

Les satellites altimétriques au service de la mesure du niveau de la mer

Par Cyril GERMINEAUD,

Centre national d'études spatiales (Cnes), Toulouse

Claire DUFAU et Pierre PRANDI

Collecte Localisation Satellites (CLS), Ramonville-Saint-Agne

Depuis les années 1990, l'altimétrie par satellite a révolutionné notre compréhension de la dynamique océanique, offrant plus de 30 ans de mesures continues. Les satellites altimétriques, tels que Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Jason-3, et Sentinel-6 MF, ont permis de surveiller avec précision l'évolution du niveau moyen global de la mer. La mission SWOT, lancée en 2022, introduit une technologie innovante avec un radar interférométrique KaRIn, permettant une résolution spatiale dix fois supérieure à celle des satellites conventionnels. Cette avancée offre une vision inédite des structures de fine échelle de la circulation océanique. Une élévation du niveau moyen global de la mer d'environ 10 cm a été observée depuis 1993, avec une accélération significative depuis la fin des années 2000. Deux principaux facteurs contribuent à cette augmentation : l'expansion thermique des océans et la contribution des eaux de fonte des glaciers et calottes polaires. Cependant, cette élévation masque des variations régionales très importantes qui sont détectables par les satellites altimétriques. Les risques de submersion marine liés à l'élévation du niveau de la mer représentent des enjeux économiques majeurs. Les communautés côtières du monde entier font face à des menaces, nécessitant des solutions d'adaptation. Des initiatives telles que Littoscope en France utilisent des données satellites pour évaluer les risques de submersion, anticiper les impacts, et proposer des solutions pour réduire la vulnérabilité des zones côtières. En conclusion, l'altimétrie spatiale a été cruciale pour comprendre la dynamique océanique à différentes échelles spatiales et temporelles, mesurer l'élévation du niveau de la mer, et anticiper les risques de submersion. Les avancées technologiques, telles que le radar KaRIn de Swot, ouvrent de nouvelles perspectives pour une observation encore plus détaillée des océans, fournissant des informations cruciales pour faire face aux défis posés par le changement climatique.

L'ALTIMÉTRIE SPATIALE : PLUS DE 30 ANS DE MESURES CONTINUES

Depuis le début des années 1990, l'altimétrie par satellite a changé le regard porté sur la dynamique océanique en permettant l'observation des mers et des océans avec une couverture spatio-temporelle sans précédent. Les mesures, réalisées de manière continue depuis maintenant plus de 30 ans, permettent notamment de construire des indicateurs climatiques comme le niveau moyen global de la mer.

Les satellites altimétriques permettent de mesurer avec une grande précision et stabilité l'évolution de la hauteur de la surface de la mer, fournissant une couverture quasiment complète du domaine océanique tous les 10 jours. La mission altimétrique Topex/Poseidon, lancée en 1992 et développée conjointement par le Cnes en France et la Nasa aux États-Unis, est la première mission ayant permis d'atteindre le niveau de performance requis pour mesurer l'évolution du niveau moyen global de la mer. Topex/Poseidon a été suivi par plusieurs satellites altimétriques destinés à surveiller l'océan sur le long terme : Jason-1 en 2001 puis Jason-2 en 2008, Jason-3 en 2016 et la mission Sentinel-6 Michael Freilich (MF) en 2020. Ces missions sont appelées « missions de référence » et assurent la stabilité à long terme du système d'observation. Ces missions ont été lancées sur la même orbite, elles observent donc le même océan et une inter-calibration précise est possible grâce à la réalisation systématique d'une phase tandem pendant laquelle les deux satellites sont placés l'un derrière l'autre à quelques minutes d'intervalle.

