



La cartographie géomorphologique et géographique pour un nouveau paradigme de l'évaluation du risque côtier d'érosion des falaises meubles, exemples pris en Bretagne

A new paradigm for the assessment of coastal erosion risks of soft cliffs using geomorphological and geographical mapping, examples in Brittany

Noémie BASARA¹, Alain HENAFF² & Nicolas LE DANTEC³

Abstract : In France, the implementation of management plans for coastal erosion risks relies on the knowledge of the coastline retreat rate and of the maximum retreat distance for a failure event. In contrast to this commonly-used method corresponding to the government guidelines, a new paradigm proceeding from a geomorphologist view is proposed for assessing soft-cliffs erosion hazards and risks. This novel approach crosses geomorphological mapping of soft cliffs and the physical processus controlling soft-cliffs retreat with the stakes subject to erosion hazard. The methodology combines field observations and spatial analysis under GIS. This methodology allows to move away from considering retreat rates and to comprehensively delineate the areas subject to coastal erosion risks and where it would seem wise to prohibit any new building. Therefore, this approach is well-suited for long-term management of soft-cliffs coastal territories, which is essential in order to adapt to the impacts of global change on the coastline. The proposed approach is tested on six sites located in Brittany, where residential lots and farmlands constitute a significant part of the stakes subject to soft-cliffs retreat.

Keywords : mapping, coastal erosion hazard, stakes, management, soft cliffs, Brittany.

Résumé : En France, la cartographie réglementaire des risques littoraux d'érosion s'appuie sur la connaissance du taux de recul moyen du trait de côte et de l'événement maximal de recul. Par opposition à cette méthode préconisée par les instances ministérielles et communément employée aujourd'hui, le regard du géomorphologue conduit à proposer un nouveau paradigme pour l'évaluation de l'aléa et du risque d'érosion des falaises meubles. Cette nouvelle approche repose sur le croisement de cartes géomorphologiques des formations meubles et des processus physiques impliqués dans le recul des falaises meubles avec les enjeux exposés. La méthodologie s'appuie sur les observations de terrain et l'analyse spatiale sous SIG. Elle permet de s'affranchir de la considération des vitesses de recul et de délimiter l'ensemble des zones qui sont assujetties aux risques d'érosion côtière et sur lesquelles il semblerait prudent d'interdire toutes nouvelles constructions. Cette démarche est donc adaptée à une gestion sur le long terme des territoires littoraux à falaises meubles, qui est essentielle pour s'adapter aux impacts des changements globaux sur le littoral. L'approche proposée est testée sur six secteurs localisés en Bretagne, où les terrains résidentiels et agricoles représentent une part importante des enjeux menacés par le recul des falaises meubles.

Mots-clés : cartographie, aléa érosion côtière, enjeux, gestion, falaises meubles, Bretagne.

INTRODUCTION

Contexte

Dans les territoires littoraux confrontés aux problèmes d'évolution du trait de côte, la cartographie du risque d'érosion est primordiale pour la mise en place d'une gestion durable des zones côtières. Elle représente également un outil essentiel pour définir les stratégies de prévention (Leone et Vinet, 2006). En France, la cartographie réglementaire des risques littoraux s'appuie sur les préconisations du guide méthodologique (MEDDE/DGPR, 2014) pour l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL). Ces plans de prévention sont des documents réglementaires de planification, créés en France par la loi du 2 février 1995, dont l'objectif est d'adapter l'aménagement du territoire aux risques littoraux d'érosion et de submersion marine (PERHERIN & ROCHE, 2010).

¹ Université de Bretagne occidentale, LETG-Brest-Géomer, UMR 6554 CNRS, Institut Universitaire de la Mer, Technopôle Brest Iroise, Rue Dumont d'Urville, 29280 Plouzané, France – noemiebasara@live.fr

² Université de Bretagne occidentale, LETG-Brest-Géomer, UMR 6554 CNRS, Institut Universitaire de la Mer, Technopôle Brest Iroise, Rue Dumont d'Urville, 29280 Plouzané, France – alain.henaff@univ-brest.fr

³ Cerema, Laboratoire Géosciences Océan, UMR 6538 CNRS UBO, Technopôle Brest Iroise, Rue Dumont d'Urville, 29280 Plouzané, France – nicolas.ledantec@univ-brest.fr

Cette approche, propre au gestionnaire des territoires à risques, aboutit à la production de cartes d'aléas qui sont basées - pour l'aléa érosion - sur la connaissance du taux de recul moyen du trait de côte et de l'événement maximal de recul sur une période donnée. Le regard du géomorphologue conduit à proposer pour l'évaluation de l'aléa et du risque d'érosion des falaises meubles un nouveau paradigme, très différent de cette méthode communément employée aujourd'hui. La particularité morphologique des falaises meubles est d'être façonnées dans des matériaux hérités faiblement résistants à l'érosion (DAVIDSON-ARNOTT, 2010 ; RODET, 2013). Leur taux de recul est contrôlé par le processus de dénudation de la couverture meuble dont la vitesse varie dans le temps et dans l'espace. Dans cet article, le risque d'érosion des falaises meubles est analysé sur six sites d'étude en Bretagne. L'approche de l'aléa consiste en l'identification et la localisation, sur les sites, des formations meubles, dépôts du versant littoral qui seront amenés à plus ou moins longue échéance à être érodés. La cartographie de l'occupation et de l'usage du sol est réalisée afin de déterminer les enjeux menacés. Le risque d'érosion présent sur les sites est ensuite analysé au regard des stratégies de gestion actuellement mises en place. Pour terminer, la nouvelle approche proposée pour évaluer les risques d'érosion des falaises meubles est discutée et comparée à la méthode classique de cartographie des risques littoraux d'érosion.

METHODES EXISTANTES POUR LA CARACTERISATION DU RISQUE D'EROSION

L'aléa érosion

L'aléa recul du trait de côte est la conséquence d'un départ de sédiments provoqué par des processus d'origine marine, subaérienne et/ou anthropique. Le trait de côte est situé à l'interface terre/mer et est défini, selon le SHOM, comme la laisse des plus hautes mers lors d'une marée astronomique de coefficient 120. Cet aléa concerne le recul des côtes basses meubles et des falaises (PERHERIN & ROCHE, 2010). La méthode fréquemment utilisée pour délimiter les zones soumises à l'aléa érosion s'effectue par l'extrapolation de la position future du trait de côte à partir du taux de recul moyen annuel sur une échéance donnée auquel est additionné le recul correspondant à un événement maximal d'érosion observé lors d'un phénomène météo-marin extrême. La zone potentiellement soumise à l'aléa érosion est définie le plus souvent à échéance de 20, 50 ou 100 ans (MORTON *ET AL.*, 1993 ; CROWELL *et al.*, 1999). Dans le guide méthodologique (MEDDE/DGPR, 2014), c'est une échéance de 100 ans qui est proposée et le recul du trait de côte est qualifié d'« aléa fort ». Pour évaluer le taux de recul moyen d'une portion de côte, une variété de techniques est utilisée (SUNAMURA, 1992). À l'échelle pluri-décennale à séculaire, les taux de recul sont connus en cartographiant la ligne de rivage à partir de supports iconographiques (cartes anciennes, plans cadastraux) et de photographies aériennes et sont donc associés à une incertitude dépendante de l'échelle et/ou de la résolution spatiales de ces supports. À l'échelle inter à pluri-annuelle, des campagnes de suivi sur le terrain à l'aide d'outils topographiques (tachéomètre, GPS différentiel, LIDAR terrestre...) permettent d'obtenir des distances de recul, voire des volumes érodés (EX : ADAMS & CHANDLER, 2002 ; LEVOY & MONFORT, 2009 ; YOUNG *et al.*, 2010).

La technique la plus utilisée et préconisée dans le guide méthodologique est l'analyse des traits de côte historiques à partir de photographies aériennes verticales (LE CORNEC *et al.*, 2008 ; BOSSIS, 2016 ; DHI, 2016). Pour les secteurs non couverts par les photographies aériennes ou sur des secteurs où le trait de côte est difficilement identifiable, l'information peut être obtenue par la confrontation de travaux issus de la littérature (MEEM, 2016 ; DHI, 2016). L'extrapolation s'effectue aussi parfois à partir de l'Indicateur National de l'Erosion côtière (INE) qui présente l'évolution pluri-décennale du trait de côte sur le littoral français (HEDOU *ET AL.*, 2015 ; LANDREAU, 2018). Certains auteurs préconisent de prendre en compte, à la fois, les vitesses historiques et récentes dans la caractérisation de l'aléa afin de distinguer ce qui relève d'évolutions durables, d'une part, de ce qui, d'autre part, correspond à des événements ponctuels et parfois exceptionnels d'origine naturelle ou anthropique (HENAFF *et al.*, 2013). Toutefois, LEVOY et MONFORT (2009) ont montré que ces deux types de vitesses de recul obtenues sur des périodes différentes, ne sont pas toujours compatibles. Les vitesses historiques et récentes sont effectivement parfois très différentes en raison d'imprécisions inhérentes à l'exploitation des photographies aériennes (échelles spatiales et résolution des documents) ou de la précision des outils utilisés lors des levés.

Les enjeux

La notion d'enjeux recouvre l'ensemble des personnes, des biens et des activités susceptibles d'être affectés par un aléa (MEEM, 2016). L'identification et la caractérisation des enjeux soumis à l'aléa érosion sont une étape indispensable dans l'élaboration des cartes des risques littoraux. Il s'agit d'identifier le fonctionnement du territoire, les types d'occupation du sol et les différentes problématiques à prendre en compte. L'analyse des enjeux est réalisée indépendamment de l'aléa et s'effectue donc sur un périmètre plus grand que celui exposé à l'aléa (MEDDE/DGPR, 2014). Elle consiste à dénombrer et à spécifier la nature des enjeux. Les cartes d'enjeux produites à l'échelle du 1/10 000, voire du 1/5 000 pour les zones denses nécessitant une analyse plus précise tels

que les centres-villes ou les fronts de mer, ont ainsi pour objectif de distinguer les zones urbanisées des espaces naturels et agricoles, par exemple. Dans le guide méthodologique, les enjeux sont regroupés en trois catégories distinctes : les enjeux incontournables (espaces urbanisés, centres touristiques, élevages agricoles...), les enjeux complémentaires (infrastructures de transport, enjeux patrimoniaux, culturels...) et d'autres éléments qui incluent l'évolution démographique et le contexte socio-économique. L'analyse et la cartographie des enjeux s'appuient sur l'utilisation de systèmes d'informations géographiques (SIG) et des données issues de plans cadastraux, d'orthophotographies ou de Scan25 de l'IGN (Institut Géographique National). Des visites de terrain et des rencontres avec les élus peuvent venir compléter l'analyse et améliorer la caractérisation des enjeux (HENAFF & PHILIPPE, 2014).

Zonage et évaluation du risque

Le zonage est une approche planifiée préventive (KLEIN *et al.*, 1999) dont l'objectif est de limiter les risques côtiers (PASKOFF, 2001). Le principe du zonage est d'éviter que les zones d'aléas soient aménagées et anthropisées. Les zones à risque sont généralement définies par le croisement de l'aléa avec les enjeux (MEDDE/DGPR, 2014). La superposition des cartes d'aléa avec la cartographie des enjeux permet ainsi d'établir la carte de zonage réglementaire. Le guide méthodologique préconise une échelle de restitution au 1/10 000. Le zonage et l'identification des enjeux menacés permettent ainsi de prescrire des mesures de prévention, de protection et de sauvegarde. Le plan de zonage établi présente différentes dispositions réglementaires selon le niveau de risque identifié sur un secteur. Des zones d'interdiction ou d'autorisation de constructions sous conditions (ex : installation d'équipements légers) peuvent ainsi apparaître sur le document. Les enjeux menacés identifiés par le zonage peuvent également faire l'objet d'une évaluation économique qui s'appuie sur des hypothèses de valeurs monétaires (ex : évolution du prix du foncier, coût de reconstruction d'une route...) (HENAFF & PHILIPPE, 2014 ; LE BERRE *et al.*, 2014). Cette évaluation est notamment utilisée dans les Analyses Coûts-Bénéfices (ACB). Elle permet d'apprécier la pertinence des projets d'aménagement et des moyens de gestion au regard de la valeur des enjeux menacés (CEPRI, 2011; ANDRE, 2013; LE BERRE *et al.*, 2014; CREACH, 2015). Elle représente donc un précieux outil d'aide à la décision (PERHERIN *et al.*, 2015).

Une nouvelle caractérisation adaptée aux littoraux à falaises meubles

Les falaises meubles sont des littoraux formées par des dépôts faiblement consolidés (ex : sables, limon, argile) fossilisant des versants côtiers correspondant à des falaises mortes, et qui possèdent une faible résistance à l'érosion (GREENWOOD & ORFORD, 2008; BROWN, 2008; BARKWITH *et al.*, 2014). Ces falaises sont très répandues dans les hautes et moyennes latitudes ayant connu notamment l'alternance de climats froids et tempérés de la période quaternaire. Ces falaises sont présentes sur les côtes bordant les trois façades maritimes du Canada, le nord-est des Etats-Unis, la côte sud de la Nouvelle-Zélande et dans l'Europe de l'Ouest où elles représentent 11,7 % du linéaire côtier des pays de l'Union Européenne (EUROSION, 2004; CARPENTER *et al.*, 2012). En France, elles sont notamment présentes sur la côte bretonne, s'étendant sur un peu plus de 20 % du linéaire (HENAFF *et al.*, 2018). Ces formations meubles qui nappent les versants actuels sont héritées d'une longue histoire géologique marquée par différentes phases de dépôts et d'érosion (DAVIDSON-ARNOTT, 2010; LAFORGE & HUET, 2013; RODET, 2013). Les formations ont été taillées en falaise par la mer lors des phases de transgression marine durant le Quaternaire. L'érosion et le recul des falaises meubles correspondent donc au nettoyage de la couverture meuble héritée (Fig. 1). Le taux de recul de ces falaises est contrôlé par le degré de dénudation de la couverture meuble qui varie dans le temps et dans l'espace (PINOT, 1993). En Bretagne, la majeure partie du linéaire côtier est encore couverte par une partie de ce manteau de formations superficielles (BIVILLE, 2004). Dans cette région, les formations meubles correspondent à des dépôts périglaciaires (ex : loess, limon, head), à des altérites de nature lithologique très variée et, parfois, à des formations marines remaniées (plages anciennes de galets) et littorales (dunes) qui s'intercalent ou coiffent les formations périglaciaires.

