



HAL
open science

Le littoral : caractérisation et gestion d'un espace à risques

Frédéric Leone, Freddy Vinet

► **To cite this version:**

Frédéric Leone, Freddy Vinet (Dir.). Le littoral : caractérisation et gestion d'un espace à risques. Presses universitaires de la Méditerranée, 78 p., 2013, Géorisques, 978-2-36781-002-7. hal-03051069

HAL Id: hal-03051069

<https://hal.science/hal-03051069>

Submitted on 8 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Le littoral : caractérisation et gestion d'un espace à risques

Collection « Géorisques »

Directeurs de collection :
Frédéric LEONE, Freddy VINET

Comité scientifique :
Albert COLAS, Frédéric LEONE, Nancy MESCHINET DE RICHEMOND,
Tony REY, Freddy VINET

La collection « Géorisques » est une publication annuelle consacrée à la géographie des risques naturels. Les numéros thématiques privilégient les approches méthodologiques, ce qui n'exclue pas de publier des numéros consacrés à des terrains spécifiques : littoraux, montagneux ou îliens.

Les ouvrages de la collection regroupent des articles sélectionnés suite aux rencontres « Géorisques » organisées dans le cadre du master *Gestion des catastrophes et des risques naturels* (G.C.R.N.) de l'université Paul-Valéry. La publication bénéficie également du soutien de l'U.M.R. « Gouvernance, risque, environnement, développement » (GRED).

L'objectif de la collection est de confronter les approches des chercheurs et des praticiens sur des problématiques récentes.

Le littoral : caractérisation et gestion d'un espace à risques

Sous la direction de Frédéric Leone & Freddy Vinet
(université Paul-Valéry Montpellier 3)

GÉORISQUES n° 4
Collection de l'U.M.R. GRED
(université Paul-Valéry Montpellier 3)

Illustration de couverture :
Photomontage réalisé par les PULM à partir d'une orthophoto I.G.N. (2008) de Mayotte
provenant du Conseil général de Mayotte, avec leur aimable autorisation.

Mots-clés : risques, vulnérabilités, gestion, littoral, tsunami, érosion.

Tous droits réservés, PULM, 2013.

ISBN 978-2-36781-002-7

Sommaire

<i>Éditorial : Le littoral, caractérisation et gestion d'un espace à risques</i> Jean-Marie MIOSSEC, Freddy VINET & Frédéric LEONE	9
1 <i>Étude diachronique (1946 à 2006) de l'évolution du trait de côte de la plage de Sidi Abed (côte Atlantique Marocaine)</i> Khalid EL KHALIDI, Mohamed CHAIBI, Frédéric LEONE, Bendahhou ZOURARAH, Jean-Philippe CHEREL & Mouhamed MANNAN	13
2 <i>Impacts et risques environnementaux dans la zone des Niayes : l'exemple du lac Retba (Grande Côte, Sénégal)</i> Tony REY, Amadou DIOP & Jean-Charles DENAIN	19
3 <i>Niveaux marins extrêmes dans le Golfe du Lion : variabilité contemporaine et future (1905-2100)</i> Albin ULLMANN	27
4 <i>Vulnérabilité face aux aléas naturels littoraux et accès aux ressources : perspectives aux Philippines</i> Jean-Christophe GAILLARD, Emmanuel A. MACEDA, Élodie STASIAK, Virginie LE MASSON, Iwan LE BERRE & Maria Victoria O. ESPALDON	41
5 <i>Caractérisation de la vulnérabilité du littoral de Suscinio : l'importance du facteur patrimonial</i> Soazig PIAN & Hervé REGNAULD	49
6 <i>La gestion des risques côtiers en France métropolitaine : évolution des doctrines, inertie des pratiques?</i> Catherine MEUR-FÉREC, Yannick LAGEAT & Alain HÉNAFF	57
7 <i>Estimation de l'aléa tsunami par simulation numérique</i> Hélène HÉBERT & François SCHINDELÉ	69

Éditorial : Le littoral, caractérisation et gestion d'un espace à risques

Jean-Marie Miossec, Freddy VINET & Frédéric LEONE

U.M.R. GRED | Université Paul-Valéry Montpellier 3 & I.R.D., Route de Mende, 34199, Montpellier.

Jean-Marie.Miossec@univ-montp3.fr

Freddy.Vinet@univ-montp3.fr

Frederic.Leone@univ-montp3.fr

Les littoraux, milieux naturels mobiles sont soumis aux évolutions de trois composantes naturelles : lithosphère, hydrosphère océanique et continentale, atmosphère. S'y ajoutent les actions de l'Homme, directes ou indirectes : déficit sédimentaire, augmentation du niveau de la mer, anthropisation croissante, changements d'usages... L'évolution actuelle des rivages conduit à la conclusion que, à côté des causes générales ou naturelles du dynamisme côtier, et en particulier de son recul, des actions anthropiques ont, par la densification des littoraux, modifié les équilibres anciens et, souvent, augmenté les vulnérabilités sociétales.

Cette attraction des littoraux s'est fortement accrue depuis un siècle. De nombreuses activités se sont implantées sur cette frange étroite de contact mer/terre : commerce, pêche et aquaculture, agriculture, industrie, tourisme. L'urbanisation généralisée est le symbole de cette littoralisation. On estime aujourd'hui qu'autour du quart des habitants de la planète, environ un tiers de son produit économique, se situe sur un peu plus de 10 % de la superficie des terres émergées (Bourgou et Miossec, 2010). En Méditerranée, ce sont près de 68 millions de personnes qui vivent à moins de 5 km du trait de côte (figure 1). Cette littoralisation massive de la population mondiale a fait basculer ces espaces du monde vide au monde plein. Elle s'est accompagnée d'interventions humaines qui ont entraîné une déstabilisation de l'environnement littoral, et, en certains cas, une dégradation sans précédent.

Ces évolutions tendanciellees se manifestent parfois par des ruptures plus ou moins graves dans la dynamique des littoraux. La tempête Xynthia et les submersions marines consécutives en Vendée et Charente-Maritime en février 2010 sont l'expression même de cette dynamique intermittente. Les événements extrêmes rares peuvent intervenir dans un contexte anthropique qui a rapidement changé. Le réchauffement climatique n'entre pas en considération lorsqu'il s'agit de faire face aux événements rares de grande ampleur, qu'il s'agisse des submersions marines d'origine atmosphérique ou des tsunamis (Hébert et Schindelé, dans ce volume). Dans le cas des événements rares de forte magnitude, c'est l'évolution des enjeux et de leurs

vulnérabilités qui détermine l'ampleur des catastrophes. En cela, la submersion marine de Xynthia fut révélatrice de l'occupation récente (moins de 50 ans) du littoral par des populations âgées vulnérables.

Ainsi la notion d'échelle de temps est-elle fondamentale dans la prise en compte de l'aménagement des littoraux : le temps des tendances lourdes (le siècle), le temps des cycles (marée, saisons) et le temps de l'instantané : le tsunami, la tempête, l'événement-rupture, catharsis inévitable des dynamiques environnementales. Les temporalités de l'ingénieur, de l'urbaniste, du promoteur-lotisseur, de l'usager, ne sont, elles non plus, pas les mêmes, pas plus que celles du politique, scandées par les échéances électorales. Leur perception du changement de l'environnement et de la donne institutionnelle — en particulier réglementaire — est variable. Ce volume rassemble plusieurs contributions qui ont pour trait commun d'aborder directement ou indirectement ces discontinuités temporelles.

La question du réchauffement de l'atmosphère est bien sûr une entrée devenue classique dans les risques littoraux. Toutefois, cette question doit être relativisée. Les incertitudes sont nombreuses sur l'évolution des marqueurs climatiques non thermiques c'est-à-dire sur les réponses anémométriques ou pluviométriques régionales au réchauffement de l'atmosphère. Ullmann (dans ce volume) ne trouve pas de tendance bien affirmée dans l'évolution de la fréquence et de l'intensité des tempêtes dans le golfe du Lion. En revanche, si l'augmentation observée du niveau marin se confirme, elle aggravera, à intensité égale, les conséquences des tempêtes en termes d'érosion et de submersion marine, comme c'est déjà le cas sur le littoral atlantique marocain (El Khalidi *et al.*, dans ce volume). Le réchauffement climatique, plus qu'un risque, peut être un facteur de risque. Dans le cas des falaises normandes (Meur-Ferec *et al.*, dans ce volume), le réchauffement climatique par le biais de l'eustatisme est au pire un accélérateur de la tendance séculaire au recul du trait de côte. Pian et Regnaud (dans ce volume) montrent que les témoins archéologiques sont à la fois les marqueurs et les enjeux de l'augmentation du niveau de la mer dans le sud de la Bretagne.

Au-delà des dynamiques croisées des éléments naturels eux mêmes, la fragilité des milieux côtiers tient autant à l'évolution des pressions anthropiques. Rey *et al.* (dans ce volume) montrent bien que l'assèchement des Niayes de la côte nord ouest du Sénégal est une tendance lourde consécutive à la fermeture des communications mer-lagune par progradation du cordon littoral. Toutefois, l'augmentation récente de la pression anthropique (pompage dans la nappe phréatique, déboisement, agriculture intensive...) explique l'accélération de la dégradation récente du milieu.

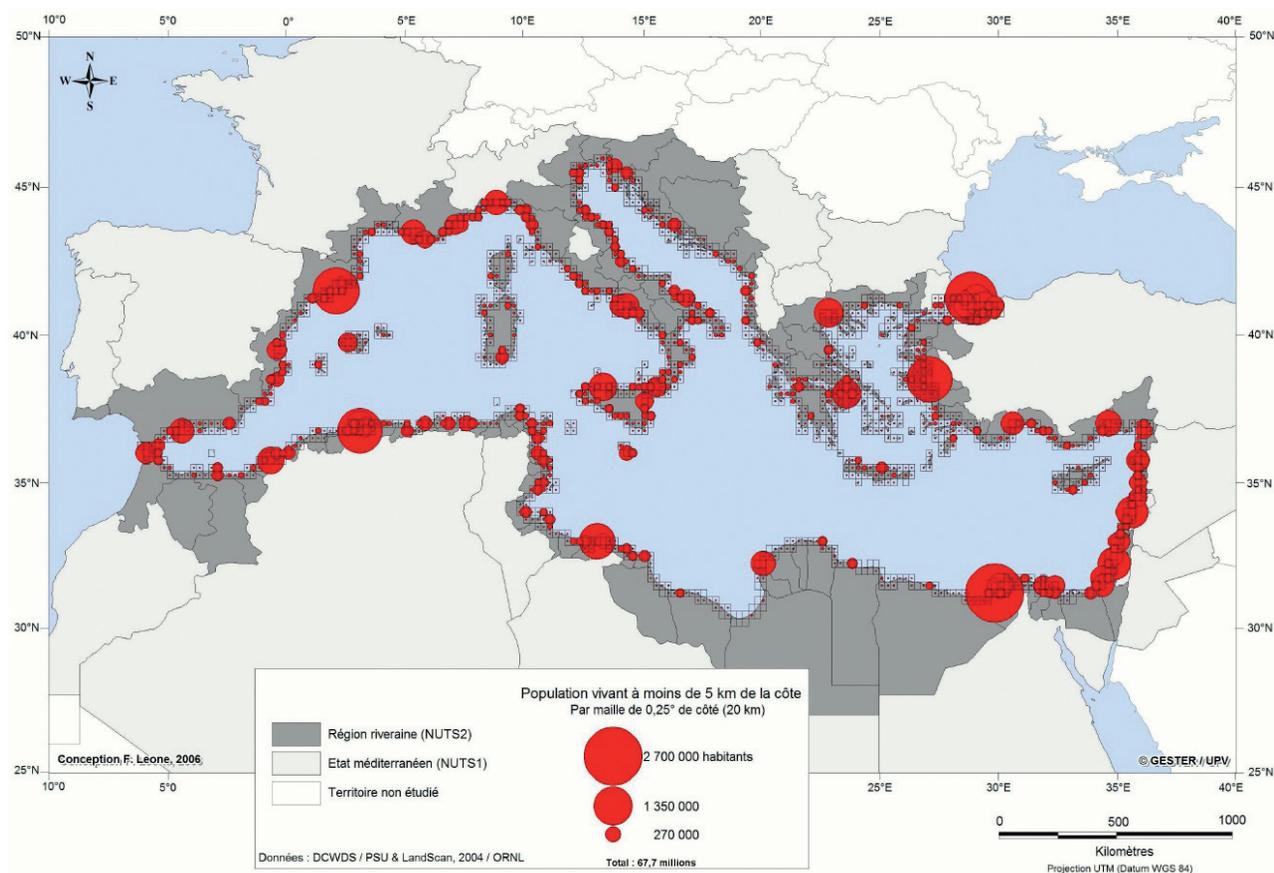


Fig. 1. — Estimation de la population littorale du bassin méditerranéen (inédit).

Des contributions abordent la question des solutions face aux dégradations environnementales et aux menaces qui affectent les littoraux. Face à ces dégradations, les pays riches ont semble-t-il accepté le principe d'une mobilité du littoral. Ainsi les grandes périodes d'endiguement massif ou de protection « dure » paraissent-elles révolues. Pourtant Meur-Férec et *al.* (dans ce volume) constatent que la tendance au durcissement du littoral et à la fixation du trait de côte perdure malgré quelques contre-exemples retentissants. Dans les pays pauvres, la réduction de la vulnérabilité est une priorité. Comme Rey et *al.* au Sénégal, Gaillard et *al.* (dans ce volume) observent sur les littoraux des Philippines soumis aux cyclones et aux marées de tempête une forte vulnérabilité des populations locales liées aux faibles ressources qui n'offrent pas de marge d'ajustement face à la variabilité de ces ressources et aux menaces naturelles récurrentes.

L'amélioration de la connaissance des littoraux confirme les inquiétudes que l'on pouvait avoir déjà, il y a plusieurs décennies. André Guilcher livrait, déjà en 1990 une synthèse, fruit de sa connaissance de terrain de l'océan mondial et de ses rivages. Il prônait une « philosophie des rivages » (Guilcher, 1990). Celle-ci commence à se conforter, de nos jours, dans une vision globale de la problématique littorale. Après avoir cheminé parallèlement, littoralistes naturalistes et littoralistes humanistes confluent désormais dans la prise en compte du risque littoral, risque souligné par les événements-ruptures fortement médiatisés. Il serait cependant dangereux et erroné de s'engager dans une voie

généraliste et globalisante : le recul des côtes n'est pas universel et « la gestion du littoral ne doit pas suivre des règles générales et inflexibles : il faut procéder au coup par coup, après examen soigneux des différents facteurs en cause » (Guilcher, 1990). C'est cette idée d'intervention modulée et graduée que reprenait Roland Paskoff dans *Côtes en danger* : « l'idée de base est qu'il ne faut surtout pas être prisonnier de principes rigides et absolus. Les décisions doivent être prises en tenant compte des situations particulières, après une étude approfondie de la tendance évolutive du rivage et des risques qui lui sont associés, des enjeux économiques et sociaux, de l'intérêt offert par les faits de nature » (Paskoff, 1993).

Les perspectives de gestion de ces espaces particuliers doivent s'appuyer sur une connaissance approfondie de chaque secteur côtier, en développant l'analyse à différents niveaux scalaires. La gouvernance des côtes ne saurait se satisfaire de critères englobants : chaque territoire littoral a sa spécificité, des conditions environnementales particulières, des réponses spécifiques des populations, en fonction de leurs moyens et de leurs conceptions de gestion de crise et de danger marin et littoral. Celles-ci sont fortement influencées par le caractère maritimiste ou non maritimiste de ces populations ripuaires, qui, pour beaucoup, aujourd'hui, sont issues de l'intérieur des terres. Avec l'accentuation de la densification inconsidérée des littoraux, les risques qui les menacent et les menaceront dans l'avenir, naissent, pour la plupart d'entre eux, d'une mauvaise gestion de ces espaces exigus, fragiles et mouvants.