Des missions complémentaires, telles que la mission Saral/AltiKa lancée en 2013, sont utilisées pour accroître la couverture et la résolution spatiales, en particulier aux hautes latitudes. En décembre 2022, une nouvelle mission altimétrique, Swot (*Surface Water and Ocean Topography*), conjointe entre le Cnes et la Nasa a été lancée. Swot embarque pour la première fois dans l'histoire de l'altimétrie spatiale un radar interférométrique large fauchée dénommé KaRIn (*Ka-band Radar Interferometer*). KaRIn fournit des mesures avec une résolution spatiale sans précédent, dix fois supérieure à celle obtenue avec les satellites altimétriques actuels. Cette véritable rupture technologique permet d'observer pour la première fois les structures dites de fine échelle de la circulation océanique de surface, comme l'évolution de petits tourbillons, de filaments ou encore de courants étroits. Ces petites structures jouent un rôle essentiel dans le transport vertical et horizontal des flux d'énergie (chaleur), de carbone et de nutriments ; leur prise en compte constitue donc une avancée importante.

Par ailleurs, la mission Swot ne se limite pas à l'océanographie, l'instrument KaRIn fournit aussi des mesures hydrologiques permettant le suivi des niveaux d'eau des lacs, et autres réservoirs mais aussi des rivières avec une précision de l'ordre du centimètre. Cette capacité de Swot à mesurer environ 90 % des eaux de surface de la planète offre donc la possibilité d'acquérir une meilleure compréhension du cycle de l'eau en général, et de suivre l'impact du changement climatique sur les ressources en eau.

Principe de l'altimétrie par satellite

L'instrument principal installé sur un satellite altimétrique est un radar, capable de mesurer avec une grande précision le temps de trajet aller-retour d'une onde électromagnétique émise verticalement et réfléchi par la surface de la mer (voir la Figure 1). Ce temps converti en distance (en utilisant la vitesse de la lumière) permet ainsi d'obtenir une mesure précise de la distance entre le satellite et la surface océanique en moyennant les estimations sur une seconde.

La détermination de l'altitude du satellite par rapport à un ellipsoïde de référence se fait avec un léger délai grâce à un calcul d'orbite précis. Ce calcul nécessite un modèle complet des forces agissant sur le satellite et des mesures très précises des distances et des vitesses relatives entre le satellite et des stations géodésiques au sol. Des mesures acquises par des systèmes de localisation tels que Doris (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*), et les constellations GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) sont utilisées pour suivre et ajuster en permanence la trajectoire du satellite, permettant ainsi de déduire son altitude par rapport à l'ellipsoïde de référence et, par conséquent, la hauteur de la surface de la mer au-dessus de cet ellipsoïde (voir la Figure 1).

L'hypothèse initiale de la propagation des ondes radar à la vitesse de la lumière s'avère inexacte dans l'atmosphère. Par conséquent, diverses corrections doivent être appli-