Les falaises meubles reculent plus rapidement en comparaison des autres falaises (WOODROFFE, 2002; PREMAILLON *et al.*, 2017). Leurs taux de recul sont généralement compris entre 10 cm et 1 m/an (MASSELINK *et al.*, 2014; SUNAMURA, 2015) mais ils peuvent également être plus élevés comme sur la côte est du Royaume-Uni avec des reculs pouvant atteindre 4,7 m/an (WOODROFFE, 2002 ; QUINN *et al.*, 2009; BROOKS *et al.*, 2012). Pour autant, les enjeux au sommet et en arrière des falaises se sont multipliés durant le vingtième siècle (MEUR-FEREC, 2006) et sont toujours en augmentation. En Bretagne, les enjeux humains et bâtis exposés au recul des falaises meubles posent désormais de nombreux problèmes de gestion du risque d'érosion qui n'ont pas, jusqu'à présent, focalisé une attention équivalente à celle portée à la gestion des risques sur les côtes basses d'accumulation (BASARA *et al.*, à paraître).

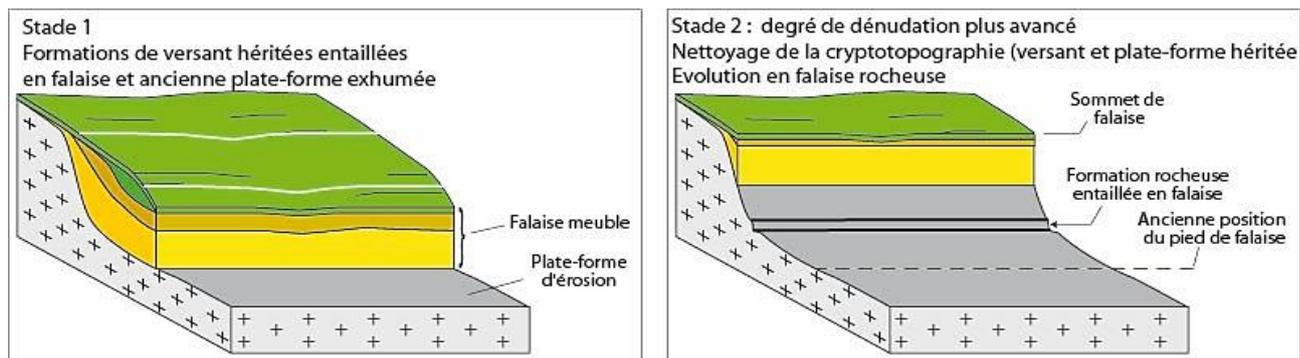


Fig. 1 : Evolution et recul d'une falaise meuble par le nettoyage des formations de versant (réalisation : A. HENAFF, 2018)

L'approche développée dans cette étude pour caractériser l'aléa érosion consiste à identifier et à localiser, sur les versants côtiers, les formations meubles qui fossilisent la falaise morte rocheuse, pour laquelle le recul progressif du rivage aboutira, si le processus est achevé au cours de la transgression actuelle, à son ravivement. Cette approche est donc applicable sur les littoraux à falaises meubles du fait de leur extension limitée par la falaise morte en arrière du littoral. Les enjeux sont analysés quant à eux par l'approche classique définie dans le guide méthodologique des PPRL. La délimitation des formations meubles et l'identification des enjeux nécessitent à la fois des mesures sur les cartes topographiques (IGN 1/25000), de la photo-interprétation des photographies aériennes et des observations sur le terrain à l'échelle locale. La méthodologie a ainsi été appliquée sur un échantillon de six sites bretons à falaises meubles représentatifs des configurations rencontrées régionalement en termes de géomorphologie, d'enjeux et de stratégies de gestion (Fig. 2) (BASARA *et al.*, à paraître). Trois de ces sites se localisent dans le Finistère (Locquirec, Telgruc-sur-Mer et Plouzévet) et trois autres dans les Côtes d'Armor (Pléneuf-Val-André, Plougrescant et Tredrez-Locquémeau). Les sites sont différemment exposés à l'attaque marine : ceux présents sur la côte nord s'ouvrent sur la Manche tandis que ceux localisés sur la façade ouest sont exposés aux houles de l'océan Atlantique (Fig. 2).

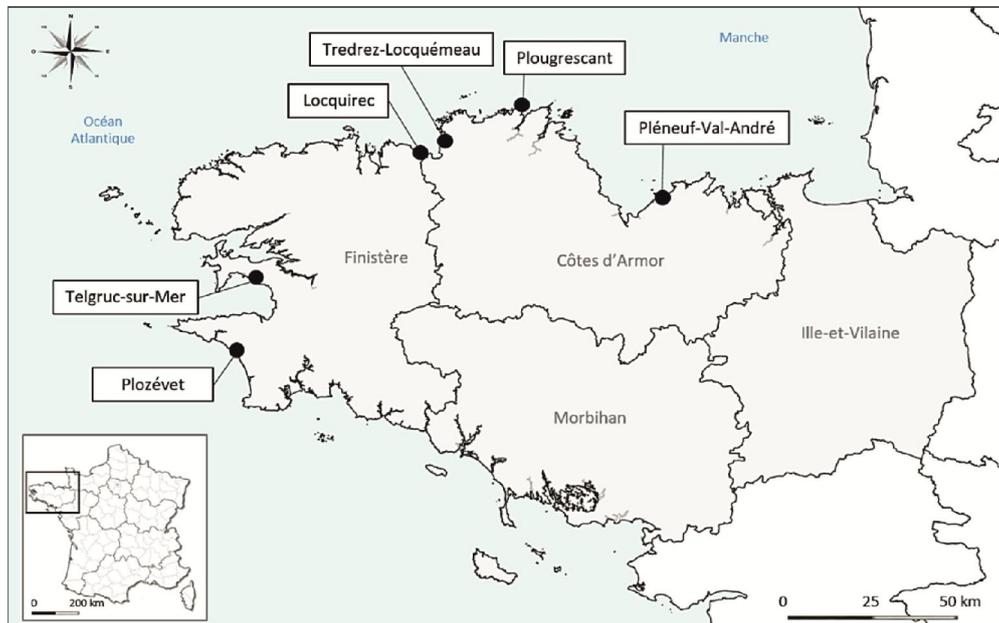


Fig. 2 : Localisation des sites d'étude en Bretagne.

Cet article ne remet pas en question la méthodologie mise en œuvre dans l'élaboration des PPR littoraux. S'appuyant sur l'analyse géomorphologique, il propose des recommandations afin d'améliorer le zonage du risque d'érosion sur les côtes à falaises meubles.

METHODES

Les grandes étapes de la cartographie du risque

L'approche géomorphologique proposée pour la cartographie du risque d'érosion des falaises meubles peut être décomposée en plusieurs grandes étapes (Fig. 3) qui seront détaillées ci-après. Cette méthodologie s'appuie tout d'abord sur des observations de terrain sur les périmètres d'étude de chaque site, qui sont complétées par une analyse spatiale sous SIG des cartes IGN à grande échelle et des photographies aériennes. A partir des observations de terrain et des informations recensées, une cartographie géomorphologique décrivant les caractéristiques de la côte et de l'estran (topographie, lithologie, formes d'érosion...) ainsi que l'extension des formations meubles en arrière des côtes est réalisée. Une cartographie des enjeux recensant l'ensemble des aménagements, dont les ouvrages de protection, est ensuite effectuée. La dernière étape repose sur le croisement de la localisation des formations meubles avec les enjeux recensés, puis l'identification de l'ensemble des enjeux susceptibles d'être menacés par l'érosion côtière dans la zone d'étude.

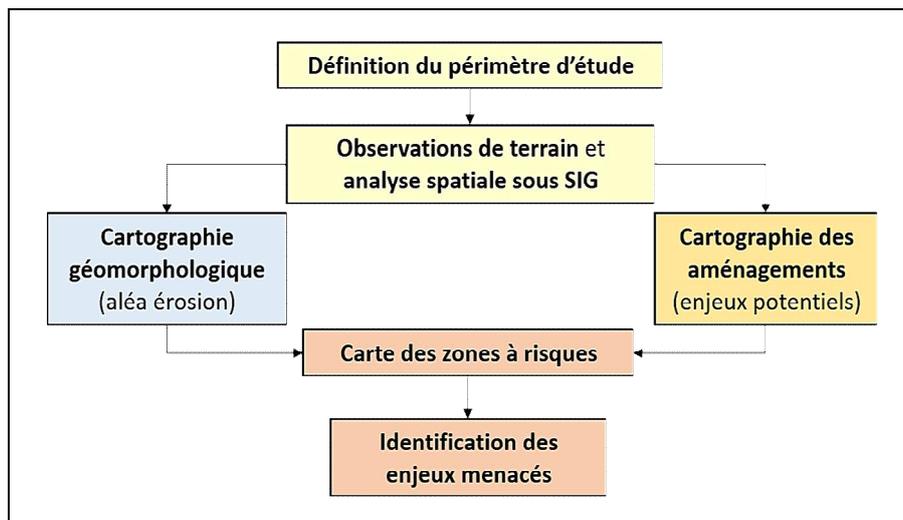


Fig. 3 : Déroulement du travail de cartographie de l'aléa et d'identification des enjeux.

Définition du périmètre d'étude et observations de terrain

Avant toute cartographie et analyse de terrain, il est essentiel de bien définir le périmètre d'étude sur chaque site où les observations géographiques seront réalisées en détail (Tab. 1). La longueur de chaque site d'étude a été choisie de façon à étudier un linéaire de falaises meubles se trouvant dans une même cellule hydro-sédimentaire, délimité à ses extrémités par une avancée rocheuse ou des ouvrages côtiers.

Tab. 1 : Caractéristiques physiques et géographiques des sites d'étude.

Département	Commune	Site d'étude	Hauteur de falaise (m)	Longueur du linéaire étudié (m)	Périmètre d'étude (m)	Aire d'étude (m ²)
22	Pléneuf-Val-André	Les Vallées-Nantois	10 à 30	1 250	1 250 x 220	275 000
	Plougrescant	Pors-Hir	3 à 4	400	400 x 250	100 000
	Tredrez-Locquémeau	Notigou	11 à 13	600	600 x 180	108 000
29	Locquirec	Le Moulin de la Rive	10 à 12	700	700 x 300	210 000
	Telgruc-sur-Mer	L'anse du Caon	5 à 14	500	500 x 220	110 000
	Plozévet	Poulbréhen	4 à 5	480	480 x 140	67 200

Le linéaire doit être suffisamment étendu pour avoir une représentativité des modalités de recul du secteur mais sa longueur doit également être limitée afin de garantir la faisabilité d'un suivi géomorphologique s'appuyant sur la mesure périodique de la topographie des falaises (soit, de l'ordre de quelques centaines de mètres) et, conjointement, l'observation régulière de paramètres environnementaux. La largeur de chaque site

d'étude, dans la direction perpendiculaire au trait de côte, a été limitée à l'étendue maximale des formations meubles en arrière des falaises. Sur les six sites d'étude, la largeur ne dépasse pas les 220 mètres et la longueur de côte est généralement comprise entre 400 et 700 mètres. Pour l'un des sites d'étude situé sur la commune de Pléneuf-Val-André, la longueur du linéaire est deux fois plus grande que celle des autres sites en raison de l'analyse conjointe de deux secteurs à falaises meubles (Plage des Vallées et Plage de Nantois), juxtaposés et séparés par une pointe rocheuse.

Lorsque les périmètres d'étude ont bien été définis, de nouvelles observations de terrain sont menées sur chaque site. Ces observations portent sur les différentes caractéristiques physiques du milieu tels que la morphologie de la falaise et de la plage, les ouvrages de protection ou les formes d'érosion en présence.

Cartographie géomorphologique

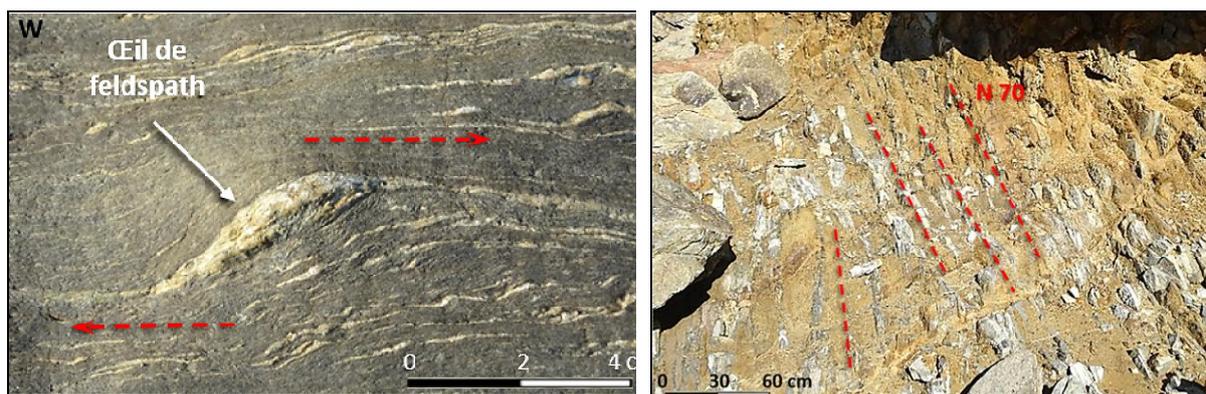
A partir du logiciel libre QGIS™, une cartographie à très haute résolution, au 1/150, a ensuite été réalisée en utilisant l'orthophotographie aérienne de l'IGN de 2015 comme fond de référence, pour un rendu cartographique au 1/4 000. Sur ces cartes, les formes d'érosion observées sur le terrain ont été recensées et les formations meubles ainsi que les caractéristiques morphologiques de la côte et de l'estran ont été cartographiées. L'ensemble des éléments décrits sur ces cartes a été regroupé en sept rubriques (Annexe 1) : la topographie, l'hydrographie, le type de côte, la lithologie des falaises, la granulométrie de l'estran, les formes d'érosion et les paramètres morpho-dynamiques. Chacune des rubriques comprend des descripteurs qui sont renseignés dans le SIG sous forme d'entités et de données attributaires (Annexe 2).

La **topographie** de chaque site est représentée au moyen de courbes de niveau, d'isobathes et de cotes d'altitude. Les courbes de niveau ont été tracées à partir du MNT (Modèle Numérique de Terrain) issu de la base de données topographique (BD Topo) de l'IGN et les isobathes ont été tracées au moyen des fonds de carte des SCAN25 de l'IGN. Les ruptures de pente observées sur le terrain sont représentées sous forme de figurés et permettent de différencier les formes concaves et convexes du versant en s'inspirant des préconisations de la cartographie géomorphologique (GUEREMY & MARRE, 1996; JOLY, 1997; MARRE, 2007).

Pour l'**hydrographie**, les étangs permanents et les cours d'eau ont été tracés. Ils sont issus de la BD Topo de l'IGN et ils ont été vérifiés au moyen de photographies aériennes.

Trois types de côte, présents en Bretagne, ont été différenciés : les côtes d'érosion comprenant les falaises rocheuses et les falaises meubles, les côtes d'accumulation regroupant les dunes et les cordons de galets et les plates-formes d'érosion regroupant les tors et les platiers. Lorsque plusieurs de ces faciès sont présents sur un site, ils sont représentés selon leur position sur l'estran et le long du trait de côte.

