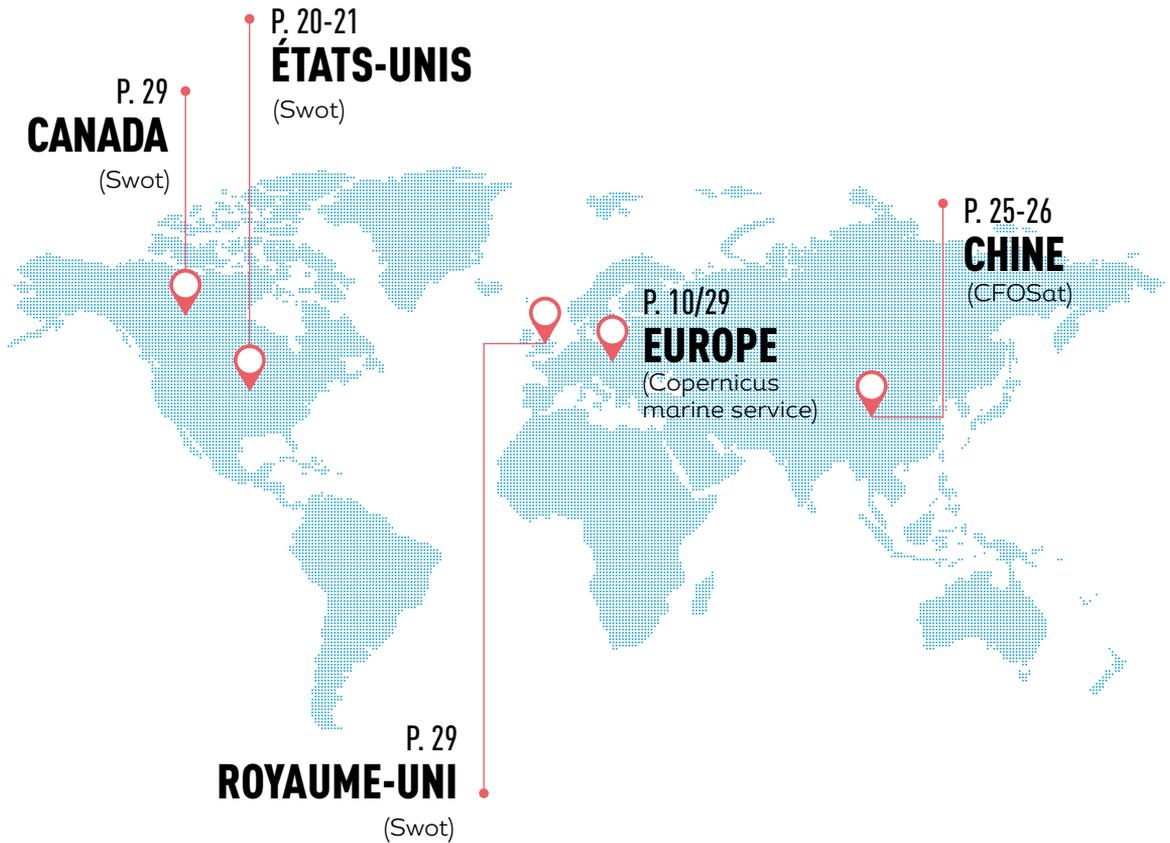
@CNES



CNES



LES PAYS QUI ÉTUDIENT LES OCÉANS À PETITE ÉCHELLE





CONTRIBUTEURS



PHILIPPE ESCUDIER

Passionné d'océan, Philippe Escudier en a fait sa spécialité. De Topex-Poséidon à Vagsat, futur CFOSat, il a été de tous les programmes. Son passage comme directeur business chez CLS l'a notamment amené à commercialiser des services sur la gestion des ressources marines. Aujourd'hui responsable du développement des usages du spatial au CNES, il nous a aidés à vous raconter l'incroyable aventure de l'océanographie spatiale.



SOPHIE COUTIN-FAYE

Madame Altimétrie au CNES, elle a participé à la naissance de cette filière spatiale d'excellence qui a mis en évidence la montée continue du niveau des océans. Responsable des filières Altimétrie et Argos (autre grande contributrice à l'étude du climat), Sophie Coutin-Faye est habitée par un souci de transmission tant aux utilisateurs des données spatiales qu'au grand public. Elle a été la caution de ce numéro.



THIERRY LAFON

Après avoir travaillé plus de 10 ans sur les programmes Jason-1 puis 2, Thierry Lafon a pris les manettes du projet Swot en 2008. Et, plus particulièrement, du développement des composantes françaises de la mission. De la complexité technique aux relations avec les Américains, il incarne à 100 % ce projet. Très occupé, il a dégagé du temps pour nous expliquer les enjeux de ce satellite très attendu.



BOYD VINCENT

Embarqué dans l'aventure de CNESmag depuis les tout premiers numéros, Boyd Vincent est traducteur spécialisé dans le spatial. Son credo, c'est la fluidité et la facilité de lecture. Son but : trouver des passerelles linguistiques et culturelles entre le français et l'anglais pour sublimer les sujets du magazine. Artisan des mots comme il aime à se définir, il est notre « voix anglaise ».

CNESMAG

CNESmag, le magazine d'information du Centre national d'études spatiales, 2 place Maurice Quentin. 75039 Paris cedex 01. Adresse postale pour toute correspondance : 18 avenue Édouard Belin. 31401 Toulouse cedex 9. Tél. : +33 (0)5 61 27 40 68. Internet : <http://www.cnes.fr>. Cette revue est adhérente à Communication&Entreprises. Abonnement : <https://cnes.fr/reabonnement-cnesmag> **Directeur de la publication** : Jean-Yves Le Gall. **Directrice éditoriale** : Marie-Claude Salomé. **Rédactrice en chef** : Brigitte Alonzo-Thomas. **Secrétaire générale de la rédaction** : Céline Arnaud. **Rédaction** : Brigitte Alonzo-Thomas, Karol Barthélémy, Liliane Feuillerac. **Photothèque (recherche iconographique)** : Marie-Claire Fontebasso. **Responsable photo** : Nicolas Tronquart. **Crédits photo** : p. 4 P. Escudier - CNES/P. Jalby - CNES/E. Grimault - B. Vincent ; p. 5 CNES/S. Godefroy ; p. 6 CNES/D. Ducros ; p. 7 (haut) CNES/C. Peus - (droite) Getty Images ; p. 8 (gauche) Getty Images - (droite) CNES/CLS ; p. 9 CNES/CLS/AVISO ; p. 8-9 CNES/ESA/D. Ducros - O. Sattler ; p. 10 (haut) Getty Images - (bas) Mercator Océan International ; p. 11 (haut) ESA ; p. 13 et 15 Witi De TERA/Opale/Leemage ; p. 16 Getty Images ; p. 17 Ocean Next ; p. 18 Getty Images ; p. 19 S. Gladwell/Getty Images ; p. 20 Getty Images ; p. 21 CNES/E. Grimault ; p. 22 CNES/P. Le Doaré ; p. 23 Getty Images ; p. 24 (haut) CLS/AVISO - (bas) CNES/N. Tronquart ; p. 25 Copernicus Sentinel Data ; p. 27 CNES/Thales Alenia Space/L. Barranco ; p. 33 I. Arnould ; p. 35 CNES ; p. 36 Quonops Online Service. **Illustrations** : David Ducros, François Foyard, Jean-Marc Pau, Robin Sarian (Idix). **Web master** : Sylvain Charrier, Mélanie Ramel. **Réseaux sociaux** : Mathilde de Vos. **Traduction** : Boyd Vincent. **Conception, conseil et réalisation** : Citizen Press - Camille Aulas, David Corvaisier, Mathilde Gayet, Alexandra Roy. **Impression** : Ménard. ISSN 1283-9817. **Ont participé à ce numéro** : Laurence Amen, Pierre Bahurel, Pierre brasseur, Patrick Castellan, Selma Cherchali, Marianna Chilness, Philippe Collot, Sophie Coutin-Faye, Emline Deseez, Daniele Destaerke, Gérald Dibarboure, Claire Dramas, Nicolas Durfour, Philippe Escudier, Gabrielle Fournier, Thierry Lafon, Anne Lifermann, Alain Mallet, Benoit Meyssignac, Estelle Oblidis, Jean-Gabriel Parly, Claire Tison, Cécile Thomas-Courcoux. Et toutes nos excuses à Marianne Quiles, rédactrice dans le CNESmag 80 et oubliée dans l'ours du précédent numéro.



ÉDITORIAL



Le vent et les vagues. L'évocation de ce couple énigmatique fait immédiatement penser aux journées passées à la plage...

Et pourtant, derrière ces images de vacances, se cachent les clés du climat de notre planète. C'est en effet cette interaction permanente entre l'atmosphère et l'océan, qui définit le temps qu'il fait. Sa compréhension est essentielle à la météorologie et son évolution nous renseigne sur le changement climatique et son impact sur notre environnement. Ce sont ces phénomènes qui sont décrits par nos invités dans ce numéro de CNESMAG, en mettant un accent particulier sur le rôle irremplaçable des satellites pour leur observation. En effet, seuls les satellites peuvent fournir des données globales sur les terres émergées et les océans et cela, pendant de très longues périodes. Aujourd'hui, la Terre est auscultée continuellement, ce qui permet de prendre son pouls et d'anticiper son évolution. Dans ce domaine, nos satellites nous font faire la course en tête. Avec les Etats-Unis, Topex-Poseidon et Jason ont mis en évidence l'augmentation moyenne de 3,4 millimètres par an du niveau des océans. Avec l'Inde, Saral-AltiKa fournit des données remarquables en altimétrie fine. Avec la Chine, CFOSat est le premier satellite à observer simultanément le vent et les vagues. Et avec l'Europe, les Sentinel du programme Copernicus mesurent des paramètres de l'océan qui ne l'avaient jamais été. Au total, nous comprenons chaque jour davantage les humeurs du vent et des vagues et leur impact sur le climat de notre planète.

JEAN-YVES LE GALL

PRÉSIDENT DU CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES



KARIN

Un cœur français

Après les satellites d'océanographie Topex-Poséidon puis ceux de la famille Jason, Swot renforcera encore un peu plus les liens de la coopération franco-américaine dans cette discipline. Pour preuve : le développement de KaRin, l'altimètre interférométrique à large fauchée qui sera embarqué sur le satellite (cf. p. 27). C'est au CNES que la NASA a confié la fourniture de son « cœur analogique » : l'unité radio-fréquence (RFU). Objectif : transcender le niveau de performance de l'instrument principal (cf. p. 18) grâce à la géométrie d'observation des deux antennes radar situées aux extrémités d'un mât. Développé par Thales Alenia Space, il est livré dès cet été au Jet Propulsion Laboratory, en Californie, pour être ultérieurement intégré dans KaRin.

Swot est un satellite d'observation de la Terre dédié aussi bien à la mesure du niveau des océans qu'à celui des eaux de surface, des lacs et des cours d'eau (fleuves, rivières, etc.).

