

Comment évaluer les risques d'inondation dans les zones côtières de basse altitude où l'on manque de données ? La précision des informations sur l'élévation est déterminante

Avec la montée du niveau de la mer, les zones côtières de basse altitude densément peuplées, dont beaucoup se situent dans les pays du Sud, sont de plus en plus exposées aux risques d'inondation, d'où la nécessité de procéder à des évaluations fiables de ces risques. Les évaluations étant menées sur la base d'informations sur l'élévation qui sont référencées sur le niveau local de la mer, leur fiabilité dépend fortement de la précision et de la référence verticale des données utilisées. C'est pourquoi 1) nous présentons de manière synthétique comment utiliser correctement des données relatives à l'élévation, ainsi que les éléments à prendre en compte ; et 2) nous appelons à ce que des données de haute précision sur l'élévation soient publiquement disponibles à l'échelle mondiale.

Des éléments dont il faut tenir compte : le problème de l'imprécision des élévations

La montée du niveau marin (NMN) provoquée par le réchauffement climatique d'origine humaine suscite des inquiétudes croissantes pour l'avenir des zones côtières de basse altitude. Au niveau mondial, alors que le niveau moyen de la mer (NMN) a augmenté de 0,2 m entre 1901 et 2018, il sera, d'après les estimations, de 0,5 m à 1,0 m plus élevé en 2100 qu'en 1900, en fonction des trajectoires d'émissions (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat/GIEC, 2021). Compte tenu de la forte incertitude qui plane sur le comportement futur des calottes polaires, des valeurs de NMN beaucoup plus élevées ne sont pas à exclure. Au cours des prochains siècles ou millénaires, le niveau de la mer devrait continuer à augmenter et pourrait gagner plusieurs mètres. L'impact de la NMN et des risques côtiers tels que les ondes de tempête et les tsunamis étant étroitement lié à l'élévation des terres et à la topographie côtière, l'évaluation des risques d'inondation dépend fortement de la précision des données relatives à l'élévation, en particulier dans les deltas fluviaux et les plaines côtières de basse altitude. De récentes études ont montré qu'en 2020, 267 millions de personnes dans le monde vivaient dans des zones côtières situées à moins de 2 m au-dessus du NMN, soit le triple des estimations basées sur des données moins précises (Kulp et Strauss, 2019 ; Hooijer et Vernimmen, 2021).

Auteurs

Katharina SEEGER (Université de Cologne)
Philip S. J. MINDERHOUD (Université de Wageningen)
Leon T. HAUSER (Université de Zurich)
Pietro TEATINI (Université de Padoue)
Marie-Noëlle WOILLEZ (AFD)

Les informations sur l'élévation sont obtenues soit par mesure directe, par le biais de levés topographiques et de mesures GNSS (Système mondial de positionnement par satellite), soit par exploitation des données de télédétection transmises par des avions ou des satellites (altimétries optique, radar, laser), afin de générer des modèles numériques d'élévation (MNE) de la surface de la Terre. Les progrès de la télédétection au XXI^e siècle ont permis de produire de multiples MNE, d'échelle locale et mondiale, avec des résolutions spatiales et des degrés de précision différents en fonction des données sources, des techniques de traitement et du terrain lui-même. Les informations sur l'élévation n'ont donc rien d'absolu : elles dépendent d'un système de mesure ou d'un modèle spécifique, qui représente soit l'élévation de la *surface* (y compris d'éléments comme la végétation et les bâtiments), soit celle du *terrain* (c'est-à-dire au niveau du sol nu). Par conséquent, le type de MNE revêt une importance capitale dans l'évaluation des risques d'inondation. En outre, certains phénomènes, comme la subsidence^[1] et l'accumulation de sédiments, peuvent faire varier l'élévation au fil du temps, en particulier dans les deltas fluviaux. Pour ce type de paysages, il est donc primordial que les MNE soient à jour, et cela doit être pris en compte avant toute utilisation des données.