La **lithologie des falaises meubles et des falaises rocheuses** a été identifiée à partir des cartes géologiques du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) au 1/50 000 et des observations de terrain permettant d'affiner la cartographie à l'échelle du 1/500 (Fig. 4). La direction et le pendage des structures tectoniques observées (failles et fractures) ont été précisés.



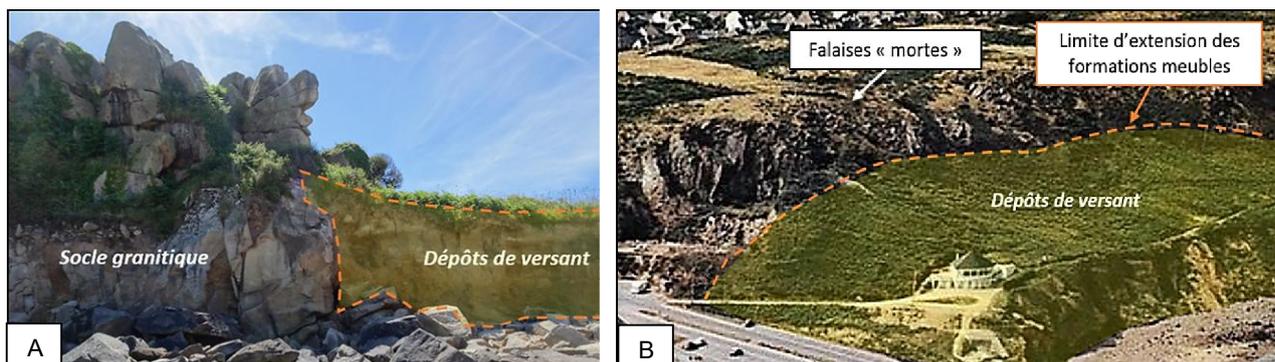
Ombre de pression visible dans les amphibolites formant le platier à Plözévet et indiquant le passage d'une zone de cisaillement dextre.

Série volcano-sédimentaire orientée Est-Ouest en pied de falaise à Notigou (Tredrez-Locquêmeau).

Fig. 4 : Observations géologiques réalisées sur les sites d'étude.

L'**extension maximale des dépôts quaternaires** a été déterminée à partir de l'observation, sur le terrain, d'affleurements du socle (Fig. 5A) ou de la présence de falaises mortes (Fig. 5B). Pour ce travail, les cartes topographiques et les données LIDAR issues de la BD Litto3D® de l'IGN et du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) ont aussi été utilisées car la limite entre les dépôts quaternaires et la falaise morte est souvent marquée par une élévation rapide de la topographie. Enfin, les photographies anciennes

donnent également la possibilité d'observer des affleurements avant qu'ils ne soient masqués par l'urbanisation (Fig. 5B).

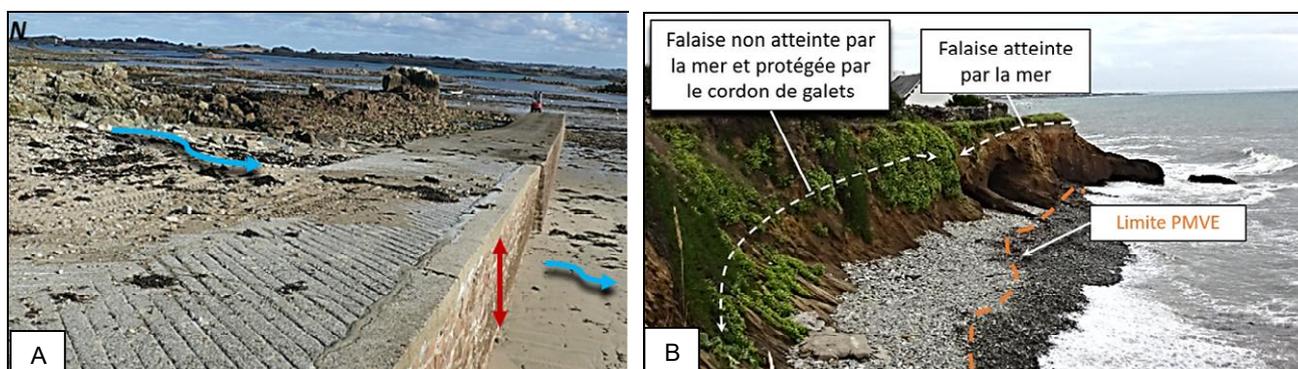


A : à partir de l'observation d'affleurement de socle sur le terrain (Plougrescant) ; B : à partir de l'observation de falaises mortes visibles sur une photographie aérienne prise dans les années 1960 (Pléneuf-Val-André).

Fig. 5 : Identification de l'étendue des formations meubles sur les sites d'étude.

La **granulométrie de l'estran** a été représentée en sept classes granulométriques allant des sables vaseux aux blocs décimétriques, selon la classification de C.K. WENTWORTH (1922). Ces différentes classes se distinguent sur les cartes par la taille des points. La caractérisation est réalisée par des observations de terrain et par les données issues des cartes des formations superficielles des fonds marins accessibles sur la base de données Sextant de l'IFREMER (<https://sextant.ifremer.fr>).

Concernant les **paramètres morphodynamiques**, l'orientation préférentielle des houles a été déterminée à partir de la base de données ANEMOC (Atlas Numérique des Etats de Mer Océaniques et Côtiers). La dérive littorale et l'écoulement des eaux continentales ont été déterminés à partir d'observations de terrain relevant notamment les changements topographiques le long de la plage et du versant (Fig. 6A et Fig. 7). Ainsi, le long d'un linéaire de plage continu, les secteurs en déficit sédimentaire représentent la zone amont de la dérive littorale et les secteurs d'accumulation, la zone aval (Fig. 6A). Le niveau de pleine mer moyenne de vive eau (PMVE) obtenu à partir d'observations lors de grandes marées a aussi été tracé pour chaque site (Fig. 6B).



A : Déficit sédimentaire au sud de la cale indiquant la zone amont de la dérive littorale à Pors-Hir (Plougrescant).

B : Limite des pleines mers de vives eaux identifiée lors de grandes marées (12/08/2018) à Plozévet.

Fig. 6 : Identification des caractéristiques des processus physiques d'origine marine.

L'écoulement des eaux continentales s'effectue le long des dépressions topographiques et des fonds de vallée et leur direction est connue par le tracé des talwegs sur les cartes topographiques. Les formes d'érosion tels que les ravins ou les zones de résurgence ont également permis de retrouver la direction principale des écoulements (Fig. 7).

Enfin, les **formes d'érosion** observées sur le terrain ont été distinguées selon leur origine marine (ex : sous-cavage, grotte) ou continentale (ex : chablis, trou de suffosion, éboulis...) (Fig. 8).



Fig. 7 : Ecoulements préférentiels des eaux continentales à la Plage des Vallées (Pléneuf-Val-André) et ravin formé par les zones de convergence des eaux de ruissellement identifiés sur le terrain et sur une image drone.

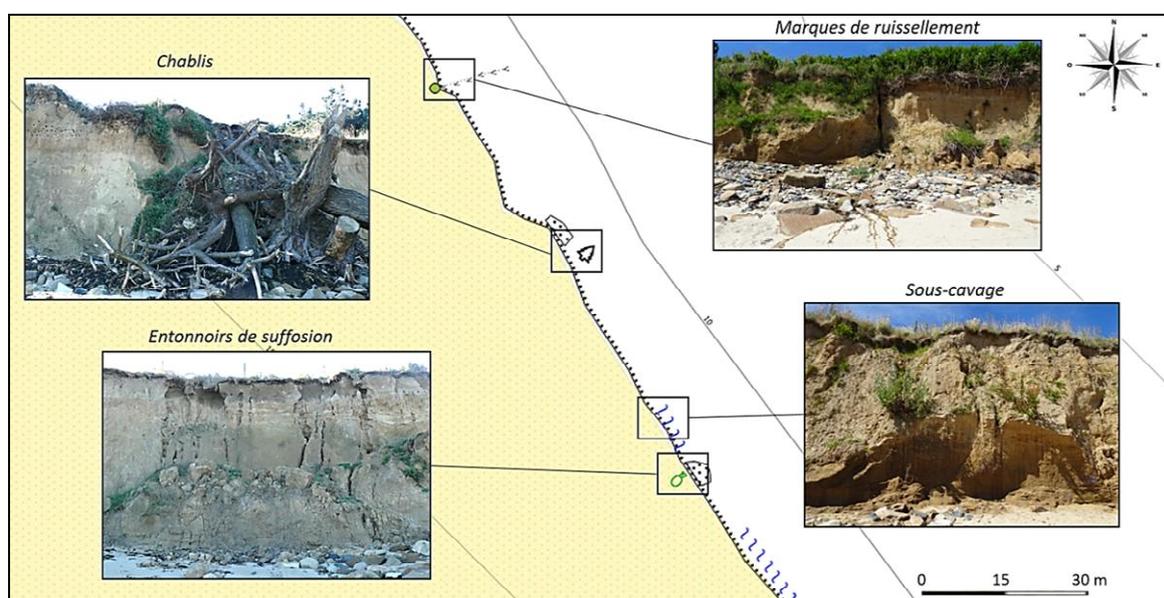


Fig. 8 : Extrait de la cartographie des formes d'érosion visibles sur la paroi des falaises à Plougrescant

Cartographie des enjeux

L'évaluation des risques côtiers et leurs représentations cartographiques sont encore trop souvent réduites à la simple prise en compte de l'aléa et négligent l'autre composante fondamentale du risque que sont les enjeux présents sur le territoire. Ces cartes d'aléas - parfois abusivement dénommées cartes de risque - et utilisées notamment dans les Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) en France permettent de réglementer l'occupation du territoire mais ne donnent pas la possibilité de visualiser les différents éléments exposés au risque et les pertes potentielles en terme de proportion ou de coût (LEONE, 2007). Or, les cartes d'enjeux sont essentielles afin d'anticiper et de prioriser les décisions à prendre en matière de réduction des risques et de mise en place d'actions de sensibilisation et de concertation.

La cartographie détaillée des enjeux qui a été réalisée à l'échelle du 1/650 sur les six sites d'étude a utilisé l'orthophotographie aérienne de l'IGN de 2015 comme fond de référence. Une analyse sous SIG des limites des parcelles cadastrales issues de la base de données BD Parcellaire de l'IGN et les observations de terrain ont permis d'identifier tous les enjeux matériels présents sur les secteurs étudiés. Les inventaires des Zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF) provenant de la plateforme *data.gouv.fr* ont

permis de connaître les enjeux environnementaux. Sur cette cartographie de l'occupation et de l'usage du sol, dix catégories d'éléments exposés ont été créées afin de différencier les enjeux d'ordre humain, économique, stratégique et environnemental (Annexe 2).

Des caractéristiques propres aux aménagements et apparaissant essentielles pour l'évaluation du degré de sensibilité au risque ont été précisées. Ainsi, la distinction des routes communales et départementales a été réalisée car leur fréquentation ainsi que leur coût de remise en état et de construction peuvent différer remarquablement. Selon son classement, une route peut donc représenter un enjeu plus ou moins fort. De plus, ce classement détermine le gestionnaire responsable de son entretien et donc les moyens financiers permettant d'assurer sa gestion.

Pour les bâtiments, trois classes ont été distinguées : les bâtiments résidentiels comprenant toutes les résidences principales et secondaires ; les bâtiments de service comprenant le bâti à vocation de loisirs ou de services publics ; les bâtiments de stockage qui sont utilisés pour entreposer du matériel et qui ne sont pas des lieux d'habitation (ex : hangar, abri de jardin...). Ces classes déterminent également le niveau de sensibilité des bâtiments au risque. Ainsi des bâtiments résidentiels et de service situés en zone à risque auront un degré de sensibilité plus fort car ils impliquent directement la vie humaine.

Identification des zones à risque et des enjeux menacés

Les zones à risque pour l'aléa érosion côtière ont été définies comme le croisement de la localisation et de l'extension des formations meubles avec les éléments exposés. L'identification des enjeux menacés par l'érosion des falaises meubles, à l'échelle locale, repose donc sur le croisement de la cartographie géomorphologique avec la cartographie des enjeux (Fig. 3). Le rendu cartographique des cartes est au 1/4 000.

Dans cette étude, il a été choisi de ne pas caractériser les enjeux menacés par leur valeur marchande, l'évaluation économique des enjeux, qui n'est pas sans poser de problèmes, étant considérée hors du périmètre de cette étude. Il est en effet difficile d'avoir accès aux données sur les valeurs des biens immobiliers et de monétariser des enjeux qui n'ont pas de traduction monétaire directe comme les bénéfices résultant des services écosystémiques ou la présence d'un patrimoine culturel (LE BERRE *et al.*, 2014). La difficulté de l'évaluation économique peut porter également sur la présence de dommages indirects comme la perte d'exploitation d'une entreprise maraîchère suite à la destruction d'une partie de ses terres agricoles. Ainsi, dans cette étude, les enjeux présents dans les zones à risque ont été quantifiés par leur superficie au moyen d'un outil de mesure de surface sur le logiciel de SIG. Ces surfaces ont ensuite été rapportées à l'aire du secteur d'étude afin de connaître leurs proportions relatives sur chacun des sites et de pouvoir les comparer d'un site à l'autre. Enfin, les stratégies de gestion actuellement mises en place sur chaque site ont été analysées au regard des enjeux menacés.

RESULTATS

Identification des enjeux menacés sur les sites d'étude

L'emprise spatiale des enjeux menacés correspond à la superficie de la zone exposée au risque d'érosion des falaises meubles, c'est-à-dire à l'étendue des formations meubles. Elle est comprise entre 19 114 et 64 502 m² pour les six sites d'étude.

Le site des Vallées-Nantois à Pléneuf-Val-André

D'après la carte des zones à risque (Fig. 9), l'érosion des falaises meubles de la plage de Nantois, située dans la partie Est du site, pourrait menacer environ 185 m du sentier côtier (GR34).

La cartographie montre également qu'un peu plus de 20 000 m² du golf serait menacés par l'érosion des falaises meubles (Fig. 10A). Du côté de la plage des Vallées, l'érosion des falaises meubles pourrait affecter 16 400 m² de terrains résidentiels ainsi que le parking et les cales permettant l'accès à la plage. A l'Ouest du parking, une maison située à 14 m du bord de falaise et le sentier côtier longeant ce sommet sur 260 m seraient menacés (Fig. 10B).

Sur le plan écologique, les falaises des Vallées-Nantois correspondent à une Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF). L'érosion des falaises concernerait près de 19 000 m² de la ZNIEFF. Le recul des falaises meubles engendrerait donc ici une perte d'habitat. De plus, la falaise de Nantois correspond à une zone d'intérêt départemental sur le plan géologique, car c'est sur cette falaise qu'a été défini le stratotype de Nantois. Cette portion de falaise représente effectivement une des coupes quaternaires les plus complètes en Bretagne en termes d'enregistrements stratigraphiques (LOYER *et al.*, 1995).