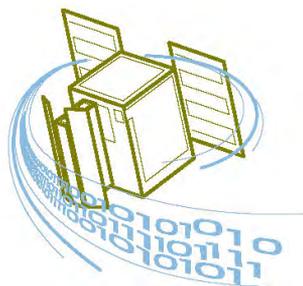


L'ESSENTIEL



SCO DES DONNÉES MONDIALES PARTAGÉES

Le SCO (Space Climate Observatory), c'est la concrétisation de l'un des douze engagements pris à Paris lors du premier One Planet Summit, en 2017. Initié par le CNES et lancé officiellement par le président de la République lors de l'édition 2019 du Salon du Bourget, cet observatoire s'appuie sur deux leviers : la coopération internationale et la donnée spatiale. Le concept a convaincu 60 agences spatiales, dont 25 sont déjà engagées dans une déclaration commune ; des ONG et des organismes publics les ont depuis rejointes. Ces partenaires fondateurs mutualisent à l'échelle mondiale des données multisources et, en particulier, des données satellitaires. Gardien de ce « patrimoine », le SCO le diffuse aussi largement. Et pour cause : ces informations peuvent constituer de précieux outils d'aide à la décision sur des projets locaux d'aménagement du territoire, par exemple. En juin 2018, un premier site a prouvé la viabilité de cet observatoire mondial. Il fera appel aux moyens du big data et à l'intelligence artificielle.



8 TÉRABITS

C'est le débit de données que KaRin livrera chaque jour. Ne comptez pas : 8 térabits équivalent à 8 000 000 000 000 bits ! Ces données transitent entre la France et les États-Unis, qui en partagent l'exploitation. Elles sont traitées au sol de manière automatique par des milliers de cœurs d'ordinateurs.



CFOSAT UN SANS-FAUTE !

Mis sur orbite par la fusée chinoise « Longue marche 2C », CFOSat a très vite battu des records de réactivité. À Toulouse et à Xi'an, capitale de la province du Shaanxi, les équipes françaises et chinoises affichaient leur soulagement dès la recette en vol : tout était au vert, la mise à poste, la mise en route des instruments et la chaîne de traitement des données. CFOSat a coché toutes les cases et répondu parfaitement, en temps et en heure, à sa feuille de route. Les deux radars, le français Swim et le chinois Scat, ont livré dès les premiers jours des spectres de vagues et des cartes des vents d'une qualité exceptionnelle, en cohérence totale avec les modèles théoriques. Début juillet, le satellite est entré en phase d'exploitation pour contribuer à la compréhension des phénomènes océaniques et de leur couplage avec l'atmosphère (cf. En actions p. 25-26).



TOSCA

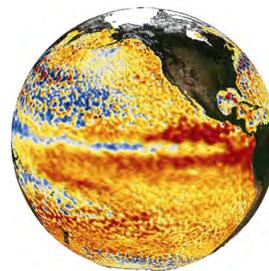
L'ASSURANCE DE FAIRE LES BONS CHOIX

Le CNES est un agitateur... d'idées! Il le revendique en publiant chaque année un appel à propositions qui stimule la communauté scientifique française. Un comité d'experts du nom de Tosca analyse ensuite les propositions reçues en rapport avec les thèmes Terre solide, Océan, Surfaces continentales et Atmosphère, et donne un avis éclairé sur les travaux innovants qu'il faut accompagner. En 2018, le groupe de travail dédié à l'océan s'est par exemple intéressé à des profils *in situ* récoltés par des éléphants de mer. Plus d'une vingtaine de femelles ont été équipées de balises océanographiques haute fréquence qui ont enregistré en continu la température, la salinité, la lumière et, pour certaines d'entre elles, la fluorescence du phytoplancton. La collecte de données s'est avérée exceptionnelle. Combinées aux observations altimétriques qui préfigurent la mission Swot, elles ont contribué à révéler certains phénomènes comme la présence de fronts océaniques dans l'océan profond.

86

projets ont été soutenus par le CNES dans le cadre de Tosca océan en 2018. Environ 400 chercheurs ont participé à ces travaux, qui ont donné lieu à près de 300 publications scientifiques de grande qualité.

En mai 2015, les signes avant-coureurs d'El Niño sont ici visibles dans l'océan Pacifique.



EL NIÑO

ENFANT TERRIBLE

Courant côtier saisonnier chaud au large du Pérou, El Niño est l'un des plus pernicieux et des plus terribles phénomènes qui soient. Inondations, pluies intenses, déroutement de typhons vers des régions non préparées... ses conséquences sont dramatiques pour les populations côtières et l'économie des pays impactés. Le dernier El Niño majeur remonte à 1997-1998; il avait fait 23 000 victimes de par le monde et provoqué entre 34 et 46 milliards de dollars de dégâts. C'est à cette époque que Topex-Poséidon avait détecté les signes avant-coureurs de son passage. Depuis, l'altimétrie spatiale n'a pas relâché sa vigilance. En 2015 par exemple, elle a détecté le début d'un El Niño qui, par chance, n'a pas eu de suites. Si elle n'arrête pas les caprices de la nature, l'altimétrie spatiale permet en revanche de prendre les mesures de sécurité nécessaires. Des observations sont effectuées sur une base trimestrielle et couvrent les six mois suivants. La NOAA¹, en particulier, gère un site Internet sur lequel des bulletins et des analyses hebdomadaires sont disponibles.

1. National Oceanic and Atmospheric Administration.

LES SATELLITES OCÉANOGRAPHIQUES

TOPEX-POSÉIDON (CNES-NASA)

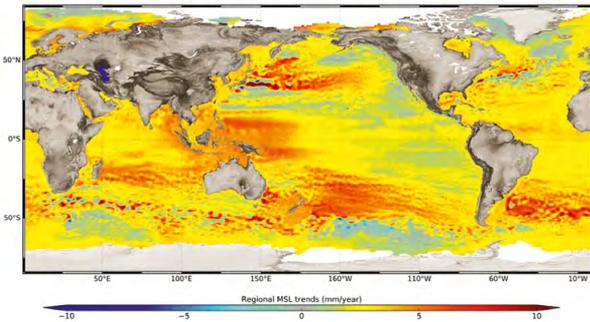


Lancé en 1992, l'altimètre Poséidon, combiné avec l'instrument Doris, mesure avec une précision de quelques centimètres la surface de l'océan.

ERS (ESA)



Premier satellite européen de télédétection, ERS mesure la couleur des océans et la température de surface jusqu'en 2000 (ERS-1 lancé en 1991, ERS-2 en 1995).



Évolution du niveau moyen des mers sur la période de janvier 1993 à septembre 2018, calculée grâce aux données cumulées des satellites altimétriques de haute précision (Topex-Poséidon et Jason-1, 2 et 3).

JASON-3 LA RÉFÉRENCE

Au fil des générations d'altimètres de la filière Jason, le CNES a poursuivi sans relâche le même objectif, celui d'une précision d'orfèvre. Héritier du pionnier Topex-Poséidon, Jason-3, lancé en 2016, a atteint l'excellence avec une précision centimétrique. Il le doit à l'obstination des équipes du CNES, dont la ténacité est aujourd'hui récompensée. Plus encore, Jason-3 est un des éléments du programme européen Copernicus ainsi que d'Eumetsat, et vient alimenter les modèles de prévision du Service de surveillance de l'environnement marin de Copernicus (CMEMS) opéré par Mercator Océan International. Ce positionnement assure sa visibilité à l'échelle mondiale et la pérennité de la filière. C'est aussi pour partie sur les données d'altimétrie de Jason-3 que s'appuie le GIEC pour analyser l'évolution du climat et établir ses conclusions qui orientent ensuite les politiques publiques.

3,4 MM

Au XX^e siècle, le niveau des mers a augmenté de moins de 2 mm par an. Entre 1993 et 2003, les mesures altimétriques de Topex-Poséidon estiment la hausse à 2,9 mm/an. L'élévation du niveau moyen s'élève aujourd'hui à 3,4 mm /an.

30 %

L'océan absorbe près de 30 % des émissions de dioxyde de carbone dues aux activités humaines ; il en contient 50 fois plus que l'atmosphère. Il répartit ensuite ce CO₂ en profondeur grâce aux courants. Les zones froides des océans absorbent plus de CO₂ que les zones chaudes.

17,5°

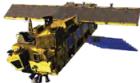
C'est la température moyenne des océans jusqu'à 200 mètres de profondeur ! Cette température est à peu près égale à celle de la surface. Mais elle n'est pas homogène sur tous les points du globe. Le maximum est de 27-28 °C dans les océans tropicaux et le minimum de -1,8 °C dans les eaux polaires.

**JASON
(CNES-NASA)**



Versions miniatures de Topex-Poséidon, trois générations (2001, 2008, 2016) se succèdent et seront suivies par Sentinelle-6.

**ENVISAT
(ESA)**



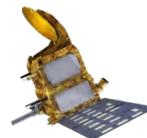
Lancé en 2002, ce successeur d'ERS-1 et 2 donne accès aux mesures en quasi-temps réel.

**SMOS
(ESA)**



Minisatellite lancé en 2009, Smos mesure la salinité de la surface des océans. La première carte de salinité a été produite en 2010.

**SARAL
(CNES-ISRO)**



Satellite franco-indien, Saral étudie le niveau des mers, des glaces et des rivières avec AltiKa. Lancé en 2013, il prend le relais d'Envisat et améliore la précision et la résolution des mesures.

**SENTINELLE
(ESA)**



La série des satellites du programme Copernicus a été lancée à partir de 2016 et alimente le système européen d'analyse et de prévision des océans (CMEMS).



L'ESSENTIEL



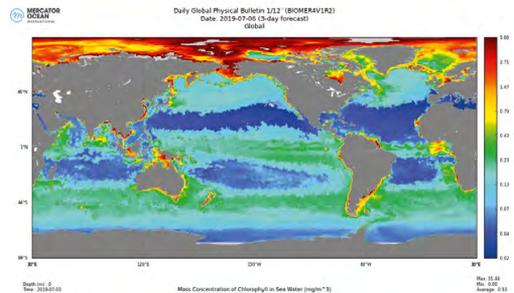
GIEC URGENCE EXTRÊME

On avait laissé le Giec¹ crier à l'urgence dans son 6^e rapport en 2018. Les deux nouveaux rapports, qui paraîtront en août et septembre 2019, ne sont pas plus rassurants. Benoît Meyssignac, océanographe au Legos², l'affirme : « Les recherches récentes indiquent une accélération de la montée du niveau de la mer. » Depuis 2005, la fonte des glaces continentales s'est accélérée, devenant la contribution majeure à la hausse du niveau de la mer. Elle devrait encore s'accroître dans les décennies à venir. À moyen terme, cette élévation aura un impact capital sur la fréquence des événements extrêmes. Illustrés récemment par la tempête Xynthia (hausse de 1,15 m du niveau de la mer), ces phénomènes encore considérés comme « rares » seront monnaie courante d'ici à la fin du siècle si les émissions de gaz à effet de serre ne sont pas réduites. Avec une hausse qui pourrait atteindre jusqu'à 1 m en 2100, les littoraux et les régions ultramarines sont en danger ; il faut en repenser dès aujourd'hui l'adaptation.