Bibliographie

BOURGOU M. (éd.), *Les littoraux, entre nature et société*, E.N.S. Tunis et éditions Sahar, 2007, 360 p.

BOURGOU M. et MIOSSEC J.-M., *Les littoraux. Enjeux et dynamiques*, PUF, coll. L, 2010, 295 p. + compléments sur le site des PUF.

GUICHER A., « Vers une philosophie des rivages », *Cahiers nantais* n° 35-36, 1990, p. 3-15.

PASKOFF R., *Côtes en danger*, Masson, 1993, 250 p.

1 Étude diachronique (1946 à 2006) de l'évolution du trait de côte de la plage de Sidi Abed (côte Atlantique marocaine)

Khalid EL KHALIDI*, **Mohamed CHAIBI**,
Frédéric LEONE, **Bendahhou ZOURARAH**,
Jean-Philippe CHEREL &
Mouhamed MANNAN

**UFR-Doctorat Environnement, Aménagement et Gestion Intégrée des Espaces Littoraux. Laboratoire Géosciences Marines, Faculté des Sciences, El Jadida, Maroc.*

elkhalidi_khalid@yahoo.fr

Résumé. — L'évolution historique du trait de côte de la plage Sidi Abed a été identifiée à partir de la carte topographique 1/25000^e et les photographies aériennes des missions de 1946, 1949, 1966, 1989, 1997 et 2006. Ces dernières sont comparées et analysées de manière à obtenir des cartes d'évolution du littoral qui donnent des taux moyens de recul ou d'avancée du trait de côte. Les observations sur la plage de Sidi Abed montrent que le trait de côte est caractérisé par une variabilité morphologique spatiale et temporelle non négligeable. Cette analyse permet de différencier deux secteurs qui ont évolué de manière différente pendant 60 ans.
Mots-clés. — Plage Sidi Abed, étude diachronique, trait de côte, érosion.

Title. — *Diachronic Study (from 1946 to 2006) of the Shoreline Evolution of the Beach of Sidi Abed (Moroccan Atlantic Coast)*

Abstract. — *The historical evolution of the shoreline of the beach Sidi Abed was given from the 1:25000 topographic map and the aerial photographs of 1946, 1949, 1966, 1989, 1997 and 2006 missions. The shoreline of different missions was compared and analyzed to obtain evolution maps of littoral which give average rates of shoreline erosion or progression. The observations on the shoreline variations of Sidi Abed show a beach characterized by a considerable space and temporal morphological variability. This analysis makes it possible to differentiate two sectors which evolved in a different way during 60 years.*

Keywords. — *Beach Sidi Abed, Diachronic Study, Shoreline, Erosion.*

Introduction

La zone côtière ne joue pas seulement un rôle important pour le développement de l'économie nationale (tourisme, industrie...), mais présente aussi un grand enjeu pour le développement social de la population locale (Philips & Jones, 2006). Dernièrement, il a été reporté par Povh

(2000) que les trois quarts de la population mondiale seront installés à moins de 60 km du trait de côte en 2020. Cela justifie la nécessité de réaliser des études qui visent à expliquer les phénomènes qui modifient l'aspect de cette zone abritant des ressources très importantes.

La zone littorale n'est pas stable. Elle est sujette à de nombreux changements morphologiques qui résultent de forçages extérieurs naturels (houles, marées, vents, tempêtes...) et/ou anthropiques (aménagement divers). Leur prévision est un enjeu important, aussi bien au niveau scientifique qu'économique. Dans cette étude, nous nous intéressons à l'impact des conditions hydrodynamiques et des interventions humaines sur l'évolution du trait de côte. Cette évolution a été récemment abordée par plusieurs études qui ont confirmé son étroite liaison avec les changements climatiques et qui se marquent par l'activité des houles et une élévation du niveau de la mer (Crawford & Thomson, 1999 ; Douglas, 2001 ; Weihaupt & Stuart, 2000). En effet, cette élévation du niveau de mer est un des facteurs de risque pris en considération lors des futurs aménagements de la zone côtière.

Le suivi de l'évolution historique de la position du trait de côte à partir des cartes et des photographies aériennes permet la détermination du taux d'érosion ou d'accumulation d'une plage sableuse (Mary & Stephen, 2002).

La ligne des plus hauts niveaux de mer est utilisée comme indicateur du trait de côte sur les photographies aériennes. Elle est définie comme étant la partie mouillée par la dernière haute marée. La ligne de haute marée déterminée pour chaque photographie aérienne, représente la position de trait de côte pour l'année de la prise de la photo.

Hormis pour certains auteurs (Morton & Speed, 1998) qui ont lié la ligne de la plus haute marée aux conditions locales (marée et houle), cette ligne est largement utilisée comme étant le meilleur indicateur du trait de côte car elle est facile à déterminer et à interpréter sur les photos aériennes (Crowell *et al.*, 1991 ; Mary & Stephen, 2002).

1.1 Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude de Sidi Abed, située à 25 km au sud d'El Jadida, forme un bassin qui appartient à la Meseta côtière du Maroc occidental (figure 1).

La plaine des Doukkala, à laquelle appartient Sidi Abed, connaît depuis les années soixante un essor économique important avec un grand développement des activités agricoles et industrielles. Elle est également considérée pour les années à venir comme le second pôle industriel du Maroc,

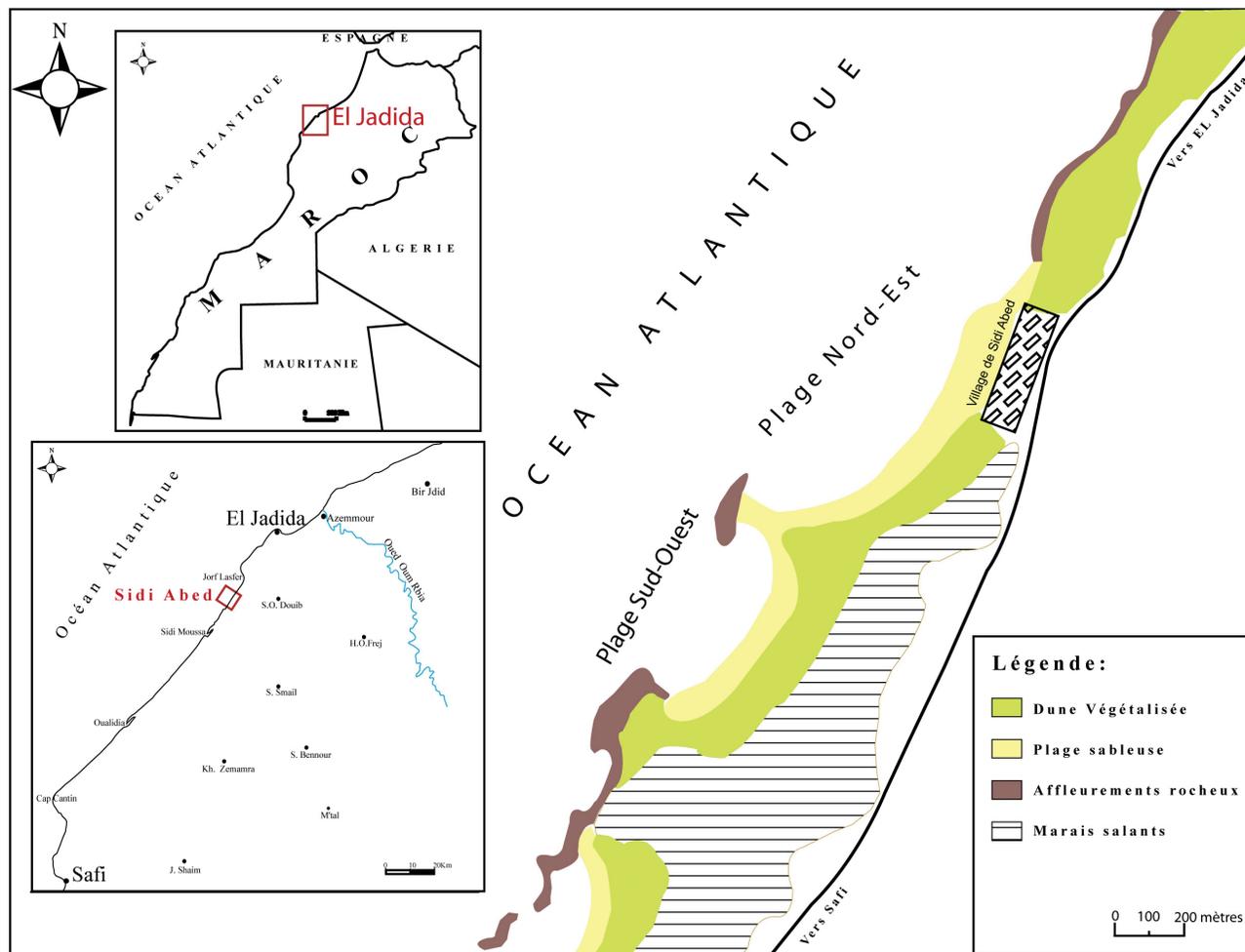


Fig. 1. — Carte de localisation de la zone d'étude (source : carte topographique 1/25000 publiée en 1991 par la Division de la Conservation Foncière et des Travaux Topographiques, Maroc).

associé à une forte expansion démographique. D'après le dernier recensement effectué en 2004, la population de Sidi Abed s'élève à quelques 20 854 habitants.

L'anthropisation au niveau des dunes bordières se traduit par divers aménagements qui ont provoqué de fortes dégradations. Or ces dunes étaient à la fois un pare-choc et une réserve de sable pour l'alimentation des plages en période d'érosion.

La plage de Sidi Abed s'alimente par les sédiments de la plate forme. Ils proviennent du large et de l'érosion des falaises cénomaniennes environnantes. Son alimentation dépend à la fois de l'état de la plage, de la direction, et de la puissance des conditions hydrodynamiques.

1.2 Conditions météorologiques et hydrodynamiques

Le climat y est de type méditerranéen semi-aride tempéré à hiver doux et à été généralement chaud et sec. Les principaux agents qui participent à la mobilisation du sable sont le vent, les houles et les courants de marées.

1.2.1 Les vents

D'après les résultats enregistrés par les stations d'El Jadida (*in* Chaibi, 2003) et de Oualidia (Carruesco, 1989), les vents dominants soufflent du nord ou de directions voisines. Cette direction est presque constante durant toute l'année, mais elle est interrompue pendant la saison des pluies. Les vents d'origine continentale (de secteurs E et S) sont relativement peu fréquents pendant l'été. Le littoral d'El Jadida est plus venté pendant l'hiver. Cela couvre la période humide (de novembre jusqu'à avril) avec des vents dominants qui proviennent des secteurs N, NE et NO. En hiver, le mois le plus calme est celui de janvier avec une moyenne qui ne dépasse pas 4 m/s. Le plus agité est le mois de mars (4,75 m/s). Pendant la saison chaude, le mois de septembre (5,2 m/s) représente le mois le plus calme tandis que le mois de mai (6,2 m/s) se caractérise par la moyenne la plus élevée. En saison sèche (de mai à septembre) dominent les vents de secteur NE. Par contre, les vents d'est constituent la direction la plus rare surtout en été, tandis que les vents de SO sont les moins fréquents.

1.2.2 La marée

La marée est de type semi diurne avec un marnage compris entre 2 et 4 mètres et un signal grossièrement sinusoïdal

d'une période de 12 h 25 min. Elle est caractérisée par deux cycles dans le même jour, deux pleines mers et deux basses mers. Pendant les marées de mortes eaux, les courants sont plus faibles avec des intensités de l'ordre de 10 à 20 cm/s. Les fortes amplitudes enregistrées pendant les mois de janvier (4,40 m), de février (4,24 et 4,40 m) et de mars (4,45) sont influencées par les vents de mer. Le maximum est atteint pendant les vives eaux du mois d'août avec 4,48 m. Les marées des mortes eaux du mois de mars représentent l'amplitude la plus faible atteinte sur toute l'année de 2001 avec une moyenne de 0,85 m (Chaibi, 2003).

1.2.3 Les houles

Les houles affectant le littoral des Doukkala proviennent généralement de l'Atlantique nord. Elles sont issues soit des dépressions passant entre les Açores et l'Islande, soit des dépressions passant sur les Açores, en direction du Portugal, du Golfe de Gascogne ou du sud de l'Irlande. Les houles prédominantes sont celles du secteur NO qui alternent avec des houles moins fortes mais plus fréquentes. Pour le secteur étudié, les stations de mesure les plus proches sont celles du port de Jorf Lasfar. Selon les données calculées à Jorf Lasfar (1991-2001, source station météorologique de Casablanca), les houles de direction O à NO sont quasi-permanentes. Les amplitudes varient de 0,5 à 7 mètres et on enregistre exceptionnellement des houles de 9 mètres. Les périodes vont de 8 à 18 secondes. Les plus fortes amplitudes sont associées à des périodes de 10 à 16 secondes. L'agitation du sud-ouest est associée aux vents locaux et apparaît uniquement en hiver. Le nombre de jours de houle de SO a été estimé à 21 jours par an, avec des amplitudes de 1 à 3 m et une période de 7 s. En conclusion, la prédominance des houles longues de direction NO pendant les mois d'hiver dans cette région est due à l'exposition frontale de la côte (orientée NE-SO) et aux longues lames en provenance des dépressions du front polaire.

1.3 Matériels et méthodes utilisés pour cette étude

La technique indirecte de suivi du trait de côte par photographies aériennes consiste en l'analyse diachronique de photos verticales. Elle reste une méthode reconnue pour appréhender l'évolution d'un littoral sableux sur plusieurs décennies.

Les études d'évolution historique du littoral servent d'abord à déterminer la tendance à long terme de l'évolution du littoral. Utilisées au départ dans un but purement « théorique », elles ont connu à partir de la fin des années 80, de plus en plus d'applications pratiques notamment pour l'estimation des changements futurs de la ligne de rivage. Pour suivre une évolution d'une date à une autre sur des photographies aériennes, il est impératif de corriger très soigneusement les déformations géométriques qui existent sur ce type de document. Les photographies aériennes sont en effet entachées de déformations géométriques dues à la prise de vue elle-même (perspective conique) et aux conditions des prises de vues (axe de l'avion, tangage, roulis, lacet). La correction de ces déformations est effectuée grâce au repérage de points invariants, communs aux différentes

photographies et aux documents cartographiques de référence. Connaissant les coordonnées de ces points, le logiciel utilisé peut calculer un modèle de déformation permettant de recalcr les différents clichés sur un document de référence. La précision du recalage sera d'autant plus grande que le nombre d'amers utilisés est important et proche de la zone à étudier. La difficulté de ce genre d'opération sur un linéaire côtier sableux en évolution tient au difficile repérage de points d'amers suffisamment nombreux.

Cette méthode présente un grand intérêt pour l'étude de telles évolutions, les photographies aériennes étant généralement des supports d'une grande précision, à condition, comme nous venons de le préciser, de corriger les distorsions géométriques et de tenir compte des différentes erreurs inhérentes à la méthode (Dolan *et al.*, 1980 ; Leathernan, 1983 ; Morton *et al.*, 1998).

Conformément à cette approche, l'évolution historique de la plage de Sidi Abed a été déterminée à partir de deux types de documents : la carte topographique au 1/25 000^e (1991, utilisée comme document cartographique de référence) et les photos aériennes des missions de 1946, 1949, 1966, 1989, 1997 et 2006. Ces dernières ont été comparées et analysées de manière à obtenir des cartes d'évolution du littoral et des taux moyens de recul ou d'avancée du trait de côte.