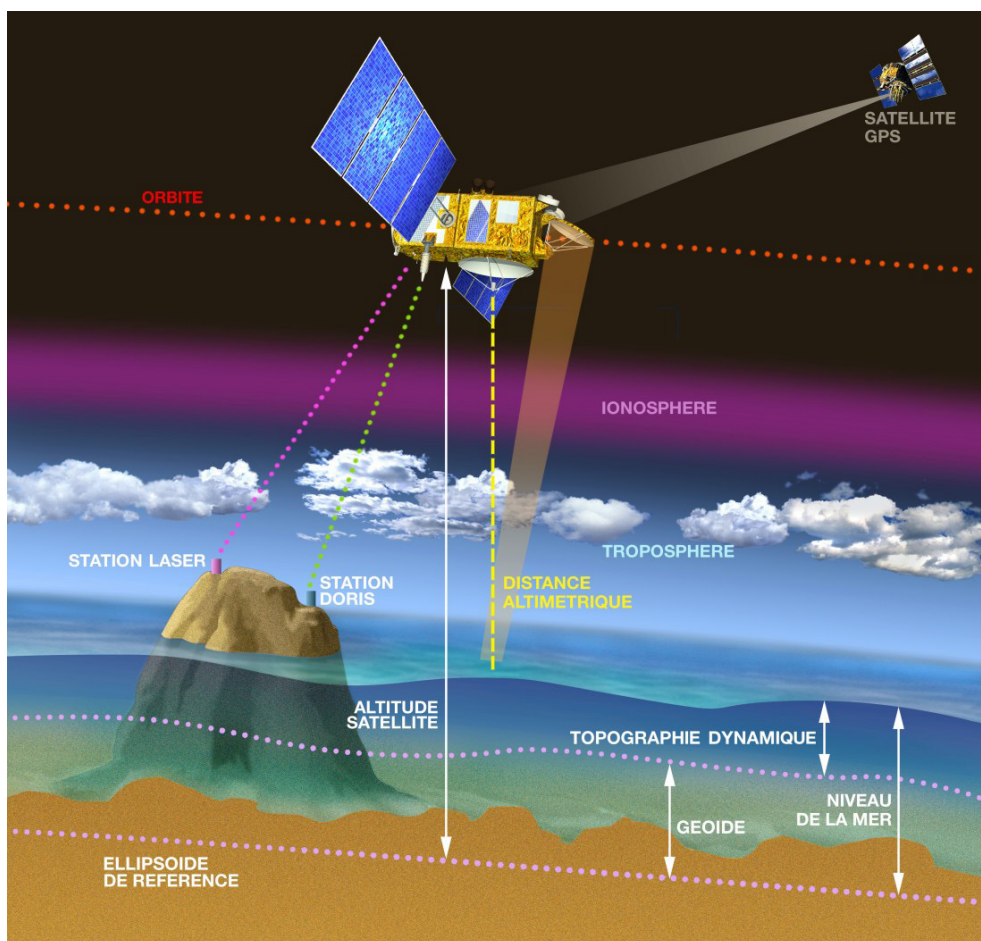


Figure 1 : Schéma illustrant le principe de l'altimétrie par satellite (Crédits : Cnes/Aviso).

quées à la distance altimétrique pour compenser les effets de ralentissement causés par l'ionosphère, l'air et la vapeur d'eau présents dans la troposphère. Ces corrections comprennent l'utilisation d'un radiomètre embarqué pour mesurer le contenu en vapeur d'eau et l'application de corrections ionosphériques basées sur l'analyse des ondes radar à différentes fréquences. D'autres corrections sont nécessaires pour prendre en compte des facteurs tels que l'état de la surface de la mer, les marées océaniques et la réponse de l'océan aux forces exercées par la pression atmosphérique et le vent. La quantité qui intéresse principalement les océanographes est la hauteur de mer par rapport au géoïde, appelée topographie dynamique. C'est en effet cette quantité qui contient l'information sur la circulation océanique totale, et qui permet d'étudier les processus complexes qui se produisent à la surface des océans.

Le géoïde correspond à la topographie qu'aurait un océan au repos sous le seul effet de la gravité. Cette surface présente des creux et des bosses reflétant les variations de l'attraction terrestre d'un point à l'autre de la Terre et la topographie des fonds marins. Les fines échelles du géoïde sont mal résolues et on utilise en pratique une méthode indirecte pour reconstruire la topographie dynamique : la hauteur de mer est exprimée en anomalies par rapport à un état moyen de la surface océanique calculé par rapport à l'ellipsoïde de référence. Ces anomalies sont ajoutées à la topographie dynamique moyenne qui corres-

pond à la même surface mais exprimée par rapport au géoïde. Pour donner un ordre de grandeur les creux et bosses de la surface marine ont une amplitude de plusieurs mètres à plusieurs dizaines de mètres. Le signal océanique variable (c'est-à-dire les anomalies de hauteur de mer) a pour sa part une amplitude maximale de l'ordre de quelques dizaines de centimètres après correction des effets de marée.