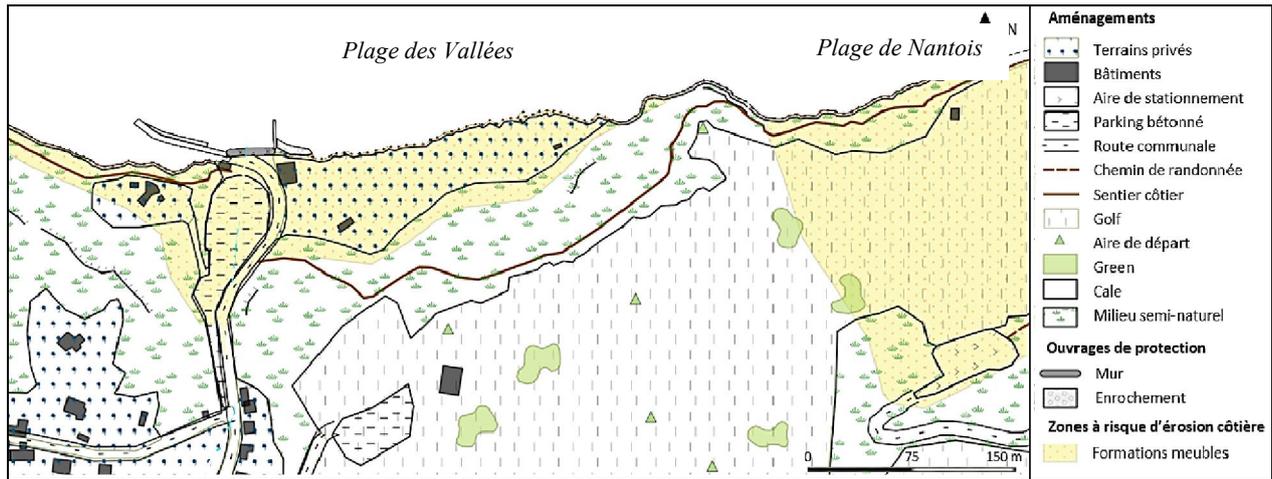
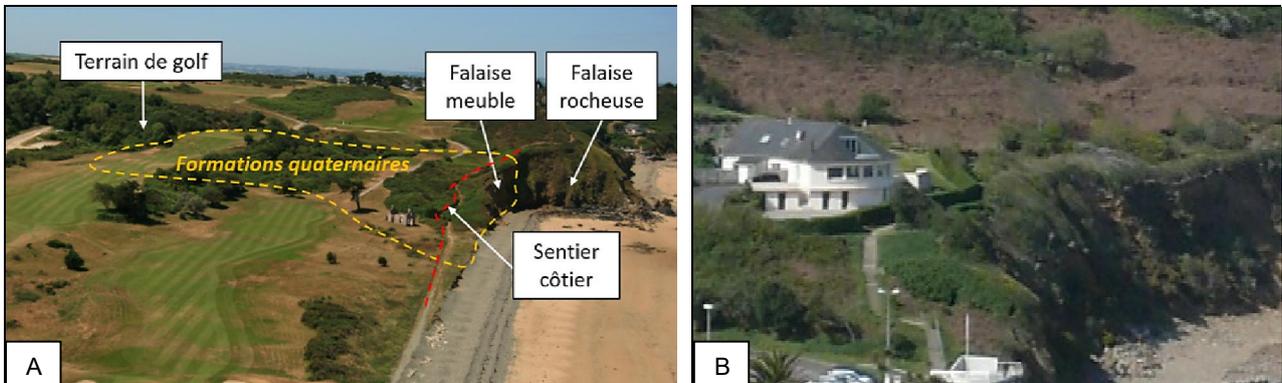


Fig. 9 : Zones à risque d'érosion de falaises meubles sur la plage des Vallées-Nantois (Pléneuf-Val-André).



A : terrain de golf et sentier côtier (Plage de Nantois) ; B : sentier et résidence en bordure de falaise (Plage des Vallées).

Fig. 10 : Enjeux menacés par l'érosion des formations meubles à Pléneuf-Val-André.

L'anse de Pors-Hir à Plougrescant

Sur le site de Pors-Hir, à Plougrescant, l'érosion des falaises meubles menacerait quatre résidences (Fig. 11). Deux d'entre elles se trouvent actuellement à proximité du trait de côte, à 19 et 17 mètres du bord de falaise (Fig. 12A). Des ouvrages de défense contre la mer (perré et enrochements) ont été mis en place au nord du site.

La cartographie montre qu'un peu plus de 550 m de la route d'accès au site serait menacée. Cette route a déjà subi des dommages durant les grandes marées de janvier 2005. Elle représente un enjeu pour la commune car elle permet notamment l'accès au site touristique du Gouffre. Au Nord du site, entre 12 500 et 13 000 m² de terrains agricoles seraient concernés par le recul des falaises meubles. Les deux cales situées au nord de l'anse de Pors-Hir, qui sont utilisées notamment pour une exploitation ostréicole, seraient également affectées par le phénomène d'érosion (Fig. 12B).

Tout comme le site de la Plage des Vallées, l'érosion des falaises meubles de Pors-Hir engendrerait ici une perte d'habitat naturel car le littoral de Pors-Hir est un espace remarquable appartenant au périmètre Natura 2000 et qui représente une Zone de Protection Spéciale (ZPS) liée à la Directive Oiseaux (DERNIER, 2010)

L'anse du Moulin de la Rive à Locquirec

Sur le site du Moulin de la Rive, à Locquirec, le risque d'érosion des falaises meubles concernerait 12 résidences (Fig. 13). Cinq d'entre elles se trouvent à moins de 12 m du front de falaise (Fig. 14A). Des murs de protection et des enrochements ont été construits le long du trait de côte afin de protéger le pied de falaise de l'érosion marine.

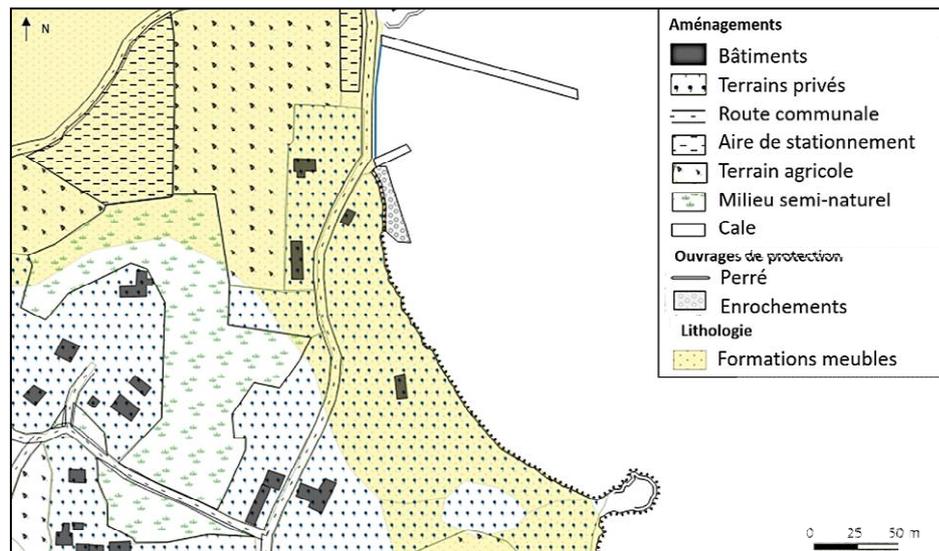


Fig. 11 : Zones à risque d'érosion de falaises meubles à Pors-Hir (Plougrescant).



A : résidence située à 19 mètres du bord de falaise ; *B* : cale utilisée notamment par une exploitation ostréicole.

Fig. 12 : Enjeux menacés à Pors-Hir.

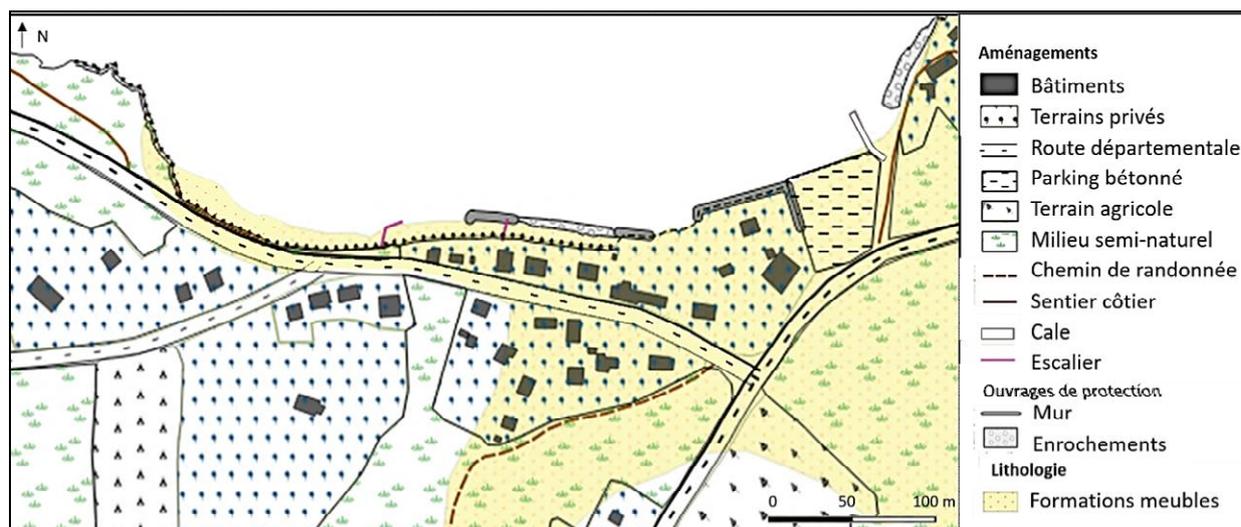
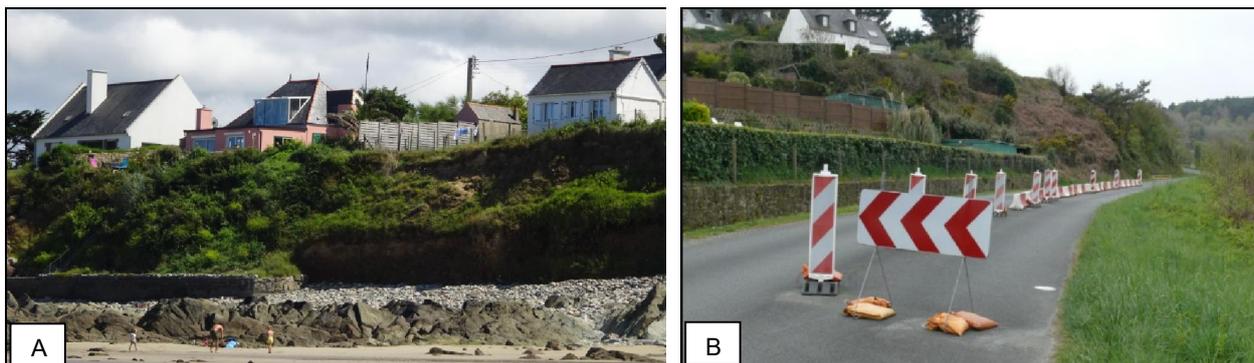


Fig. 13 : Zones à risque d'érosion de falaises meubles du Moulin de la Rive (Locquirec).

Une portion d'un peu plus de 650 m de la route départementale longeant le site serait menacée. Depuis les tempêtes de février 2014, des fissures sont apparues au niveau de la chaussée. Elles sont dues au glissement

desformations meubles et du remblai sur lesquels la route a été construite dans les années 1960 (Fig. 14B). Un projet de confortement du front de falaise dans ce secteur est actuellement en cours d'élaboration.



A : résidences situées à moins de 12 m du bord de falaise ; B : route départementale réduite à une voie en raison de l'apparition de fissures sur la chaussée.

Fig. 14 : Enjeux menacés au Moulin de la Rive.

Notigou à Tredrez-Locquémeau

Sur le site de Notigou, à Tredrez-Locquémeau, l'érosion des falaises meubles concernerait 18 résidences (Fig. 15 – Fig. 16). Elle affecterait également la route communale qui longe la corniche sur environ 215 mètres. Cette route représente un enjeu car elle constitue la seule voie d'accès à une dizaine de résidences ainsi qu'à la plage de Notigou.

L'anse du Caon à Telgruc-sur-Mer

Sur le site de l'anse du Caon, à Telgruc-sur-Mer, 10 résidences seraient concernées par l'érosion des falaises meubles (Fig. 17 – Fig. 18A). Environ 250 mètres du sentier côtier et 19 000 m² de terrains agricoles reposant sur ces formations meubles seraient également affectés par le recul des falaises meubles (Fig. 18B).

La route départementale longeant ce site serait également impactée. Cette route est actuellement protégée au sud par un enrochement de 130 mètres, à l'endroit où elle est le plus proche du sommet de falaise, c'est-à-dire entre 4 à 5 mètres du bord (Fig. 17).

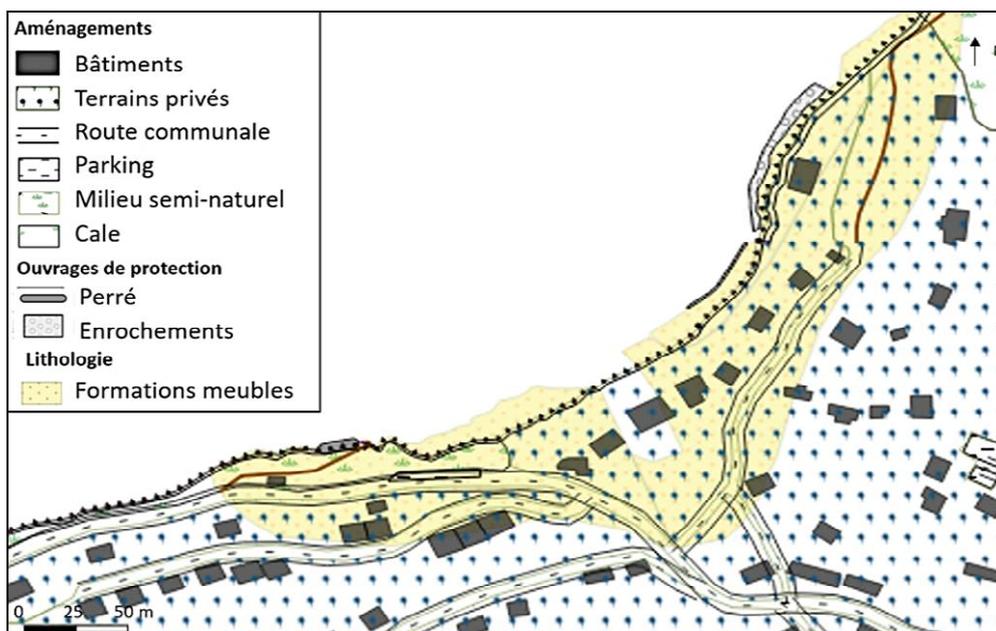


Fig. 15 : Zones à risque d'érosion de falaises meubles de l'anse de Notigou (Tredrez-Locquémeau).