Les corrections géométriques et le géoréférencement des photo-aériennes ont été fait avec l'aide du logiciel de traitement d'images TNTmips. Les coordonnées cartographiques choisies sont celles de la carte au 1/25 000^e de la région de Sidi Abed. Le Datum est celui de Merchich et la projection utilisée est la projection Lambert Conformal Conic Maroc nord. La première étape a consisté à géoréférencer la carte au 1/25 000^e qui avait été précédemment numérisée. Nous avons ensuite recalé (rectifié) les différentes photos aériennes sur ce document de référence. La rectification (déformation géométrique par rééchantillonnage) a été faite selon un modèle affine permettant d'éliminer les déformations géométriques internes. Ce modèle a donné de bons résultats pour nos photos car la région d'étude se trouve à de basses altitudes et les déformations internes étaient limitées.

La digitalisation des divers traits de côte à partir des photographies aériennes rectifiées et la représentation des résultats ont été faites sous ArcGis, ce qui a permis la création et la mise à jour des données géographiques ainsi que des analyses spatiales approfondies. Nous avons ensuite réalisé des cartes d'évolutions et avons calculé les surfaces érodées ou accumulées entre deux missions aériennes. La mesure de la surface et de la distance qui sépare deux traits a permis d'estimer les taux d'érosion et d'engraissement linéaires entre deux prises de vue (Gobert *et al.* 1996 ; Durand, 2001 ; Gaillot et Chaverot, 2001 ; Robin, 2002).

1.4 Résultats et discussions

L'analyse diachronique des photographies aériennes du littoral de Sidi Abed des années 1946, 1949, 1966, 1989, 1997 et 2006 a permis de suivre l'évolution de cette plage sableuse. Le travail d'analyse effectué sur les différentes séries de photos aériennes a permis de subdiviser la zone d'étude en deux secteurs qui évoluent différemment (figure 2) :

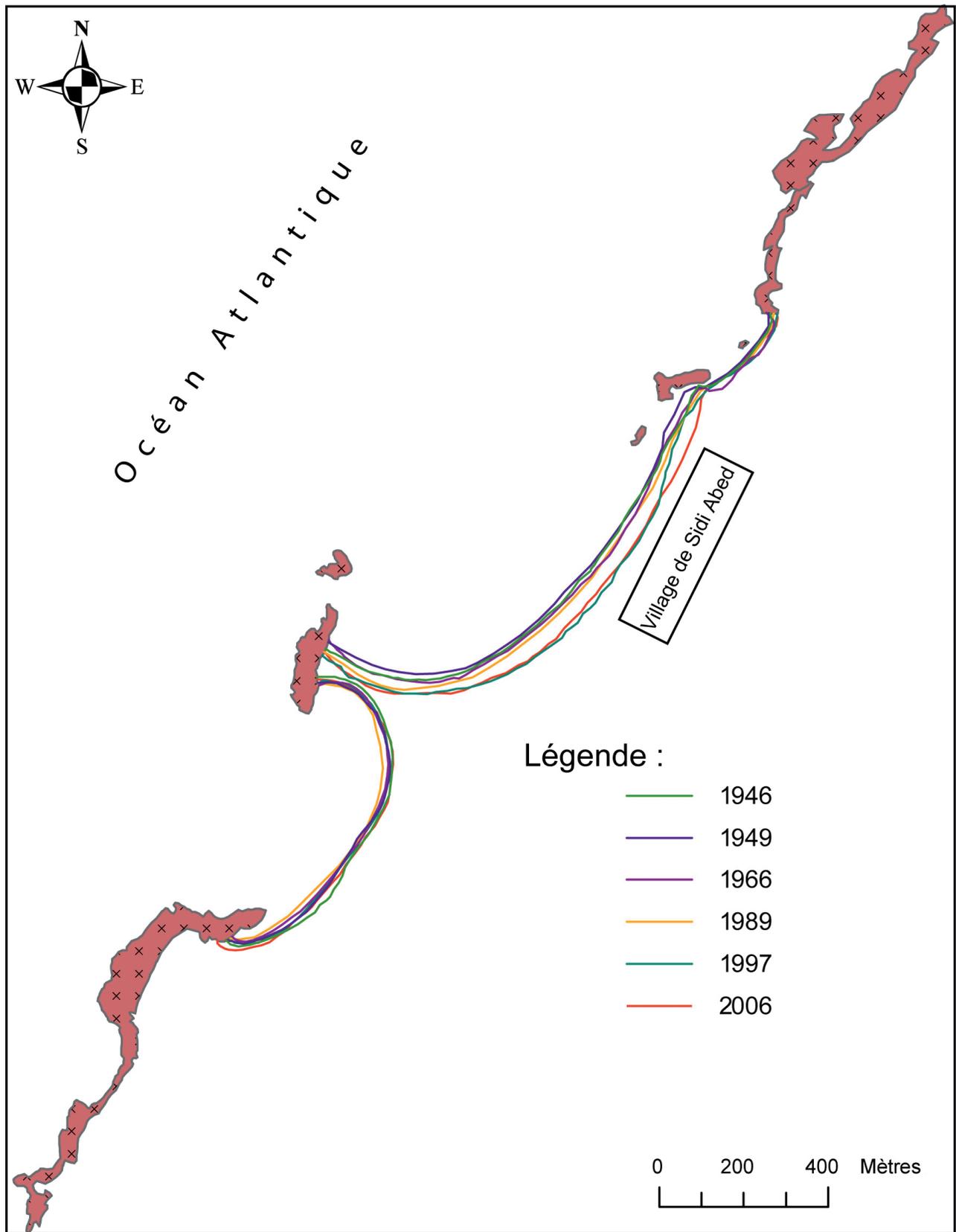


Fig. 2. — Évolution du trait de côte de la plage de Sidi Abed (années 1946, 1949, 1966, 1989, 1997 et 2006).

- Une zone nord-est où la plage a connu un engraissement entre 1946 et 1949 (+ 12 803 m²) (tableau 1). Pendant cette période, la zone est restée sauvage et il n’y avait pas d’aménagements. La plage évoluait alors sous le seul effet des conditions hydrodynamiques qui régnaient alors. Entre 1949 et 1966 (17 ans), les aménagements ont commencé sur la dune et on remarque qu’une surface estimée de 20 555 m² a été perdue. Entre 1966 et 1989 (23 ans) l’érosion est continue. Entre 1989 et 1997, sur une période de 8 ans, les aménagements ont évolué de façon remarquable. La zone est en effet nommée chef du lieu d’une commune rurale en 1992 et la demande en sable a été énorme. La valeur de surface érodée y a été la plus élevée sur cette portion de plage (– 33 947 m²). Enfin, entre 1997 et 2006 (9 ans) la plage a connu un léger engraissement estimé à 1 234 m². En plus de l’action anthropique, la plage du secteur nord-est est exposée directement aux houles dominantes (nord-est). Au total sur 60 ans (1946 à 2006), cette plage a connu une érosion nette estimée à 53 237 m² de surface perdue.

Tabl. 1. — Évolution de la surface entre deux traits de côte de dates différentes (secteur de plage nord-est)

	Erosion (m ²)	Engraissement (m ²)	Tendance générale
1946 à 1949	257,35	13060,22	+ 12802,87
1949 à 1966	20555,32	—	- 20555,32
1966 à 1989	12949,84	2564,64	- 10385,2
1989 à 1997	33947,00	—	- 33947,00
1997 à 2006	5626,26	6859,94	+ 1233,68
1946 à 2006	53430,02	192,69	- 53237,33

- Une zone sud-ouest où la dune n’est pas concernée par les aménagements humains. L’action anthropique s’y fait moins sentir, sauf durant ces dernières années qui ont été marquées par la dégradation de la forêt suite à la sécheresse et au pâturage. La forêt a été artificiellement implantée au début des années soixante pour assurer la stabilisation de la dune qui a tendance à envahir les champs et les salines situés à son pied continental. La bande de végétation qui couvre les dunes frontales a assuré une protection des sables contre les vents de terre (est, nord-est et sud-est). Bien évidemment, la végétation est un élément principal qui limite l’érosion éolienne et qui modifie considérablement le mécanisme de transport. Elle provoque une baisse de la vitesse de cisaillement au niveau du sol par une augmentation de rugosité. Le sable est mobilisable dès que le taux de couvert végétal devient inférieur à 35 %. L’évolution de cette zone de plage de Sidi Abed n’a pas été trop importante, pour les raisons déjà invoquées, et aussi parce que cette plage n’est pas exposée aux houles dominantes de direction nord-ouest. La plage est en même temps protégée par un cordon rocheux sous-marin. Entre 1946 et 2006, le bilan de surface est positif pour cette partie de plage de Sidi Abed. Il est de + 2 573 m² (tableau 2).

Tabl. 2. — Évolution de la surface entre deux traits de côte de dates différentes (secteur de plage sud-ouest)

	Erosion (m ²)	Engraissement (m ²)	Tendance générale
1946 à 1949	—	10118,67	+ 10118,67
1949 à 1966	3222,73	1246,96	- 1975,77
1966 à 1989	—	7087,24	+ 7087,24
1989 à 1997	10681,71	—	- 10681,71
1997 à 2006	5960,51	126,7	- 5833,81
1946 à 2006	1764,01	4337,2	+ 2573,19

Conclusion

Les activités humaines sont souvent à l’origine de la dégradation de la zone côtière. La dynamique des plages ne peut plus être actuellement étudiée sans tenir compte de l’influence humaine. Ses impacts sont bien marqués sur la plage nord est de Sidi Abed. Ces activités accélèrent les processus d’érosion. Elles se traduisent par l’utilisation du sable de plage pour la construction des maisons non autorisées, par la déstabilisation de la végétation qui entraîne l’ouverture de siffle-vent, par une sur-fréquentation des piétons sur les dunes d’autant plus forte que Sidi Abed est une zone balnéaire des plus appréciée du Maroc.

Les observations des variations de trait de côte de la plage de Sidi Abed montrent une variabilité qui a permis de distinguer deux secteurs :

- Un secteur nord-est en érosion : la plage y a subi un recul continu du trait de côte. Celui-ci a été estimé à 53 237 m² de surface perdue pendant 60 ans, soit un taux moyen de démaigrissement de 887 m²/an. Le même phénomène d’érosion côtière a été constaté sur d’autres sites de la côte atlantique Marocaine, notamment dans la baie de Tanger (EL Abdellaoui et Ozer, 2007), dans l’est du port de Mohammadia (Idrissi *et al.*, 2004), ainsi que dans la baie d’Agadir (Charrouf, 1989).
- Un secteur sud-ouest plus ou moins stable : la plage n’a subi qu’une légère avancée de son trait de côte au cours de la même période d’étude. Le taux d’engraissement a été estimé à 2 573 m² sur 60 ans. Entre ces deux secteurs, il existe un tombolo. Ce corps sédimentaire est dû à la rotation de la houle autour de l’extrémité du cordon rocheux qui se trouve au milieu de la plage de Sidi Abed. Ce phénomène de diffraction, renforcé par la dérive littorale, entraîne la création d’un courant qui ramène les sables depuis les deux plages de part et d’autre du cordon.

Signalons qu’en accompagnement du développement socio-économique, il serait souhaitable de prendre en considération une vision à long terme de l’évolution du trait de côte de la plage dans le plan d’aménagement de Sidi Adeb. Il n’en est rien pour le moment mais notre travail fournit quelques éléments d’appréciation de cette dynamique littorale.

Remerciements

Ce travail a été réalisé avec le soutien du PAI 101/MA/04 et du programme LagMar du réseau REMER.

Bibliographie

- CARRUESCO C., *Genèse et évolution de trois lagunes du littoral atlantique depuis l'holocène : Oualidia, Moulay Bouselham (Maroc) et Arcachon (France)*, Thèse de Doctorat d'État n° 960, 2 t., université de Bordeaux 1, 1989, 485 p.
- CHAIBI M., *Dynamique sédimentaire et morphogénèse actuelle du littoral d'El Jadida (Maroc)*, Thèse de Doctorat ès-sciences, université d'Aix-Marseille, 2003, 235 p.
- CHARROUF L., *Problèmes d'ensablement des ports marocains sur la façade atlantique. Leur impact sédimentologique sur le littoral*, Thèse, univ. Paris-Sud, 1989, 278 p.
- CRAWFORD W. R. & THOMSON R. E., « Sea level rise in British Columbia », in C. J. STEWART (éd.), *Proceedings of the 1999 Canadian Coastal conference*, vol. 1, Canadian Coastal Science and Engineering Association, 1999, p. 265-276.
- CROWELL M., LEATHERMAN S. P. & BUCKLEY M. K., « Historical shoreline change : error analysis and mapping accuracy », *Journal of coastal research*, 7, 1991, p. 839-852.
- DOLAN R., HAYDEN B. P., MAY P. M. & SUZETTE, « The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs », *Shore and Beach*, 48, 1980, p. 22-29.
- DOUGLAS B. C., « An introduction to sea level », In B. C. DOUGLAS, M. S. KEARNEY, & S. P. LEATHERMAN (éd.), *Sea level rise history and consequences*, San Diego, USA : Academic Press, 2001, p. 1-11.
- DURAND P., « Érosion et protection du littoral de Valras-Plage (Languedoc, France). Un exemple de déstabilisation anthropique d'un système sableux », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 1, 2001, p. 55-68.
- EL ABDELLAOUI J. E. & OZER A., « Étude diachronique et historique de l'évolution du trait de côte de la baie de Tanger (Maroc) », *Revue Télédétection*, vol. 7, 2007, p. 157-171.
- GAILLOT S. & CHAVEROT S., « Méthode d'étude des littoraux à faible évolution. Cas du delta du Golo (Corse) et du littoral du Touquet (Pas de Calais) en France », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 1, 2001, p. 47-54.
- GOBERT D., OZER A. & CORNET Y., « Étude diachronique de 1948 à 1990 de l'évolution du littoral des plages de Monza et d'Ablo (cap de Corse) par traitement analogique de photographies aériennes – *Photo-interprétation* », n° 1996/1, 1996, p. 49-57.
- IDRISSI M., HOURIMECHE A., REY V., CHAGDALI M., « Impact des installations côtières sur l'évolution du littoral de Mohammedia (Maroc) », VIII^{es} *Journées nationales Génie Civil – Génie Côtier*, Compiègne, 2007.
- LEATHERMAN S. P., « Shoreline mapping : a comparison of techniques », *Shore and Beach*, 51, 1983, p. 28-33.
- MARY J. P. & STEPHEN L., « The high water line as shoreline indicator », *Journal of coastal research*, 18 (2), 2002, p. 329-337.
- MORTON R. A. & SPEED F. M., « Evaluation of shorelines and legal boundaries controlled by water levels on sandy beaches », *Journal of coastal research*, 14, 1998, p. 1373-1384.
- PHILIPS M. R. & JONES A. L., « Erosion and tourism infrastructure in the coastal zone : Problems, consequences and management », *Tourism Management*, vol. 27, 2006, p. 517-524.
- POVH D., « Economic instruments for sustainable development in the Mediterranean Region, Responsible Coastal Zone Management », *Periodicum Biologorum*, 102(1), 2000, p. 407-412.
- ROBIN M., « Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique », in *Le littoral : regards, pratiques et savoirs*, Éditions Rue d'Ulm/Presses de l'École normale supérieure, Paris, 2002, 230 p.
- WEIHAUPT J. G. & STUART A. W., « Future global coastline changes implied in the historic archives. Responsible Coastal Zone Management » – *Periodicum Biologorum*, 102(1), 2000, p. 439-448.