Variabilité temporelle du niveau de la mer observée par altimétrie spatiale

Les observations altimétriques continues depuis 1993 jusqu'à aujourd'hui ont permis d'établir un indicateur climatique majeur : le niveau moyen global de la mer (ou *Global Mean Sea Level*, GMSL dans la littérature scientifique). Cet indicateur est actuellement calculé à partir des observations recueillies par les missions de référence Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Jason-3 et Sentinel-6 MF, après avoir retiré les variations semi-annuelles et annuelles. Un filtre temporel de 6 mois et une correction du rebond postglaciaire (- 0,3 mm/an) sont aussi appliqués avant d'estimer l'élévation du niveau moyen global de la mer, estimée à 3,6 mm/an (avec une incertitude de 0,3 mm/an) pour la période 1993-2023 ; correspondant à une augmentation d'environ 10 cm depuis 1993 (voir la Figure 2). Cependant, il est important de préciser qu'une accélération significative de cette augmentation a été observée depuis la fin des années 2000, estimée à 0,12 mm/an/an. Cela implique qu'à chaque décennie, le rythme d'augmentation du niveau moyen global de la mer augmente d'1,2 mm/an. Au cours de la dernière décennie (2014-2023) une hausse de 4,4 mm/an du niveau moyen a été observée (voir la Figure 2).

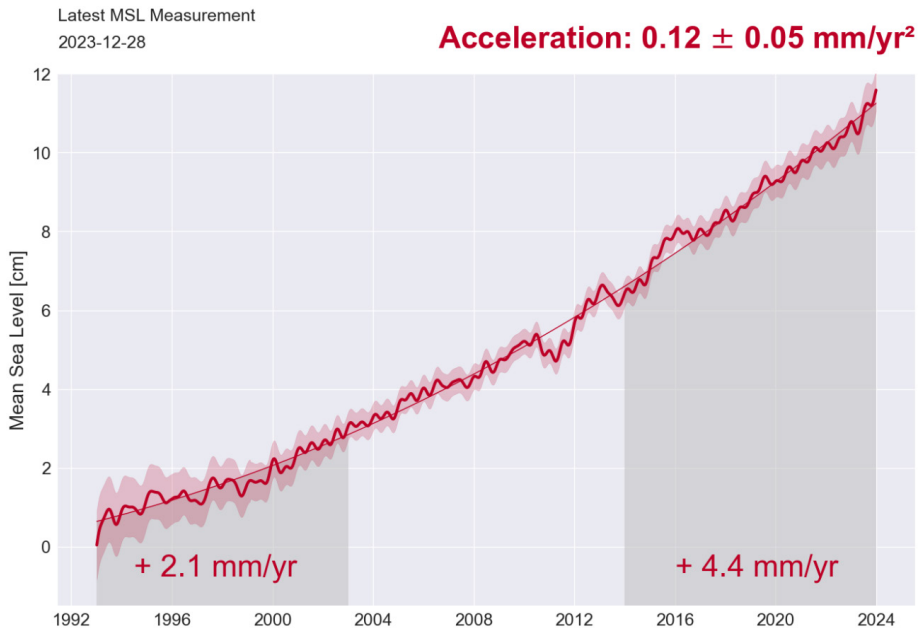


Figure 2 : Niveau moyen global du niveau de la mer (*Mean Sea Level*, MSL) estimé à partir des données altimétriques Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Jason-3 et Sentinel-6 Michael Freilich sur la période 1993-2023 (Crédits : Cnes, Legos et CLS).

Deux facteurs principaux en lien avec le réchauffement climatique actuel expliquent cette augmentation du niveau moyen : l'expansion du volume des océans et l'apport d'eau douce

provenant de la fonte des glaces et des glaciers. D'une part, l'océan global absorbe plus de 90 % de l'excédent de chaleur accumulé dans le système climatique induit par l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (von Schuckmann *et al.*, 2016) ; la température moyenne des océans augmente donc, et l'eau de mer se dilate. D'autre part, l'excédent de chaleur accumulé dans le système provoque la fonte des calottes polaires (Groenland et Antarctique) et des glaciers de montagnes. Ces eaux de fonte contribuent à l'augmentation de la masse de l'océan et donc à la hausse du niveau de la mer (Oppenheimer *et al.*, 2019) observée par satellite depuis 1993.