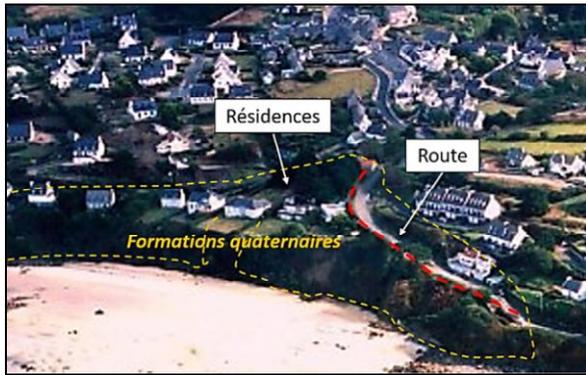


Fig. 16 : Routes et résidences menacées à Notigou.

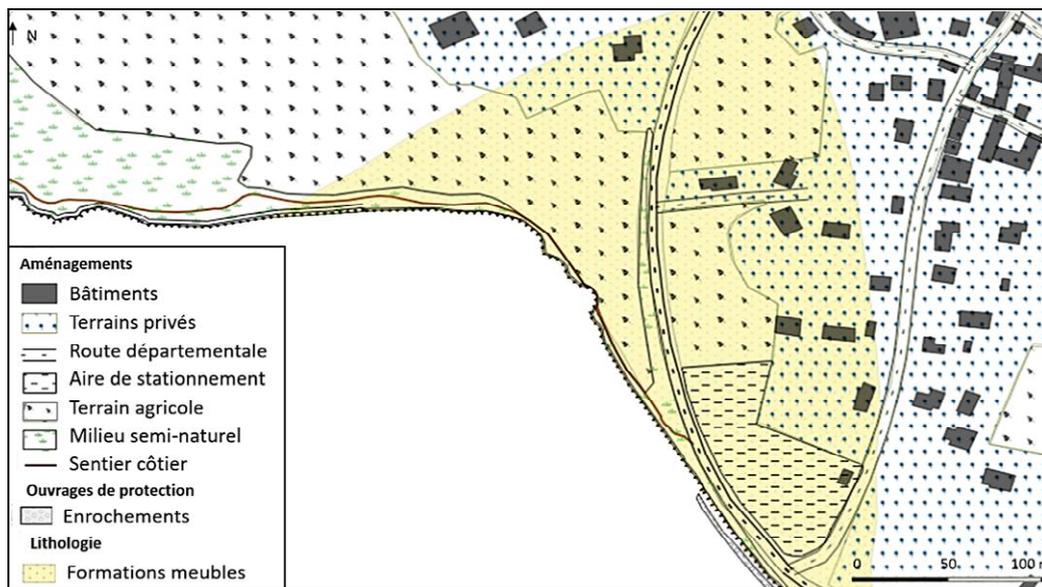


Fig. 17 : Zones à risque d'érosion de falaises meubles de l'anse du Caon (Telgruc-sur-Mer).



A



B

A : Résidences situées en arrière du front de falaise ; B : terrain agricole et sentier côtier.

Fig. 18 : Enjeux menacés à l'anse du Caon.

Poulbréhen à Plozévet

Sur le site de Poulbréhen, à Plozévet, l'érosion des falaises meubles concernerait 13 résidences (Fig. 19). La route communale ainsi que les terres agricoles longeant ce secteur seraient également menacées.

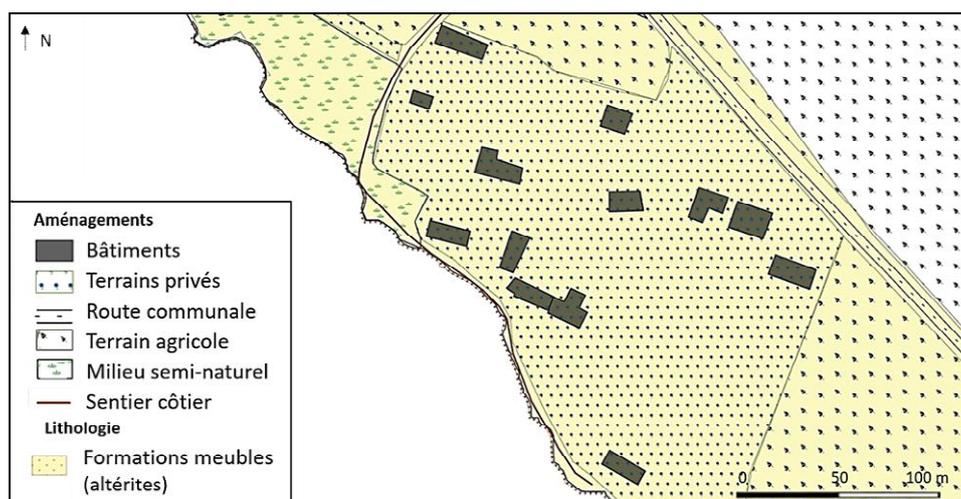


Fig. 19 : Zones à risque d'érosion de falaises meubles à Poulbréhen (Plozévet).

Dans ce secteur, comme sur le site de Telgruc-sur-Mer, le littoral est très exploité par l'activité agricole et l'installation de résidences principalement secondaires. Par endroits, le sentier littoral est à proximité immédiate du bord de falaise, voire a complètement disparu à la suite du recul des falaises meubles (Fig. 20). Une enquête publique sur la procédure de modification de la servitude du passage est actuellement en cours afin de redéfinir le tracé du sentier côtier.



Fig. 20 : Erosion du sentier côtier de Poulbréhen à Plozévet.

Diversité des enjeux menacés par l'érosion des falaises meubles

La quantification des enjeux par leur superficie dans les zones à risque permet d'apprécier leur proportion vis-à-vis des autres enjeux et vis-à-vis des autres sites à falaises meubles (Fig. 21).

Les **terrains résidentiels** représentent 45 % des enjeux menacés sur les six sites d'étude (Fig. 21B). Ce sont les principaux enjeux impactés par l'érosion des falaises meubles, en terme de superficie. Ce sont les enjeux les plus étendus sur les sites de Plougrescant, de Tredrez-Loquémeau et de Plozévet (Fig. 21A).

Les **terrains agricoles** occupent également une part importante dans les enjeux exposés au risque, notamment dans les communes restées rurales telles que Telgruc-sur-Mer, Plozévet ou Plougrescant (Fig. 21A). La disparition d'une partie des terres agricoles sous l'effet du recul des falaises meubles représente avant tout un enjeu économique car elle pourrait avoir un impact sur la production et le rendement agricoles.

Les **milieux dits « semi-naturels »** représentent des terrains qui ne sont pas exploités par l'homme mais qui ont pu être modifiés et façonnés par son intervention (haie, prairie...). Ils constituent le troisième enjeu le plus impacté en terme de superficie sur les sites d'étude. Ces portions littorales non aménagées servent de zone tampon naturelle au recul des falaises et réduisent la sensibilité des sites à l'érosion.

Les **activités de loisirs** sont représentées, ici, seulement sur le site de Pléneuf-Val-André avec la présence du golf. Celui-ci constitue un enjeu économique important pour la commune car un peu plus de 4 200 personnes

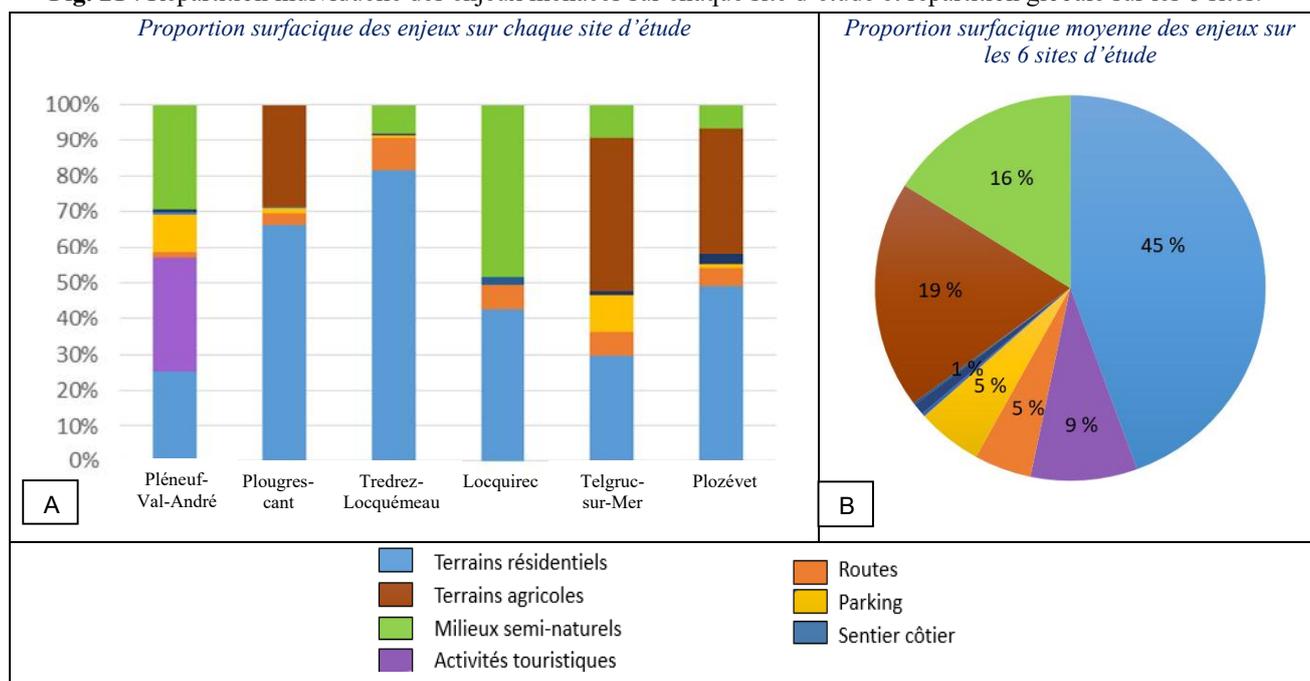
fréquentent le golf chaque année et il est le lieu de compétitions de niveau international (GEOLITT, 2016). De plus, le golf représente une source de recettes importante pour la commune.

Une attention particulière doit être portée aux **routes** menacées par le recul des falaises et dont la proportion est de 5 % sur les six sites d'étude. Cette proportion ne reflète pas la fréquence d'exposition au risque du fait de leur superficie réduite en comparaison des terrains privés ou des espaces naturels. Les routes sont effectivement fréquemment impactées du fait de leur tracé à proximité du trait de côte. Elles représentent un enjeu important pour les communes, d'une part, parce qu'elles desservent la population riveraine et, d'autre part, parce qu'elles peuvent avoir un impact sur les activités économiques en permettant, par exemple, l'accès à des sites devenus touristiques. C'est le cas, par exemple, de la route de la Corniche à Locquirec ou de la route de la Plage à Telgruc-sur-Mer. Les communes tentent le plus souvent de protéger les routes par la mise en place d'enrochements, plutôt que de chercher à les déplacer.

De même que pour les routes, les **sentiers côtiers**, représentant 1 % des enjeux, sont sous-représentés en terme de proportion dans l'analyse faite sur la base de l'étendue des zones à enjeux, du fait de leur largeur réduite. Mais ils sont fréquemment impactés par le recul des falaises meubles en raison de leur proximité avec le sommet de falaise. La forte fréquentation des sentiers côtiers bretons en font un enjeu important. Toutefois, contrairement aux routes, ces sentiers ne sont pas souvent protégés par des ouvrages car ils sont plus faciles à déplacer en retrait du rivage. Ainsi, sur les sites de Telgruc-sur-Mer et de Pléneuf-Val-André, les sentiers côtiers ont déjà été déplacés à plusieurs reprises à la suite du recul de la falaise. Le déplacement et la redéfinition du tracé du sentier posent souvent problème aux communes. Selon la loi du 31 décembre 1976, une servitude de passage réservée aux piétons doit être présente le long du littoral sur une bande de trois mètres. Cette loi s'applique à toutes les propriétés privées situées en bordure du littoral et construites après 1976. Pourtant, à de nombreux endroits, comme sur la commune de Plozévet, la servitude de passage n'est pas respectée, les propriétaires riverains faisant obstacle à cette loi. Les études sur les servitudes de passage s'éternisent dans de nombreuses communes qui peinent à trouver des solutions. Ainsi, des conflits se créent, d'une part, entre les associations de riverains qui défendent leur propriété et, d'autre part, les associations de protection du littoral qui dénoncent l'inaccessibilité du sentier côtier aux promeneurs malgré la loi de 1976. De ce fait, le sentier côtier peut devenir un enjeu politique et social.

Les **parkings** et les aires de stationnement représentent 5 % des enjeux menacés sur les six sites d'étude. Il s'agit d'un enjeu important pour les communes littorales qui doivent répondre à des difficultés de stationnement surtout en période estivale. C'est le cas des six sites d'étude qui voient leur population doubler en été. L'analyse des éléments exposés au risque d'érosion des falaises meubles sur les six sites d'étude montre que le recul des falaises menace une diversité d'enjeux d'ordre humain, économique, stratégique et socio-environnementale qui peuvent être sources de conflit. Face à ces difficultés, les communes choisissent de mettre en place différentes stratégies de gestion.

Fig. 21 : Répartition individuelle des enjeux menacés sur chaque site d'étude et répartition globale sur les 6 sites.



Analyse des stratégies de gestion au regard des enjeux menacés

L'échantillon de six sites ne fournit pas à lui seul une vision complète des stratégies de gestion, mais permet tout de même de mettre en évidence quelques grandes tendances. On peut observer plusieurs approches, de la fixation du trait de côte par des méthodes dites dures (aménagement) au laisser-faire. Ces différences de choix dans les stratégies de gestion s'expliquent plutôt en terme de caractéristiques du recul (cinématique à court terme et fréquence des phénomènes d'érosion) ou par les ressources financières que les communes concernées parviennent à mobiliser. L'analyse des stratégies de gestion sur les sites d'étude ne montre pas de lien direct entre la nature ou la proportion des différents enjeux et les mesures de gestion adoptées. Le recours aux ouvrages de défense est fréquent, avec une faible efficacité.

Ainsi, par exemple, pour les sites de Pors-Hir (Plougrescant) et de Poulbréhen (Plozévet) qui présentent des enjeux comparables en terme de proportion (terrains résidentiels et agricoles représentant plus de 84 % des enjeux menacés), le premier site a été aménagé par la mise en place d'enrochements, ainsi que de murs de protection, tandis que, sur le second, aucun ouvrage de défense contre la mer n'a été installé. Si l'on considère maintenant la cinématique du recul, les falaises du site de Plougrescant présentent effectivement des taux de recul à court et moyen termes plus élevés (entre 50 à 60 cm/an) en comparaison des falaises de Plozévet (entre 5 à 10 cm/an). Par ailleurs, la présence de milieux naturels protégés ne semblent pas expliquer à eux seuls les stratégies adoptées car bien que les falaises des sites de Plougrescant et de Pléneuf-Val-André se situent dans une zone Natura 2000, leur linéaire est artificialisé respectivement à 16 et 9 %.