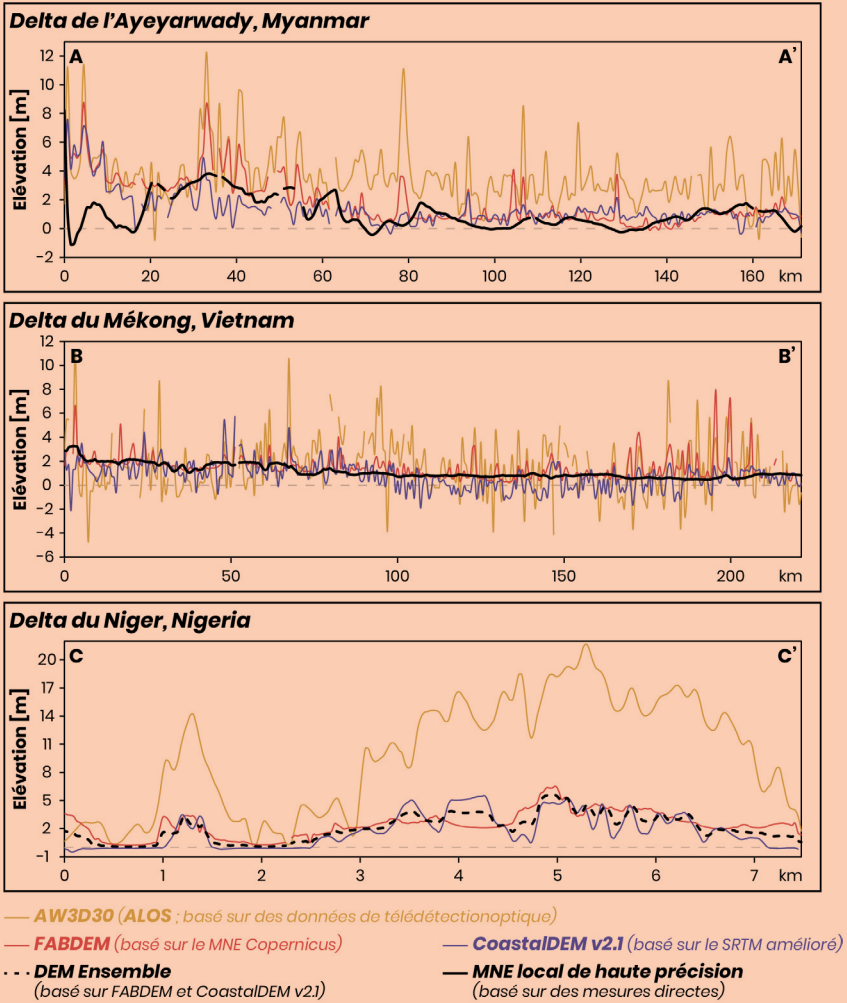
Si des MNE de haute qualité (obtenus au moyen du système LiDAR), qui représentent l'élévation avec une résolution spatiale et une précision verticale de l'ordre du décimètre, sont disponibles pour des régions situées aux États-Unis, en Australie, en Nouvelle-Zélande et en Europe, ces données ne sont pas accessibles, ou

[1] Affaissement progressif de la surface terrestre contribuant à faire monter le niveau de la mer dans les zones littorales.

n'existent pas, pour la majeure partie du littoral sur Terre. Cela pose notamment de graves problèmes pour les zones côtières de basse altitude densément peuplées d'Asie et d'Afrique ou les petits États insulaires en développement. Dans ces régions, l'évaluation des risques d'inondation s'appuie encore souvent sur des MNE mondiaux générés à partir de données satellites qui souffrent d'erreurs verticales importantes, pouvant atteindre plusieurs mètres, et d'artefacts tels que des effets de bande (figures 1 et 2). Cela a un impact considérable sur la qualité des évaluations de l'exposition aux risques d'inondation et à la MNM (Minderhoud *et al.*, 2019 ; Hauser *et al.*, 2023 ; Seeger *et al.*, 2023).

Certains des problèmes présents à l'origine dans les MNE mondiaux (tels que SRTM, ACE, ASTER, AW3D (ALOS)) ont été partiellement résolus dans les MNE mondiaux corrigés publiés récemment (tels que MERITDEM, CoastalDEM, FABDEM), mais même dans ces derniers, des irrégularités persistent. En outre, une étape cruciale du traitement, qui consiste à rapporter les données mondiales à un référentiel vertical local, tel que le NMM local, est souvent omise ou oubliée. Par défaut, dans les catalogues en ligne, les MNE mondiaux sont référencés sur un ellipsoïde global (par ex., WGS84), c'est-à-dire un modèle sphérique lisse et aplati de la Terre, ou sur un modèle de géoïde (par ex., EGM96, EGM2008), c'est-à-dire la forme que la surface de l'océan aurait sous la seule influence de la gravité terrestre et donc sans tenir compte des effets de la température de l'eau, des vents, des marées et des courants. Il est fondamentalement incorrect et problématique de partir du principe que l'élévation du géoïde ou de l'ellipsoïde correspond au niveau local de la mer, puisque le NMM local peut varier de plusieurs mètres.