2 Impacts anthropiques et risques environnementaux dans la zone des Niayes: l'exemple du lac Retba (Grande Côte, Sénégal)

Tony REY*, Amadou DIOP** &
Jean-Charles DENAIN*

* Université Montpellier 3

Département de Géographie

Laboratoire GESTER

Route de Mendé, 34 199 Montpellier Cedex 5 — France

Tél. : 04 67 14 22 50/Fax. : 04 67 14 58 33

tony.rey@univ-montp3.fr

jean-charles.denain@univ-montp3.fr

** Université Cheikh Anta DIOP de Dakar

Département de géographie

B.P 5005 — Dakar-Fann — Sénégal

amadoudiop@geradsn.org

Résumé. — L'objectif de cet article est d'évaluer les différentes menaces qui pèsent sur l'environnement du lac Retba. La pression démographique et le poids des activités humaines perturbent le fonctionnement « naturel » de cet espace littoral qui ne possède pas une capacité de charge suffisante pour s'ajuster à la demande. Les changements environnementaux sont alors multiples et s'accroissent. En découlent des risques environnementaux mais aussi phytosanitaires. En outre, la surface du lac Retba a fortement rétréci depuis la fermeture de la lagune (XIV^e-XV^e siècle) mais surtout depuis la sécheresse amorcée dans les années 1960. Une meilleure gestion des activités et des pratiques agricoles constituent autant de solutions pour maintenir toutes les activités et pour préserver un milieu littoral d'une importance économique considérable pour l'État du Sénégal.

Mots-clés. — Environnement, sécheresse, *kjökkenmödding*, lac Retba, Niayes, Grande Côte, Sénégal.

Title. — *Impacts and Environmental Risks in the Zone of Niayes: the Example of the Lake Retba (Great Coast – Senegal)*

Abstract. — *The objective of this article is to estimate the various threats which weigh on the environment of the lake Retba. The weight demographic and human activities perturb the "natural" functioning of this space which does not possess a capacity of sufficient load to fit the demand. The environmental changes are then multiple and accelerate and trigger environmental and phytosanitary risks. Besides, the surface of the lake Retba has strongly shrink since the closure of this lagoon (XIV^e-XV^e century) but especially since the pluviometric deficit begun in the 1960s. A improved management of the activities and the agricultural practices constitute so many solutions to maintain all the activities and to protect acoastal environment which has got a considerable economic importance for the State of Senegal.*

Keywords. — *Natural Risks, Environment, Drought, Kjökkenmödding, Retba Lake, Niayes, Great Coast, Sénégal.*

Introduction

Le Sénégal offre deux longues et larges côtes rectilignes séparées par la presqu'île du Cap Vert : la Petite Côte au sud et la Grande Côte au nord qui s'étend sur environ 250 km de St Louis à la presqu'île et sur 5 à 15 km de large (figure 1). Cette bande littorale constitue les Niayes composés d'étangs, de zone humides et de lacs salés. Dans cet espace s'est développée une agriculture urbaine et périurbaine qui désormais assure à elle seule 40 % de la production nationale (Mbaye, 1999). Les ressources et les opportunités des Niayes sont considérables : la sauvegarde de ces écosystèmes côtiers constitue des enjeux sociaux, économiques et environnementaux essentiels pour l'État du Sénégal. Mais les ressources et l'état du milieu se détériorent à cause des conditions climatiques et hydrologiques défavorables (diminution des pluies hivernales) mais aussi du fait de la forte pression humaine. L'étude de la zone du lac Retba permet de pointer du doigt ces diverses pressions sur le milieu.

2.1 Cadre général

2.1.1 Espace géographique

Le lac Retba (14°50'N-17°20'O) est situé à 30 km au nord de Dakar le long de la Grande Côte sénégalaise. La topographie autour du lac révèle plusieurs formes de reliefs allant des grandes dunes blanches qui culminent entre 15 et 20 mètres, aux dépressions et couloirs interdunaires hydro-morphes où affleure la nappe phréatique.

- Les surfaces agricoles consacrées aux cultures pluviales, maraîchères et fruitières occupent une importante superficie (figure 2). Ces terres sont gagnées par le défrichement des forêts, des steppes arbustives et herbacées, lesquelles ne cessent de reculer. Le maintien d'une production agricole suffisamment élevée pour faire face à l'accroissement de la population et approvisionner les marchés locaux et ceux de Dakar est à ce prix.
- Les espaces palustres et marécageux correspondent à l'extension lagunaire passée du lac Retba. Ces terres sont actuellement impropres aux cultures compte tenu de la forte teneur en sel des sols ; seuls quelques ongulés domestiques y broutent les herbes salées.

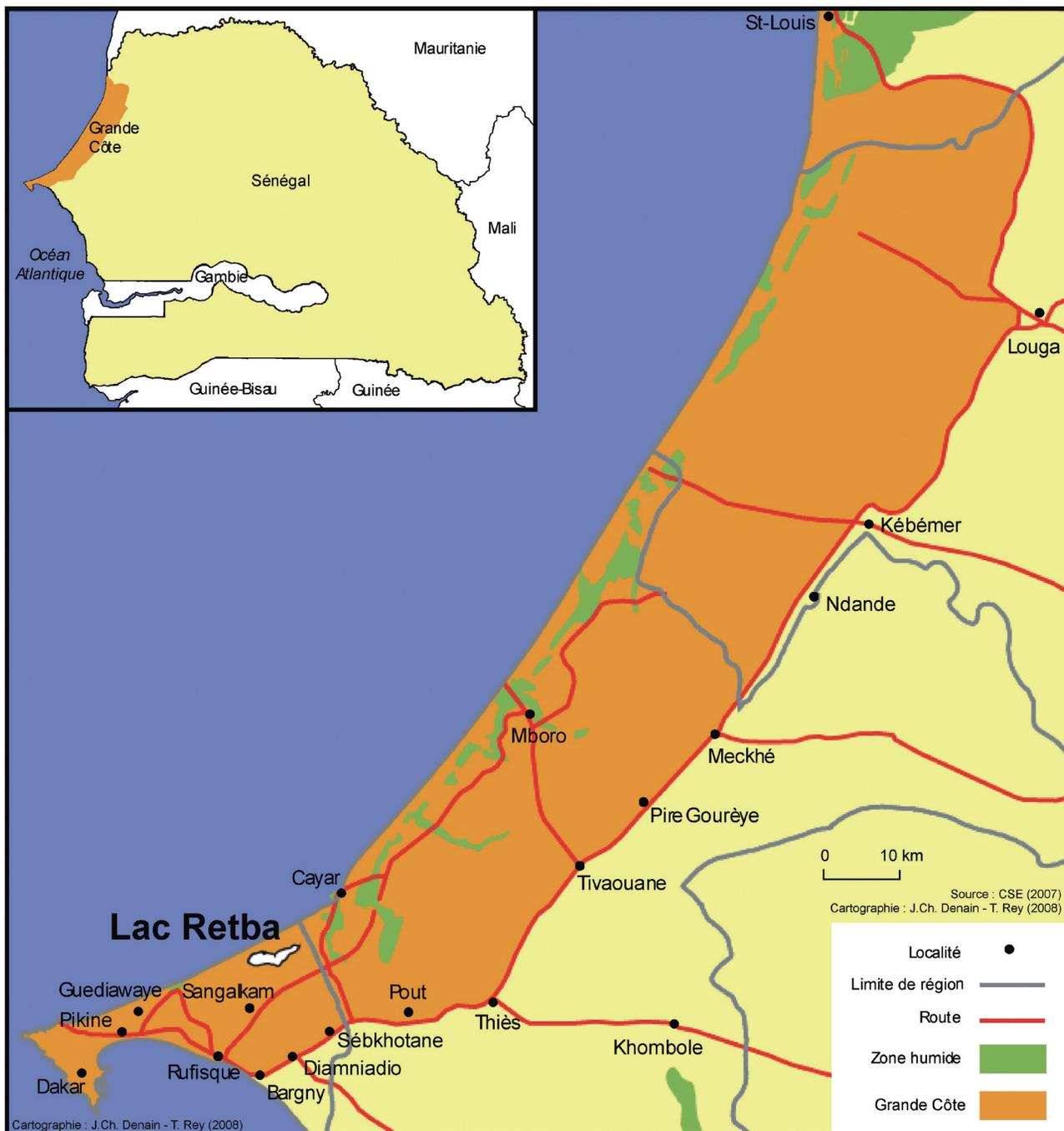


Fig. 1. — Localisation du secteur d'étude.

– Côté mer, les cordons dunaires actuels et anciens sont fixés par plusieurs bandes de filaos. Ces arbres qui proviennent d'Australie ont été plantés en 1970 pour limiter la migration des dunes blanches et limiter l'érosion éolienne. Aujourd'hui, la bande de filaos a atteint sa phase de vieillissement et de fin de cycle de vie. Ce n'est pas seulement l'écosystème du lac Retba qui est menacé de déséquilibre et pire, de disparition, ce sont les Niayes tout entier.

La physiognomie de la végétation originelle du lac Retba et sa composition floristique ont été profondément modifiées au cours de ces dernières décennies. Ces transformations,

qui vont dans le sens d'une dégradation et d'une transformation accélérée des paysages antérieurs, résultent des conditions environnementales, d'aménagement et d'exploitation de la région. Les ressources et les opportunités qu'offre la zone des Niayes sont en cours de disparition.

2.1.2 Diversité et richesse des paysages imputables aux formations littorales fossiles et actuelles

Les formations marines qui affleurent autour du lac ont été caractérisées par Elouard *et al.* (1975) ; elles se regroupent autour de quatre unités morpho-sédimentaires (figure 3) :

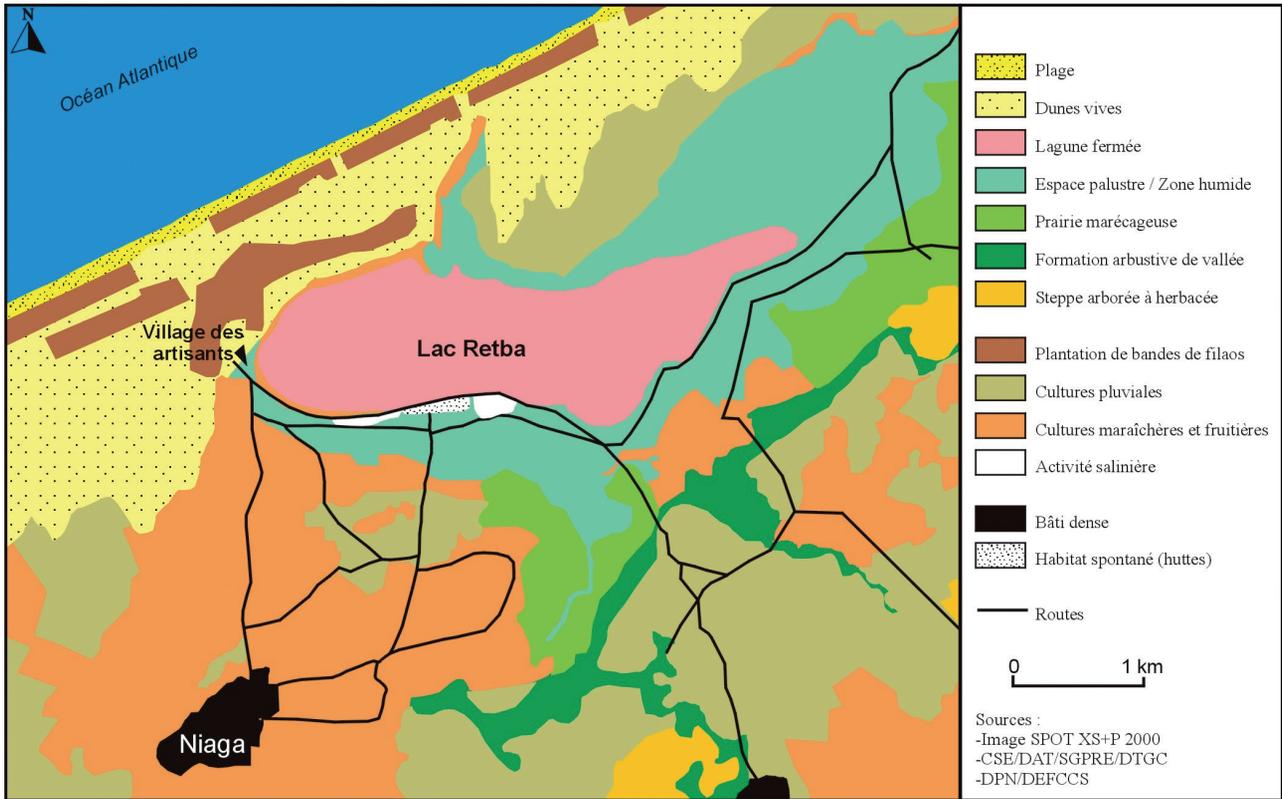


Fig. 2. — Modalités d'occupation du sol sur le site du lac Retba.

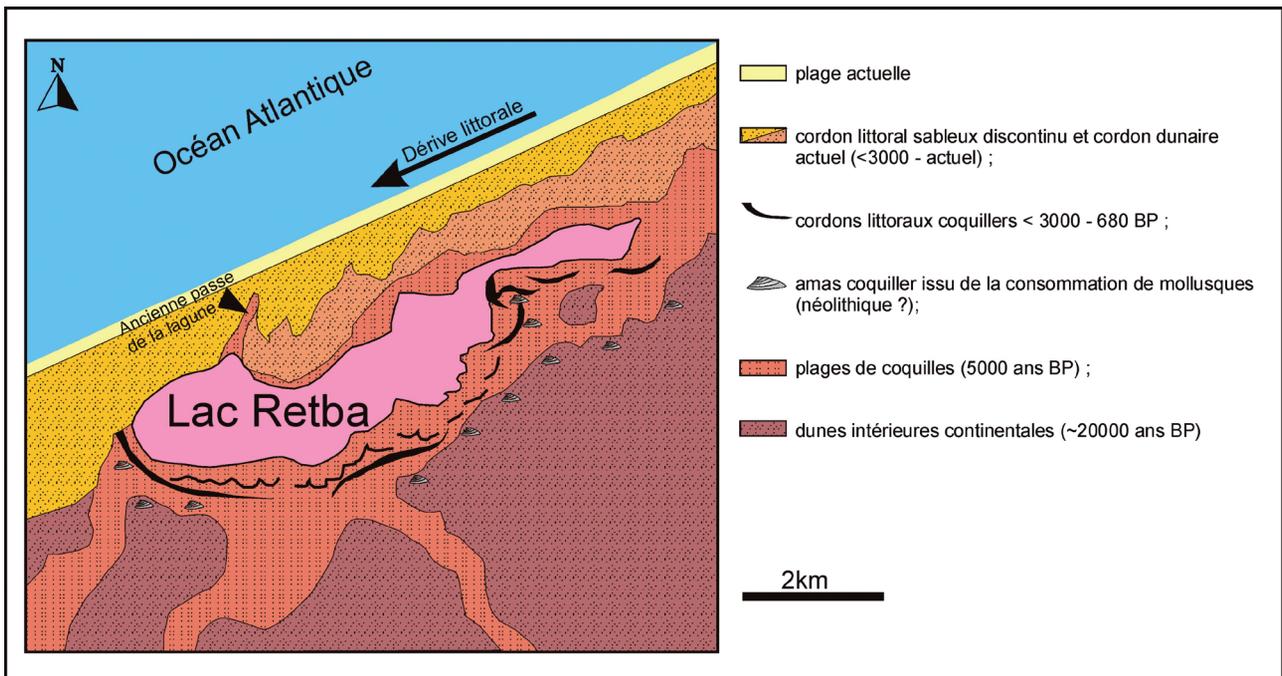


Fig. 3. — Formations superficielles autour du lac Retba (D'après Elouard 1975 – Modifié).