Les enrochements représentent 68 % des ouvrages de défense utilisés. Les autres ouvrages correspondent à des murs de protection ou des perrés. Les principaux enjeux protégés par ces ouvrages sont les terrains résidentiels et les routes qui représentent respectivement 60 et 26 % des enjeux protégés. Les ouvrages de défense contre la mer ont généralement été mis en place sans concertation ni réflexion globale préalable sur leur impact ou sur leur efficacité, d'où « l'effet dominos » (PASKOFF, 2010) qui appelle à la mise en place d'ouvrages supplémentaires dans la continuité des précédents. La poursuite du recul des falaises meubles en arrière des enrochements, comme c'est le cas sur le site de Plougrescant, montre, par ailleurs, que les ouvrages de défense mis en place sur ce type de côte sont rarement adaptés.

Apport de la cartographie géomorphologique dans l'évaluation de la sensibilité des sites à l'érosion

Identification des facteurs impliqués dans l'érosion des falaises

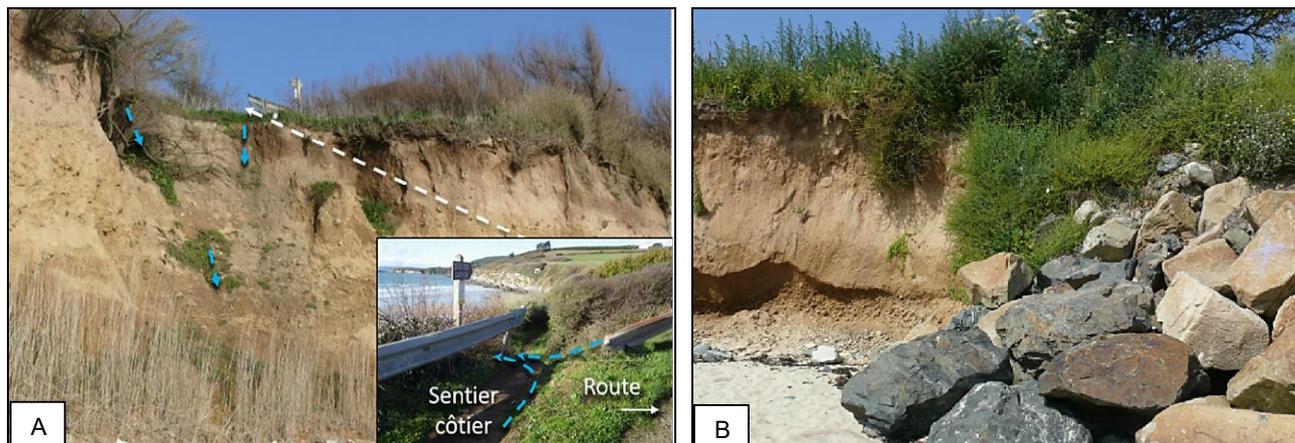
Paradigme nouveau pour la caractérisation de l'extension des zones affectées par le risque d'érosion, la carte géomorphologique permet aussi de mettre en évidence la prépondérance de l'origine continentale ou marine des processus impliqués dans l'érosion des falaises meubles. Les différentes formes d'érosion observées sont effectivement des indices qui renseignent sur les agents impliqués. De plus, le géoréférencement des caractéristiques environnementales (ex : sens de la dérive littorale, direction principale d'écoulement des eaux continentales) permettent de comprendre l'origine de ces formes d'érosion. Ainsi, les ravins ou les trous de suffosion observés sur les sites de Plougrescant, de Pléneuf-Val-André et de Telgruc-sur-Mer témoignent d'une érosion continentale. Les sous-cavages observés à Plozévet et Plougrescant témoignent quant-à-eux d'une érosion marine.

Les formes d'érosion recensées montrent également l'influence de certains aménagements et ouvrages côtiers. La formation des ravins et des trous de suffosion semble être favorisée par la présence de routes et de sentiers en amont qui concentrent l'écoulement des eaux de ruissellement. Ceci s'observe très bien sur le site de Telgruc-sur-Mer (Fig. 22A) où un ravin s'est formé par le ruissellement concentré des eaux guidées par la route et le sentier côtier. Ainsi, aux facteurs d'érosion « naturelle », d'origine continentale ou marine, s'ajoutent les facteurs anthropiques. Ces facteurs joueraient un rôle majeur dans l'érosion des formations meubles et accéléreraient le recul des versants (BONNOT-COURTOIS *et al.*, 2008).

Détermination de la sensibilité des sites à l'érosion

La cartographie géomorphologique renseigne aussi sur la sensibilité spatiale des sites à l'érosion continentale ou marine. Ainsi, la présence de platier et d'un cordon de galets épais en avant des falaises diminuera cette sensibilité. A l'inverse, la présence d'un ouvrage de protection ou d'un versant rocheux à proximité l'augmentera car ils représentent une barrière à la dissipation de l'énergie des vagues qui se retrouvera accrue aux extrémités de ces structures rigides (Fig. 22B).

La cartographie géographique met également en évidence des problèmes de résurgences d'eau le long de la côte dues notamment à des canalisations d'évacuation des eaux usées non raccordées (Fig. 23).



A : Ravin formé par la concentration des eaux ruisselant le long de la route et du sentier côtier à Telgruc-sur-Mer.
 B : « Effet de bout » provoqué par la réflexion des vagues à l'extrémité d'un enrochement à Pors-Hir (Plougrescant).

Fig. 22 : Impact des aménagements sur l'érosion des falaises

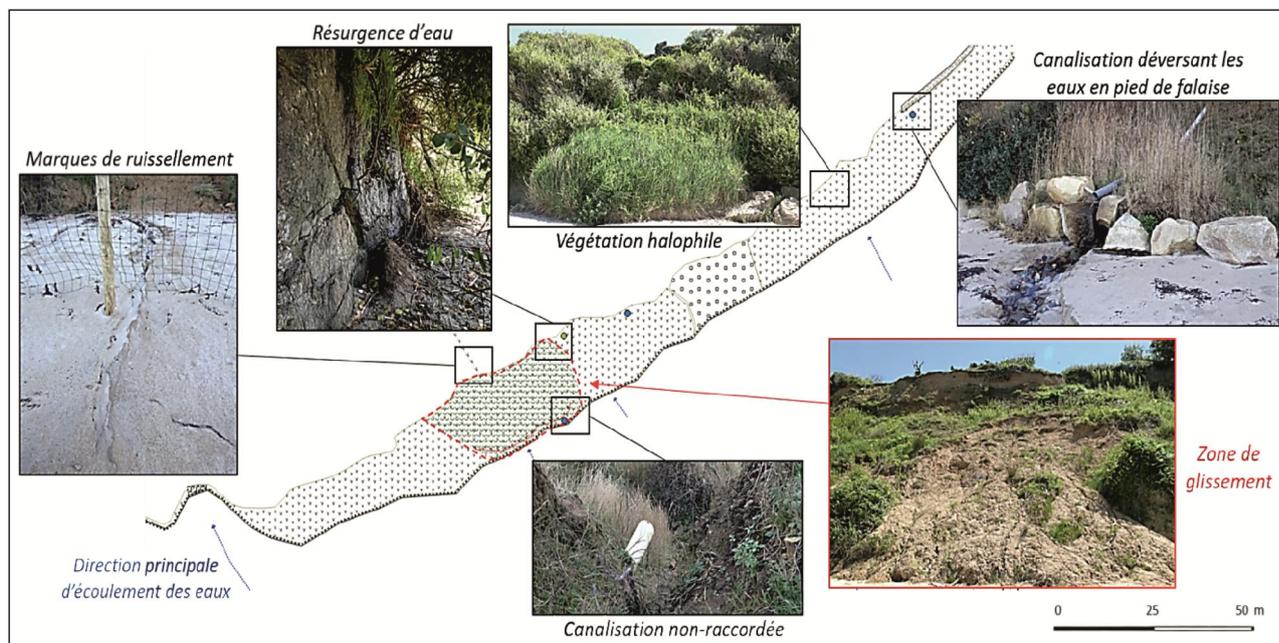


Fig. 23 : Ruissellement, formes d'érosion et canalisations non raccordées observés sur le site de Tredrez-Locquémeau.

La cartographie géomorphologique représente donc un outil d'analyse efficace et d'aide à la décision et à l'aménagement des zones côtières. Elle peut être utilisée dans le choix de mesures de mitigation comme le drainage et le raccordement des eaux usées ou dans le choix de techniques de protection adaptées aux modalités de recul et aux conditions environnementales. Ainsi, sur les sites dont le recul est conditionné principalement par des processus d'origine marine, les ouvrages de défense mis en place devront tenir compte de l'orientation principale des houles et du sens de la dérive littorale qui ont une incidence sur l'alimentation sédimentaire des secteurs situés en aval. Sur les sites dont l'érosion est conditionnée principalement par des processus continentaux, les systèmes de drainage devront tenir compte de la direction préférentielle d'écoulement des eaux et de la localisation des formations meubles.

DISCUSSION

Marge d'erreur sur l'étendue des zones à risque

L'extension maximale des formations meubles en arrière des versants présente une marge d'erreur estimée à ± 6 mètres. La végétation et l'urbanisation des versants peuvent rendre difficile l'observation d'affleurements permettant d'identifier la nature des formations. La limite des formations meubles présente sur les cartes est une interprétation des observations issues des campagnes de terrain et d'analyses de photographies aériennes ainsi que de cartes topographiques. Il est donc important de noter que l'étendue des zones à risque peut être réduite ou, à l'inverse, augmentée dans les marges définies par cette incertitude. Parmi les formations meubles, les altérites - présentes par exemple sur le site de Plozévet - sont les matériaux dont l'étendue maximale est la plus incertaine. Ces formations étant issues d'une altération lente de la roche mère, il est en effet difficile de trouver une limite nette entre les dépôts meubles et les formations peu altérées. L'approche présentée dans cet article suppose donc que l'extension spatiale des formations meubles soit limitée.

Choix méthodologiques concernant les enjeux

Les enjeux cartographiés sur les sites d'étude tiennent compte de tous les ouvrages pouvant être identifiés sur le terrain ou sur des photographies. Les réseaux électriques, d'adduction d'eau et téléphoniques n'ont pu être cartographiés du fait de la difficulté d'accès à ces données et de leur caractère confidentiel. De plus, dans cette analyse du risque qui s'affranchit de la notion de temps, les enjeux sont considérés comme constants. L'existence de la loi Littoral et des zones classées inconstructibles sur les secteurs d'étude permet de considérer qu'aucune nouvelle construction n'est possible. Toutefois, les éléments exposés peuvent être amenés à évoluer dans le temps, aussi bien par l'apparition d'enjeux (autres que liés au bâti) que par la disparition d'enjeux. Enfin, la cartographie des zones à risque ne prend pas en compte l'éventuel effet neutralisant des ouvrages de protection existants sur l'érosion des dépôts meubles. On considère, en effet, qu'à suffisamment longue échéance, l'ouvrage sera rendu inefficace ou détruit car son entretien deviendra trop onéreux sur le long terme. Le maintien du trait de côte par l'entretien des ouvrages n'est effectivement pas toujours une option économiquement viable.

En raison de la difficulté que pose l'évaluation économique des enjeux, les éléments exposés ont été quantifiés par leur superficie dans la zone à risque. La comparaison de leur proportion moyenne (Fig. 21B) avec celles identifiées par les travaux de BIVILLE et VAN WAERBEKE (2003) à partir d'enquêtes communales réalisées sur 110 communes en Bretagne fait apparaître certaines similitudes mais aussi des différences notables (Tab. 2).

Tab. 2 : Proportions comparées des enjeux menacés par le recul des falaises meubles au travers de deux approches de quantification

Enjeux	Proportions évaluées dans cet article sur 6 sites d'étude, à partir de l'étendue spatiale	Proportions évaluées dans les travaux de Biville et Van Waerbeke (2003) sur 110 communes, à partir d'enquêtes communales
Terrains résidentiels	44,4 %	15,7 %
Terrains agricoles	19,1 %	19,5 %
Milieux semi-naturels	16,0 %	8,1 %
Activités touristiques	8,8 %	5,7 %
Routes	4,7 %	4,3 %
Parking	5,4 %	-
Sentier côtier	1,0 %	71,9%

Les proportions des terrains agricoles, des activités touristiques et des routes menacés par l'érosion des falaises meubles sont équivalentes entre les deux études. A l'inverse, tandis que les terrains résidentiels sont les enjeux les plus exposés sur les six sites d'étude, les travaux de BIVILLE et VAN WAERBEKE (2003) montrent une forte exposition du sentier côtier (71,9% des enjeux). De même, les milieux semi-naturels représentent ici, le double de la proportion obtenue par les enquêtes. Ces différences peuvent s'expliquer par le nombre réduit de sites étudiés, mais aussi par la différence de méthodologie entre l'analyse d'observation de terrain et de documents cartographiques d'une part et les retours d'enquête d'autre part. Les résultats des enquêtes peuvent en effet refléter une préoccupation moindre des communes pour les biens privés tels que les terrains résidentiels en comparaison des biens publics. Ainsi, les sentiers côtiers exposés à l'érosion et pouvant menacer les randonneurs sont une source d'inquiétude plus grande pour le maire du fait de sa responsabilité en matière de sécurité des cheminements imposée dans le code pénal (article 121-2, loi n°2000-647). De même, la faible valeur économique des milieux semi-naturels peut expliquer leur sous-représentation dans les réponses des communes. Ces différences en termes de proportion montrent que le choix de la méthode de quantification des enjeux conditionne fortement les résultats. On peut supposer qu'une évaluation économique des enjeux donnerait des résultats différents des deux premières approches ; le sentier côtier et les milieux semi-naturels seraient sous-représentés, du fait de leur valeur non-monnaire, en comparaison des autres enjeux.