La courbe du niveau moyen de la mer masque toutefois une variabilité régionale significative du niveau moyen de la mer, avec des régions où celui-ci augmente trois fois plus rapidement que la moyenne globale (voir la Figure 3). Cette variabilité spatiale est principalement due à la redistribution de la chaleur sous l'influence des grandes oscillations climatiques, en particulier l'oscillation Australe/El Niño, l'oscillation Pacifique Décennale ou encore l'oscillation Nord Atlantique. Les tendances régionales du niveau moyen de la mer reflètent aussi des variations à différentes échelles spatiales, des grandes structures à l'échelle des bassins océaniques aux structures plus fines dites de méso-échelle dans les grands courants tels que le Gulf Stream, le Kuroshio et le courant circumpolaire austral (autour de l'Antarctique). L'accès à cette dynamique régionale constitue un apport majeur de l'altimétrie par satellite pour comprendre et suivre les variations du niveau de la mer en complément des marégraphes installés à la côte.

En plus de ces indicateurs du niveau moyen de la mer, la combinaison des mesures provenant de différents altimètres permet de construire des cartes quotidiennes de hauteurs de mer, telles que celles diffusées par le service marin¹ (*Copernicus Marine Service*, CMEMS) du programme Copernicus de l'Union européenne.

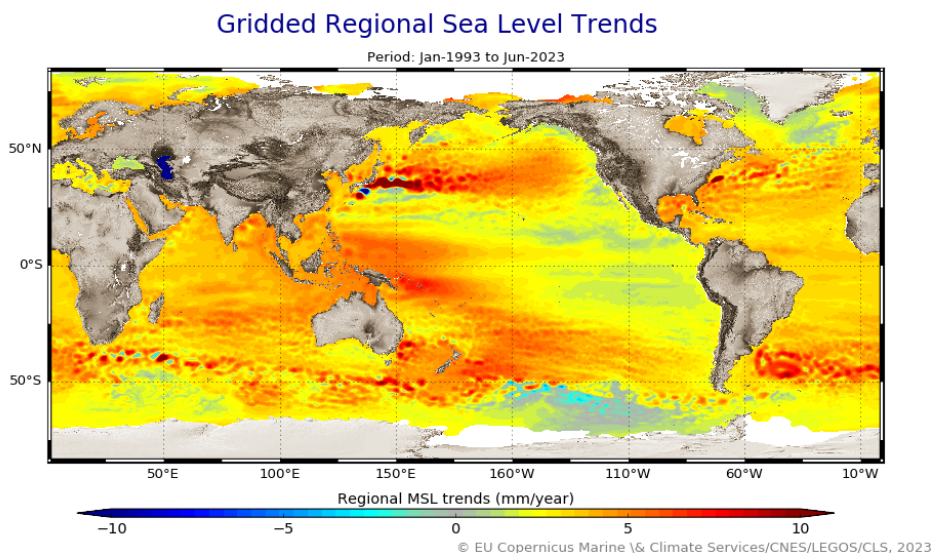


Figure 3 : Carte des tendances régionales du niveau moyen de la mer (*Regional Mean Sea Level Trends*) sur la période de janvier 1993 à juin 2023. Cette carte des tendances grillées au 1/4 de degré est obtenue à partir des données altimétriques multi-missions du service climatique de Copernicus, C3S Ssalto/Duacs.

¹ <https://marine.copernicus.eu/fr>

ÉLÉVATION DU NIVEAU DE LA MER ET RISQUES DE SUBMERSIONS MARINES

Les enjeux économiques liés aux risques de submersion en zone côtière dans le monde sont colossaux. De nombreuses communautés côtières à travers le monde vivent déjà avec la menace de l'élévation du niveau de la mer. Ces risques de submersion peuvent impacter des quartiers d'habitations entiers, endommager les infrastructures, et donc mettre la vie des populations en danger et causer de lourdes pertes socio-économiques (IPCC², 2022).

Réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de la planète et limiter la hausse de la température moyenne à la surface du globe à 1,5 voire 2°C par rapport à l'ère pré-industrielle est une nécessité absolue pour de nombreuses villes du monde qui seront confrontées à une forte menace de la montée des eaux d'ici la fin du XXI^e siècle (IPCC, 2019). Selon une analyse de l'impact du changement climatique sur les plus grandes villes (Rosenzweig *et al.*, 2018), la population urbaine totale menacée par l'élévation du niveau de la mer, si les émissions ne diminuent pas, pourrait compter plus de 800 millions de personnes, vivant dans 570 villes, d'ici 2050. Selon les estimations, les coûts économiques mondiaux pour les villes, en raison de la montée des eaux et des submersions induites, pourraient s'élever à 1 000 milliards de dollars d'ici le milieu du XXI^e siècle. Comme pour d'autres aléas climatiques, les villes connaîtront un impact de l'élévation du niveau de la mer à des rythmes différents en fonction des régions. Les villes de la côte Est des États-Unis, ainsi que les grandes villes d'Asie du Sud-Est, sont particulièrement vulnérables, car elles connaissent une élévation du niveau de la mer plus rapide que la moyenne globale.

Face à ces risques, des solutions sont possibles pour les anticiper et les réduire au maximum en concevant des initiatives d'adaptation, en identifiant les zones à haut risque avec une meilleure cartographie des risques de submersions et en incitant leurs habitants à se reloger, en renforçant le drainage des eaux, l'approvisionnement en eau douce et les liaisons de transport pour réduire la vulnérabilité. Une analyse coûts-bénéfice des stratégies d'adaptation pour réduire les risques a notamment été réalisée dans la baie d'Osaka, au Japon (Ha *et al.*, 2021) : les auteurs estiment que sans mesures d'adaptation, le coût annuel attendu des dommages dus au risque d'inondation par ondes de tempête y augmentera, passant de 9,85 milliards de JPY (75 millions d'euros) à 69,17 milliards de JPY (517,5 millions d'euros) dans le scénario RCP8.5 du GIEC (AR5) projeté jusqu'en 2100. Ces actions d'adaptation peuvent être encouragées par la sensibilisation des élus et gestionnaires des territoires aux échelles nationale, régionale et locale.

En France, la solution Littoscope³ a été développée, avec le soutien du Cnes et son Observatoire Spatial du Climat (SCO), pour évaluer les impacts de la montée des océans dans les zones côtières à partir des observations satellites. Elle repose sur trois piliers : a) estimer les aléas de submersion côtière futurs à partir d'images satellitaires optiques haute résolution et de données altimétriques satellitaires ; b) évaluer les risques associés en prenant en compte les enjeux locaux ; et c) proposer une plateforme de visualisation dédiée aux décideurs locaux. L'estimation des aléas de submersion s'appuie sur la combinaison d'un modèle numérique d'élévation des terres à haute résolution (0,5 m) estimé à partir des images satellites Pléiades⁴ combinées avec les tendances du niveau de la mer estimées à partir des missions altimétriques ou des projections climatiques du Giec. L'intensité décennale des tempêtes et des ondes de marée est également prise en compte à partir d'un

² GIEC en anglais - IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).

³ <https://www.spaceclimateobservatory.org/fr/littoscope>

⁴ <https://www.pleiades-cnes.fr>



Figure 4 : Estimation d'une submersion côtière en 2100 en prenant en compte les tendances régionales liées à l'élévation du niveau de la mer observée par altimétrie depuis 1993 et des effets d'une onde de tempête décennale (hauteur d'eau au-dessus des terres en mètres) (Crédits : CLS et Cnes).

