

Contribution de la télédétection spatiale multiangulaire au suivi et à la Compréhension de l'ÉROsion des falaises (CICERO)

Doctorante : Z. Bessin (LGO, LETG)

Directeur de thèse : C. Delacourt (LGO)

Co-encadrantes : P. Letortu (LETG) et M. Jaud (LGO, UMS 3113)

Financement : GIS BreTel (région Bretagne) et ED SML (UBO)

Résumé du projet

La thèse porte sur la contribution de la télédétection spatiale multiangulaire (Pléiades et Pléiades Neo) au suivi et à la compréhension de l'érosion des falaises. Cette thèse analysera différents types de falaises (meubles et rocheuses), situées dans différentes régions. Seront ainsi étudiées des falaises meubles en Bretagne (qui représentent 20 % du linéaire côtier breton) et des falaises rocheuses calcaires en Normandie et sur l'île de Zakynthos (Grèce). Sur ces trois sites, les falaises reculent rapidement (> 10 cm/an) et menacent des enjeux implantés à proximité de la falaise (personnes, biens, activités, réseaux...). Cela soulève des questions scientifiques, sociétales et politiques sur la gestion et l'aménagement du littoral, et ce, dans un contexte de changement global. L'échelle synoptique des images satellites (en cohérence avec l'échelle de gestion du littoral, qui va de quelques km à centaines de km), le nombre croissant de satellites et la répétitivité des acquisitions propices au suivi saisonnier et événementiel, ainsi que la très haute résolution (THR) des images et la grande agilité des satellites (capables d'acquérir des images obliques variées) sont autant de critères qui offrent de nouvelles perspectives en termes de suivi des évolutions des côtes à falaises, et notamment du front de falaise, référentiel jusque-là impossible à étudier à partir d'images acquises au nadir. Le projet EROFALITT (ÉROsion des FAlaises du LITToral normand), financé par le Centre National d'Études Spatiales (CNES) et coordonné entre 2016 et 2020 par P. Letortu, a permis de démontrer le potentiel de l'imagerie spatiale THR et agile dans le suivi et la compréhension de l'érosion des falaises. Le sujet de thèse proposé ici permettra de préciser cette contribution en étudiant (1) le suivi pluridécennal des vitesses de recul du haut de falaise par imagerie aérienne et spatiale THR sous SIG (Systèmes d'Information Géographique) ; (2) la détection semi-automatique de mouvements gravitaires par apprentissage statistique (type Machine Learning) afin de suivre les rythmes et les modalités d'éboulement ; (3) la reconstruction 3D par stéréorestoration des zones de changement potentielles afin de calculer l'érosion du front de falaise (vitesses de recul complémentaires de celles mesurées en haut de falaise, informations sur la diffusion spatiale et temporelle de l'instabilité des parois) ; (4) la comparaison des dynamiques d'érosion entre les différents sites étudiés et la proposition d'hypothèses permettant d'expliquer ces différences. Par ailleurs, une attention particulière sera portée à la dissémination des méthodes et des résultats auprès des élus et des gestionnaires afin d'intégrer durablement le jeu de données d'imagerie spatiale dans une « boîte à outils » pour une gestion pérenne des territoires côtiers. Il s'agira également d'améliorer la prise en compte des données satellites dans le cadre des services d'observations dédiés au trait de côte (par ex. le Service National d'Observation Dynalit), labellisés par les organismes de recherche nationaux et européens.

Présentation détaillée du projet

1 - Hypothèse et questions posées, état de l'art, identification des points de blocages scientifiques

L'érosion des falaises (qui représentent 52 % du linéaire côtier mondial, Young et Carilli, 2019) est le résultat de facteurs marins (niveau moyen des mers, vagues...), continentaux (précipitations, variations des températures...) et anthropiques (artificialisation, modification du stock sédimentaire...). Leur multiplicité et leur imbrication ne permettent pas actuellement d'identifier les contributions respectives de ces facteurs au déclenchement des éboulements (Naylor et al., 2010 ; Letortu et al., 2015). Ainsi, l'imprévisibilité du moment et du lieu de l'érosion demeure, posant des problèmes de gestion des risques (accidents parfois mortels). Pour atteindre cet objectif majeur, la recherche requiert des données 3D du front de falaise (FF, du pied au haut de falaise, meilleur référentiel pour observer tous les éboulements), à THR spatiale (< 1 m), avec un temps de revisite court (de la saison à la journée), sur de longs linéaires côtiers afin de respecter l'échelle de gestion qu'est la cellule hydro-sédimentaire¹.