- Les dunes intérieures continentales ($\approx 20\ 000$ BP) ;
- Les plages de coquilles (5 000 BP) ;
- Les cordons coquilliers (3 000 – 680 BP) ;
- Les cordons sableux discontinus (3000 à l'actuel).

Ce lac, qui n'en est pas un, est aujourd'hui une lagune fermée, témoin d'une vaste lagune qui était autrefois connectée à l'océan atlantique. Plusieurs lignes de cordons dunaires d'époques distinctes s'intercalent entre le lac Retba et l'Océan Atlantique. Ce sont eux qui, sous l'effet de la dynamique marine (dérive littorale dirigée du nord au sud) et éolienne, ont ensablé et colmaté la passe, isolant ainsi la lagune de la dynamique marine. Les différentes phases d'ouvertures et de fermetures de la lagune depuis sa formation jusqu'au stade actuel se sont effectuées sous l'action conjuguée des variations du niveau marin et du climat (Kalck, 1978 ; Rouvillois, 1982 ; Sow, 2001 ; Sarr *et al.*, 2008). En fonction des éléments géochronologiques et des traces d'occupation, la déconnexion avec l'océan se serait produite autour du XIV-XV^e siècle (Elouard *et al.*, 1975). Depuis cette époque, la lagune se colmate, rétrécit et au gré de cette tendance, les environnements et les écosystèmes littoraux et lacustres changent.

2.2 Hydrologie du lac Retba

2.2.1 Une variabilité climatique marquée

L'espace étudié appartient au domaine climatique sahélo-soudanien à deux saisons, l'une sèche et longue et l'autre courte et humide avec des conditions plus douces grâce aux influences océaniques. Les précipitations surviennent généralement entre juin et octobre avec un maximum en août (mousson), elles sont peu abondantes et dépassent rarement 500 mm/an dans la région de Dakar. Mais depuis les années 1970, il apparaît une réduction importante des précipitations : les isohyètes ont migré de 200 km vers le sud, et cette translation s'est accompagnée d'une aridification du climat, processus historique qui menace l'équilibre fragile entre les hommes et le milieu (Nicholson, 2001). Mais au regard des évolutions climatiques enregistrées en Afrique au cours du Quaternaire récent (Maley, 1981), il n'est pas évident que le changement de régime pluviométrique survenu pendant les décennies passées se confirme. Quoi qu'il en soit, les récentes contraintes pluviométriques produisent une cascade d'effets directs et indirects tant sur le milieu naturel et la ressource en eau que sur les modes d'occupation et d'exploitation du sol dont la pluralité des processus et des forçages climato-anthropiques constituent autant de facteurs de dégradation des environnements côtiers directement ou indirectement imbriqués. À ce jour, le lac est sous alimenté en eau ainsi que la nappe phréatique littorale. L'alimentation en eau du lac s'effectue principalement par une lentille d'eau douce côté terre.

2.2.2 Le lac Retba : un milieu aquatique fermé abiotique

Le lac Retba correspond sous sa forme actuelle à un étang côtier fermé transformé en bassin évaporatoire avec, comme caractéristique principale l'hyper-salinisation ; les concentrations maximales de sel peuvent atteindre 463 g/l^{-1} (Bettarel *et al.*, 2006.). L'eau du lac possède un très bas taux d'oxygène à cause de la pauvre solubilité des

eaux. Il subsiste donc dans cet environnement abiotique des algues microscopiques, qui, en fonction de leur concentration et des conditions météorologiques, donnent la coloration rose des eaux du lac (d'où le nom de Lac Rose). Aujourd'hui, un large cordon dunaire d'environ 400 mètres limite les échanges en eau qui désormais s'effectuent surtout sous l'effet conjugué du biseau salé côté océan et d'une lentille d'eau douce côté terre.

Le lac possède une morphologie allongée aux extrémités orientales et occidentales circulaires. La surface en eau est relativement petite, elle s'étend sur 400 ha. La profondeur maximale atteint rarement plus de 3 mètres. Sur ce plan d'eau, le vent génère des ondes qui se propagent dans le lac. Lorsque les conditions météorologiques sont réunies (force et durée du vent), des vagues se forment. L'eau entraînée se heurte rapidement aux berges du lac, et un courant de retour est nécessaire. Cette dynamique conduit à l'existence de tourbillons de surface.

La texture du fond est caractérisée par des dépôts de sables fins à grossiers qui proviennent en partie des dunes littorales situées en bordure du lac. À ces sédiments, se mélangent les encroûtements de sel qui s'y déposent en couches.

2.3 Des pratiques agricoles inadaptées aux milieux

2.3.1 Défrichements et surexploitation des terres arables

La communauté rurale de Sangalkam compte 50 000 habitants regroupés dans 28 villages urbains ou villes rurales (DPS, 1992). La croissance démographique nécessite de recourir aux défrichements pour accroître les surfaces agricoles de manière à répondre à la demande des marchés locaux et dakarois.

Le développement des cultures maraîchères nécessite de recourir à des défrichements massifs. L'impact direct de cette pratique agricole est la destruction des écosystèmes originels puis leur remplacement par des plantes et des cultures introduites. Il en résulte un paysage uniforme et monotone. Les nouvelles terres défrichées sont rapidement enrichies en intrants. Puis, les cultures subissent des traitements phytosanitaires (pesticides) pour réduire les risques d'attaques parasitaires. La Métaphose et le Tamaron représentent respectivement 35,9 % et 12,7 % des pesticides utilisés dans l'activité maraîchère dans l'espace agricole du lac Retba (GERAD, 2006). Dans sa classification, l'OMS considère ces produits comme dangereux, voire très dangereux. Les modalités d'usage de ces produits chimiques se transmettent par voie orale et en conséquence, les doses et les délais d'attente entre les traitements ne sont pas respectés alors que l'adaptation ou la résistance des parasites aux produits encouragent les producteurs à faire des mélanges ou à pratiquer le surdosage. Ces produits se déposent dans l'environnement immédiat, c'est-à-dire sur les produits, les sous-produits, la terre et l'eau, constituant ainsi un danger potentiel pour le consommateur. Les risques sanitaires et environnementaux ne sont pas du tout évalués et pris en compte.

Par ailleurs, les défrichements fragilisent les sols et diminuent le couvert végétal de ceux-ci. Même temporaire, la dénudation des terres accentue les effets de l'érosion éolienne et hydrique.

Enfin, les exploitants agricoles ne pratiquent pas ou peu la jachère. À terme, la surexploitation des sols et leur appauvrissement (baisse de leur fertilité) sont à craindre.

2.3.2 Une demande en eau insatisfaite et une qualité insuffisante

Les cultures maraîchères et arboricoles consomment d'importantes quantités d'eau. Ces ponctions se font directement dans la nappe phréatique sub-affleurante. Or, le rechargement de la nappe dépend entièrement des précipitations, ce qui lui confère un caractère aléatoire, soumis aux conditions climatiques dans le temps et l'espace. Actuellement, les pompages en eau autour du lac Retba s'effectuent principalement dans les céanes dont la profondeur maximale n'excède pas trois mètres et les puits traditionnels, en dehors des rares motopompes. L'alimentation en eau des cultures reste traditionnelle, elle se fait avec des arrosoirs et des seaux. Les pompages intensifs dans la nappe et la position des céanes (trop nombreuses et trop proches les unes des autres) créent un déséquilibre de la pression exercée par l'eau douce sur l'eau de mer. La dépressurisation favorise la remontée du biseau salé en arrière du littoral, ce qui tend à accroître la salinité des eaux douces destinées aux cultures et participent à la dégradation des sols.

À la salinisation des sols, il faut ajouter que la pénurie d'eau a favorisé l'utilisation des eaux usées dans le maraîchage et l'horticulture. Cette pratique s'est intensifiée avec l'accroissement de la population (Koné, 2002). La réutilisation des eaux usées sans prétraitement sont à l'origine d'impacts sur l'environnement et sur la santé des populations (Ndiaye *et al.*, 2006).

Enfin, l'eau des céanes et des puits apparaissent comme des lieux de prédilection dans la prolifération des anophèles ; le nombre de cas de personnes atteintes par le paludisme est largement supérieur à la moyenne nationale¹.

La présence de nombreux usagers et des pratiques agricoles inadéquates induisent une forte concurrence sur cette ressource en eau dans les conditions actuelles de sa disponibilité, et génèrent des risques environnementaux et phytosanitaires indéterminés.

2.3.3 L'activité salinière vecteur de conflits, de risques sanitaires et environnementaux

Le lac Retba constitue un bassin évaporitique récent dans lequel le sel se dépose. Cette transformation du milieu lagunaire a modifié les modalités d'usage du lac qui auparavant (sans que l'on ne sache réellement quand) procurait du poisson aux pêcheurs. Depuis les années 1960, l'hypersalinisation du lac a provoqué la mort de toutes les espèces aquatiques. Aujourd'hui, ce sont les exploitants du sel ($\approx 3\ 000$ personnes) qui tirent profit du lac. 80 % de ces travailleurs proviennent de Guinée. L'arrivée des travailleurs n'est pas du tout organisée ; spontanément, ils se sont installés au bord du lac. D'années en années, la surface occupée par cet habitat anarchique s'accroît et rien n'est entrepris pour leur donner accès à des conditions de vie décentes. Il n'y a ni adduction en eau potable, ni collecte des eaux usées (rejetées dans le lac), ni ramassage des déchets solides (brûlés sur place). L'extraction du sel ne

leur procure que de très faibles revenus (5 000 Fcfa pour le récolteur). Le prix du sac de sel est imposé par le Comité de gestion du Lac Rose qui ne les achète qu'à très bas prix. On estime que plus de 90 % de la production du Lac Retba est exportée vers des pays qui manquent de sel de consommation comme la Côte d'Ivoire, le Mali ou le Burkina Faso. Le mode de prélèvement du sel génère de sévères risques sanitaires. À l'aide d'un grappin, les plongeurs arrachent les encroutements de sel déposés au fond du lac. Puis ils remontent les plaques de sel sur une barque (cargaison qui avoisine 1400 kg), qui sera ensuite ramenée sur la berge afin d'être vidée de son chargement par les récolteuses (Sow, 2002). Le sel et les plongées répétées entraînent des brûlures, du dessèchement et du fendillement de la peau, et des affections O.R.L. récurrentes. Les plongeurs subissent aussi la pollution des eaux du lac.

Enfin, l'emprise spatiale de cette activité provoque de profondes modifications environnementales comme la dégradation des berges et l'altération de la beauté du paysage.

2.3.4 Des pratiques touristiques éloignées de l'écotourisme durable

Le lac Retba est une curiosité naturelle, rendu célèbre par les arrivées du rallye Paris-Dakar. La première des pressions touristiques exercées sur le milieu est le passage continu, répété et anarchique des véhicules autour du lac, dans les dunes et sur la plage (absence de circuit balisé). Que ce soient les véhicules du rallye Paris-Dakar ou ceux des touristes (bus, 4x4, quads), tous participent à la déstabilisation des écosystèmes, à la fragilisation du cordon dunaire (formes d'érosion éolienne comme les siffles-vents) et des cuvettes interdunaires (piétinement et destruction des rhizomes qui stabilisent les dunes) ainsi qu'à la migration des dunes vives en direction du lac Retba. Les effets apparaissent d'autant plus accentués que les bandes de filaos protègent de moins en moins efficacement cet espace. En effet, plantés en 1970, ils ont aujourd'hui atteint un stade de vieillissement avancé qui va nécessiter une nouvelle vague de reboisement et cela pour l'ensemble des Niayes. D'ores et déjà, des parcelles de maraîchage situées dans les bas-fonds ont été abandonnées en raison de leur ensablement. La fragilité du milieu littoral nécessite rapidement de revoir les modalités de tourisme, dévoreur d'espace et loin du concept d'éco-tourisme et de tourisme durable en cours de développement sur la Petite Côte sénégalaise.

2.4 Quel avenir pour le lac Retba et ces environnements ?

2.4.1 L'assèchement des zones humides

L'étude comparative des photographies aériennes² et d'images satellitaires³ du lac Retba montre la forte altération de l'humidité de la zone en quelques décennies. Les nombreuses petites dépressions et ares installées sur la frange littorale du lac, poissonneuses d'après de nombreux témoignages, ont aujourd'hui disparu. Elles occupaient des dépressions dont certaines, avant la sécheresse des années

1. Centre ORSTOM de Dakar — 1994, Document interne. « Les anophèles de la zone de Niakhar, Sénégal ».

2. Photographies aériennes 1954, 1966, 1978, 1980, 1995, 2000.

3. Image Google Earth 2008.

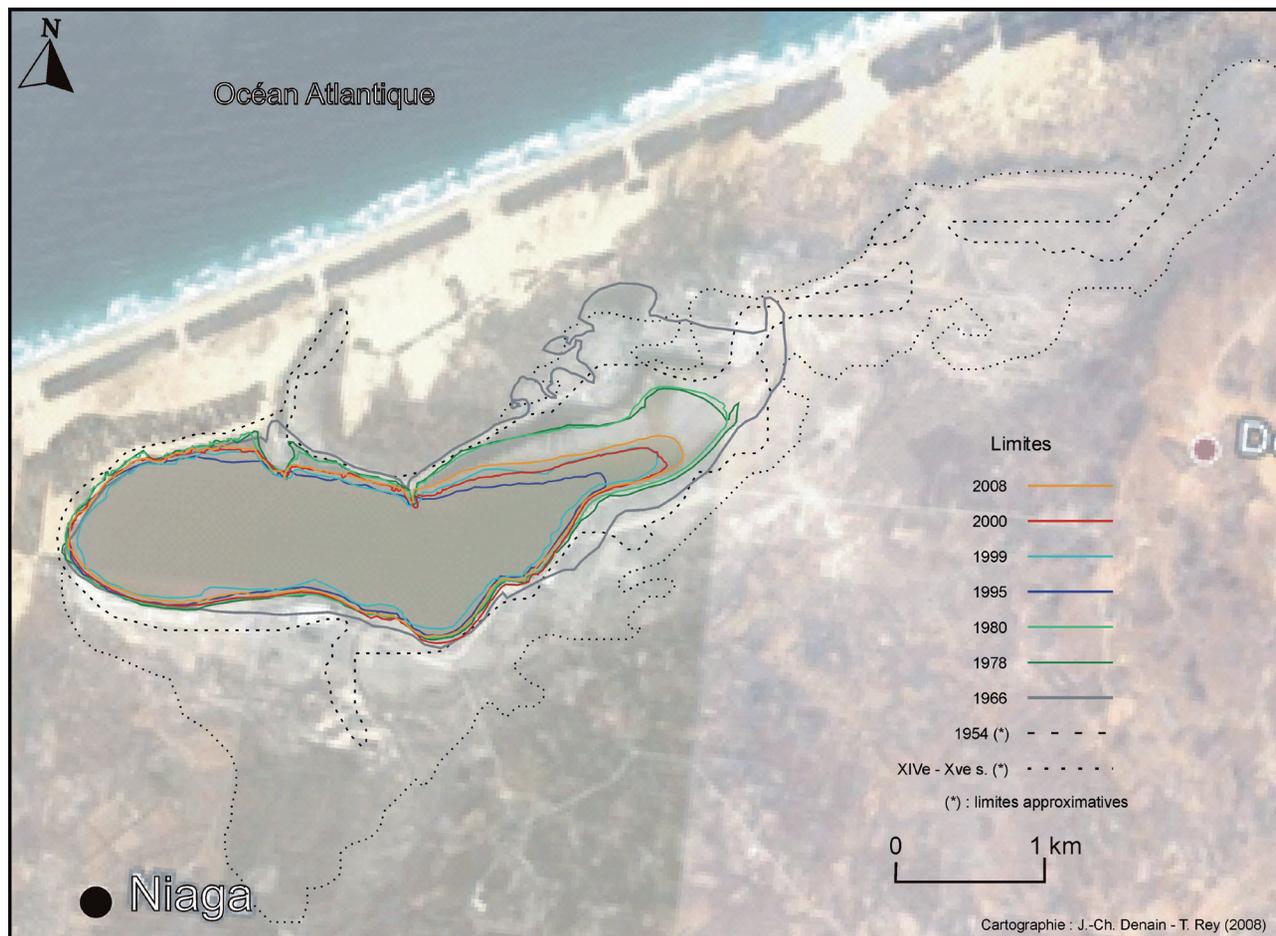


Fig. 4. — Évolution de la surface du lac Retba du xiv^e-xv^e siècle à 2008.