Originalité et intérêts de l'approche utilisée

L'analyse du risque d'érosion présentée dans cet article se différencie de l'approche classique consistant à calculer une distance de recul à partir d'un taux d'érosion moyen (FORSYTH, 2009; MEDDE/DGPR, 2014; PERHERIN *et al.*, 2015) et qui est préconisée dans les guides méthodologiques d'élaboration des plans de prévention des risques littoraux. Cette évaluation du risque est tributaire de la capacité à caractériser la cinématique régressive des falaises meubles. Or, les falaises meubles sont des littoraux dont la cinématique, lente à modérée, présente des taux de recul souvent associés à des marges d'erreur plurimétriques (DOUGLAS & CROWELL, 2000; COSTA *et al.*, 2003). De plus, l'utilisation des taux historiques peut sous-estimer le risque (BERNATCHEZ *et al.*, 2012) et l'incertitude du zonage sera d'autant plus élevée que l'échéance sera lointaine (LEVOY & MONFORT, 2009). Par ailleurs, ces zonages d'aléa tiennent rarement compte de l'impact du changement climatique sur l'évolution des taux de recul car cet impact reste difficile à quantifier (PERHERIN & ROCHE, 2010). Pour autant, il est admis que le changement climatique aura des conséquences non seulement sur l'élévation du niveau des mers mais aussi sur l'intensité des précipitations et des tempêtes, augmentant ainsi les phénomènes d'érosion des falaises et la menace sur les territoires urbanisés (BRAY & HOOKE, 1997; FAIRBANK & JAKEWAYS, 2006). Outre les incertitudes associées aux taux de recul, la dynamique régressive des falaises ne se fait pas de manière continue mais par à-coups (PINOT, 1998 ; LETORTU *et al.*, 2015). Les taux de recul historiques ne reflètent donc pas l'ampleur du recul à court terme. Ainsi, l'indicateur INE réalisé à l'échelle nationale indique un recul « imperceptible » pour les falaises de Pors-Hir, à Plougrescant, alors que des reculs de 2 à 3 m se sont produits en l'espace d'une journée lors de l'épisode de tempête du 2 février 2014. Tandis que le recul moyen des falaises meubles est souvent inférieur à 0,5 m/an, des reculs décimétriques sont fréquemment observés lors d'un seul événement (SUNAMURA, 2015). Une telle dynamique a une implication pour les enjeux situés en sommet de falaises. Adoptant un regard de géomorphologue sur le recul actuel des falaises meubles qui correspond au nettoyage de la couverture meuble héritée, la caractérisation de l'aléa érosion présentée dans cet article consiste à cartographier l'extension maximale des formations meubles en arrière du littoral. Cette approche est adaptée aux littoraux à falaises meubles et seulement à ce type de littoral du fait de leur étendue spatiale limitée par la falaise morte qui constitue la limite extrême qui sera atteinte par la transgression en cours, comme ce fût le cas lors des transgressions précédentes.

Cette cartographie de l'aléa à partir de la localisation des formations meubles et non par le biais des vitesses de recul permet de s'affranchir de la variable « temps » et des incertitudes sur les taux de recul. Ainsi, les cartes d'aléa n'ont plus besoin d'être réactualisées régulièrement. Prendre en compte l'étendue maximale des formations meubles permet aussi de favoriser une détermination de l'aléa spatialement plus précise. Cette cartographie du risque permet ainsi d'identifier les lieux où les actions préventives seraient nécessaires, à la fois pour la population, pour le fonctionnement du territoire et en terme de coût. Il s'agit d'une nouvelle approche conceptuelle de l'évaluation du risque d'érosion qui donne la priorité à une gestion sur le long terme des territoires littoraux.

La cartographie comme outil d'aide à la réduction du risque

La carte des zones à risque débouche sur la mise en évidence de lieux à la fois stratégiques et sensibles, information essentielle pour toute politique de prévention des risques (D'ERCOLE & METZGER, 2009). L'analyse sous SIG des caractéristiques physiques et géographiques des territoires et l'évaluation des facteurs

responsables du recul des falaises permettent d'identifier, sur chaque site, des actions possibles de réduction du risque. Celle-ci peut s'effectuer soit par la diminution des enjeux exposés (déplacement et relocalisation des installations menacées sur des terrains situés en dehors des zones à risque), soit par la diminution de l'aléa d'érosion (diminution de la sensibilité des sites à l'érosion par le drainage du versant, par exemple).

En termes d'enjeux et de planification préventive, les zones à risque identifiées sur les cartes devraient ne pas faire l'objet de nouveaux aménagements et, si ce n'est pas déjà le cas, être classées inconstructibles. Afin de limiter le risque, il est effectivement nécessaire d'éviter toute installation au sommet des falaises meubles car elles sont vouées au recul à plus ou moins long terme (BONNOT-COURTOIS & LANÇON, 2004). Des mouvements de terrain d'ampleur significative peuvent même se produire à court terme. Le problème actuel est que, dans bien des cas, les falaises meubles sont aménagées et le risque de destruction d'enjeux est déjà présent, comme on le constate sur les sites présentés dans cette étude.

Outre l'interdiction d'habitations, des principes de gestion et d'aménagement visant à atténuer les processus érosifs doivent être retenus dans ces zones à risque (PINOT, 1993, 1997; BONNOT-COURTOIS & LANÇON, 2004). Sur les sites dont le recul est conditionné principalement par des processus d'origine marine, des techniques dites « souples » tel que le rechargement de plage ou le reprofilage du versant, qui n'empêchent pas le recul du trait de côte mais permettent de l'atténuer, sont à privilégier. De plus, en comparaison aux techniques dites « dures » (enrochement, perrés...), elles ont l'avantage de ne pas stopper les échanges sédimentaires entre la plage et le versant. Pour les sites dont le recul des falaises meubles est attribué essentiellement aux processus d'origine continentale, des techniques visant à réduire les ruissellements concentrés et l'apport supplémentaire d'eau dans les sols sont à privilégier. Il est tout d'abord essentiel que les eaux usées soient raccordées car les infiltrations liées aux habitations multiplieraient par deux voire trois, la vitesse de recul du trait de côte (BONNOT-COURTOIS *et al.*, 2008). Le drainage des versants permettra également de limiter les déstabilisations de terrain. Il est important également d'éviter les terrassements en sommet de falaise et les sentiers côtiers qui favorisent la concentration des eaux de ruissellement. L'idéal est de conserver une bande végétalisée sur plusieurs mètres en arrière des falaises. Pour les terres agricoles, il est préconisé de cultiver parallèlement à la falaise afin de limiter les écoulements dans le sens de la pente.

La gestion du risque implique des actions préventives et de mitigation mais aussi des actions d'information des citoyens : les propriétaires riverains mais aussi les personnes empruntant le sentier côtier et la plage. Pour cela, des panneaux explicatifs peuvent être implantés à l'entrée des secteurs à risque afin d'informer la population du risque d'instabilité de falaise.

Autres utilisations de la cartographie du risque

La carte des zones à risque peut être utilisée pour évaluer la valeur des enjeux menacés et ainsi identifier les projets d'aménagement les plus pertinents. Ainsi, pour des enjeux menacés à faible coût monétaire, le laisser-faire ou l'intervention limitée par une protection souple du littoral pourront être privilégiés. A l'inverse, pour de forts enjeux pouvant menacer la vie humaine, la fixation du trait de côte ou la relocalisation sur des terrains situés en dehors des zones à risque seront à privilégier. Les cartes des zones à risque peuvent être utilisées pour hiérarchiser les enjeux au regard de leur valeur marchande (LE BERRE *et al.*, 2014; BERNATCHEZ *et al.*, 2015) ou d'utilité (économique, stratégique, environnementale, affective...) (DREJZA, 2015).

La cartographie peut également être utilisée pour évaluer la vulnérabilité des territoires côtiers à l'érosion via l'utilisation d'indicateurs qui incluent des variables permettant de caractériser la sensibilité physique de la côte et la composante sociale de la vulnérabilité du territoire (GORNITZ, 1990; SHAW *ET AL.*, 1998; BORUFF *ET AL.*, 2005; MEUR-FEREC, 2006; DEL RIO & GRACIA, 2009; GAKI-PAPANASTASSIOU *ET AL.*, 2010; McLAUGHLIN & COOPER, 2010; DREJZA, 2015).

Les informations apportées par l'utilisation de la cartographie montrent que l'étude géomorphologique de terrain, naturaliste et quantitative, associée à la géomatique, représente un outil essentiel pour une appréhension globale du risque d'érosion des falaises meubles. La méthodologie présentée dans l'article est une approche qualitative qui vise à étudier le risque au sens large et sous différents angles : approche géomorphologique permettant d'étudier les facteurs et les processus physiques à l'origine de l'érosion ; approche géographique permettant d'identifier les enjeux menacés et les stratégies de gestion à adopter. Elle présente l'avantage d'être facilement réutilisable aussi bien par les équipes de recherche que par les gestionnaires des services déconcentrés de l'Etat et des collectivités territoriales.

CONCLUSION

La cartographie du risque d'érosion des falaises meubles présentée dans cet article est basée sur le croisement de la localisation des formations meubles avec les enjeux exposés. La méthodologie s'appuie sur des observations de terrain et une analyse spatiale sous SIG. La méthode de cartographie du risque d'érosion présentée ici, permet de s'affranchir des incertitudes sur les vitesses de recul et de délimiter l'ensemble des zones qui sont assujetties aux risques d'érosion côtière et où il semblerait prudent d'interdire toutes nouvelles

constructions. La cartographie du risque sur les six sites d'étude a montré que les terrains résidentiels et agricoles représentent une part importante des enjeux menacés par le recul des falaises meubles en Bretagne. Cette cartographie permet de mettre en évidence les secteurs dont les enjeux sont significatifs, notamment lorsque le sommet de falaise est entièrement urbanisé. La cartographie représente un moyen d'identifier les processus physiques impliqués dans le recul des falaises, ce qui est essentiel dans le choix des techniques d'adaptation. Cette démarche est donc adaptée à une gestion sur le long terme des territoires littoraux à falaises meubles. Elle est opérationnelle et applicable à d'autres secteurs côtiers à falaises meubles, et constitue ainsi un outil d'aide à l'aménagement et la gestion des risques sur les zones côtières.

Remerciements

Les recherches et développements présentés dans cet article ont été financés par la Région Bretagne (allocation de recherche doctorale), l'Ecole Doctorale des Sciences de la Mer et du Littoral, l'ISBlue et le Labex Mer (aides de l'État gérées par l'Agence Nationale de la Recherche au titre des programmes « Investissements d'avenir » portant respectivement la référence ANR-17-EURE-0015 et ANR-10-LABX-19) et la Fondation de France dans le cadre du projet Osiris (référence 1539).

BIBLIOGRAPHIE

- ADAMS, J. & CHANDLER, J., 2002. Evaluation of LIDAR and medium scale photogrammetry for detecting soft-cliff coastal change. *Photogramm. Rec.* 17, 405–418.
- ANDRE, C., 2013. Analyse des dommages liés aux submersions marines et évaluation des coûts induits aux habitations à partir de données d'assurance : perspectives apportées par les tempêtes Johanna (2008) et Xynthia (2010). Thèse de doctorat. Université de Bretagne occidentale-Brest.
- BARKWITH, A., THOMAS, C.W., LIMBER, P.W., ELLIS, M.A. & MURRAY, A.B., 2014. Coastal vulnerability of a pinned, soft-cliff coastline—Part I: Assessing the natural sensitivity to wave climate. *Earth Surf. Dyn.* 2, 295–308.
- BASARA, N., HENAFF, A. & LE DANTEC, N., à paraître. Méthodologie de sélection de sites pour l'étude et le suivi des risques côtiers d'érosion des falaises meubles en Bretagne. *Géomorphologie Relief Process. Environ.*
- BERNATCHEZ, P., DREJZA, S. & DUGAS, S., 2012. Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral des îles de la Madeleine. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec. Laboratoire LDGIZC, Université du Québec à Rimouski.
- BERNATCHEZ, P., DUGAS, S., FRASER, C. & DA SILVA, L., 2015. Évaluation économique des impacts potentiels de l'érosion des côtes du Québec maritime dans un contexte de changements climatiques. Rapport remis à Uranos. Laboratoire LDGIZC, Université du Québec à Rimouski.
- BIVILLE, M., 2004. Les falaises meubles des Côtes Nord Bretonnes, Dynamique morphogénique et risques induits. Rapport de recherche remis à l'Université de Bretagne occidentale-Brest.
- BIVILLE, M. & VAN WAERBEKE, D., 2003. Les risques induits par le recul des falaises meubles sur les côtes nord-bretonnes : difficultés croissantes de la gestion du sentier côtier. *Hommes Terres Nord* 1, 55–63.
- BONNOT-COURTOIS, C., FEISS-JEHEL, C. & DE SAINT LEGER, E., 2008. Vulnérabilité des rivages en Côtes d'Armor (Bretagne Nord, France) : aléas et enjeux. *Xème Journ. Natl. Génie Côtier-Génie* 155, 10.
- BONNOT-COURTOIS, C. & LANÇON, G., 2004. «Erosion littorale. Evaluation du risque. Phase 2 : Caractérisation de l'aléa érosion sur le littoral des Côtes d'Armor». Rapport UMR 8586 PRODIG CNRS remis à la DDE 22.
- BORUFF, B.J., EMRICH, C. & CUTTER, S.L., 2005. Erosion hazard vulnerability of US coastal counties. *J. Coast. Res.* 932–942.
- BOSSIS, M.-L., 2016. Plan de Prévention des Risques Naturels Littoraux "Ouest-Odet"- Phase 1 : Analyse préalable du site. Rapport Egis eau remis à la Préfecture du Finistère.
- BRAY, M.J. & HOOKE, J.M., 1997. Prediction of soft-cliff retreat with accelerating sea-level rise. *J. Coast. Res.* 453–467.
- BROOKS, S.M., SPENCER, T. & BOREHAM, S., 2012. Deriving mechanisms and thresholds for cliff retreat in soft-rock cliffs under changing climates: Rapidly retreating cliffs of the Suffolk coast, UK. *Geomorphology* 153, 48–60.
- BROWN, S., 2008. Soft cliff retreat adjacent to coastal defences, with particular reference to Holderness and Christchurch Bay, UK. Thèse de doctorat. University of Southampton.
- CARPENTER, N.E., STUIVER, C., NICHOLLS, R., POWRIE, W. & WALKDEN, M., 2012. Investigating the recession process of complex soft cliff coasts : an Isle of Wight case study. *Coast. Eng. Proc.* 1, 123.
- CEPRI, 2011. L'ACB (analyse coût/bénéfice) : une aide à la décision au service de la gestion des inondations. Guide à l'usage des maîtres d'ouvrage et de leurs partenaires, Les guides du CEPRI.