Mais le suivi de ce référentiel subvertical est problématique car l'imagerie satellite « classique » (au nadir) ne permet que le suivi du sommet de falaise. La mesure THR du FF est possible par des méthodes in situ, telles que la photogrammétrie ou le scanner laser (Lim et al., 2010 ; Jaud et al., 2019), mais sans remplir les critères de haute fréquence et de surface couverte. Mais aujourd'hui, les nouvelles générations de satellites THR (70 cm pour Pléiades et 30 cm pour Pléiades Neo (Airbus Defence and Space, 2017) et d'une grande agilité (dépointage jusqu'à 40° pour Pléiades (ASTRIUM, 2012)) permettent d'envisager un suivi du front de falaise remplissant tous ces critères. A partir d'images Pléiades panchromatiques dépointées et multidates, une méthode de reconstruction 3D a été proposée pour le suivi du front des falaises calcaires en Normandie (Letortu et al., 2020, EROFALITT). La précision planimétrique peut atteindre 10 cm avec une densité de points de 2 pts/m² sur le FF permettant un bon suivi de toute érosion supérieure à 100 m³ (Letortu et al., accepté), soit 70 % des éboulements observés sur ce secteur.

Certains problèmes persistent comme la dépendance de la restitution 3D aux paramètres environnementaux (météo, exposition du front de falaise) et la difficulté à optimiser les paramètres de traitements sur l'ensemble de la zone. Par ailleurs, les volumes de données en jeu impliquent de développer des méthodes d'analyses semi-automatiques adaptées, telles que l'apprentissage statistique de type Machine Learning. Là encore, un verrou devra être levé pour adapter ces méthodes aux images obliques (non orthorectifiées). Enfin, un autre levier consiste à travailler sur des sites aux caractéristiques géologiques proches, mais aux contraintes environnementales variées pour mieux connaître le rôle des facteurs environnementaux dans l'érosion.

Ainsi cette thèse permettra d'améliorer le suivi et la compréhension du fonctionnement des falaises grâce à l'imagerie satellite THR et multiangulaire. Ceci implique de tirer le meilleur profit de l'imagerie satellite en développant des chaînes de traitements adéquates, intelligibles et transposables pour le suivi et la gestion durable des falaises.

2 - Approche méthodologique et techniques envisagées

¹ Echelle à laquelle se déroulent les phénomènes et dynamiques sédimentaires. La cellule hydro-sédimentaire est ainsi un concept permettant d'identifier, à une échelle donnée, des compartiments du littoral qui peuvent être décrits et analysés de manière autonome sur le plan des transports sédimentaires. Ce découpage du littoral a pour objectif de permettre l'établissement de bilans des échanges de sédiments au sein de chaque cellule et d'aider à la définition de la bonne échelle géographique de prise de décision en matière d'aménagement côtier. Elle permet en effet de bien prendre en compte l'ensemble des facteurs d'évolution du littoral sur un secteur géographique donné (<https://www.ecologie-solidaire.gouv.fr>).

Cette thèse se focalisera sur trois sites : Pléneuf-Val-André (falaises meubles, Bretagne), Varengeville-sur-Mer (falaises rocheuses calcaires, Normandie) et Keri sur l'île de Zakynthos (falaises rocheuses calcaires, Grèce). Ces falaises, possédant un FF subvertical et pluridécamétrique, reculent rapidement (>10 cm/an), maximisant les probabilités d'occurrence des éboulements. Considérer deux contextes bioclimatiques différents (climat tempéré océanique et climat méditerranéen) permettra de bénéficier de différents contextes météorologiques pour l'acquisition d'images satellites dépointées et d'évaluer le rôle des facteurs météorologiques (entre autres) dans les dynamiques d'érosion des falaises calcaires. Par ailleurs, les orientations variées des falaises (nord en Normandie, nord-ouest en Bretagne, sud-ouest pour Zakynthos) permettront de tester différentes configurations d'acquisition des images satellites. Ces trois sites sont étudiés depuis plusieurs décennies et il sera possible de réaliser des levés photogrammétriques qui serviront de vérité terrain. La variété des sites permettra d'évaluer la transposabilité de la méthode, afin que les autres acteurs de la communauté scientifique et de la société civile puissent en bénéficier.