1970, étaient plantées en riz par la colonie diola qui alternait cette activité avec la récolte du vin de palme. Avec l'enfoncement de la nappe, ces mares se sont asséchées, et malgré une reviviscence intermittente (en année particulièrement pluvieuse), leur mise en culture nécessite un arrosage systématique à partir de 1976.

2.4.2 L'avenir incertain du lac Retba

Depuis sa déconnexion avec l'océan (xiv^e-xv^e siècle), le lac Retba se comble préférentiellement au nord-est et à l'est (figure 4). D'une part, le colmatage s'effectue dans le sens des vents dominants — l'Harmattan — et d'autre part, les espaces les plus éloignés de l'ancienne passe s'assèchent plus rapidement (profondeur moins importante, faiblesse des courants...). La superficie du plan d'eau est passée de 15 km² (xiv^e-xv^e siècle) à moins de 3 km² en 2006. Cette rétraction était beaucoup plus accentuée durant la période 1954-2006. En effet, le lac Retba a perdu plus de 50 % de sa superficie en moins d'un demi siècle : la superficie est estimée à 6,7 km² en 1954 et à 2,96 km² en 1999. Pourtant, le colmatage n'apparaît pas inéluctable. Une légère expansion du plan d'eau s'est produite entre la fin des années 1990 et 2008 (3,403 km²). Cette tendance va-t-elle se confirmer ? Les améliorations climatiques seront-elles suffisamment longues pour garantir la pérennité de ce bassin ? Dans l'état actuel des choses, rien ne semble pouvoir contrecarrer cette tendance séculaire à l'assèchement.

Le seul moyen véritablement efficace pour préserver le lac et ses zones humides serait d'établir une nouvelle connexion avec la mer. Celle-ci pourrait être réalisée à partir d'une passe fossile (figure 3). Bien entendu, l'ouverture de la passe modifiera la configuration du lac Retba actuel, et la couleur rose des eaux disparaîtra. La mise en place d'une lagune ouverte signifie aussi la fin de l'exploitation du sel. Par contre, l'ouverture du milieu favorisera la reconquête des zones humides et le développement d'un écosystème lagunaire favorable à de nouvelles activités (pisciculture et l'ostréiculture).

Conclusion

La zone du lac Retba présente une diversité de biotopes qui abritent des types de végétation assez variés et une composition floristique assez riche. La végétation et la flore originelle ont été cependant fortement modifiées par la dégradation des facteurs éco-climatiques et les activités anthropiques pendant ces dernières décennies.

Dans le détail — et en ce qui concerne les zones de dépressions — la sécheresse, la salinisation des terres, les défrichements et la surexploitation ont été à l'origine de la raréfaction, voire d'une menace de disparition de nombreuses espèces caractéristiques. L'utilisation massive des pesticides liée au maraîchage et à l'arboriculture n'est pas sans

poser de problèmes sur l'environnement et l'état sanitaire des populations. Dans les terres de l'intérieur, le couvert végétal a été plutôt affecté par les défrichements pour la culture pluviale et le pâturage.

À côté des risques environnementaux, se manifestent des risques sanitaires inconsiderés. Ils sont liés au problème d'assainissement, d'accès à l'eau potable, de collecte des eaux usées et de rejet des déchets domestiques. S'y ajoutent les risques accrus de développement du paludisme autour des céanes.

Finalement, le développement important des activités de maraîchage et d'arboriculture, les formes d'occupation explosives (village d'artisanat et des exploitants de sel, complexe touristique) et les modes d'exploitation et de prélèvement des ressources naturelles (eau, sel, coquillages, etc.) prolongent la question cruciale de la spéculation foncière dans la zone par celle des usages. Le lac Retba — système d'interface nature/société — doit être perçu à la fois comme un système d'interactions et comme un ensemble de milieux naturels et sociaux dont les caractéristiques influent sur la répartition et la durabilité des usages présents. La réduction de l'impact des risques climatiques, économiques, environnementaux et sanitaires passe par la maîtrise de l'eau, la diversification des productions et le renforcement des capacités des différentes catégories d'exploitants.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la Direction de l'Aménagement du Territoire du Sénégal et M. Souleymane Diop du Centre de Suivi Écologique de Dakar. Nous remercions très chaleureusement l'équipe du Groupe d'Étude de Recherche et d'Appui au Développement et particulièrement le coordinateur Monsieur le Professeur Amadou Diop pour l'accueil et l'aide précieuse fournie.

Bibliographie

- BETTAREL Y., BOUVY M., DUMONT C. & SIME-NGANDO T., « Virus-Bacterium Interactions in Water and Sediment of West African Inland Aquatic Systems », *Appl. Environ. Microbiol.* 72(8), 2006, p. 5274-5282.
- ELOUARD P., EVIN J. & HÉBRARD L., « Observations et résultats de mesures au radiocarbone sur les cordons littoraux coquilliers du lac Retba », Sénégal, *Bulletin de Liaison de l'ASEQUA*, Dakar, n° 46, 1975, p. 15-20.
- FAYE S. C., FAYE S., WOHNLICH S. & GAYE C. B., « An assessment of the risk associated with urban develop-

ment in the Thiaroye area (Senegal) », *Environmental Geology*, 45 (3), 2004, p. 312-322.

- GARNIER J.-M., « Évolution géochimique d'un milieu confiné : le lac Retba (Cap-Vert), Sénégal », *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique*, 20 (1), 1978, p. 43-58.
- GERAD, « Diagnostic de la zone du Lac Rose », Rapport octobre 2006, 2006, 84 p.
- KALCK Y., *Évolution des zones à mangroves du Sénégal au Quaternaire récent, études géologiques et géochimiques*, Thèse, université Louis Pasteur — Strasbourg, 1978.
- KONÉ D., *Épuration des eaux usées par lagunage à microphytes et à macrophytes (Pistia Stratoites) en Afrique de l'Ouest et du centre : État des lieux, performances épuratoires et critères de dimensionnement*, Thèse de Doctorat n°2653, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2002, 170 p.
- MBAYE A., « Production des légumes à Dakar : importance, contraintes et potentialités », in SMITH O.B. (éd.). *Urban agriculture in West Africa : contributing to food security and urban sanitation*, Ottawa, International Development Research Centre (IDRC)/Technical Centre for Agricultural and Rural Cooperation (CTA), 1999, p. 56-66.
- NICHOLSON S., « Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries », *Climate Research*, 17, 2001, p. 123-144.
- NDIAYE M. L., GUÈYE-GIRARDET A. & PFEIFER H.-R., « Impacts des eaux usées sur l'évolution microbiologique des sols : étude de cas à Pikine Dakar-Sénégal », *Agrosol.* 17 (1), 2006, p. 33-38.
- ROUVILLOIS A., « Comparaison entre la faune de foraminifères de la surface des mangroves actuelles du Sénégal, de Bassid (Sine-Saloum), d'Oussouye et de Balingor (Casamance) et celle d'un sondage à Bango (delta du fleuve Sénégal) », *Cahiers de Micropaléontologie* 2, 1982, p. 149-154.
- SARR R., SOW E. & SARR B., « Holocene marine intrusions in Retba and Mbawane lakes (Senegal) evidenced by ostracod faunas », *Revue de Micropaléontologie*, vol. 51, Issue 4, 2008, p. 327-338.
- SOW E., « *Le Quaternaire récent du Sénégal occidental (lacs Retba et Tanma ; estuaires de la Casamance). Implications eustatiques et paléoclimatiques des diatomées* », Thèse, Faculté des Sciences et Techniques, université Cheikh Anta Diop, Dakar, 2001.
- SOW P., « Les récolteuses de sel du lac Rose (Sénégal) : Histoire d'une innovation sociale féminine », *Géographie et cultures*, n° 41, 2002, p. 93-113.

3 Niveaux marins extrêmes dans le Golfe du Lion : variabilité contemporaine et future (1905–2100)

Albin ULLMANN

Centre de Recherches de Climatologie,
C.N.R.S./Université de Bourgogne, Dijon, France.
albinullmann@yahoo.fr

Résumé. — À l'échelle du xx^e siècle, la hauteur du percentile annuel à 90% du niveau marin au Grau-de-la-Dent, en Camargue, montre une augmentation significative de +0,32 mm/an. Cette augmentation résulte de la combinaison entre la lente remontée du niveau marin moyen (+0,20 mm/an) et de l'élévation du niveau des surcotes marines (+12 mm/an) associées aux tempêtes dans le Golfe du Lion. Au xxi^e siècle, la hauteur et la fréquence des surcotes des tempêtes pourraient rester stationnaires dans le Golfe du Lion et dans le scénario A2 et B2 du changement climatique. Néanmoins, ces dernières vont se produire sur un niveau marin moyen inéluctablement de plus en plus haut en raison notamment de la dilatation thermique des mers et des océans. Il en résulte une importante augmentation de la hauteur et de la fréquence des pics de niveaux marins, aujourd'hui considérés comme extrêmes, et associés aux risques de submersion et d'inondation dans le Golfe du Lion.

Mots-clés. — Niveau marin extrême, surcote, changement climatique, Golfe du Lion.

Title. — *Extreme Sea Levels in the Gulf of Lion: Contemporary and Future Variability (1905–2100)*

Abstract. — *The annual 90th percentile of sea level at Grau-de-la-Dent station (Camargue) shows a significant increase in the 20th century (+0.32 mm/yr). This increase corresponds to the superimposition of the long-term sea-level rise (+0.20 mm/yr) and of the increase of sea-surge height (+0.12 mm/yr). Sea-surge height and frequency could stay almost stationary in the Gulf of Lions during the 21st century and for A2 and B2 scenarios of climate change. Nevertheless, sea-surges will occur on a mean sea level ineluctably higher mostly linked with the thermal expansion of the Sea. Consequently, the frequency and height of extreme sea levels associated with coastal flooding would considerably increase during this century, stressing the coastal vulnerability in the low-lying Gulf of Lion.*

Keywords. — *Extreme Sea Level, Sea Surge, Climate Change, Gulf of Lions.*

Introduction

Face à l'élévation du niveau marin, la vulnérabilité des zones côtières basses et sableuses est particulièrement

importante (Nicholls et Hoozemans, 1996). Les récents modèles de prédiction du climat présentés par l'IPCC (« Intergovernmental Panel on Climate Change ») prévoient un réchauffement et une élévation globale et significative du niveau marin pour le xxi^e siècle (IPCC, 2007). Ces tendances sont favorables à la multiplication et à l'intensification des pics de niveaux marins extrêmes responsables de la submersion et de l'érosion des zones littorales. La plupart de ces événements violents se produisent lors des tempêtes liées au passage d'une forte dépression (Bouligand et Pirazzoli, 1999). Ces forçages atmosphériques entraînent alors un niveau marin observé supérieur à celui normalement atteint par la marée astronomique. C'est ce que l'on appelle la surcote marine.

Le Golfe du Lion est situé au nord-ouest du bassin méditerranéen occidental (figure 1). Les côtes françaises s'étendent sur environ 200 kilomètres de Port-Vendres à Marseille et sont ouvertes au sud ou au sud-est sur la Méditerranée. Elles sont principalement composées de vastes étendues basses et sableuses sauf à ses deux extrémités où le littoral présente une alternance de baies entrecoupées par des caps rocheux (figure 1). C'est également dans la partie orientale du Golfe du Lion que se trouve l'embouchure du Rhône, deuxième plus grand fleuve s'écoulant en Méditerranée après le Nil, qui constitue une zone deltaïque de plus de 145 000 ha (figure 1). Dans le Golfe du Lion, les fortes surcotes sont des événements d'échelle régionale, liées à la présence de forts vents de mer soufflant de secteur sud tout autour du Golfe (Ullmann *et al.*, 2007b ; Ullmann et Moron, 2008). Ces vents de tempête poussent la masse d'eau vers les côtes et entraînent une élévation importante et brutale du niveau de la mer au niveau du littoral (Ullmann et Pirazzoli, 2007).

Face aux risques de submersion et d'érosion liées aux surcotes, le Golfe du Lion présente des enjeux particulièrement importants. Le littoral y est en effet densément peuplé et concentre de nombreuses activités économiques et sociales. C'est le cas par exemple du tourisme balnéaire des côtes héraultaises, des importants flux commerciaux et pétroliers du port autonome de Marseille, de la pêche et de l'aquaculture ou encore de la production de sel de la Compagnie de Salins du Midi et de l'Est. Les enjeux sont également naturels, notamment avec la Camargue dans le delta du Rhône, zone protégée mais menacée par les surcotes qui ont entraîné un recul du trait de côte de plus de 100 mètres en un siècle (Sabatier et Suanez, 2003). Enfin, les surcotes empêchent l'écoulement hydraulique des fleuves et rivières vers la mer et peuvent alors considérablement augmenter le risque d'inondation durant les crues, particulièrement importantes dans le Golfe du Lion. Ce golfe est donc vulné-

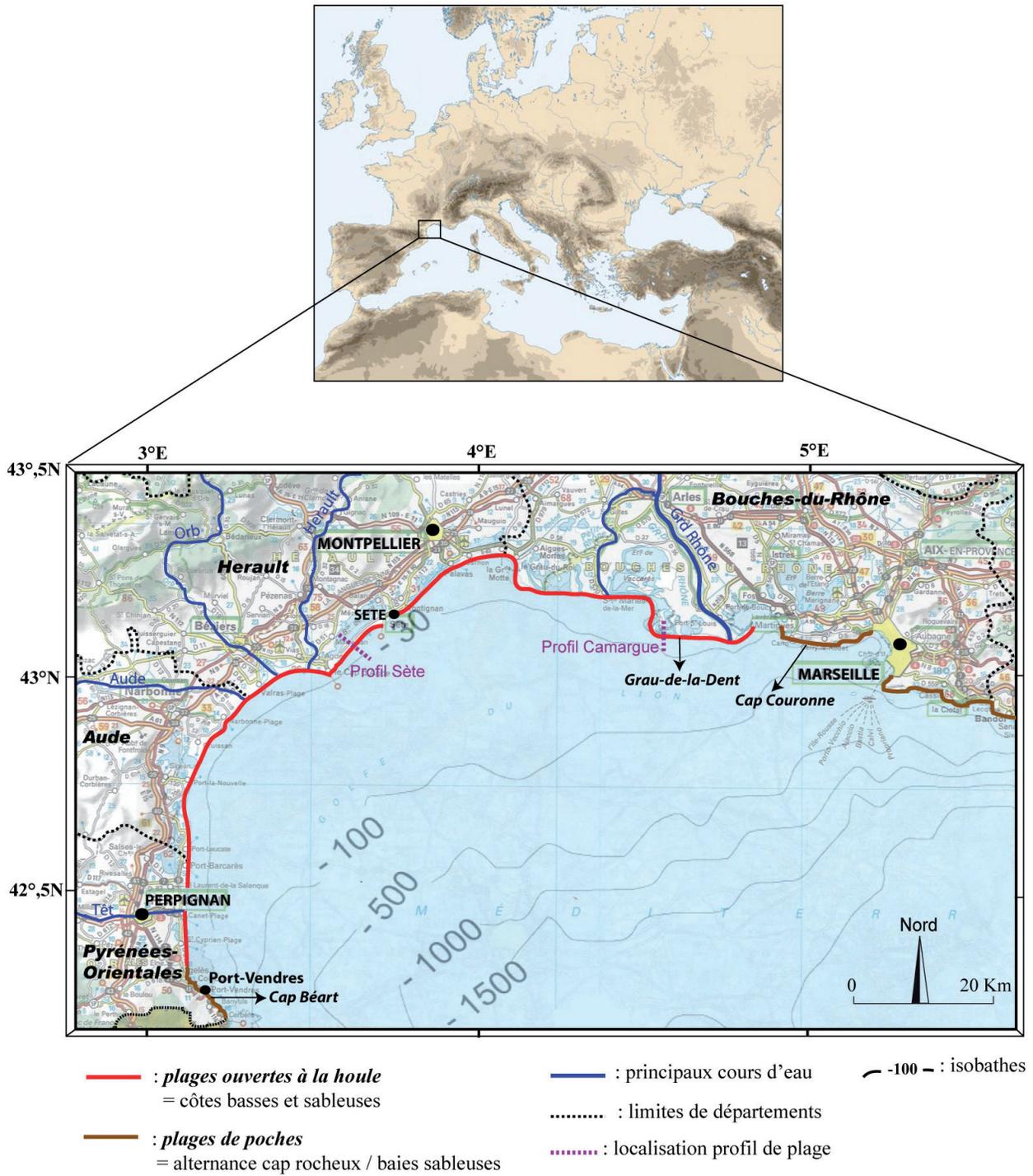


Fig. 1. — Localisation.

table face aux pics de niveaux marins extrêmes et concentre une multitude de « hot spots » où les risques sont sérieux. L'objectif de cette étude est d'analyser l'évolution des niveaux marins extrêmes à l'échelle du xx^e siècle et les forçages climatiques associés (approche diagnostique), dans le but de prévoir leur hauteur et fréquence au XXI^e siècle dans le cadre du changement climatique (approche par modélisation).