Figure 1 – Comparaison de MNE pour des zones côtières où l'on manque de données, sur la base des profils d'élévation



Pour A et B, la différence entre les MNE et le « MNE local de haute précision », plus fiable, montre qu'il existe d'importantes disparités verticales. Pour C, aucun MNE local n'est disponible, la ligne pointillée montre une moyenne d'ensemble (A : Seeger *et al.*, 2023 ; B : Minderhoud *et al.*, 2019 (modifié) ; C : Hauser *et al.*, 2023).

Actions requises pour exploiter des données d'élévation quand il est impossible de mener une vérification sur le terrain

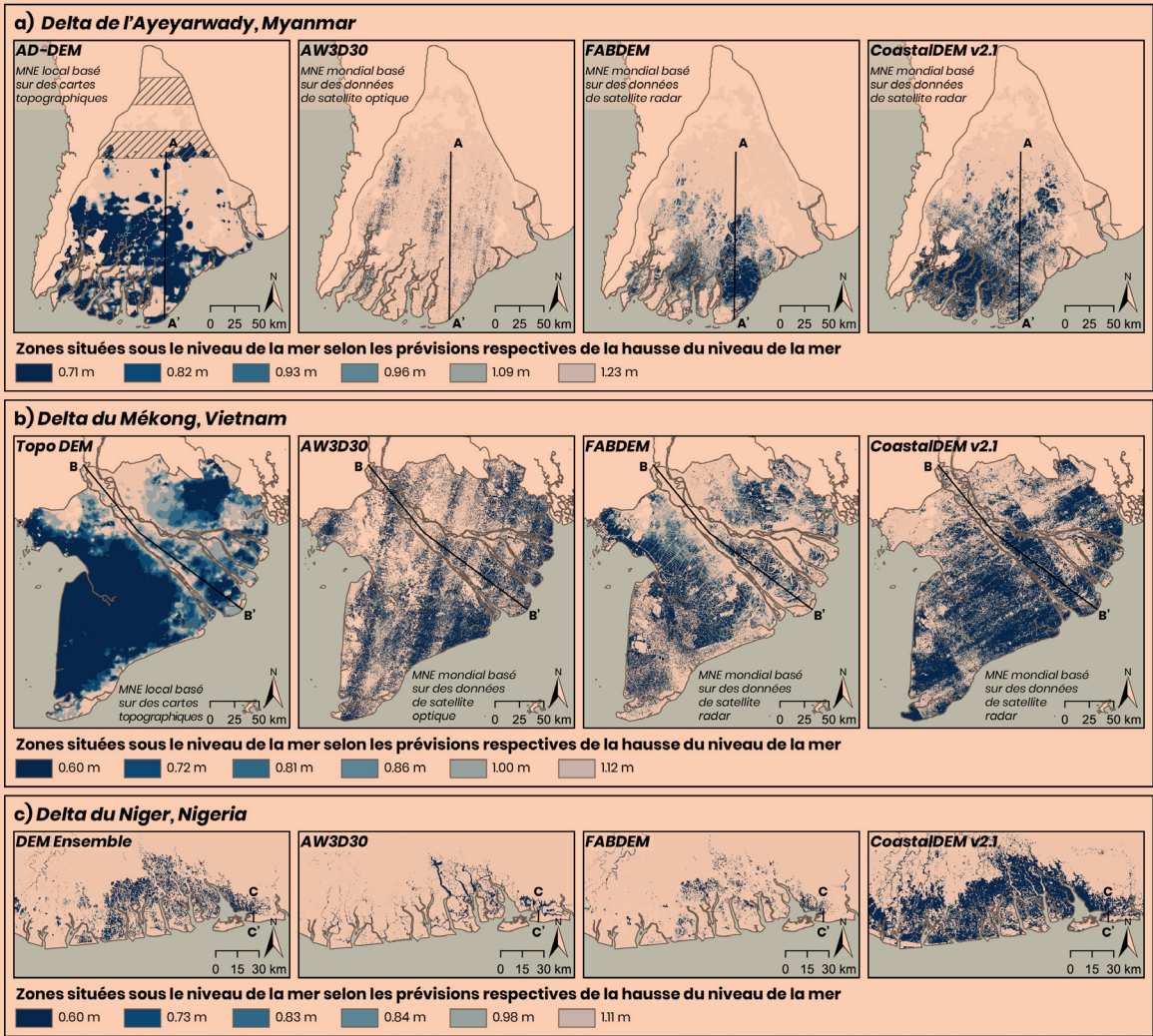
L'évaluation des risques d'inondation, en particulier dans les zones où les données manquent, nécessite de mener au préalable des recherches et de traiter les données sur l'élévation avec un soin tout particulier :