La collecte des images satellites THR et des données de validation est financée par le projet CNES HIRACLES (High Resolution imAgery for CLiff Erosion Studies), coordonné par P. Letortu (2021-2023). À partir de ces images, la méthodologie envisagée combine des approches classiques et des volets innovants qui sont davantage explicités ci-dessous :

- un suivi diachronique classique de la position du sommet de falaise sous SIG (à partir des images acquises pour la thèse et d'archives) pour obtenir des vitesses annuelles d'érosion ;
- une approche orientée « front de falaise », avec la mise en place d'une détection semi-automatique des mouvements gravitaires grâce à un apprentissage statistique. En effet, les images satellites d'un FF s'avèrent être un jeu de données massivement multivarié, que ce soit en fonction des caractéristiques propres au site (couleur, texture, hauteur, orientation de la falaise) ou des caractéristiques de l'acquisition (trajectographie du satellite par rapport au site, heure de passage, saison, météo). Aussi, pour identifier les zones d'éboulements (et plus largement des zones aux caractéristiques communes), des méthodes de Machine Learning seront mises en œuvre, car la diversité des sites devrait permettre de créer un jeu de données d'entraînement suffisamment varié pour couvrir au mieux l'ensemble des configurations possibles ;
- à partir de ces résultats de segmentation et des couples stéréoscopiques, une reconstruction 3D sera réalisée. Pour la restitution du FF, l'un des résultats du projet EROFALITT soulignait l'importance d'optimiser les paramètres de traitement en fonction des caractéristiques de la zone. La qualité des reconstructions devrait donc se trouver améliorée en travaillant de façon plus ciblée sur ces zones d'éboulements. Les chaînes de traitement ASP, Micmac et ERDAS Imagine ayant été testées, ces routines pourront être réutilisées. Par ailleurs, les nouvelles possibilités offertes par le logiciel Agisoft Metashape ou la chaîne de traitement CARS du CNES seront également testées ;
- les précédentes étapes renseigneront sur les rythmes et les modalités d'érosion (taille des éboulements, cinématique, durée d'évacuation des éboulements par la mer...). Une analyse des données d'érosion sera menée afin d'expliquer les différences obtenues entre les sites d'étude ;
- la dissémination de nos méthodes et résultats auprès des élus et des gestionnaires sera facilitée par les rapports privilégiés entretenus par l'équipe encadrante avec ces interlocuteurs dans le cadre des observatoires régionaux et interrégionaux du littoral (OSIRISC, ROL...).

3 - Positionnement et environnement scientifique dans le contexte régional, national et international

À l'échelle régionale, l'amélioration des connaissances grâce à cette thèse contribuera à renforcer l'expertise régionale de suivi et de compréhension de l'aléa érosion côtière sur les côtes à falaises de l'EUR ISblue (qui appartient au Domaine d'Innovation Stratégique (DIS) 1 : économie maritime pour une croissance bleue) et en matière d'expertise en télédétection du GIS BreTel (qui appartient au DIS 3 : économie numérique sécurisée et responsable). À terme, ces expertises ont vocation à alimenter le secteur du conseil auprès des élus et des gestionnaires de collectivités territoriales confrontées à l'aléa érosion, le secteur des études environnementales ainsi que des travaux pour l'aménagement durable du littoral et du trait de côte. Les objectifs assignés à la thèse justifient aussi son rattachement à l'axe transversal « les transitions énergétique et écologique ». Cette transversalité dans les DIS souligne que ce projet doctoral est pleinement sur des domaines bretons d'excellence et porteurs. De plus, notre forte volonté de transfert des connaissances et de dialogue entre la recherche académique, les élus, les gestionnaires du littoral, et les acteurs du développement économique et de l'innovation permettront d'accélérer la transition vers une économie sobre et durable. En outre, le projet de thèse répond au chantier phare 8 « améliorer la sauvegarde de la vie humaine et la gestion des risques environnementaux en zone côtière » de la charte des espaces côtiers bretons. Enfin, ce sujet de thèse permettrait d'avancer sur les propositions émises par l'Association des CESER de l'Atlantique et l'étude sur « Submersion marine et érosion côtière. Connaître, prévenir et gérer les risques naturels littoraux sur la façade atlantique » (2015).