3.1 Données

3.1.1 Données marégraphiques

La série marégraphique quotidienne (12h TU) du Grau-de-la-Dent (43.3°N-5°E) de 1905 à 2005 est analysée dans cette étude. Les données proviennent de la Compagnie de Salins du Midi et de l'Est et sont exprimées par rapport au système altimétrique de référence du *Niveau général français* (NGF). La série souffre d'un hiatus entre 1960 et 1974.

Pour chaque valeur quotidienne de hauteur d'eau enregistrée, la marée astronomique correspondante a été calculée à l'aide d'un logiciel spécifique (POLIFEMO ; Tomasin, 2005 ; Ullmann *et al.*, 2007a). La soustraction de la valeur de la marée astronomique des données marégraphiques brutes permet d'extraire la surcote marine, défini comme l'élévation anormale du plan d'eau par rapport à la hauteur normalement atteint par la marée astronomique. Pour calculer les variations de la marée astronomique, le logiciel réalise une analyse harmonique sur les données disponibles afin d'en extraire les principales constantes harmoniques (Ullmann *et al.*, 2007a). L'utilisation des séries de hauteurs de surcotes par rapport à celles des données marégraphiques brutes permet d'analyser aussi indépendamment que possible l'évolution du niveau marin uniquement forcé par les conditions météorologiques dans le Golfe du Lion.

3.1.2 Pression atmosphérique de surface

Les données de surcotes sont comparées aux données de pression atmosphérique de surface. Les données quotidiennes à 6 h TU de 1905 à 2002 sont issues des ré-analyses du NCAR (National Center for Atmospheric Research) et ont été extraites du site <http://dss.ucar.edu/>. Elles sont exprimées en hectopascals (hPa), ont une résolution spatiale de 5° de longitude et de 5° de latitude et couvrent l'ensemble du globe.

Deux séries de pression atmosphérique quotidiennes à 12 h TU de 1980 à 2100 sont également utilisées dans cette étude. Elles proviennent des simulations du modèle de circulation générale ARPEGE-climat de Météo France (Royer *et al.*, 2002). Il simule le champ de pression sur l'ensemble du Globe avec une résolution spatiale de 2.8°*2.8°. Les deux séries de pression atmosphérique sont simulées selon deux scénarios du changement climatique différents : le scénario A2, plutôt pessimiste, et le scénario B2, le plus optimiste (IPCC, 2007).

3.2 Niveaux marins extrêmes et surcotes : variabilité au xx^e siècle

Lorsqu'un pic de niveau marin est atteint dans le Golfe du Lion, il est important de considérer deux éléments distincts

dans la hauteur du plan d'eau. Le premier correspond à la surcote (figure 2), c'est-à-dire la hausse brutale et transitoire du niveau marin sous l'effet des forts vents de mer qui poussent et accumulent la masse d'eau vers la côte. Le deuxième correspond au niveau marin moyen dont les variations sont bien plus stables, multi-décennales à séculaires (figure 2). Un pic de niveau marin observé à un moment donné correspond ainsi à la superposition d'une surcote marine sur un niveau marin moyen.

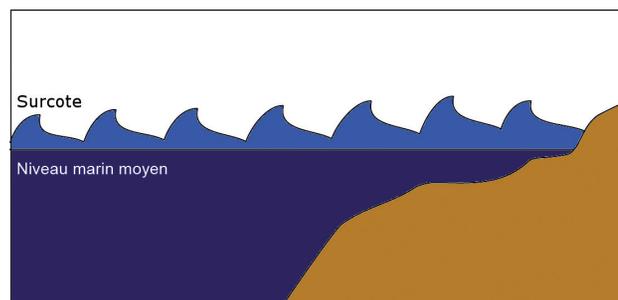


Fig. 2. — Représentation schématique d'un pic de niveau marin.

Pour analyser l'évolution de la hauteur des pics de niveaux marins extrêmes à l'échelle du xx^e siècle, le percentile annuel à 90 % (P90) du niveau marin a été calculé de 1905 à 2005 au Grau-de-la-Dent. La figure 3a montre que la hauteur des niveaux marins extrêmes a augmenté au xx^e siècle à une vitesse moyenne de + 0.32 cm/an, significative au seuil de 99 % par un test en T de Student. De cette augmentation, deux différents types de variabilité du niveau marin peuvent être isolés. Le premier correspond à l'augmentation significative du P 90 des surcotes uniquement, à une vitesse de +0,12 cm/an (figure 3b). Le deuxième correspond à la lente remontée du niveau marin moyen de +0,20 cm/an (figure 3c). En d'autres termes, la hausse des niveaux marins extrêmes dans le Golfe du Lion au xx^e siècle correspond à la superposition de l'augmentation des surcotes et de la remontée du niveau marin moyen (Ullmann *et al.*, 2007a). Du point de vue climatique, cette dernière est principalement associée au réchauffement de la Méditerranée entraînant la dilation de la masse d'eau (Moron, 2003). Ce réchauffement de la Méditerranée est synchrone du réchauffement global des mers et des océans et peut être en partie attribué à l'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre d'origine anthropique et donc au changement climatique *stricto-sensu* (Moron 2003 ; Ullmann, 2008). La hausse des surcotes est principalement liée à l'augmentation de la fréquence et de la force des tempêtes et des vents de sud à sud-est dans le Golfe du Lion (Ullmann *et al.*, 2007b ; Ullmann et Pirazzoli, 2007). Pour résumer, l'élévation séculaire des pics de niveaux marins extrêmes dépend de l'interaction entre des forçages climatiques agissant à différentes échelles spatio-temporelles.

3.3 Modélisation des surcotes au xx^e siècle

Afin de prévoir la fréquence et l'intensité des surcotes marines au XXI^e siècle, il est tout d'abord nécessaire d'élaborer un modèle de prévision à partir des observations faites

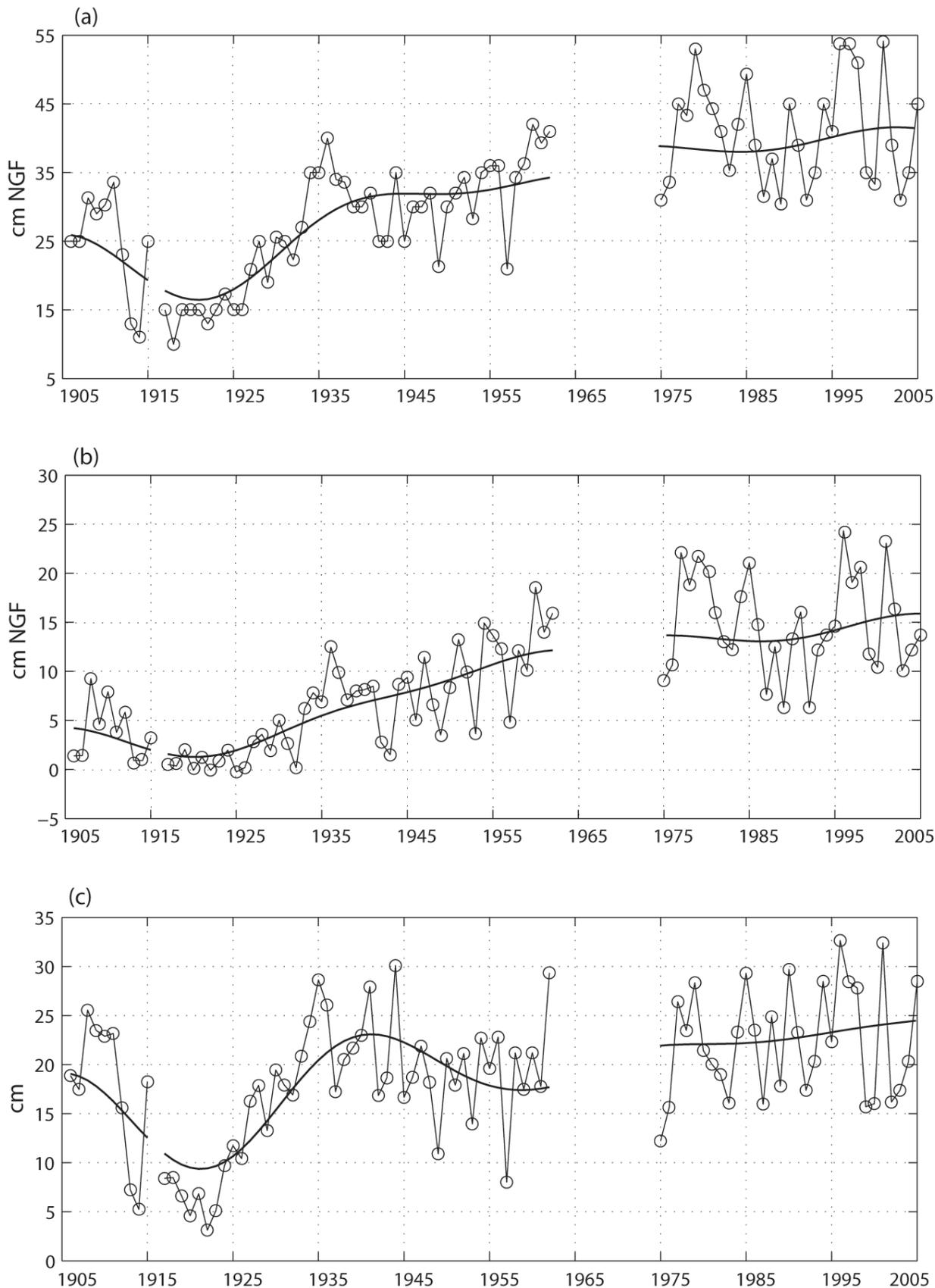


Fig. 3. — (a) Percentile annuel à 90% (en cm) du niveau marin, (b) niveau marin annuel moyen et (c) percentile annuel à 90% des surcotes au Grau-de-la-Dent de 1905 à 2005. En trait gras superposé, les variations filtrées par un filtre de Butterworth passe-bas ne retenant que les périodes plus longues que 30 ans.

au xx^e siècle. La figure 4 présente les corrélations entre les variations quotidiennes de la hauteur des surcotes au Grau-de-la-Dent de 1974 à 2002 et le champ de pression atmosphérique sur l'Atlantique Nord et L'Europe. Cette méthode a pour but de déterminer quels sont les secteurs barométriques les plus fortement reliés aux variations locales des surcotes. Au Grau-de-la-Dent, les variations quotidiennes des surcotes sont les plus fortement corrélées aux variations de la pression atmosphérique autour d'un secteur centré sur le Golfe de Gascogne, du nord de la Péninsule Ibérique au sud-ouest de la France (figure 4). La corrélation maximale négative atteint - 0.6 (significative au seuil de 99 % par un test T de Student). Compte-tenu de l'échelle spatiale de l'analyse et de la taille de l'échantillon, une corrélation de - 0.6 entre la pression atmosphérique quotidienne sur une large fenêtre spatiale et les surcotes locales témoigne d'une relation robuste. La variabilité quotidienne de la pression atmosphérique autour du Golfe de Gascogne est également la plus fortement corrélée à celle des surcotes dans d'autres secteurs du Golfe du Lion, comme à Sète et à Port-Vendres (Ullmann et Moron, 2007). La Méditerranée ne se situe pas sur l'axe préférentiel de déplacement des perturbations tempérées et les dépressions y sont rarement très creusées (Rogers, 1997). Ces corrélations peuvent donc être expliquées par les variations importantes de la pression entre le nord de la Péninsule Ibérique et les sud des Iles Britanniques, associées au passage des perturbations tempérées sur le proche Atlantique, générant des vents de sud à sud-est dans le Golfe du Lion.

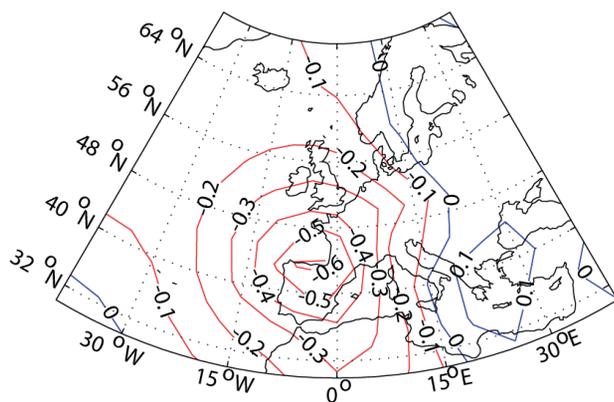


Fig. 4. — Corrélations entre la pression atmosphérique et les variations quotidiennes de la hauteur des surcotes/décotes à 12h TU au Grau-de-la-Dent de 1986 à 1995. Les corrélations positives (négatives) en bleu (rouge) sont cotées par intervalles de 0.1.

À partir de ce constat, un modèle de régression linéaire est testé avec la pression atmosphérique quotidienne autour du Golfe de Gascogne ($[15^{\circ}W-0^{\circ}W]$, $[40^{\circ}N-45^{\circ}N]$) comme prédicteur de la hauteur quotidienne des surcotes. Ce modèle est testé en validation croisée avec les données de surcotes du Grau-de-la-Dent sur la période de 1974 à 2002. Dans un premier temps, les coefficients de la régression sont calculés sur la période de 1974 à 1988 et appliqués de 1989 à 2002, ce qui permet de simuler une série quotidienne de surcotes de 1989 à 2002 à partir d'un modèle

élaboré sur une période antérieure. Ce cas où l'apprentissage des coefficients s'effectue sur une période antérieure à la vérification permet de se rapprocher d'un cas opérationnel, dans lequel on ne connaît pas à l'avance les valeurs du prédictant.

Les percentiles mensuels à 90 % (P 90) des surcotes et la fréquence mensuelle des surcotes > 20 cm (L 20) issus des simulations sont ensuite comparés aux observations au Grau-de-la-Dent de 1989 à 2002. La corrélation entre les simulations et les observations est élevée : 0.82 pour les P 90 et 0.73 pour les L 20, significative à plus de 99 % (tabl. 1). Même si une forte erreur existe pour certains mois (février 1990 ou février 1995 ; figure 5), l'erreur-type est faible.

