

Des jumeaux numériques pour la gouvernance des océans ? Les observatoires des socio-écosystèmes marins, un enjeu central

Auteurs : Sophie Lanco (IRD), Fabrizio d'Ortenzio (CNRS), Jean François Doussin (CNRS), Emma Inthavong (IRD), Olivier Pringault (IRD), Jean Marc Daniel (IFREMER), François Houiller (IFREMER), Cyril Lathuilière (Shom), Hervé Roquet (Météo France).

Contexte

Initialement développés dans le secteur de l'industrie à partir des années 60, les jumeaux numériques (Digital Twin ou DT) se sont récemment étendus à de nombreux domaines dont celui de la science et de l'écologie. S'appuyant sur la montée en puissance fulgurante des outils d'intelligence artificielle, ils peuvent être développés

désormais sur des systèmes complexes de grande ampleur, tel qu'un territoire (e.g. une aire marine, une ville, un estuaire, un bassin...) ou l'océan tout entier. Les jumeaux numériques suscitent un intérêt croissant en tant qu'outil d'aide à la décision, notamment en matière de gestion et de préservation environnementale.

Messages clés

À l'heure où les jumeaux numériques de l'océan (*Digital Twin of the Ocean* - DTO) sont envisagés comme un outil de rupture pour l'aide à la décision dans des espaces marins soumis à de multiples pressions, des défis inédits doivent être relevés pour les rendre véritablement opérationnels dans l'accompagnement à la gouvernance des océans.

Les DTO permettent d'entrevoir des opportunités de scénarisation importantes pour tester virtuellement l'effet de différentes mesures de gestion en amont de leur mise en œuvre. Toutefois, la qualité de leurs prédictions dépendra étroitement de la richesse, de la représentativité et de la qualité des données qui l'alimenteront.

Pour rendre pleinement opérationnel l'usage des jumeaux numériques, ils devront intégrer de manière plus complète les dynamiques sociétales et naturelles qui déterminent les trajectoires des socio-écosystèmes

marins, et donc assimiler plus largement les observations pertinentes qui permettront les contraindre et les forcer.

Dépasser ce verrou requiert le développement et la consolidation à l'échelle globale d'observatoires intégrant la diversité et l'interaction des dynamiques naturelles et sociétales, afin d'alimenter des DTOs interactifs, inclusifs et éthiquement encadrés.

Cela fait appel à une approche collaborative et interdisciplinaire s'appuyant sur une infrastructure standardisée et un mode de fonctionnement équitable (fiabilité des données, procédure d'accès transparente...).

Mis en œuvre dans cet esprit, le DTO qui produira les services de demain combinera dans un jeu synergique observation et modélisation, en garantissant la pertinence du DTO par l'observation et, en retour, en assurant une valorisation accrue des données d'observation par le DTO.

Problématique et Vision

Les jumeaux numériques sont des représentations virtuelles et interactives d'un système, mis à jour en temps réel à travers un flux d'observations pertinentes, et constituant une sorte d'empreinte digitale sur laquelle des expériences de scénario peuvent être menées. Dans le cadre de systèmes naturels comme les océans, ils peuvent être utilisés pour prévoir les effets des changements globaux, évaluer les impacts des activités humaines sur les socio-écosystèmes étudiés et informer les stratégies de conservation, de protection, et de gestion des activités humaines.

Leur puissance repose sur la représentation numérique d'un système complexe, résultant des interactions constantes entre dynamiques naturelles et dynamiques sociétales (ici les socio-écosystèmes marins),

construite en combinant le plus grand jeu de données disponible (incluant des simulations de modèles numériques déterministes) avec les outils de l'intelligence artificielle. Leur capacité d'absorber en continu les données au fur et à mesure de leur récolte, et d'affiner leur comportement leur permet de « coller au plus près » de l'évolution du système réel. Cette propriété est particulièrement intéressante dans un contexte de changement climatique, où les systèmes évoluent dans des enveloppes de variabilité différentes de celles de leurs trajectoires historiques.

Face à ces nouvelles opportunités, des initiatives majeures dédiées à l'Océan voient le jour. L'Union européenne, par exemple, investit massivement dans le développement d'un jumeau numérique de

l'océan (*Digital Twin of the Ocean* ou DTO), dont l'initiative la plus mature est pilotée par *Mercator Ocean International*. L'ambition d'un DTO est de disposer d'une représentation virtuelle d'un socio-écosystème ou d'un espace marin sur laquelle il serait possible de simuler des scénarios et d'expérimenter des alternatives de gouvernance visant la protection et la durabilité de ces socio-écosystèmes.

Toutefois, quel que soit leur niveau de sophistication, les jumeaux numériques ne pourront s'affranchir des observations. Au contraire, plus leur complexité et leur résolution augmentera plus des données d'observation qualifiées et acquises aux bonnes échelles seront indispensables pour garantir le réalisme des simulations et donc finalement la pertinence des services produits.

Les systèmes d'observation indispensables existent : il nous faut donc non seulement les préserver, mais aussi les faire évoluer pour intégrer de nouveaux paramètres et pour que soit totalement qualifiées, référencées, et organisées des données prêtes à être moissonnées par les DTOs. Ce n'est qu'en connectant «en dur» sur les modèles un système d'observation, dynamique et robuste que les DTOs tiendront leurs promesses au monde scientifique et à l'ensemble de la société.