A l'échelle nationale, ce sujet s'inscrit dans la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte. Il fait notamment écho au rapport du député S. Buchou « Quel littoral pour demain ? Vers un nouvel aménagement des territoires côtiers adapté au changement climatique » (2019). Notre projet rejoint de nombreuses préconisations de ce rapport comme l'impératif de la connaissance associé à la nécessité de son partage, pour aller vers la question cruciale de la transition (adapter l'existant et anticiper l'implantation future et durable des biens et des activités).

A l'échelle internationale, notre collaboration avec N. Evelpidou (Univ. Athènes), dont l'expertise est reconnue en géomorphologie des falaises calcaires des îles ioniennes, nous permet d'élargir nos recherches vers un environnement propice à l'acquisition d'images satellites (faible couverture nuageuse en Méditerranée) et où, malgré une géologie proche des falaises calcaires normandes, les forçages continentaux et marins rencontrés sont différents. Cette collaboration, officialisée par le projet HIRACLES, se poursuit dans ce sujet de thèse afin de comparer la contribution des facteurs météo-marins à l'érosion des falaises calcaires entre un climat méditerranéen et un climat tempéré océanique (Normandie). De par la couverture mondiale du réseau satellite et notre réseau de chercheurs internationaux étudiant les falaises (coll. avec le Canada, le Royaume-Uni, la Nouvelle-Zélande, États-Unis (soumission en septembre dernier d'un projet de post doc Marie Curie en lien avec ces pays)), nos travaux seront facilement transférables.

Bibliographie

Airbus Defence and Space, 2017. Airbus révolutionne le marché de l'observation de la Terre avec sa constellation Pléiades Neo, les premiers satellites optiques commerciaux utilisant le SpaceDataHighway [WWW Document]. Airbus. URL <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/fr/2017/09/Press-release-SpaceDataHighway.html> (accessed 9.24.20).

Association des CESER de l'Atlantique, 2015. Submersion marine et érosion côtière - Connaître, prévenir et gérer les risques naturels littoraux sur la façade atlantique.

- ASTRIUM, 2012. Pléiades Imagery - User Guide (Technical report No. USRPHR-DT-125-SPOT-2.0).
- Basara, N., 2019. L'érosion des littoraux à falaises meubles en Bretagne : aléa, enjeux et gestion du risque. Université de Bretagne Occidentale.
- Buchou, S., 2019. Quel littoral pour demain ? Vers un nouvel aménagement des territoires côtiers adapté au changement climatique (Rapport parlementaire).
- Jaud, M., Letortu, P., Théry, C., Grandjean, P., Costa, S., Maquaire, O., Davidson, R., Le Dantec, N., 2019. UAV survey of a coastal cliff face - Selection of the best imaging angle. *Measurement* 139, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.02.024>
- Letortu, P., Costa, S., Cador, J.-M., Coinaud, C., Cantat, O., 2015. Statistical and empirical analyses of the triggers of coastal chalk cliff failure. *Earth Surface Processes and Landforms* 40, 1371–1386. <https://doi.org/10.1002/esp.3741>
- Letortu, P., Jaud, M., Théry, C., Nabucet, J., Taouki, R., Passot, S., Augereau, E., 2020. The potential of Pléiades images with high angle of incidence for reconstructing the coastal cliff face in Normandy (France). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 84, 101976.
- Letortu, P., Taouki, R., Jaud, M., Costa, S., Maquaire, O., Delacourt, C., accepté. 3D reconstructions of the coastal cliff face in Normandy (France) based on oblique Pléiades imagery: assessment of ASP® and MicMac® processing chains. *International Journal of Remote Sensing*.
- Lim, M., Rosser, N.J., Allison, R.J., Petley, D.N., 2010. Erosional processes in the hard rock coastal cliffs at Staithes, North Yorkshire. *Geomorphology* 114, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.02.011>
- Naylor, L.A., Stephenson, W.J., Trenhaile, A.S., 2010. Rock coast geomorphology: Recent advances and future research directions. *Geomorphology* 114, 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.02.004>
- Young, A.P., Carilli, J.E., 2019. Global distribution of coastal cliffs. *Earth Surface Processes and Landforms* 44, 1309–1316. <https://doi.org/10.1002/esp.4574>