- (i) **Collecter les jeux de données disponibles.** Il faut tenir compte des informations sur la génération des données, les conditions de traitement, le système de référence vertical, la résolution spatiale et le type de MNE (surface ou terrain).
- (ii) **Convertir le système de référence vertical en NMM local.** Si les marégraphes fournissent des informations très localisées sur le niveau de la mer, ils peuvent s'avérer inadaptés pour déterminer le niveau de la mer dans des zones côtières étendues, ou lorsque les séries chronologiques sont incomplètes, trop brèves ou obsolètes. La topographie dynamique moyenne obtenue par altimétrie satellitaire peut alors constituer un substitut en accès libre.
- (iii) **Évaluer la précision par recroisement avec des données locales sur l'élévation.** En l'absence de mesures au sol, la validation indirecte permet d'évaluer les différences relatives entre les MNE, par exemple la correspondance entre la topographie et la géomorphologie et/ou des zones inondées lors de crues. L'évaluation des MNE selon divers critères et à l'aide d'un ensemble statistique large

offre la vision la plus complète de leurs performances et permettra de sélectionner les données sur l'élévation les plus adaptées pour évaluer les risques d'inondation dans la zone d'intérêt.

Par exemple, Minderhoud *et al.* (2019) et Seeger *et al.* (2023) ont généré des MNE respectivement pour les deltas du Mékong et de l'Ayeyarwady en exploitant des données tirées directement de cartes topographiques locales. Lorsque l'on compare ces MNE locaux, dont la précision verticale est de l'ordre du décimètre et qui sont référencés sur le NMM local, avec des modèles mondiaux très utilisés, tels que SRTM ou AW3D, on observe des différences de plusieurs mètres, les modèles mondiaux surestimant les élévations par rapport aux modèles locaux (Figure 1). Ces écarts se retrouvent ensuite dans les évaluations des risques de MNM et d'inondations qui menacent les zones, populations et infrastructures, des MNE différents pouvant déboucher sur des estimations très différentes (Figure 2). Dans le delta de l'Ayeyarwady, les données actuellement disponibles sur l'élévation indiquent que les zones susceptibles de tomber sous le niveau de la mer à la suite d'une MNM de ~2,2 m représentent entre ~1 et 68 % de la zone deltaïque et concernent une population actuelle (2020) de ~65 000 à 5 millions de personnes (Seeger *et al.*, 2023). En utilisant des MNE plus avancés, soumis à des traitements plus performants, ce grand degré d'incertitude peut être réduit, dans le cas du delta de l'Ayeyarwady à entre ~53 et 68 % de la zone deltaïque et entre ~3,6 et 5 millions de personnes. Le degré d'incertitude demeure toutefois relativement important pour déployer des stratégies d'adaptation à petite échelle spatiale, d'où la nécessité de rendre publiquement accessibles des données locales de meilleure qualité sur l'élévation.

Figure 2 – Zone située sous le futur niveau moyen de la mer d'après les MNE locaux et mondiaux (a) Seeger *et al.*, 2023 ; b) Minderhoud *et al.*, 2019 (modifié) ; c) Hauser *et al.*, 2023).



Arguments en faveur de l'utilisation de données spécifiques sur l'élévation pour évaluer les risques d'inondation dans les régions littorales

Le manque de données et la prise en compte inadéquate du degré d'incertitude des MNE et de la conversion du système de référence vertical compromettent la fiabilité des évaluations des risques d'inondation et des stratégies de réduction de la vulnérabilité pour de nombreuses zones côtières de basse altitude. Les personnes et les infrastructures exposées aux risques côtiers pourraient être plus nombreuses qu'on ne le pensait jusqu'à présent. En vue d'améliorer les évaluations à l'avenir, nous formulons les recommandations suivantes :