Néanmoins, des verrous persistent entre les avancées techniques actuelles et l'ambition de produire un outil d'aide à la décision et d'accompagnement à la gouvernance. Les développements actuels se concentrent principalement sur les composantes physico-chimiques de l'océan et les premiers échelons trophiques. Pourtant, la gestion et la gouvernance ne peuvent prétendre réguler que ce qui nous est accessible, c'est-à-dire les activités humaines elles-mêmes : on peut restreindre des captures de pêche mais on ne peut pas contrôler la reproduction des populations de poissons, on peut renoncer à implanter des infrastructures en mer, mais on ne peut pas intimer aux organismes vivants de s'y adapter. Un véritable accompagnement numérique à la prise de décision dans les océans appelle donc la capacité à explorer dans le DTO des scenarii représentant les interactions entre paysages océanographiques, communautés vivantes et activités humaines.

RECOMMANDATIONS

Pour répondre à leur promesse de fournir des « laboratoires virtuels » fiables d'expérimentation des politiques publiques en mer, les initiatives actuelles de jumeaux numériques de l'océan doivent se renforcer dans deux directions : une meilleure représentation des composantes biotiques et anthropiques des socio-écosystèmes marins ; et une meilleure représentation des différentes régions océanographiques de l'océan global. Ce constat appelle deux recommandations d'action principales :

1) Pérenniser et amplifier les réseaux d'observation de l'océan

Le maintien de réseaux d'observation pérennes est un véritable défi, questionné de façon chronique au gré des contraintes budgétaires. Pourtant, l'engouement suscité par les promesses des jumeaux numériques remet au cœur des enjeux la donnée d'observation. Il apparaît dès lors indispensable de diversifier thématiquement, amplifier géographiquement et pérenniser les observatoires pour collecter et structurer des données plus fiables et pertinentes. Il est aussi indispensable de réduire le déséquilibre Sud-Nord dans la disponibilité et l'accessibilité aux données d'observation, sans quoi, tant la qualité des DTO, que l'équité dans leur accessibilité seront pénalisées, notamment dans les régions tropicales. Cela requiert un engagement politique et budgétaire pérenne pour que la provision de données pertinentes permette à l'empreinte numérique du DTO de rester fidèle à la trajectoire réelle des socio-écosystèmes marins soumis au changement global.

Par conséquent, il est indispensable d'étoffer l'approche des jumeaux numériques de l'océan pour qu'ils embrassent l'ensemble des composantes des socio-écosystèmes marins, selon une approche plus intégrée et collaborative. **Cette ambition soulève cependant un défi majeur : la collecte, l'organisation et le traitement des données.** Si les données sont au cœur du DTO, elles en constituent aussi sa principale limite : pratiques d'acquisition de données diverses, hétérogénéité des sources et des formats, capacités infrastructurelles inégales selon les régions du monde, collaboration en interdisciplinarité complexe, etc.

Il s'agit par conséquent aujourd'hui de renforcer et organiser les capacités de collecte de données actuelles selon cinq axes principaux :

1. Consolider les réseaux d'observations existants pour améliorer leur capacité observationnelle (par inclusion des nouveaux paramètres quand c'est possible) ;
2. Améliorer et renforcer l'observation des composantes biotiques du système, en mettant particulièrement l'accent sur les niveaux trophiques supérieurs et sur leurs interactions avec les forçages abiotiques et biogéochimiques ;
3. Engager une réflexion approfondie sur la collecte, la structuration en bases de données et l'opérationnalisation des observations relatives aux socio-écosystèmes océaniques. Cela inclut une large gamme de paramètres, souvent déjà exploités à des fins scientifiques, mais encore peu intégrés aux chaînes numériques alimentant les modèles opérationnels.
4. Identifier, soutenir et opérationnaliser les technologies de rupture permettant, à terme, une acquisition massive et systématique d'observations biologiques et socio-écosystémiques.
5. Développer des architectures de DTOs qui permettent de scénariser des politiques de gestion des activités humaines dans différentes hypothèses d'évolution des socio-écosystèmes.

2) Articuler efficacement les efforts de collecte et d'organisation des observations avec les initiatives de développement des DTOs

L'IRD, le CNRS, le Shom, Météo France et l'IFREMER ont une expertise et des actifs pour contribuer à structurer un écosystème de recherche et d'innovation capable de répondre aux défis de la gouvernance des socio-écosystèmes marins. En mettant en place le *French Ocean Observing System* (FrOOS qui fédère les infrastructures et réseaux d'observation mis en place par la France de longue date, en métropole, dans les outre Mers et connectés à des réseaux internationaux), et en établissant l'infrastructure de données DataTerra et son pôle océanographique ODATIS, la France s'est dotée d'outils uniques pour assurer la fusion des données d'observation et des efforts de modélisation. Cette démarche s'inscrit dans une vision à long terme de gestion durable des activités humaines dans l'océan et de prise de décision éclairée, fondée sur des données robustes et une modélisation innovante. L'évolution de *Mercator Ocean* en Organisation Inter Gouvernementale, est une opportunité unique de mettre en commun les forces de développement des DTOs à l'échelle internationale. Pour transformer pleinement cette opportunité, il est essentiel de garantir une bonne et étroite articulation de cette initiative avec l'écosystème des organismes de recherche (nationaux et internationaux), pourvoeure des observatoires et des fronts de science.