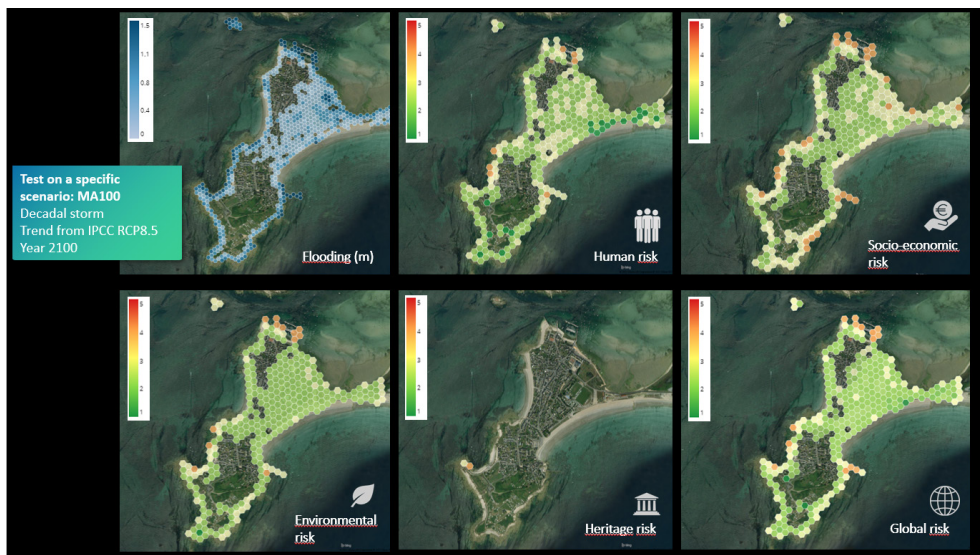


Figure 5 : Risques côtiers (humains, socio-économiques, environnementaux et patrimoniaux) estimés à partir d'un aléa de submersion et des enjeux locaux issus d'informations satellitaires (occupation des sols) et de bases de données socio-économiques locales (Crédits : CLS et Cnes).

modèle océanique dédié. Les hauteurs d'eau de submersion potentielle sont estimées à l'aide d'une approche "bathtub" (Gesch, 2018) comparant les hauteurs d'eau pour chacun des 24 scénarios (voir la Figure 4). Les risques qui en résultent (voir la Figure 5) sont estimés en croisant l'intensité de l'aléa avec des enjeux sociaux, économiques et culturels provenant de données socio-économiques nationales, régionales et locales, combinées à des informations sur l'utilisation des terres dérivées des images Pléiades.

La méthode Littoscope a été expérimentée sur deux zones de démonstration en France : la presqu'île de Gâvres en Bretagne et une zone plus large autour des étangs près de Palavas-les-Flots sur la côte méditerranéenne. Ces expérimentations ont démontré comment l'usage de données satellites en combinaison avec d'autres données peut proposer un outil de sensibilisation facilement reproductible pour les territoires littoraux à risque à l'échelle du globe.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

VON SCHUCKMANN K., PALMER M., TRENBERTH K. *et al.* (2016), "An imperative to monitor Earth's energy imbalance", *Nature Climate Change*, 6, pp. 138–144. <https://doi.org/10.1038/nclimate2876>

OPPENHEIMER M., GLAVOVIC B.C., HINKEL J., VAN DE WAL R., MAGNAN A.K., ABD-ELGAWAD A., CAI R., CIFUENTES-JARA M., DECONTO R.M., GHOSH T., HAY J., ISLA F., MARZEION B., MEYSSIGNAC B. & SEBESVARI Z. (2019), "Sea level rise and implications for low-lying islands, coasts and communities" *In: IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 321-445. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.006>

IPCC (2022), *Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability, contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 p., <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

IPCC (2019), "Summary for policymakers" *In: IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-35. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.001>

ROSENZWEIG C., SOLECKI W. *et al.* (2018), "The Future we don't want, how climate change could impact the world's greatest cities", UCCRN Technical Report, February, <https://www.c40.org/what-we-do/scaling-up-climate-action/adaptation-water/the-future-we-dont-want/>

HA S., TATANO H., MORI N., FUJIMI T. & JIANG X. (2021), "Cost-benefit analysis of adaptation to storm surge due to climate change in Osaka Bay", Japan, *Climatic Change*, 169, pp. 1-20, <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03282-y>

GESCH D. B. (2018), "Best practices for elevation-based assessments of sea-level rise and coastal flooding exposure", *Frontiers of Earth Science*, 6, 230, <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00230>