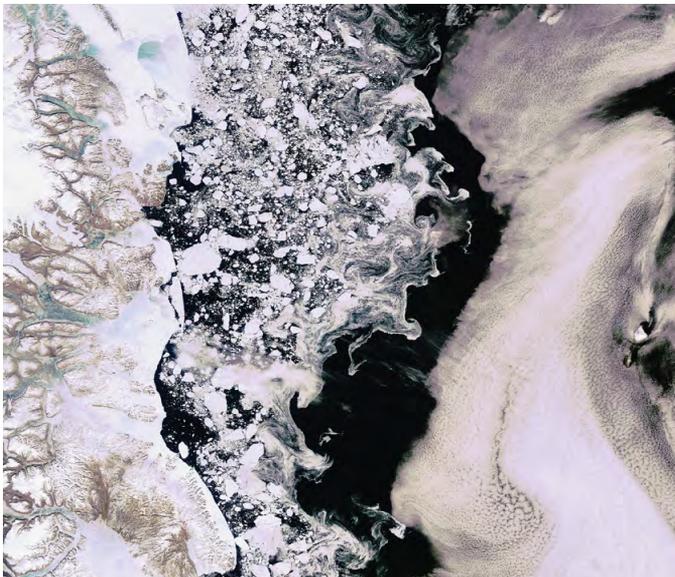
1. Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat.
2. Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales.

MERCATOR OCÉAN INTERNATIONAL OCÉANS SOUS SURVEILLANCE

Que vous soyez scientifique, développeur d'applications pour la sécurité en mer, patron d'une ferme aquacole ou simple citoyen, grâce à Mercator Océan International, vous pouvez accéder librement et gratuitement à des observations et à des prévisions concernant tous les océans du globe : l'Océan bleu (courants, température, salinité, hauteur de mer), l'Océan blanc (glace de mer) et l'Océan vert (microplanctons, chlorophylle). Analyser, modéliser et surveiller les caractéristiques physiques, dynamiques et biogéochimiques de tous les océans, en surface comme en profondeur, c'est l'objet de l'océanographie opérationnelle, une jeune discipline au cœur des activités de Mercator Océan International. Ces informations s'appuient sur une chaîne de valeur solide qui commence par les observations spatiales et produit les informations océaniques nécessaires aux programmes mondiaux de l'environnement et de la biodiversité comme les « Objectifs de développement durable » (ODD) des Nations unies.



Concentration de chlorophylle à la surface de l'océan issue du système d'analyse et de prévision biogéochimique au 1/4° opéré par Mercator Océan International.



Les tourbillons de l'océan Arctique pris par Envisat : la glace est fragmentée par les vagues de la mer du Groenland lors du début de la fonte printanière.

EUMETSAT

POUR UNE MÉTÉO PLUS FIABLE

Et pour demain, elle dit quoi la météo ? Qu'elle soit régionale ou globale, la prévision météorologique ne s'arrête pas à demain. Pour l'améliorer, il faut comprendre ce qui se passe dans l'océan et à son interface avec l'atmosphère. À partir de données satellitaires (Jason, Sentinelle, Metop, etc.), Eumetsat¹ délivre une large gamme de bulletins, alertes et services indispensables pour la navigation, les courses en mer, le routage des bateaux ou encore la protection des plateformes offshore. Les altimètres fournissent les hauteurs d'eau, principaux indicateurs du changement climatique. Des radiomètres imageurs surveillent la température de surface : sa hausse serait responsable de l'augmentation de l'activité cyclonique. Eumetsat a également l'œil sur les glaces de mer, en particulier dans l'océan Arctique. Les informations sur leur étendue, leur épaisseur, leur température ou leur dérive sont de la première importance pour l'économie, le climat et les modèles météorologiques.

1. L'Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques (Eumetsat, pour l'anglais european organisation for the exploitation of meteorological satellites) est une organisation intergouvernementale fédérant trente États européens.



ODATIS

UN PORTAIL UNIQUE POUR LA RECHERCHE

Une porte d'entrée unique, un catalogue commun, un référencement harmonisé. Le CNES et ses partenaires (CNRS, Ifremer, IRD, Shom, universités marines) facilitent les recherches des scientifiques grâce à une banque d'informations mutualisées sur la question climatique. Sur un même site, l'infrastructure de recherche DataTerra regroupe les quatre pôles thématiques¹ de données et de services. Odatis, le pôle Océan, centralise des données et produits multisources. Aviso², centre de données du CNES, l'alimente notamment en mesures altimétriques de haute précision. D'autres données spatiales sont aussi produites avec l'Ifremer³ comme les cartes de salinité Smos ou des produits CFOSat... Validées, améliorées, fusionnées, cataloguées puis distribuées, ces données marines profitent de la coordination des organismes nationaux de recherche. Qui peut les consulter ? La communauté scientifique en premier lieu. Mais les entreprises, les services publics, les acteurs du tourisme ou les particuliers peuvent aussi interroger Odatis pour suivre l'évolution de l'océan.

1. Terre solide-Océan-Atmosphère-Surfaces continentales.

2. Archivage, validation et interprétation des données des satellites océanographiques.

3. Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer.



#COMMUNAUTÉ

Tous les jours, sur les réseaux sociaux, le CNES discute avec vous. Vous nous faites part de vos réflexions ou questions. Rejoignez la conversation!;)



@JULNOUR

tralala zim boum boum. Avec du texte aussi.



Mince alors ! Je deviens une référence « météo marine » pour le CNES ! Consécration ! ❤️



@SENGENES MATHIEU

@m51sen

Mais ça serait pas le fameux duplexer du RFU de SWOT ? 🤔

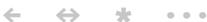
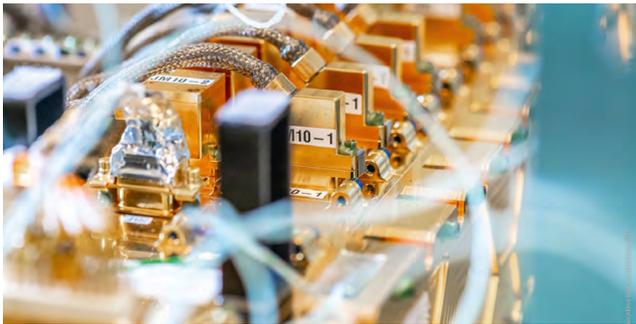


EN RÉPONSE AU @CNES

@CNES

L'actu du CNES, le Centre National d'Études Spatiales

Une **#ImageMystère** sauvage apparaît ! À votre avis, à quel satellite appartient ce... ce quoi d'ailleurs ? 🤔



@SPACE_THOMALICE

Team journalisme/communication scientifiques 📺 Vidéaste passionnée d'espace 🚀 Membre du @cafe_sciences 🍌 #BananaForScale et #SpreadThePipouness



Pour ceux qui ont pas suivi le début, du coup, **#CFOSAT** est un satellite qui étudie les vagues sur Terre.

#CNESweetup
#CNESDrawup



@PINTOFSCIENCEFR

Faire découvrir la recherche au grand public dans un cadre détendu : le bar #pint19 du 20 au 22 mai 2019 Tous les pays @pintsWorld Compte géré par @MarineArnd



L'élévation du niveau des océans s'accélère, selon des données obtenues par satellite. La fonte des glaces du Groenland est une des causes de cette accélération. Si toute la calotte glaciaire du Groenland fondait, le niveau de la mer augmenterait de 7,2 m.
buff.ly/2EW9OEI





GRAND ORAL

JEAN-LOUIS ÉTIENNE

EXPLORATEUR AGUERRI DES MILIEUX EXTRÊMES,
Jean-Louis Étienne connaît les océans comme sa poche.
Il nous détaille ses projets actuels d'exploration, dont
le premier navire taillé pour l'océan Austral,
qui permettront notamment de valider
le calibrage de satellites océanographiques
grâce aux données *in situ*.



GRAND ORAL

D'OU VIENT CET APPEL DU FROID ET DE L'OCEAN?

Jean-Louis Étienne : Enfant déjà, la nature était mon refuge, le lieu de mes rêves d'aventures en montagne. Je suis passé à l'action après mon internat de chirurgie. Le fait d'être médecin m'a permis de rejoindre Éric Tabarly pour sa course autour du monde, mais aussi le père Jaouen, un prêtre jésuite qui faisait naviguer les jeunes en rupture. Puis, répondant à mon envie polaire de toujours, j'ai monté ma propre expédition au pôle Nord, mon Cap Horn à moi. J'ai échoué en 1985 mais réussi en 1986. Ce fut une libération, une construction personnelle. Je me suis dit : « ça va être ça ma vie ! ». En explorant des terres comme le Groenland, mi-mer mi-montagne, l'océan est progressivement devenu un espace de liberté pour lequel j'ai fait construire *Antarctica*, aujourd'hui *Tara*, un bateau suffisamment robuste pour résister aux glaces des régions polaires.

ENTRENTRE ANNÉES À EXPLORER LES LATITUDES EXTRÊMES, AVEZ-VOUS ÉTÉ TÉMOIN DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE ?

J.-L. E. : J'ai vu « de mes yeux » deux cas très concrets. Au pôle Nord, en 2010, j'ai survolé en ballon la banquise que j'avais traversée à pied à la même période, en 1986. Au lieu de retrouver la glace bien compacte de mes souvenirs, j'ai découvert de larges étendues d'eau libre : l'épaisseur moyenne de la banquise est passée de 1,8 mètre en 1986 à 1,2 mètre aujourd'hui. Au Sud, la traversée

de la péninsule Antarctique, que j'ai effectuée en 1989, est aujourd'hui tout bonnement impossible : les premiers 600 kilomètres ont disparu entre 2000 et 2002, ce que nous avons suivi grâce aux images satellite.

QUE LA ÉTÉ LE RÔLE DES OUTILS SPATIAUX DANS VOS PÉRIPLÉS ?

J.-L. E. : Il a été capital ! Aux pôles, j'étais extrêmement isolé, relié au camp de base par une petite radio. Le CNES m'a fourni une balise Argos spécifique et équipée du système de détresse Sarsat. Le signal devant être transmis à Toulouse avant d'être traité, chaque soir j'émettais pendant une heure pour recevoir, le lendemain matin, la position de la veille ! L'espace a aussi révolutionné les courses : pour le tour du monde avec Tabarly, en 1979, on avait juste un sextant. Aujourd'hui, les navigateurs se déplacent plus vite que les dépressions et jouent avec la météo pour enchaîner les vents favorables.

VOUS TRAVAILLEZ SUR UN NOUVEAU NAVIRE POUR EXPLORER L'OCEAN AUSTRAL. QUEL EST CE PROJET POLAR POD ?

J.-L. E. : Avec 22 000 km de circonférence, l'océan Austral, qui entoure l'Antarctique, est un géant qui joue le rôle de courroie de transmission entre trois océans :

Atlantique, Indien et Pacifique. Il est en quelque sorte le chauffage central de la Terre, mais toutes les publications le concernant concluent que nous avons besoin de mesures et d'observations de terrain et sur de longues durées. Pour rester stable sur cet océan de tempêtes que les marins appellent les Cinquantièmes Hurlants, nous avons conçu le *Polar Pod*, un navire vertical de 100 mètres de haut dont 80 sous l'eau. C'est une station, habitée, d'acquisition de données que l'on va diffuser le plus possible en temps réel. Des équipages de trois marins et quatre scientifiques se relaieront tous les deux mois pendant au moins deux ans. À l'instar de la Station spatiale internationale, le *Polar Pod* sera la station océanographique internationale. Au final, 43 institutions issues de 12 pays participent au volet scientifique de l'expédition, coordonné par le CNRS.

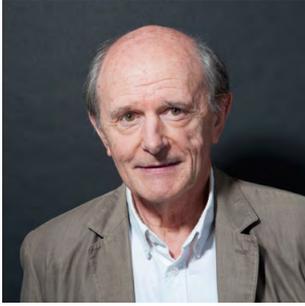
QUELLES DONNÉES ALLEZ-VOUS COLLECTER ?