- COSTA, S., LAGEAT, Y., HENAFF, A., DELAHAYE, D. & PLESSIS, E., 2003. Origine de la variabilité spatiale du recul des falaises crayeuses du nord-ouest du Bassin de Paris. L'exemple du littoral haut-normand (France). *Hommes Terres Nord* 1, 22–31.
- CREACH, A., 2015. Cartographie et analyse économique de la vulnérabilité du littoral atlantique français face au risque de submersion marine. Thèse de doctorat. Université de Nantes.
- Crowell, M., Leikin, H., Buckley, M.K., 1999. Evaluation of coastal erosion hazards study: an overview. *J. Coast. Res.* 2–9.
- DAVIDSON-ARNOTT, R., 2010. Introduction to coastal processes and geomorphology. Cambridge University Press, p. 396-434.
- DEL RÍO, L. & GRACIA, F.J., 2009. Erosion risk assessment of active coastal cliffs in temperate environments. *Geomorphology* 112, 82–95.
- D'ERCOLE, R. & METZGER, P., 2009. La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain. *Cybergeo Eur. J. Geogr.*
- DERNIER, H., 2010. Enquête sur l'aménagement du Site de Pors-Hir (No. E10000142/35). Rapport remis au tribunal administratif de Rennes.
- DHI, 2016. Plan de prévention des risques littoraux et d'inondation par débordement de cours d'eau de la Baie de Saint-Brieuc. Rapport remis à la Préfecture des Côtes-d'Armor.
- DOUGLAS, B.C & CROWELL, M., 2000. Long-term shoreline position prediction and error propagation. *J. Coast. Res.* 145–152.
- DREJZA, S., FRIESINGER, S. & BERNATCHEZ, P., 2015. Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Volume 3. Rapport remis au Ministère des Transports du Québec. Laboratoire LDGIZC, Université du Québec à Rimouski.
- EUROSION, 2004. Vivre avec l'érosion côtière en Europe. Espaces et sédiments pour un développement durable. Commission Européenne (CE).
- FAIRBANK, H. & JAKEWAYS, J., 2006. Mapping coastal evolution and risks in a changing climate - a training pack. Cent. Coast. Environ. Ventnor.
- FORSYTH, P.J., 2009. Planning on a retreating coastline : Oamaru, North Otago, New Zealand. GNS Science.
- GAKI-PAPANASTASSIOU, K., KARYMBALIS, E., POULOS, S., SENI, A. & ZOUVA, C., 2010. Coastal vulnerability assessment to sea-level rise based on geomorphological and oceanographical parameters : the case of Argolikos Gulf, Peloponnese, Greece. *Hell. J. Geosci.* 45, 109–121.
- GEOLITT, 2016. Plan Local d'Urbanisme Commune de Pléneuf-Val-André. GEOLITT.
- GORNITZ, V., 1990. Vulnerability of the East Coast, USA to future sea level rise. *J. Coast. Res.* 9, 201–237.
- GREENWOOD, R.O. & ORFORD, J.D., 2008. Temporal patterns and processes of retreat of drumlin coastal cliffs-Strangford Lough, Northern Ireland. *Geomorphology* 94, 153–169.
- GUEREMY, P. & MARRE, A., 1996. Une nouvelle méthode de cartographie géomorphologique applicable aux aléas naturels. *Trav. Inst. Géographie Reims* 24, 5–40.
- HEDOU, F., ROCHE, A., TRMAL, C. & DENIAUD, Y., 2015. Méthodologie d'élaboration de l'indicateur national d'érosion côtière, in: Proceedings of Colloque MerIGéo 2015. p. 69–72.
- HENAFF, A., LE CORNEC, E., JABBAR, M., PETRE, A., CORFOU, J., LE DREZEN, Y. & VAN VLIËT-LANOË, B., 2018. Caractérisation des aléas littoraux d'érosion et de submersion en Bretagne par l'approche historique. *Cybergeo Eur. J. Geogr.*
- HENAFF, A., MEUR-FEREC, C. & LAGEAT, Y., 2013. Changement climatique et dynamique géomorphologique des côtes bretonnes. Leçons pour une gestion responsable de l'imbrication des échelles spatio-temporelles. *Cybergeo Eur. J. Geogr.*
- HENAFF, A. & PHILIPPE, M., 2014. Gestion des risques d'érosion et de submersion marines : Guide méthodologique. *Projet Cocorisco*, p.45-46, 56.
- JOLY, F., 1997. Glossaire de géomorphologie. Paris, Armand Colin, 325p.
- JOLY, F., 1962. Principes pour une méthode de cartographie géomorphologique. *Bull. Assoc. Géographes Fr.* 39, 270–278.
- KLEIN, R.J., NICHOLLS, R.J. & MIMURA, N., 1999. Coastal adaptation to climate change: can the IPCC Technical Guidelines be applied? *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* 4, 239–252.
- LAFORGE, M. & HUET, B., 2013. Variations eustatiques pléistocènes sur la côte de Penthièvre (Côtes-d'Armor, France) au cours des trois derniers cycles interglaciaire/glaciaire et occupations paléolithiques associées. *Br. Archaeol. Rep.*
- LANDREAU, B., 2018. Stratégie de trait de côte dans le Morbihan - Phase 1 : Sensibilité des territoires littoraux à l'érosion. Cerema-Direction territoriale Ouest.
- LE BERRE, I., BAILLY, D., PHILIPPE, M. & KATO, Y., 2014. Analyse économique des enjeux exposés aux risques côtiers : application au bâti résidentiel de Bretagne, in: *Connaissance et Compréhension Des Risques Côtiers : Aléas, Enjeux, Représentations, Gestion.* p. 204–213.

- LE CORNEC, E., FIERE, M., GRUNNET, N. & PEETERS, P., 2008. Etude de connaissance des phénomènes d'érosion sur le littoral vendéen. Rapp. Dan. Hydraul. Inst. Fr. Pour DDE85.
- LEONE, F., 2007. Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes naturelles : contribution à une évaluation géographique multirisque (mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones). Thèse de doctorat. Université Paul Valéry-Montpellier III.
- LEONE, F. & VINET, F., 2006. La vulnérabilité, un concept fondamental au coeur des méthodes d'évaluation des risques naturels. Vulnérabilité Sociétés Territ. Face Aux Menaces Nat.
- LETORTU, P., COSTA, S., MAQUAIRE, O., DELACOURT, C., AUGEREAU, E., DAVIDSON, R., SUANEZ, S. & NABUCET, J., 2015. Retreat rates, modalities and agents responsible for erosion along the coastal chalk cliffs of Upper Normandy: The contribution of terrestrial laser scanning. *Geomorphology* 245, 3–14.
- LEVOY, F. & MONFORT, O., 2009. Détermination des aléas littoraux : outils et méthodes pour la délimitation des zonages. *Houille Blanche* 24–31.
- LOYER, S., VAN VLIET-LANOE, B., MONNIER, J.-L., HALLEGOUET, B. & MERCIER, N., 1995. La coupe de Nantois (Baie de Saint-Brieuc, France) : Datations par thermoluminescence (TL) et données paléoenvironnementales nouvelles pour le Pléistocène de Bretagne. *Quaternaire* 6, 21–33.
- MARRE, A., 2007. Cartographie géomorphologique et cartographie des risques. *Bull. Assoc. Géographes Fr.* 84, 3–21.
- MASSELINK, G., AUSTIN, M., SCOTT, T., POATE, T. & RUSSELL, P., 2014. Role of wave forcing, storms and NAO in outer bar dynamics on a high-energy, macro-tidal beach. *Geomorphology* 226, 76–93.
- MCLAUGHLIN, S. & COOPER, J.A.G., 2010. A multi-scale coastal vulnerability index: A tool for coastal managers? *Environ. Hazards* 9, 233–248.
- MEDDE/DGPR, 2014. Plan de prévention des risques littoraux (PPRL)-Guide méthodologique. p. 131-136.
- MEEM, 2016. Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPRN) : Guide général. La Documentation Française.
- MEUR-FEREC, C., 2006. De la dynamique naturelle à la gestion intégrée de l'espace littoral. Mémoire en vue de l'Habilitation à Diriger des Recherches. Université de Nantes.
- MORTON, R.A., LEACH, M.P., PAINE, J.G. & CARDOZA, M.A., 1993. Monitoring beach changes using GPS surveying techniques. *J. Coast. Res.* 702–720.
- PASKOFF, R., 2010. Les littoraux : impact des aménagements sur leur évolution, Elsevier Masson. ed, Pratiques de la Géographie. Paris, p.209-230.
- PASKOFF, R., 2001. L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers : le mythe et la réalité. Institut océanographique, p.117-152.
- PERHERIN, C., CHRISTIN, N., DENIAUD, Y. & ROUCHON, D., 2015. Etude des aléas littoraux dans le cadre d'une analyses coûts-bénéfices (ACB). Cerema.
- PERHERIN, C. & ROCHE, A., 2010. Évolution des méthodes de caractérisation des aléas littoraux, in: XIèmes Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil. Editions Paralia CFL, p. 609–616.
- PINOT, J.P., 1998. La Gestion du littoral. Tome 1 : Littoraux tempérés, côtes rocheuses et sableuses. Inst. Océan. Paris 400.
- PINOT, J.P., 1997. Rapport sur les risques liés à l'évolution du littoral entre Penvénan et Plouha. SMVM-DDE 22, 123.
- PINOT, J.P., 1993. L'évolution du littoral autour de la baie de Lannion et sur la côte de Granit Rose. SMVM-DDE 22, 120.
- PREMAILLON, M., REGARD, V., DEWEZ, T. & AUDA, Y., 2017. How to explain variations in sea cliff erosion rates? Insights from a literature synthesis. *Earth Surf. Dyn.* 19, 8012.
- QUINN, J.D., PHILIP, L.K. & MURPHY, W., 2009. Understanding the recession of the Holderness Coast, east Yorkshire, UK: a new presentation of temporal and spatial patterns. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 42, 165–178.
- RODET, J., 2013. Karst et évolution géomorphologique de la côte crayeuse à falaises de la Manche. L'exemple du Massif d'Aval (Etretat, Normandie, France). *Quat. Rev. Assoc. Fr. Pour l'étude Quat.* 24, 303–314.
- SHAW, J., TAYLOR, R.B., FORBES, D.L., RUZ, M.H. & SOLOMON, S., 1998. Sensitivity of the coasts of Canada to sea-level rise. *Geological Survey of Canada Ottawa.*
- SUNAMURA, T., 2015. Rocky coast processes: with special reference to the recession of soft rock cliffs. Proc. Jpn. Acad. Ser. B 91, 481–500.
- SUNAMURA, T., 1992. Geomorphology of rocky coasts. Wiley Chichester. 302 p.
- WENTWORTH, C.K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *J. Geol.* 30, 377–392.
- WOODROFFE, C.D., 2002. Coasts: form, process and evolution. Cambridge University Press, p143-188.
- YOUNG, A.P., OLSEN, M.J., DRISCOLL, N., FLICK, R.E., GUTIERREZ, R., GUZA, R.T., JOHNSTONE, E. & KUESTER, F., 2010. Comparison of airborne and terrestrial lidar estimates of seacliff erosion in southern California. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 76, 421–427.

Annexe 1 : Éléments composant les cartes géomorphologiques.

1. TOPOGRAPHIE

- Courbes de niveau
- Isobathes
 - Cote d'altitude en m
- ∩ ∩ Rupture de pente concave
- ∧ ∧ Rupture de pente convexe

2. HYDROGRAPHIE

- Cours d'eau
- Etang permanent

3. MORPHOLOGIE DE LA COTE

Plate-forme d'érosion

- Platier
- Tors

Côte d'érosion

- Falaise meuble
- Falaise rocheuse
- Côte à dénudation

Côte d'accumulation

- Cordon de galets
- Dune

Figures sédimentaires

- ☺ Croissants de plage
- ←←←← Marques de ruissellement
- Falaise morte

Ouvrages de protection

- Enrochement
- Remblais
- Epis
- Mur
- Perré

4. GEOLOGIE

- Versant meuble
- Versant rocheux

Tectonique

- ∧ Pendage des formations
- Failles et fractures

Lithologie

Roches cristallines massives

- Granite du Yaudet

- Microdiorite du Verdelet

- Microgranodiorite de Pleubian

Roches cristallophyliennes

- Schiste et grès de Douarnenez
- Série méta-volcano-sédimentaire de Lannion
- Formation de Lanvollon-Erquy
- Orthogneiss monzogranitique

Formations meubles

- Formations héritées
- Altérites

5. GRANULOMETRIE DE L'ESTRAN

- Sables vaseux (inf. à 0,06 mm)
- Sables fins (0,06 à 0,2 mm)
- Sables moyens (0,2 à 0,5 mm)
- Sables grossiers (0,5 à 2 mm)
- Graviers et cailloux (2 à 64 mm)
- Blocs (sup. à 256 mm)

6. PROCESSUS PHYSIQUES

Marins

- Dérive littorale
- Direction principale des houles
- Limite PMVE

Continentaux

- Direction principale d'écoulement des eaux
- Résurgence d'eau

7. FORMES D'EROSION

Origine marine

- ∩ Encoche marine
- ∩ Sous-cavage

Origine continentale

- Masse effondrée
- Eboulis
- Zone de glissement active
- Niche d'arrachement
- Chablis
- Trou de suffosion

Annexe 2 : Organisation des entités créés sous SIG et sources des données.

Rubrique	Sous-rubrique	Entité	Attribut	Sources et bases de données
Topographie	Continentale	Courbes de niveau	Altitude (m)	BD Topo (IGN)
		Zéro NGF		
		Cote d'altitude	Altitude (m)	
		Rupture de pente	Morphologie (concave ou convexe)	Observations de terrain
	Marine	Isobathes		Scan 25 (IGN)
		Zéro Hydrographique		
Hydrographie		Cours d'eau		BD Topo (IGN), Photographies aériennes (IGN), Observations de terrain
		Etang permanent		
Morphologie de la côte	Plate-forme d'érosion	Tors		Observations de terrain, Photographies aériennes de 2015 (IGN)
		Platier		
	Côte d'érosion	Falaise meuble		
		Falaise rocheuse		
		Côte à dénudation		
	Côte d'accumulation	Cordon de galets		
		Dune		
	Ancienne côte d'érosion	Falaise morte		
	Figures sédimentaires	Croissants de plage		
		Marques de ruissellement		
	Côte artificialisée	Enrochement		
		Mur	Année de construction / de mise en place	
		Perré		
		Epis		
Remblais				
Géologie	Lithologie	Roches cristallines massives	Nom et nature de la formation	Observations de terrain, cartes géologiques au 1 : 50 000 (BRGM)
		Roches cristallophyliennes		
		Formations meubles	Formations héritées ou altérées	
	Tectonique	Failles	Orientation et pendage (degré)	
		Fractures		
Granulométrie de l'estran		Sédiments	Classe granulométrique (sables vaseux aux blocs)	Observations de terrain, BD Sextant (IFREMER)
Caractéristiques des processus physiques	Marins	Dérive littorale		Observations de terrain
		Limite des Pleines Mers de Vives eaux	Coefficient de marée	
		Houles	Direction principale, période, hauteur significative moyenne	BD ANEMOC (Cerema)
	Continentaux	Écoulements d'eau continentale	Direction principale	Observations de terrain, BD Topo (IGN)
		Résurgence d'eau		Observations de terrain
		Bouche d'évacuation d'eau		
Formes d'érosion	Origine marine	Encoche		Observations de terrain
		Grotte, cavité		
	Origine continentale	Masse effondrée		
		Eboulis		
		Zone de glissement active		
		Niche d'arrachement		
		Chablis		

		Trou de suffosion		
Enjeux	Humains	Bâti	Utilisation (résidentielle, de service, de stockage)	Photographies aériennes de 2015 (IGN), Observations de terrain
		Terrain privés		
		Sentier côtier		
	Economiques	Terrains agricoles		
		Activités touristiques et économiques		
		Voie d'accès à la mer	Escaliers, cale	
	Stratégiques	Routes	Classement (nationale, départementale, communale)	
		Aire de stationnement (parking)	Constitution (béton, gravillons)	
	Environnementaux	Milieu semi-naturel		