- **Les données relatives à l'élévation doivent être minutieusement sélectionnées et leur qualité vérifiée** : il faut comparer les jeux de données disponibles, tenir compte de leurs informations contextuelles et expliciter les liens entre leurs références verticales. L'évaluation doit se fonder sur un large ensemble de critères et de statistiques. Le choix du jeu de données le plus adapté à l'application envisagée dépend en grande partie de la situation géomorphologique de la zone d'intérêt, de la quantité et de la qualité des données locales, ainsi que des différents jeux de données et recherches mobilisés dans l'évaluation de la qualité proprement dite. Il peut être difficile d'identifier un seul MNE qui soit plus performant que les autres lorsque la complexité augmente et que les données disponibles sont limitées. Une approche équilibrée, davantage immunisée contre les erreurs des MNE pris isolément, consiste à délimiter les zones inondables en combinant les MNE les plus précis, de façon à identifier des zones négligées par un MNE pris isolément. De plus, s'il existe des données locales précises sur l'élévation (par exemple, des mesures de points), celles-ci peuvent être

utilisées pour corriger et améliorer localement le(s) MNE mondial(aux) le(s) plus performant(s). Les incertitudes observées doivent être clairement énoncées et communiquées en toute transparence.

- **L'acquisition de données sur l'élévation de haute précision et leur mise à jour doivent être une priorité** : les options précédentes ne sont que des solutions intermédiaires. La disponibilité de données de haute précision sur l'élévation, référencées sur le niveau des marées, doit être une priorité pour les zones côtières de basse altitude dans le monde entier, et en particulier dans les pays du Sud. Il est nécessaire d'actualiser régulièrement les MNE pour s'assurer que les données sont à jour, notamment à cause des phénomènes qui contribuent à faire monter le niveau de la mer dans les zones côtières de basse altitude. Des campagnes sur le terrain et des programmes LiDAR peuvent permettre de générer des données sur l'élévation avec une précision de l'ordre du centimètre au décimètre, et avec une résolution spatiale pouvant atteindre 25 cm.
- **Libre accès** : Les données de haute qualité ainsi produites doivent être activement communiquées à la communauté de scientifiques, praticiens et techniciens concernés. Elles doivent être mises en libre accès à des fins de recherche dans des bases de données connues, accompagnées des métadonnées et de la documentation nécessaires détaillant les sources, le traitement, les incertitudes et les informations de référence verticale (le niveau de référence marégraphique et le lieu et la date d'établissement seront essentiels). Ce n'est qu'à cette condition que les experts pourront produire des évaluations de grande qualité et de haute résolution, qui formeront une base solide d'informations permettant aux organismes et décideurs politiques de concevoir et mettre en œuvre des stratégies d'adaptation et de réduction de la vulnérabilité.

Bibliographie

Hauser L. et al. (2023), "A scoping study on coastal vulnerability to relative sea-level rise in the Gulf of Guinea," Papier de recherche n°283, AFD.

Hooijer A. et Vernimmen, R. (2021), "Global LiDAR land elevation data reveal greatest sea-level rise vulnerability in the tropics," Nature Communications 12, 3592, 1-7.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2021), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the*

Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., et al. (dir.)], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, États-Unis, V-2391.

Kulp S. A. et Strauss, B. H. (2019), "New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding," Nature Communications 10, 4844, 1-12.

Minderhoud, P. S. J. et al. (2019), "Mekong delta much lower than previously assumed in sea-level rise impact assessments," Nature Communications, 10, 3847, 1-13.

Seeger, K. et al. (2023), "Assessing land elevation in the Ayeyarwady Delta (Myanmar) and its relevance for studying sea level rise and delta flooding," Hydrology and Earth System Sciences, vol. 27, n° 11, 22572281.

Agence française de développement (AFD)
5, rue Roland Barthes | 75012 Paris | France
Directeur de la publication Rémy Rioux
Directeur de la rédaction Thomas Mélonio
Création graphique MeMo, Julie Gilles, D. Cazeils
Conception et réalisation eDeo-design.com
Traduction Cadenza Academic Translations

Dépôt légal 2^e trimestre 2024 | **ISSN** 2271-7404
Crédits et autorisations
Licence Creative Commons CC-BY-NC-ND
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>
Imprimé par le service de reprographie de l'AFD.
Les analyses et conclusions de ce document

sont formulées sous la responsabilité de ses auteurs. Elles ne reflètent pas nécessairement le point de vue de l'AFD ou de ses institutions partenaires.