J.-L. E. : Nous naviguerons au sein d'une immense réserve de biodiversité marine encore méconnue, avec différents types de glace flottante. Sans moteur, le *Polar Pod* est autonome en énergie et silencieux. Grâce à la signature sonore des espèces, nous allons pouvoir faire un inventaire acoustique de la faune. Nous allons prélever des échantillons,

« ARBRE OU PHYTOPLANCTON, LE VERT EST LA SEULE UNITÉ À TERRE ET EN MER QUI PEUT CAPTER LE CO₂. NOUS DEVONS EN REMETTRE PARTOUT OÙ NOUS LE POUVONS. »



GRAND ORAL



JEAN-LOUIS ÉTIENNE

EXPLORATEUR AGUERRI
DES MILIEUX EXTRÊMES

« À L'INSTAR
DE LA STATION SPATIALE
INTERNATIONALE,
LE POLAR POD SERA
LA STATION
OCÉANOGRAPHIQUE
INTERNATIONALE. »

notamment de plancton pour évaluer l'impact de l'acidification des océans, mais aussi des activités humaines, comme les plastiques et les métaux lourds. Le navire est par ailleurs équipé de nombreux capteurs et instruments de mesure pour étudier différents phénomènes comme les échanges air/océan, l'état de mer et la dynamique des vagues, la couleur de l'océan, etc. Le CNES utilisera plusieurs de ces données *in situ* pour vérifier les mesures de satellites comme Jason, Sentinelle ou encore CFOSat. Nous travaillerons également avec Mercator Océan International pour échanger sur leurs prévisions et nos constats. L'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer) assurera la diffusion de toutes ces données.

POURQUOI UNE MEILLEURE CONNAISSANCE DE L'OCÉAN AUSTRAL EST-ELLE PRIMORDIALE

J.-L. E. : Aujourd'hui, l'enjeu majeur est l'impact environnemental du réchauffement climatique. Or l'océan Austral est le grand régulateur du climat : quelles sont ses capacités d'absorption du CO₂ et d'échange avec l'atmosphère ? En effet, non seulement il absorbe l'excès de chaleur et le diffuse autour du monde, mais c'est aussi une pompe physique de CO₂, qui se dissout et se transforme d'autant plus vite en acide carbonique que les eaux sont froides. L'ensemble provoque une acidification des océans désormais prégnante. On s'expose de plus en plus à une perturbation colossale du cycle de l'eau, que l'on observe déjà, par exemple, dans l'aggravation des épisodes cévenols et des tempêtes tropicales, fruits d'excès de chaleur dans l'océan et dans les masses atmosphériques.

QUE PEUT-ON ATTENDRE DU SPATIAL FACE À CES ENJEUX ?

J.-L. E. : Les satellites voyagent sans visa ni passeport ! Grâce à eux, nous pourrions suivre le problème majeur, à savoir les émissions de CO₂, et pointer les zones géographiques où concentrer nos efforts pour les réduire. Leurs capteurs toujours plus précis améliorent nombre d'études : nous pouvons désormais détecter les espèces et la densité de plancton et, de là, déterminer l'activité biologique

d'un secteur. D'où l'importance de valider le calibrage des mesures satellite avec des données de terrain.

QUEL MESSAGE SOUHAITEZ-VOUS FAIRE PASSER AUX NOUVELLES GÉNÉRATIONS ?

J.-L. E. : Sans énergie, c'est la misère, et sans eau, c'est la guerre. Pour éviter cela, les moyens d'agir sont partout. Nous sommes tous des agents du climat, avec nos choix de déplacement et de consommation. Chacun doit être efficace sur sa zone d'influence. Regardez si la banque de vos parents investit dans des mines de charbon... si oui, qu'ils préviennent leur banquier qu'ils vont changer de banque. Arbre ou phytoplancton, le vert est la seule unité à terre et en mer qui peut capter le CO₂. Nous devons donc en remettre partout où nous le pouvons.

Profil

1986

Premier homme à atteindre le pôle Nord en solitaire après 63 jours de marche.

1990

Plus longue traversée de l'Antarctique en traîneau à chiens (6300 km en 7 mois).

1990 à 1996

Expéditions pédagogiques sur le voilier polaire *Antarctica*.

2010

Première traversée de l'océan Arctique en ballon.



EN IMAGES

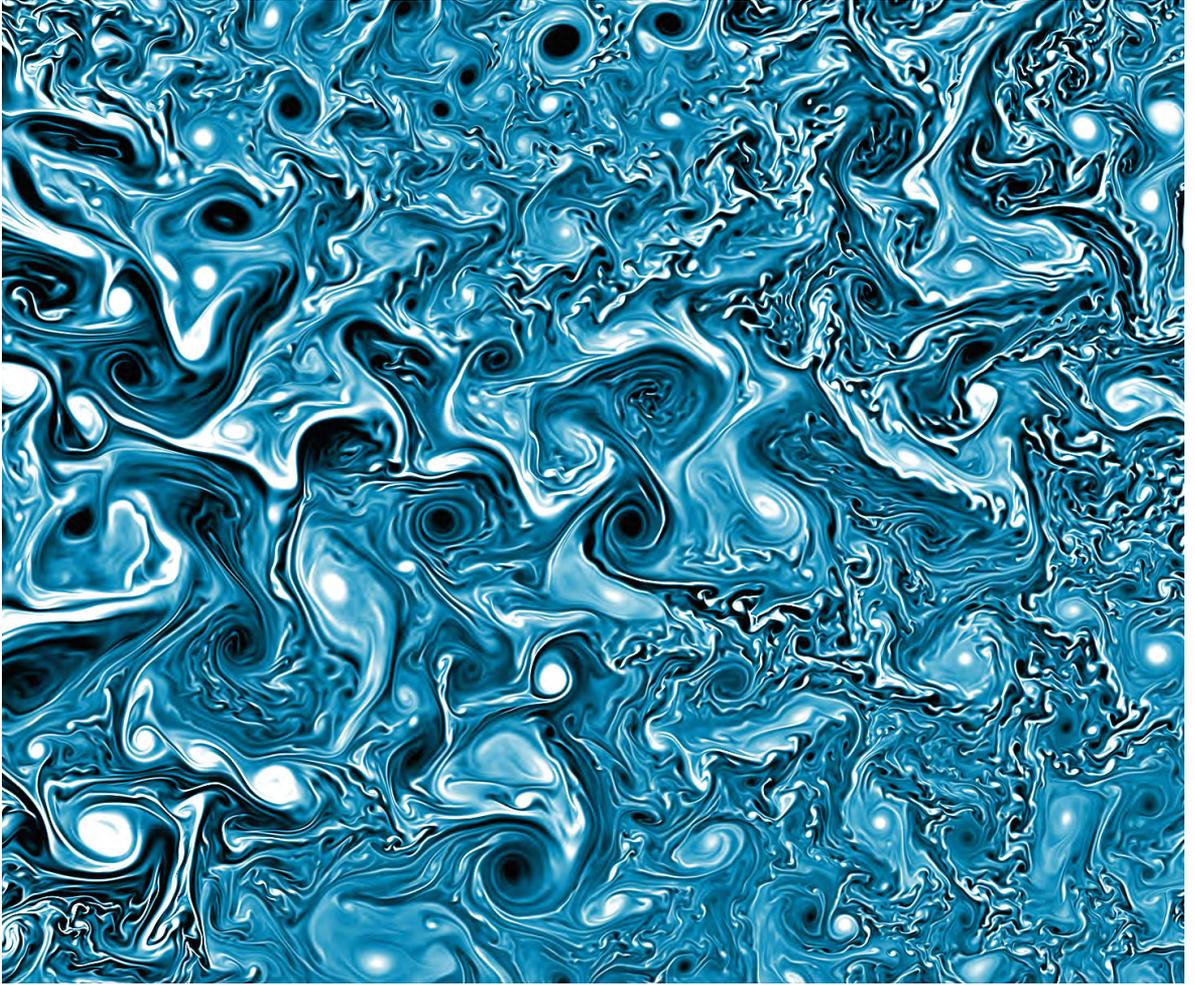


COMPORTEMENTS MARINS

Les écosystèmes de haute mer sont fragiles. La haute résolution et les requins blancs aident les biologistes à comprendre à quel point. Les données altimétriques produites par le CNES, l'Université de l'Oregon et CLS sont comparées aux tourbillons et méandres océaniques diffusés via une plateforme de données baptisée Aviso. En confrontant ces données avec les trajectoires des prédateurs suivies par le système Argos, les biologistes repèrent leurs zones d'alimentation. Objectif : prioriser l'étude des régions de l'océan essentielles à leur sauvegarde. Ces données combinées contribuent aussi à concevoir des politiques de pêche durables et à identifier des mesures de protection efficaces des aires marines.



EN IMAGES



TOURBILLONS À LA LOUPE

Les clés du changement climatique se trouvent-elles dans l'océan ? Pour le savoir, la mission haute résolution Swot scrutera la « signature » des courants à des échelles de plus en plus petites.

De l'observation de tourbillons de 50 km, il passera à celle de filaments de l'ordre de 10 km. En profondeur, il simulera le rôle des échanges verticaux sur la biologie marine. Par ailleurs, certains effets chaotiques de l'océan sont encore très mal connus. Grâce à la très haute résolution, l'Institut des géosciences de l'environnement (IGE) a conçu des modèles numériques qui faciliteront l'assimilation des données dans des modèles de prévision opérationnelle.



EN CHIFFRES

44 000

Chaque seconde, l'unité radio-fréquence (RFU) de KaRin, l'altimètre de Swot, va devoir gérer 44 000 impulsions sans en perdre aucune! Cet équipement électronique est le plus complexe jamais réalisé dans le domaine de la bande Ka.



TEAM

Une mission, c'est généralement un PI (Principal Investigator) et une équipe en lien avec une communauté scientifique. Dès sa conception, la filière altimétrique s'est dotée d'une OST-ST (Ocean Surface Topography Science Team). Originalité de la filière, cette équipe regroupe 300 scientifiques internationaux et interdisciplinaires impliqués dans l'étude des océans et utilisateurs de données altimétriques.

50

C'EST LE NOMBRE DES VARIABLES CLIMATIQUES ESSENTIELLES (ECV) susceptibles d'aider à comprendre l'évolution climatique. Vingt-six peuvent être observées depuis l'espace. L'observation spatiale des océans contribue à la mesure de variables de plus en plus nombreuses grâce à la fourniture d'informations telles que la topographie; la température; l'épaisseur, l'étendue et la concentration des glaces; la dérive des icebergs; la couleur de l'océan (concentration en chlorophylle); la rugosité et l'état de mer (vent, vagues); et plus récemment, la salinité.

CLS



La société CLS (filiale du CNES) attendait avec impatience CFOSat pour mieux éclairer les météorologues, océanographes et climatologues dans leurs travaux, et préciser aux pêcheurs et navigateurs quand l'état de mer menaçait leur

activité. Pendant les six mois de recette en vol du satellite, les équipes de CLS ont participé à calibrer puis valider au plus vite les données de Swim. Les scientifiques ont eu la primeur des résultats, avant une large diffusion depuis juillet.

Variabilité

Les courants océaniques représentent 80 % de la variabilité de la surface en plein océan. Près des côtes, ces variations peuvent s'élever à une dizaine de mètres. En atteignant la précision centimétrique, l'altimétrie spatiale a permis de lever le voile sur l'existence d'un lien entre les marées et le climat.





LE CNES EN ACTIONS

L'ALTIMÉTRIE SPATIALE CHANGE D'ÉCHELLE

L'Océanographie spatiale observe depuis près de trente ans les grandes dynamiques océaniques et leur rôle dans l'évolution du climat. Pionnier de l'altimétrie spatiale, le CNES participe, aujourd'hui avec CFOSAT et demain avec SWOT, aux premières observations de petits phénomènes locaux également essentiels à la compréhension du climat.



LE CNES EN ACTIONS



est par la terre que l'altimétrie spatiale est arrivée à la mer. Le Groupe de recherche de géodésie spatiale (GRGS), groupement scientifique qui fédère en France des équipes de recherche d'une dizaine d'institutions nationales, a été le premier à mettre en évidence l'intérêt de l'altimétrie spatiale. En l'étendant à l'océanographie, le CNES l'a appliquée alors à « un milieu turbulent animé par une dynamique complexe faite de courants, de tourbillons et de marées... », décrit Philippe Escudier, ancien responsable des programmes Océans-Cryosphère au CNES. L'océan se prête bien à ce type de mesures car il entraîne d'importants mouvements de masses d'eau, aussi bien horizontaux que verticaux. Par ailleurs, il accumule à lui seul 93 % de l'excédent de chaleur généré par le changement climatique. Cette chaleur se combine à l'apport d'eau douce issue de la fonte des glaciers et provoque, par dilatation, l'élévation du niveau de la mer. Mais ce n'est pas tout : l'océan est aussi un « puits de carbone » qui dissout directement le gaz



La performance initiale

visée par Topex-Poséidon sur la mesure du niveau de l'océan était de 13 cm. Aujourd'hui les performances sont plus de 5 fois meilleures, permettant le suivi global de l'élévation des océans avec une précision de 0,5 mm/an.

carbonique de l'atmosphère. Dans ces interactions globales connues se cachent une multitude de phénomènes de différentes échelles, toutes difficiles à investiguer. C'est à ce vaste sujet d'étude que le CNES s'est attelé, en 1987, en signant avec la NASA un protocole d'accord pour une grande première : une mission d'altimétrie de haute précision. Topex-Poséidon était née.

UN SUCCÈS FULGURANT

Lancé en 1992, ce premier satellite d'océanographie donnera des résultats exceptionnels pendant treize ans. Il apportera aussi au CNES une expertise mondiale inégalée dans le domaine de l'altimétrie spatiale. « La recherche au millimètre était partout, le gain de performance à tous les postes : construction de la mesure, orbitographie précise, radar et traitement, corrections géophysiques... », se rappelle Philippe Escudier. Cette précision dans la mesure de hauteur du satellite, le CNES, l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) et le GRGS l'ont trouvée avec Doris¹, un système de positionnement d'une précision de 1 à 2 cm dans



La capitale des Maldives, Malé, confrontée aux risques de submersion marine et d'érosion côtière.

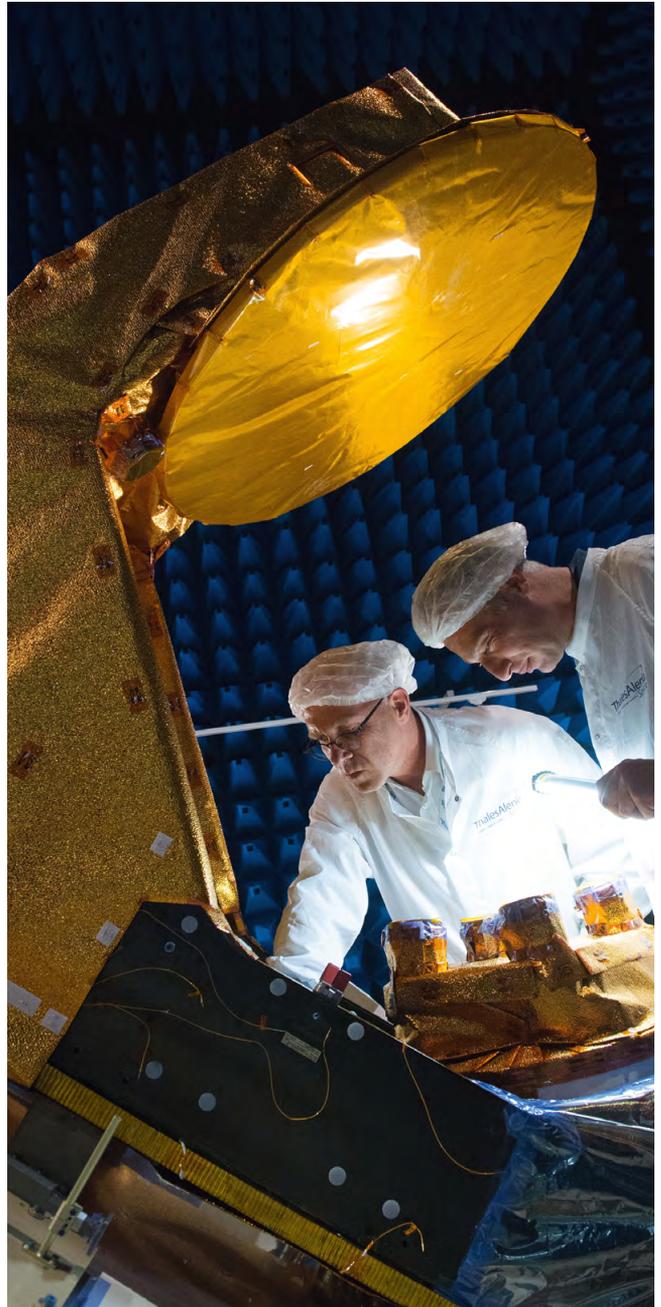


LE CNES EN ACTIONS

le calcul d'orbite. L'instrument détermine finement les trajectoires des satellites et la position des stations terrestres grâce à un réseau dense et homogène de stations au sol. Cette mission comme les suivantes ont permis de découvrir et quantifier les variations qui animent la topographie des océans (saisons océaniques, anomalies climatiques, niveau moyen de la mer, etc.). Elles ont précisé le rôle des marées océaniques et côtières, assuré le suivi des courants et des tourbillons associés, et décelé les signes précurseurs du phénomène El Niño (cf. Essentiel p. 8). Chaque millimètre de précision gagné a entraîné de nouvelles améliorations à bord autant qu'au sol. Car ce type de mesure composite compile les informations de plusieurs instruments ainsi que des modèles numériques ; le traitement des données au sol y occupe une place majeure.

UNE CONTINUITÉ DE RECHERCHE, DES SAUTS DE TECHNOLOGIE

À partir de 2001, la « famille » Jason succède à Topex-Poséidon. Révolutionnaire en matière de technologies, elle s'est montrée tout aussi fructueuse. En contraignant fortement la masse des instruments sans diminuer leur performance, le CNES a développé une plateforme générique, Proteus², et ouvert ainsi la voie aux minisatellites en orbite basse. Jason a aussi permis d'opérer un basculement de l'altimétrie spatiale vers des services opérationnels utiles aux secteurs dépendants de l'état de l'océan : sécurité maritime, protection des ressources halieutiques, prédictions météo, etc. En couplant mission de référence et missions complémentaires, les observations se sont densifiées et enrichies. Démonstration a été faite en combinant les mesures de Topex-Poséidon et celles d'ERS et de GFO (une mission de l'US Navy), ou celles de Jason avec Envisat, puis Saral (Inde) et HY2 (Chine). Le programme européen Copernicus illustre parfaitement cette approche. À terme, Jason-CS-Sentinelle-6 succédera à Jason-3 et suivra les traces des missions de référence développées depuis 1992.



L'instrument Swim du satellite CFOSat testé ici en chambre anéchoïque chez Thales Alenia Space.



LE CNES EN ACTIONS

Pour autant, la question de la connaissance et de la surveillance des océans est loin d'être réglée. Le CNES reste donc fortement impliqué. Avec l'agence spatiale chinoise (CNSA), il a mené à bien la mission CFOSat (cf. p. 7), dont les premiers résultats confirment le bon comportement des radars. Par ailleurs, la collaboration d'opportunité avec la NASA s'est depuis longtemps transformée en partenariat pérenne dans le cadre de la filière Jason-1, 2 et 3 ; elle sera encore à l'œuvre sur Swot qui, en 2021, posera un œil acéré sur les zones intermédiaires, traits de côte et estuaires jusqu'ici peu investigués (cf. p. 25-26).

1. Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (Détermination d'orbite et radiopositionnement intégrés par satellite).
2. Plate-forme reconfigurable pour l'observation, les télécommunications et les usages scientifiques.

60 000

Topex-Poséidon

a pris sa retraite en 2006. Il aura effectué 60 000 orbites autour de la Terre.

Déterminantes pour la mise en place d'une nouvelle discipline, l'océanographie opérationnelle, ses données sont toujours utilisées.

INDUSTRIE

UNE FILIÈRE D'EXCELLENCE

Marché de niche en apparence, l'océanographie spatiale a fait naître une véritable filière industrielle. C'est à Thales Alenia Space (TAS) que le CNES avait confié la réalisation du premier altimètre Poséidon. En vingt ans, le groupe a réalisé 12 altimètres des plus performants au monde ; il est aujourd'hui leader mondial du domaine. Cette première coopération réussie s'est poursuivie avec la conception de la plateforme reconfigurable Proteus. Expérimentée avec Jason-1, elle a fait le succès des mini-satellites en orbite basse (Jason-1-2-3, Calipso, Corot, Smos). Par ailleurs, le CNES a conçu le système de localisation précise Doris comme support aux missions d'altimétrie. Thomson-CSF Detexis (ex-Dassault Électronique) a réalisé l'instrument, dont 17 exemplaires volent toujours. Surnommé « le géomètre de l'espace », il a contribué à d'autres missions de localisation précise d'images en temps réel. Enfin, des synergies ont été développées avec les instruments de la filière Argos. Les deux systèmes relèvent en effet d'une filière industrielle de récepteurs Doppler toujours très féconde.



Antenne altimètre du satellite Jason en essai dans la Base compacte de mesure d'antenne (BCMA) du Centre spatial de Toulouse.



LE CNES EN ACTIONS



VARIABILITÉ OCÉANIQUE ZOOMER POUR COMPRENDRE

La connaissance des grands courants océaniques a ses limites. Dans un contexte de réchauffement climatique qui menace les régions côtières, il est plus que jamais nécessaire d'acquérir une connaissance aigüe des dynamiques océaniques de petites échelles. Face à ces nouveaux enjeux, l'altimétrie spatiale reste la réponse.



grande échelle, l'altimétrie classique a déjà apporté beaucoup (cf. encadré p. 24). Elle a contribué à comprendre les processus de circulation océanique à grande échelle,

de variations du niveau marin et de redistribution horizontale de chaleur dans l'océan. Ces informations sont essentielles pour connaître l'état de l'océan et pour évaluer son incidence dans le changement climatique global. Mais elles ne sont pas suffisantes pour comprendre les phénomènes qui se produisent localement. En pratique, ces derniers sont à l'origine de la « variabilité océanique » mais n'interviennent pas tous de la même manière, en même temps, dans les différents points de la planète. Par exemple, une augmentation globale modérée du niveau de la mer peut avoir des conséquences beaucoup plus impor-



« Océan mondial »

C'est sous ce vocable que sont regroupés les océans Atlantique, Arctique, Austral, Indien et Pacifique. La totalité de leurs eaux couvre pratiquement 71 % de la surface de la planète, soit environ 361 millions de km².

tantes que prévu sur les régions côtières et leurs populations. Les facteurs qui entrent en jeu sont nombreux : le vent local, la houle, les vagues et la dynamique océanique dite de « petites échelles ». Vu de l'espace, les tourbillons ou filaments générés sur une zone semblent petits. Or les désordres qu'ils entraînent modifient profondément les échanges océan-atmosphère, et perturbent les courants au-delà de la zone initiale. C'est pourquoi il faut connaître ces petites échelles pour paramétrer correctement les modèles océaniques et ainsi mieux prévoir cette « variabilité océanique régionale ». Et là, on manque cruellement d'éléments.

CERNER LES VENTS, ZOOMER SUR LES CÔTES

« Il faut arriver à une mesure de l'état de mer très précise qui prenne en compte le



LE CNES EN ACTIONS

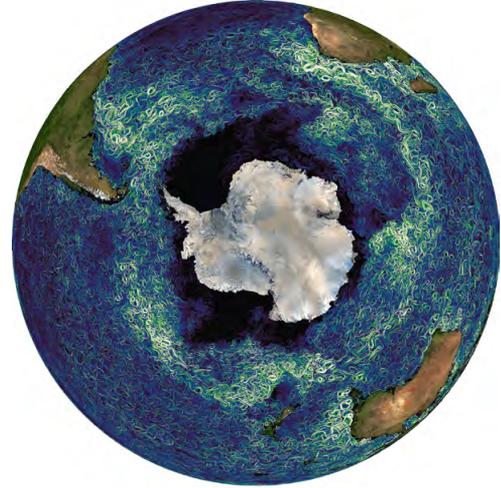
rôle des vagues sous toutes les conditions de vent. Car le vent a une incidence très forte sur les échanges de chaleur et de carbone qui s'opèrent entre l'océan et l'atmosphère. Au vu de l'évolution climatique, il est urgent de mesurer cette influence pour affiner les projections en 2100 et au-delà », précise Benoît Meyssignac, du Legos. Le satellite CFOSat va s'y employer. Dès sa phase d'exploitation, la réponse des vagues à ces vents de surface va pouvoir être intégrée dans les simulations.

L'influence du vent sur la dynamique océanique se traduit aussi à l'échelle intermédiaire. Entre tourbillons et filaments, des zones de friction se créent, des mouvements verticaux peuvent apparaître. Ces « turbulences » viennent perturber les courants océaniques moyens ; leur incidence est sensible, là aussi, en zones côtières. Les mesures s'avèrent importantes pour les études littorales. Là également, les observations manquent. L'attente repose sur les nouvelles techniques altimétriques à haute résolution ; depuis l'espace, elles sont les seules capables d'observer ces phénomènes. Avec Swot, la résolution altimétrique sera décuplée. Il apportera les premiers éléments significatifs qui compléteront la gamme des produits pour les organismes opérationnels.



Ces six cornets sont la pièce maîtresse du radar français Swot. En plus de la hauteur, cet instrument novateur fournit la direction et la périodicité des vagues à la surface des océans.

BILAN



L'APPORT DES GRANDES ÉCHELLES

L'altimétrie classique a dévoilé la circulation des gyres océaniques (gigantesque tourbillon d'eau) et mis en évidence les grands courants.

Avant les missions altimétriques, le Kuroshio ou « courant noir », courant antarctique circumpolaire le plus puissant au monde, ou encore le Gulf Stream étaient quasiment inobservés. Ces courants vivent entre plusieurs semaines et plusieurs mois par an, leur connaissance est indispensable. L'altimétrie spatiale a aussi estimé très concrètement la hausse du niveau de la mer à 3,4 mm par an. Il faut désormais poursuivre les observations sur de longues périodes. Si l'on veut comprendre les modifications de la circulation à grande échelle, leur relation aux émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique et l'accélération actuelle du niveau de la mer, il faut que ces observations soient menées régulièrement et sur des décennies. Seule une analyse concertée, cohérente et de long terme des variations du niveau de la mer et des 50 autres variables climatiques essentielles (cf. p. 18), permettra de comprendre l'évolution climatique.

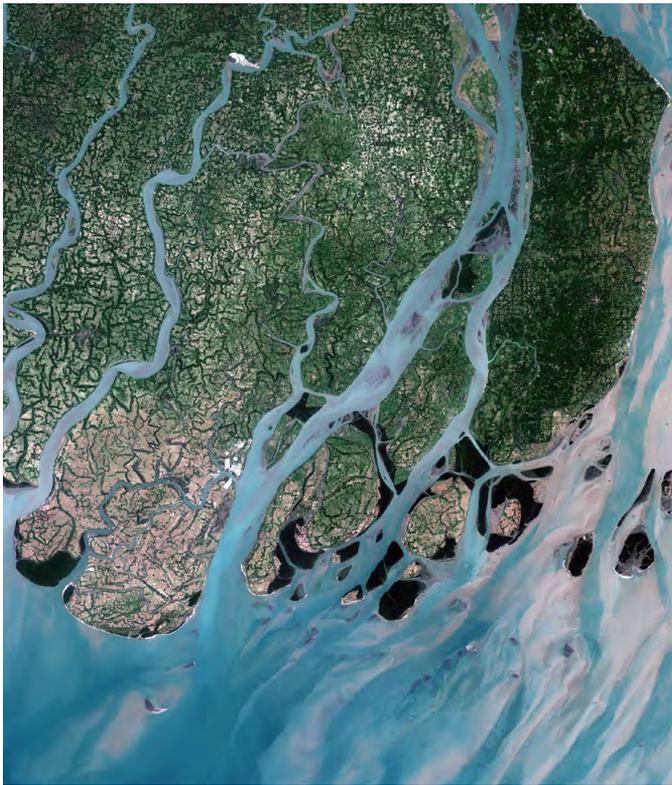


LE CNES EN ACTIONS

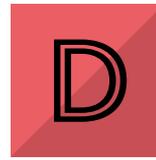
TECHNO

NOUVEAUX CONCEPTS

Le CNES et ses partenaires proposent aujourd'hui de nouveaux modes d'observation, plus précise et plus détaillée. Avec les satellites CFOSat et Swot, c'est bien un vent d'innovations technologiques qui souffle sur l'océanographie.



L'estuaire du Brahmapoutre (Bangladesh) par Sentinelle-2B.



Dans le domaine du vent et des vagues, les océanographes disposent de mesures partielles, incomplètes. L'objectif du programme CFOSat, né dans le cadre d'un partenariat entre le CNES et son homologue chinoise, avec le soutien de partenaires particulièrement concernés par l'état de l'océan comme le CNRS, l'Ifremer et Météo-France, est bien d'en apporter un état détaillé.

LA DANSE DU VENT ET DES VAGUES

Il aura fallu douze ans pour que cette mission décidée en 2007 soit enfin opérationnelle. Concrètement, CFOSat embarque deux radars originaux. L'un d'eux, Swim, a été conçu par le CNES pour analyser les vagues de surface. Développé par Thales Alenia Space, il capitalise sur les expériences passées (Cryosat, Saral, Jason) mais avec une approche novatrice : les faisceaux rotatifs du radar balayent la surface de l'océan en tournant sur eux-mêmes. Ils couvrent ainsi une surface conséquente (une fauchée) de 180 km de diamètre. Swim apporte des informations d'une très grande précision sur les vagues : hauteur, longueurs d'onde, direction, etc. Une première pour une mesure depuis l'espace. De son côté, le radar chinois Scat mesure la direction, l'intensité et la vitesse des vents de surface.

CFOSat possède un autre atout : installés sur la même plateforme, les deux instruments vont fonctionner dans le même temps, sur la même zone. Carte des vents et spectre des vagues seront donc produits au même moment, au même endroit, depuis la même position. Cette simultanéité est nécessaire pour comprendre les interactions entre vents et vagues. Mais l'intérêt du satellite n'est pas seulement scientifique : ses données seront aussi utilisées par les prévisionnistes maritimes, via des services opérationnels comme ceux développés par Eumetsat. D'autant que la performance de la mission se mesure aussi en délai : les données devraient



LE CNES EN ACTIONS

pouvoir être transmises dans les trois heures suivant leur acquisition... De quoi améliorer grandement et rapidement les bulletins météo.

UNE LARGE FAUCHÉE POUR ÉCLAIRER DE PETITES SURFACES

Successeur de Jason, Swot est conçu dans une suite thématique logique. Avec une nuance d'importance : un système d'altimétrie à « large fauchée » inédit (cf. Instants T p. 28-29). Swot part avec une double mission hydrologique et océanographique pour couvrir des zones peu ou pas étudiées : les traits de côte, abers, étiers et autres estuaires. Sur une carte, un trait de côte est une ligne claire, définie. Dans les faits, les littoraux constituent un ruban sujet à variabilité qui subit de plein fouet les marées, les vagues

et l'élévation du niveau de la mer. De leur côté, les estuaires sont des points critiques. Zones d'échange, leurs caractéristiques sont complexes. Eaux salées, eaux saumâtres et eaux vives s'y mélangent, créant des conditions exceptionnelles de développement de la biodiversité. Si elles offrent moins de profondeur que l'océan, ces zones sont sujettes à des turbulences de fond encore insondées. L'intérêt scientifique dans l'approfondissement du rapport océan-atmosphère est non négligeable, mais l'intérêt sociétal de ces zones intermédiaires qui accueillent plus de 50 % des populations mondiales l'est encore plus. Ces dernières décennies, l'activité touristique y a fait son nid. Elles sont donc de celles qui courent les plus grands risques écologiques, économiques et humains.

SKIM

UN GAIN DE PERFORMANCE

La mission Skim¹ est dans les starting-blocks : elle est pré-sélectionnée dans le programme Earth Explorer 9 de l'Agence spatiale européenne (ESA). La sélection est attendue pour l'automne. Skim se situe dans la continuité de Swim. Son objectif est de poursuivre l'étude approfondie des phénomènes océaniques de surface, en particulier les courants qui charrient la chaleur, le plancton et les microplastiques. Skim réunira un altimètre très performant et un diffusiomètre à vagues (type Swim). Il doit cartographier la topographie des océans, les courants de surface, les vagues et les glaces de mer sur la plus grande partie du globe. S'il utilise une fréquence,



ce sera la bande Ka, comme Swot, pour une meilleure résolution. Toutes ces mesures devraient apporter de nouveaux éléments pour mieux approfondir,

à l'échelle globale, les échanges encore mal connus à la surface de l'océan. Elle pourrait être lancée à l'horizon 2025.

1. Surface Kinematics Monitoring



MATIÈRE

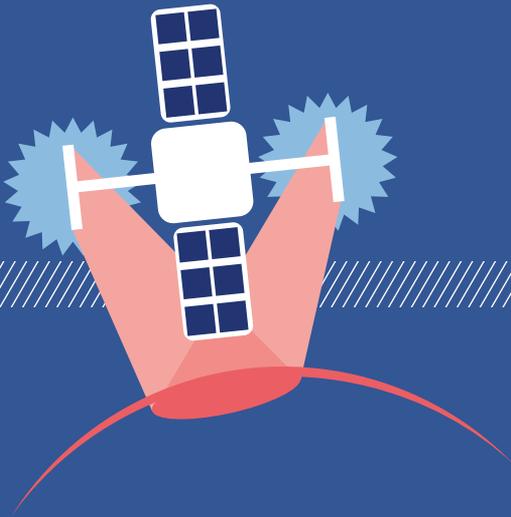
PETITE RÉVOLUTION

LÀ OÙ LES ALTIMÈTRES CONVENTIONNELS FOURNISSENT UN PROFIL DE HAUTEUR (1D), SOUS LA TRACE DU SATELLITE, L'ALTIMÈTRE À LARGE FAUCHÉE FOURNIT UNE IMAGE 2D DE LA TOPOGRAPHIE DES OCÉANS. Cette mesure bidimensionnelle est une rupture de concept par rapport à l'altimétrie radar nadir, domaine d'expertise historique du CNES. La large fauchée offre à la fois une plus large couverture et une meilleure résolution. Attendu pour affiner les modèles de prévision océanographique et climatique, cet altimètre d'un nouveau genre met également les acteurs français en bonne position pour le développement des futures missions européennes embarquant ce type d'instrument, dans la continuité de Swot. Dans le futur, cette technologie pourrait ouvrir la voie à l'observation de phénomènes à des échelles de quelques kilomètres, inaccessibles avec l'altimétrie classique.

Intérieur de l'unité radio-fréquence (RFU) de Swot avant qu'il ne soit recouvert d'une protection thermique à isolant multicouche (MLI) chez Thales Alenia Space (Toulouse).



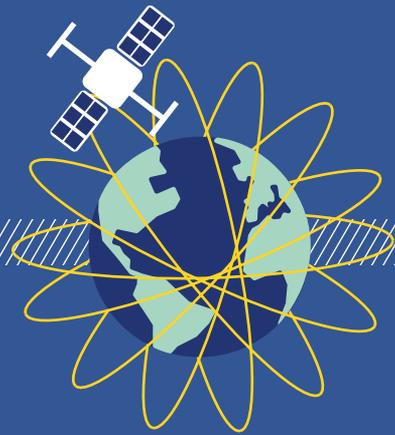
INSTANTS T



RÉSOLUTION UNE NOUVELLE ÈRE

L'atout majeur de Swot, c'est KaRin ! Ce radar interférométrique inaugure la nouvelle ère de l'altimétrie satellitaire grâce à une précision améliorée et à un meilleur rapport signal-bruit.

Les altimètres classiques utilisent une seule antenne mesurant un trajet aller-retour ; KaRin en a deux. Séparées par un mât de 10 mètres, elles sont dardées sur un même point. Cette technologie par « triangulation » génère un gain de résolution important par rapport à l'altimétrie classique. La résolution spatiale minimale de Swot a été fixée à 15 kilomètres, une performance qui permet de décrypter la circulation océanique à méso- et sous-méso-échelle.



REVISITE UNE FRÉQUENCE STABLE

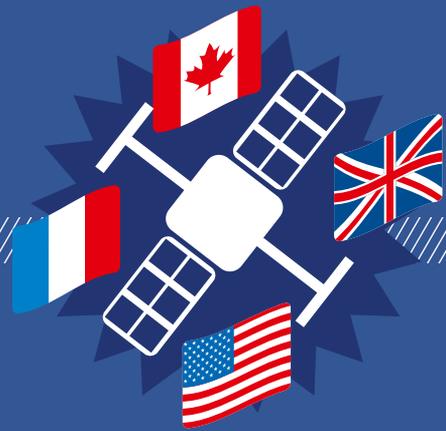
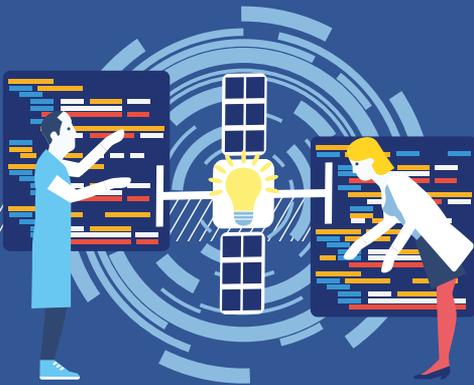
Tous les dix jours, Swot repasse sur les mêmes points du globe. Identique à celle des missions précédentes, sa fréquence de revisite n'est pas encore suffisante pour répondre à des situations de crise de type catastrophe naturelle.

Aussi, pour une meilleure fréquence de rafraîchissement, des recherches sont en cours pour concevoir des missions combinant constellations d'altimètres classiques et petits altimètres à fauchée. En phase d'étude, l'avant-projet d'altimètre à fauchée Wisa préfigure l'altimétrie de demain.



INSTANTS T

HÉRITIER DU DÉJÀ TRÈS PERFORMANT JASON, SWOT REPOUSSE ENCORE LES LIMITES. IL CUMULE LES MISSIONS ET LES COOPÉRATIONS, ET FOURNIRA DES PRODUITS INNOVANTS TRÈS ATTENDUS. CE SATELLITE AMÉLIORERA NOTAMMENT LES BULLETINS PRÉVISIONNELS À DESTINATION DES UTILISATEURS DE SERVICES COMME LE COPERNICUS MARINE ENVIRONMENT MONITORING SERVICE (CMEMS).



INNOVATION

RUPTURES TECHNO À GOGO

Swot est une mission d'envergure. En raison de son intérêt applicatif, le CNES a pu bénéficier d'un financement du Programme d'investissements d'avenir (PIA). Des PME et des entreprises de taille intermédiaire (ETI) ont également été impliquées dans la réalisation de sous-systèmes majeurs. Dès 2015, le CNES avait mis en place un secteur « aval » pour réfléchir à l'avance à l'utilisation des données ;

Swot en a bénéficié. Les conditions pour promouvoir, faciliter et valoriser l'accès aux données – et permettre ainsi un retour sur investissement immédiat – ont été mises en place au démarrage du programme.

PARTENARIAT

SWOT ENTRE DE BONNES MAINS

Quatre agences spatiales collaborent au satellite Swot, dont le CNES et la NASA, partenaires historiques. La NASA fournit KaRin, le radiomètre, un GPS de précision ainsi qu'un centre de mission pour la charge utile américaine. Le CNES fournit la plateforme, l'unité radio-fréquence (RFU) de KaRin (cf. p. 6), l'altimètre nadir bi-fréquence (Ku-C), le système de localisation Doris, le système de contrôle et commande du satellite et un centre de traitement des données. L'agence canadienne (CSA) apporte quant à elle un émetteur à impulsion micro-ondes de forte puissance. L'agence spatiale britannique (UKSA) contribue pour partie au RFU de KaRin.



RENCONTRES

PATRICK CASTILLAN

Chef de projet CFOSat au CNES

« En Chine, le temps est une simple variable »



L'accent ne trompe pas : « *Je suis un Toulousain bon teint!* » rit Patrick Castillan. Ingénieur en électronique, il a choisi le spatial « *pour la technologie et l'aventure* ». Jovial et franc, l'homme s'épanouit dans les projets collaboratifs. **Après avoir travaillé sur Iason-1 et Calipso avec la NASA, il prend les rênes de CFOSat en 2006.** Le projet naît d'une impulsion politique, l'Élysée cherchant à l'époque une composante spatiale dans ses accords avec la Chine. « *Personne n'avait jamais vu un Chinois au CNES, le volet interculturel était un chantier ouvert!* » commente-t-il. Fusion des compétences du CNES et de la CNSA, le satellite s'est installé sur orbite en 2018 avec une nouvelle façon d'étu-

dier l'océan. **« Douze ans, c'est long, mais c'est le temps nécessaire pour établir une coopération. Culture, normes, communication, processus de décision... tout est différent là-bas »**, explique le chef de projet. Il a calculé qu'en 550 missions, l'équipe a couvert 4,5 millions de kilomètres entre Paris et Pékin : « *Nous avons peu à peu tissé des liens qui ont tout changé. En 2010, pour les premiers essais, lorsque nous avons branché nos maquettes avec leur matériel et que nous nous sommes tous assis autour des mêmes écrans, la coopération s'est muée en collaboration.* » Régulièrement déstabilisés, les homologues se sont donc peu à peu apprivoisés. « *En Chine, le temps est*

une simple variable, chez nous c'est le fil conducteur de toute une vie! Nous sommes dans le préventif quand ils sont dans l'adaptabilité permanente. Et quand nous développons sur la théorie et la modélisation, eux ne jurent que par la pratique et les maquettes. Notre rigueur administrative a provoqué quelques yeux ronds! **Mais à force de compromis et d'efforts des uns et des autres, CFOSat est un merveilleux succès qui nous donne envie de monter d'autres projets ensemble** », retient Patrick Castillan. Il ramène dans ses valises la valeur de l'engagement oral car « *la base de la confiance est de se satisfaire d'une parole.* » De quoi rendre l'écrit superflu.



RENCONTRES

MARINA LÉVY

Directrice adjointe du département Océans, climat et ressources de l'Institut de recherche pour le développement (IRD), directrice de recherche au CNRS

« Le réchauffement global rend les océans moins hospitaliers »



Le Grand Bleu foisonne de vie, dont les différentes formes sont autant d'indicateurs de santé. Polytechnicienne, Marina Lévy a répondu à l'appel du large pour « comprendre ce qui se passe dans l'océan en faisant communiquer entre elles les différentes disciplines ». Après un DEA Océanographie, météorologie, environnement, suivi d'une thèse sur la production de phytoplancton en Méditerranée et d'un post-doc à Columbia University (New York) sur la biogéochimie en Atlantique nord, elle entre au CNRS comme modélisatrice. « **Comprendre un problème nécessite une vue d'ensemble, rendue possible en combinant le spatial, qui voit en surface, et l'in situ, qui voit en profondeur** »

résume-t-elle. Au fil du temps et des modèles, les résultats s'affinent : « L'océan est soumis à des pressions humaines et climatiques dramatiques que l'on détecte depuis peu, notamment grâce au spatial, dont les séries temporelles commencent à être suffisamment longues. Le réchauffement global rend les océans moins hospitaliers : le corail s'adapte mal, certains poissons migrent, le phytoplancton, base de la chaîne alimentaire marine, reçoit moins de nutriments... » déplore l'océanographe. **Femme de sciences et de dialogue, elle achève un mandat de cinq ans à la présidence du groupe Océan du Tosca (cf. p. 8), « pour faire le lien entre la recherche française**

et le CNES, grâce auquel notre communauté scientifique est à la pointe des études océaniques ». Biodiversité, climat, pollution, sécurité alimentaire... face à de tels enjeux, les Nations unies lanceront une « décennie pour les océans » en 2021. Espérant une mission dédiée à la couleur de l'océan pour des études fines des régions côtières, sous forte pression anthropique, Marina Lévy croit fermement au rôle des satellites pour l'avenir : « Altimétrie, état de mer, température, salinité... **les missions spatiales nous apportent de nouvelles informations, toujours plus précises. Nous avons besoin de la continuité de ces données pour monitorer les changements et préserver l'océan.** »



RENCONTRES

CHRISTOPHE GUINET

Écologue marin au centre d'études biologiques de Chizé du CNRS

« Nous faisons le lien entre les conditions océaniques et la vie en mer »



Jeune chercheur en écologie marine, Christophe Guinet a rencontré l'éléphant de mer en étudiant son prédateur, l'orque. **« À Chizé, nous observons le comportement des espèces en suivant des colonies sur le long terme, pour certaines depuis 1950. En 2003, inspiré par les expériences de mes collègues et la télémétrie naissante, l'éléphant de mer m'est apparu l'espèce idéale pour obtenir des mesures homogènes sur la zone australe, où il s'alimente »**, explique-t-il. Aujourd'hui directeur de recherche, **il a ainsi révélé une remarquable sentinelle : 98 % des données de température et de salinité de la banquise antarctique viennent de ces nageurs de fond** qui, chaque jour, effectuent

60 plongées de 20 minutes, de 500 à 2000 mètres de profondeur. Les balises Argos, dont ils sont équipés, ne leur font aucun mal. Parcourant jusqu'à 4000 kilomètres en l'espace de trois mois, elles ont évolué pour archiver de longues séries de données, récupérées dès qu'un animal revient à terre. « En adaptant les capteurs à leurs comportements, nous faisons le lien entre les conditions océaniques et la vie en mer. Quand un individu remonte respirer, il reste immobile, ballotté par la houle, de préférence dos aux vagues. Les capteurs au sommet de son crâne nous renseignent alors sur l'état de mer : l'accéléromètre informe sur la fréquence et l'amplitude de la houle, le magnétomètre sur l'orientation de

l'animal, et donc sur la direction des vagues et du vent », explique l'expert. Température, salinité, oxygène dissout, fluorescence, pression, état de mer... autant de données que le CNES utilise pour ajuster et valider la calibration de ses mesures satellites en Antarctique. Comptant particulièrement sur les duos avec CFOSat et Swot, Christophe Guinet attend également beaucoup du recul permis par maintenant quinze ans de mesures : **« L'éléphant de mer nous montre comment l'environnement austral est en train de changer. Ses données doivent aussi servir à identifier les zones écologiquement importantes et à favoriser des applications de gestion durable des ressources marines. »**

Historien des sciences
et théologien,
Jacques Arnould
est chargé de mission
pour les questions
éthiques au CNES.



ESPACE ÉTHIQUE



JACQUES ARNOULD

APPAREILLER

L'espace ne nous a pas seulement permis d'observer une singulière perle bleue, la Terre elle-même ; il nous a aussi dotés de capacités exceptionnelles pour continuer à explorer les océans de notre planète. L'espace ne doit pas pour autant négliger l'expérience et la sagesse des gens de mer.

Nous sommes en avril 1610. Après les observations du ciel menées à Padoue par Galilée durant l'hiver précédent, la révolution astronomique a débuté ; à Prague, Johannes Kepler peut écrire : « Créons des navires et des voiliers appropriés à l'éther céleste et beaucoup d'explorateurs ne seront pas effrayés par ces immensités vides. entre-temps, nous préparerons, pour ces courageux voyageurs des cieux, les cartes des corps célestes – moi, celles de la Lune ; et vous, Galilée, celles de Jupiter. » Ainsi, lorsqu'il envisage le voyage dans l'espace, Kepler l'associe spontanément à la navigation maritime. Un rapprochement que John Kennedy honore à son tour lors de son discours « spatial » du 12 septembre 1962 à Houston, lorsqu'il parle de « hisser les voiles sur cette nouvelle mer » ou s'inquiète « si ce nouvel océan sera une mer de paix ou un nouveau théâtre de guerre terrifiant ».

L'ESPACE, SINGULIER OcéAN

Voilà plus de soixante ans que nous avons appareillé pour l'espace ; mais nous avons encore bien des

enseignements à recevoir de la part des « gens de mer ». Car l'espace est un singulier océan que nous sommes loin d'avoir circonvenu. En effet, il n'a pas d'autre horizon que celui de nos connaissances et de nos techniques ; il n'a pas d'autre rivage que les planètes peu à peu explorées et les ports (bientôt les comptoirs ?) patiemment bâtis ; il n'a pas d'autres abysses que ceux percés par l'acuité de nos télescopes et l'agilité de nos sondes.

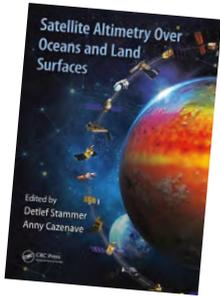
Sommes-nous prêts à affronter un tel océan, à ne plus nous contenter du cabotage, mais à appareiller pour la haute mer ? De quelles cartes disposons-nous ? De quels repères et de quelles boussoles, non seulement techniques mais politiques et juridiques ?

L'expérience des océans terrestres est indispensable à la mise en place d'une gouvernance commune des ressources (minières) de l'espace, tout comme à la préparation des équipages pour les futures navigations au long cours.

Sommes-nous prêts à lever l'ancre ?



EN VUE



À LIRE SATELLITE ALTIMETRY OVER OCEANS AND LAND SURFACES

Sous la direction conjointe du professeur Detlef Stammer, de l'Université de Hambourg, et de l'académicienne Anny Cazenave du Legos, cet ouvrage édité en anglais fournit une vue d'ensemble des techniques d'altimétrie par satellite et des missions associées. Il recense les applications les plus récentes en lien avec la dynamique des océans et du niveau de la mer. Il aborde des observations spatiales connexes de la surface de l'océan et du géoïde marin, des applications de l'altimétrie à la cryosphère et aux eaux de surface, ainsi que l'océanographie opérationnelle.

Paru en octobre 2017
aux éditions CRC Press.

À VOIR Un site web de référence

Conçu par le CNES, le site Aviso est devenu une référence mondiale en altimétrie. Dédié à l'exploitation des données altimétriques issues d'observations satellites de la mesure de la hauteur des océans, il peut être consulté par tous. Via sa newsletter, il interagit avec les utilisateurs pour rester en phase avec les nouveaux besoins exprimés et optimiser ses services.

www.aviso.altimetry.fr

À LIRE Advances in Space Research, Special Issue « 25 years of satellite altimetry »

Fin 2017, l'altimétrie fêtait son quart de siècle. Les contributions de toute la communauté scientifique, les progrès accomplis et les découvertes des vingt-cinq dernières années ont donc été compilés dans un ouvrage actuellement sous presse.

À paraître à l'automne
aux éditions Elsevier.

À AFFICHER

CFOSAT FAÇON RÉTRO



En 2018, le CNES a conçu des affiches rétro-futuristes thématiques valorisant les grands rendez-vous spatiaux de l'année. Objectif : faire découvrir au grand public les activités du centre national. Grâce au style pointilliste de Thomas Hayman, cinq affiches ont été réalisées, détournant les codes graphiques de la publicité des années 1960. CFOSat a fait partie des missions choisies et dispose donc de sa propre affiche. En juin 2019, cette série de posters a reçu un prix du prestigieux Club des directeurs artistiques.

9 MILLIONS

C'est le tonnage de déchets plastique déversés chaque année dans les océans. Ces déchets font partie des éléments qui interviennent dans le dérèglement climatique. Selon certaines prévisions, en 2050 le poids des plastiques devrait dépasser celui des poissons dans les océans.



EN VUE



ARGONAUTICA

LES ÉCOLES SUR LE PONT

Du 22 au 24 mai, l'aquarium Mare Nostrum de Montpellier accueillait les classes inscrites dans le programme éducatif « Argonautica ». Avec la communauté enseignante, le CNES a conçu ce programme pour initier les jeunes générations à l'utilisation d'outils comme les balises Argos ou les données spatiales. Commence alors une véritable démarche d'investigation. Adossé aux missions du CNES, le programme Argonautica est structuré autour de grandes problématiques environnementales : comprendre le fonctionnement de l'océan et s'interroger sur son devenir et celui des espèces qui l'habitent, notamment. Pour ce faire, il repose sur trois piliers : ArgoNimaux propose aux classes de suivre les déplacements d'animaux marins équipés de balises Argos. Très concrètement, les jeunes mesurent l'impact des variations environnementales sur certaines espèces. ArgOcéan les plonge dans les grands courants marins comme le Gulf Stream. En ajoutant un enjeu en lien avec l'humain : faire route avec les skippers du Vendée Globe. Enfin, ArgoHydro s'appuie, lui, sur les innovations technologiques et permet d'évaluer l'impact des variations climatiques sur le cycle de l'eau. Son atout : il peut être mené sur les lacs, les rivières, au plus près des écoles. Pour tous ces projets, les classes inscrites dans le dispositif Argonautica ont accès aux données spatiales ou à celles des bouées expérimentales.

<https://enseignants-mediateurs.cnes.fr/fr/web/CNES-fr/7161-argonautica.php>



AGENDA

21-25 OCTOBRE 2019
Réunion annuelle des 350 scientifiques internationaux sélectionnés par le CNES, la NASA, la NOAA et Eumetsat autour de la filière altimétrie Jason.
Chicago, États-Unis

AVRIL - MAI 2020
Meeting IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)
France

12-16 OCTOBRE 2020
Meeting OST-ST (Ocean Surface Topography-Science Team)
Darmstadt, Allemagne

HOMMAGE

Michel Lefebvre, père de l'altimétrie spatiale, nous a quittés

Passionné par l'océan, Michel Lefebvre a marqué les esprits par son infinie gentillesse. Nous devons à ce visionnaire la première mission française d'altimétrie et le système Doris. Ayant à cœur de créer une véritable communauté autour de ces enjeux, il est aussi à l'origine du colloque régulier « Jason », qui a notamment permis l'émergence de Mercator Océan International.



TRANSFERT

CARTOGRAPHIER LA SYMPHONIE Océane

Dans l'océan, on n'y voit goutte ! Seul le son se propage, indispensable à la vie sous-marine. Une symphonie parfois gravement désaccordée par l'homme. Pour remédier à ce problème de taille, la PME bretonne Quiet Oceans met en ligne son système de surveillance et de prédiction des bruits naturels et anthropiques, un outil élaboré grâce aux données spatiales.



ous les animaux marins émettent des sons : pour se repérer, chasser, communiquer... Il est désormais prouvé que le bruit généré par l'homme impacte la vie sous-marine à court et long termes.

Déjà impliqués dans les exercices sonar de l'Otan qui soulevaient le problème en 1995, Thomas Folegot et ses deux associés ont choisi d'écouter la mer pour la protéger. L'idée : créer une cartographie acoustique. Il faut pour cela caractériser la façon dont le son se propage dans l'océan, ce qui dépend de la température et de la salinité de l'eau, de la profondeur et de la nature du fond mais aussi de l'état de mer. « Même si nous travaillons sous l'eau, c'est le spatial qui nous fournit les données d'entrée, détaille Thomas Folegot. Couplé à Mercator Océan International pour décrire l'océanographie d'une zone, notre système Quonops récupère toutes les données de bruit connues du lieu, et notamment le trafic maritime, principale source de bruit anthropique. »

Depuis 2010 en Europe, la directive-cadre Stratégie pour le milieu marin impose à tout projet maritime de fournir préalablement une évaluation de son empreinte sonore et de son impact sur la faune marine. En ligne, Quonops permet de simuler soi-même diverses sources de bruit sur une zone d'intérêt. « L'utilisateur peut ainsi définir son scénario de travaux et modéliser ce qu'il ajoute au bruit existant. Le système permet ensuite de croiser la cartographie obtenue avec la présence potentielle de certaines espèces pour évaluer les risques et les impacts du projet considéré », résume l'expert en acoustique.

FR

2

millions
de cartographies
acoustiques ont déjà
été établies par Quonops
aux quatre coins du
monde.