Tabl. 1. — Statistiques sur les percentiles (en cm) mensuels à 90% (P90) et les fréquences mensuelles des surcotes > 20 cm (L20) simulées par la régression linéaire calculée de 1974-1988 et appliquée sur la période 1989-2002 : corrélations entre observations au Grau-de-la-Dent et simulations (r), erreur type (ET) et écart-type (σ). Les trois étoiles indiquent une corrélation significative au seuil de 99 % par un test en T de Student

	r (observations vs simulations)	ET	σ simulations	σ observations
P90 mensuel	0.82***	7.2 cm	7.8 cm	11.9 cm
L20 mensuel	0.73***	7.6 %	11.1 %	15.5 %

Le même exercice est répété en permutant les périodes d'apprentissage et de vérification avec des résultats (coefficients de la régression, scores statistiques) très similaires au test précédent (non montré). Pour résumer, le modèle de régression linéaire permet d'estimer de façon performante la variabilité interannuelle de la fréquence et de la hauteur des surcotes à partir de la pression atmosphérique autour du Golfe de Gascogne (Ullmann, 2008).

3.4 Prédiction des surcotes et des niveaux marins extrêmes au xxi^e siècle

3.4.1 Les surcotes

La prédiction des surcotes au xxi^e siècle se base sur le même modèle de régression que précédemment, en utilisant cette fois-ci la pression atmosphérique quotidienne autour du Golfe de Gascogne simulée de 1980 à 2100 par le modèle ARPEGE-Climat de Météo France. Deux scénarios du changement climatique différents sont utilisés, A2 plutôt pessimiste et B2 plutôt optimiste. Une série quotidienne de hauteur de surcote est ainsi simulée pour l'ensemble du xxi^e siècle et pour deux scénarios du changement climatique.

La figure 6 montre la variabilité lente des P 90 et L 20 annuelle des surcotes simulées de 2005 à 2100 dans A 2 et B 2. Pour ces deux scénarios, la fréquence et la hauteur des surcotes restent statistiquement stationnaires. Afin de détecter le signal maximum associé à chacun des scénarios, il est important de se focaliser sur la deuxième moitié du xxi^e siècle. En effet, la variabilité climatique forcée

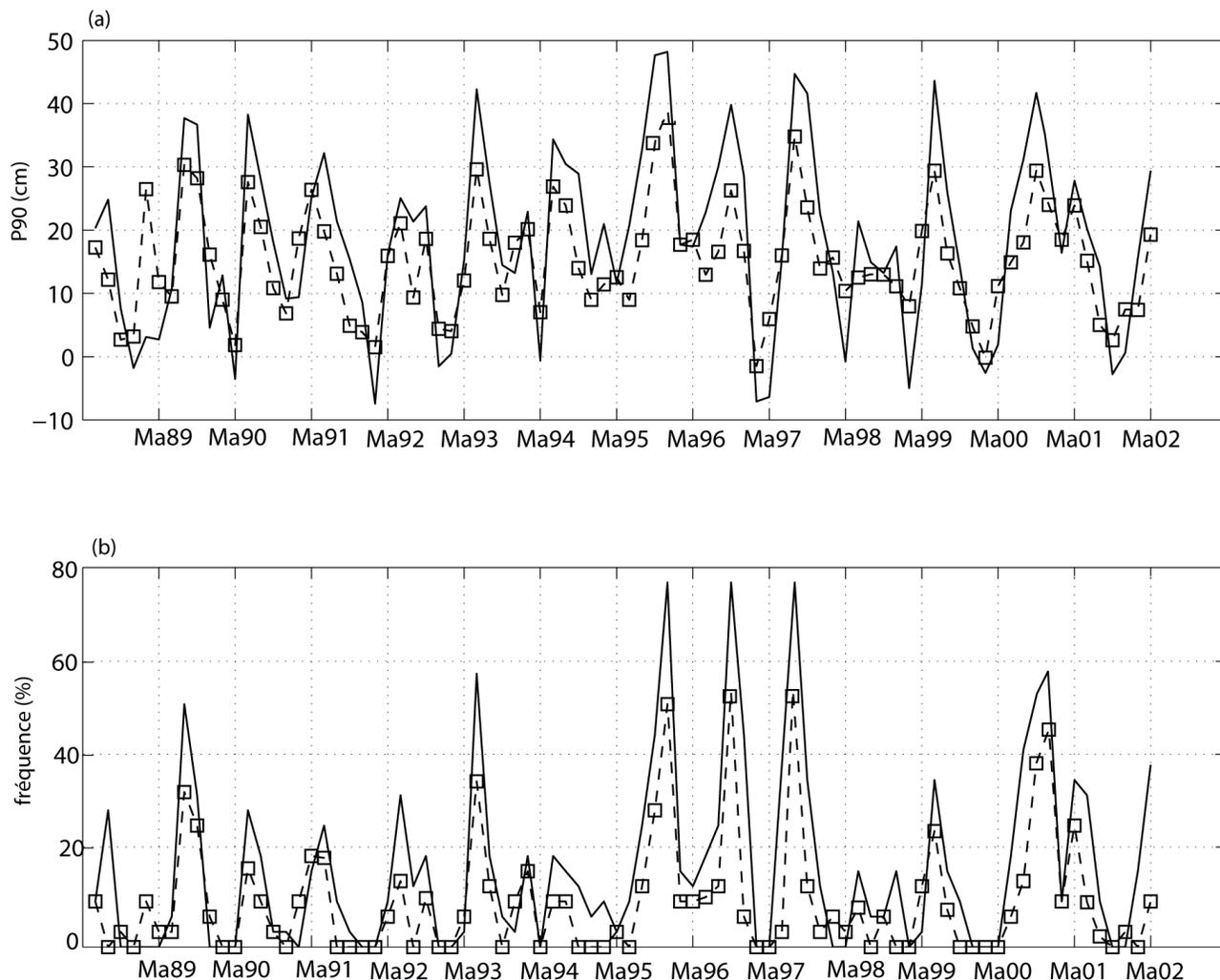


Fig. 5. — (a) Percentile (en cm) mensuel à 90% (P90) des surcotes observées au Grau-de-la-Dent de 1989 à 2002 (trait noir), simulées par la régression linéaire calculée de 1974 à 1988 (trait tireté et carrés). (b) Idem pour la fréquence mensuelle des surcotes > 20 cm.

par l'augmentation de l'effet de serre, selon les deux scénarios envisagés, est maximale à la fin de XXI^e siècle et sera *a priori* noyée dans la variabilité naturelle du système climatique dans les années 2020-2030 par exemple. Un point d'intérêt vient alors du fait que dans les 20 dernières années du XXI^e siècle, la variabilité lente de la fréquence et de la hauteur des surcotes est quasiment similaire dans A2 et B2 (figure 6). Autrement dit, l'évolution des surcotes au XXI^e siècle pourrait être très peu sensible à la différence de scénario. Lionello *et al* (2006) montre également que la fréquence des épisodes cycloniques dans le bassin méditerranéen occidental pourrait rester stationnaire au XXI^e siècle, indépendamment des scénarios envisagés. Pour résumer, le changement climatique à venir pourrait ne pas modifier significativement la fréquence et la hauteur des surcotes de tempêtes dans le Golfe du Lion (Ullmann, 2008).

Les modèles de circulation générale, comme tous modèles climatiques, sont chaotiques (le système climatique est lui-même chaotique). Cela signifie qu'ils ne simulent pas la chronologie réelle de l'atmosphère, sauf celle liée aux forçages externes comme les aérosols et les gaz à effet de serre. Autrement dit, les modèles ne simulent pas la variabilité

naturelle du climat mais uniquement la réponse du climat aux forçages externes qu'on lui impose. La stationnarité des surcotes au XXI^e siècle dans les scénarios A2 et B2 est ainsi la réponse du climat uniquement liée à la hausse des gaz à effet de serre prévue dans ces deux scénarios du changement climatique. On pourrait alors légitimement penser que la légère hausse des surcotes dans la deuxième moitié du XX^e siècle, où la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre a augmenté, résulte de la variabilité naturelle du climat et non du changement climatique d'origine anthropique.

3.4.2 La fréquence et la hauteur des pics de niveaux marins extrêmes

Dans une perspective d'impact, c'est le niveau marin réellement atteint qui prend de l'importance et pas seulement la surcote. Le pic de niveau marin réellement atteint correspond à la superposition de la surcote marine sur un niveau marin moyen (section 2). La réponse hydrostatique de la mer à l'élévation générale et régionale des températures constitue un élément primordial de l'élévation à long terme du niveau marin moyen. Plusieurs autres facteurs pourraient contribuer à l'élévation à long terme du niveau

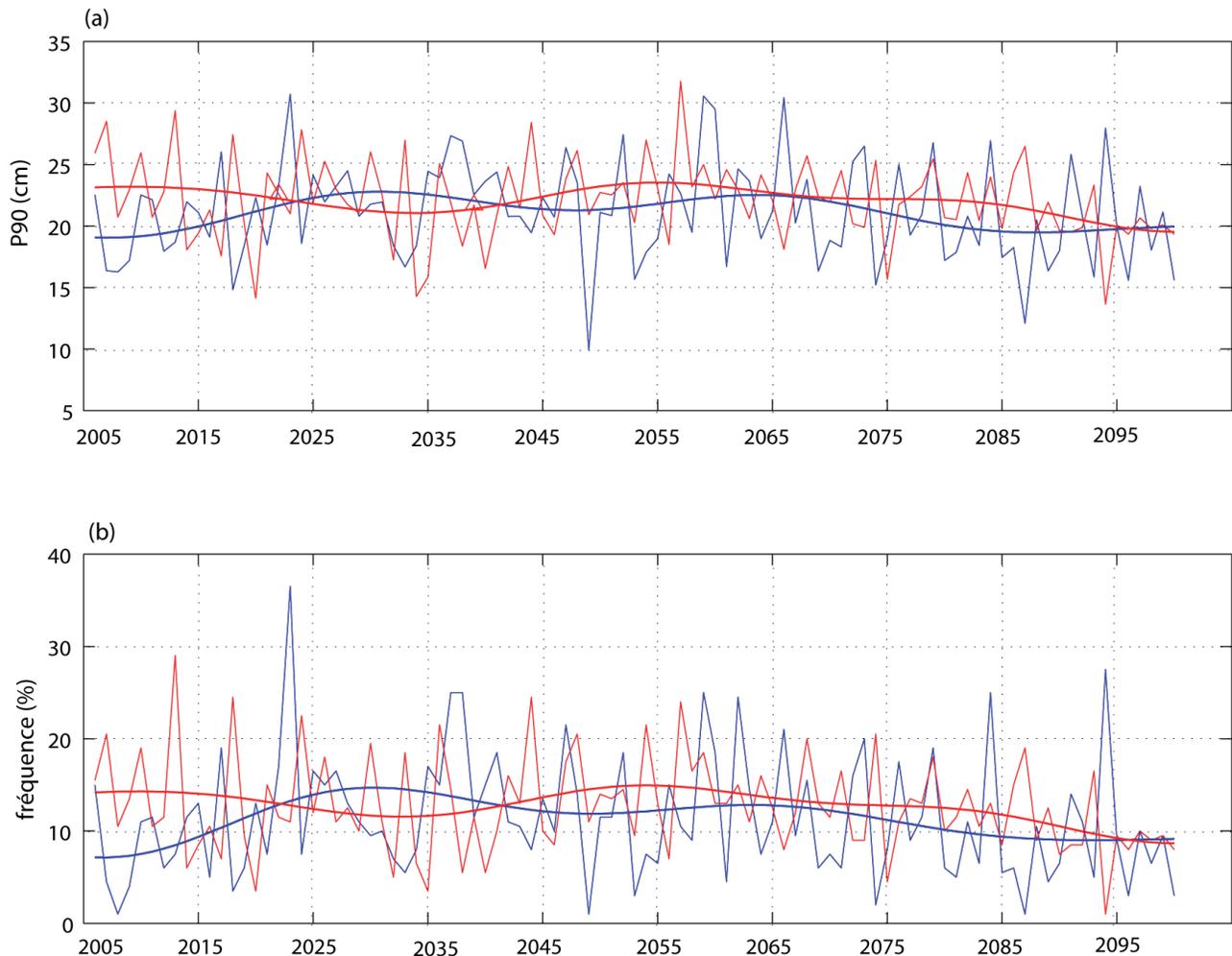


Fig. 6. — (a) Percentile (en cm) annuel à 90% et (b) fréquence (en %) annuelle des surcotes > 20 cm simulées de 2005 à 2100 par le modèle de régression linéaire à partir de la pression atmosphérique de $[15^{\circ}\text{W}-0^{\circ}\text{W}]$, $[40^{\circ}\text{N}-45^{\circ}\text{N}]$ dans A2 (rouge) et dans B2 (bleu). En trait gras superposé, les variations filtrées par un filtre de Butterworth passe-bas ne retenant que les périodes plus longues que 30 ans.

marin, comme la fonte des glaciers continentaux et inlandsis, incluant le Groenland et l'Antarctique (Lambeck *et al.*, 1990 ; Cabanes *et al.*, 2001). La somme de ces facteurs devrait induire une hausse de $+1$ mm/an à $+7.5$ mm/an, selon les scénarios et l'importance des forçages anthropiques par rapport aux autres facteurs (figure 7 ; IPCC 2007). Dans le scénario A2, la hausse du niveau marin moyen varie entre $+1.5$ mm/an et $+7.5$ mm/an avec une moyenne de $+4$ mm/an. Pour B2, la hausse du niveau marin se situe entre $+1$ mm/an et $+6.5$ mm/an avec une moyenne de $+3.3$ mm/an (IPCC, 2007).

Même si les surcotes des tempêtes pourraient rester stationnaires au XXI^e siècle, elles vont donc se produire sur un niveau marin moyen de plus en plus haut, évolution qui apparaît aujourd'hui comme inéluctable en raison de l'inertie du phénomène. Des méthodes « classiques » consistent à estimer le niveau marin futur, uniquement par la somme du niveau marin moyen actuel et des différentes projections de sa hausse. Cependant, la hausse seule du niveau marin moyen ne donnerait qu'une idée partielle de l'évolution de la fréquence et de la hauteur des niveaux marins extrêmes réellement atteints. En intégrant les surcotes (et donc les

forçages atmosphériques), l'intérêt est de pouvoir disposer d'une information sur la variabilité interannuelle de la fréquence et de la hauteur des niveaux marins les plus hauts. La hauteur quotidienne du niveau marin est donc reconstruite de 2005 à 2100, conformément à la décomposition présentée en section 2. Tout d'abord, pour reconstruire le niveau marin « brut » dans A2, le niveau marin moyen observé au Grau-de-la-Dent de 2000 à 2005 est ajouté aux valeurs quotidiennes de surcotes simulées dans A2 de 2005 à 2100. Est ajoutée ensuite la projection basse, moyenne et haute de remontée du niveau marin pour le scénario A2 ($+1.5$ mm/an, $+4$ mm/an et $+7.5$ mm/an). Les mêmes opérations sont réalisées avec les surcotes quotidiennes simulées dans B2 et les projections de l'élévation du niveau marin de ce scénario ($+1$ mm/an, $+3.3$ mm/an et $+6.5$ mm/an). Les P90 annuels et les fréquences annuelles des pics de niveaux marins dépassant différents seuils sont extraits des séries marégraphiques ainsi obtenues.

Projections basses

Dans les projections basses du scénario A2 ($+1.5$ mm/an) et B2 ($+1$ mm/an), on constate une élévation impor-

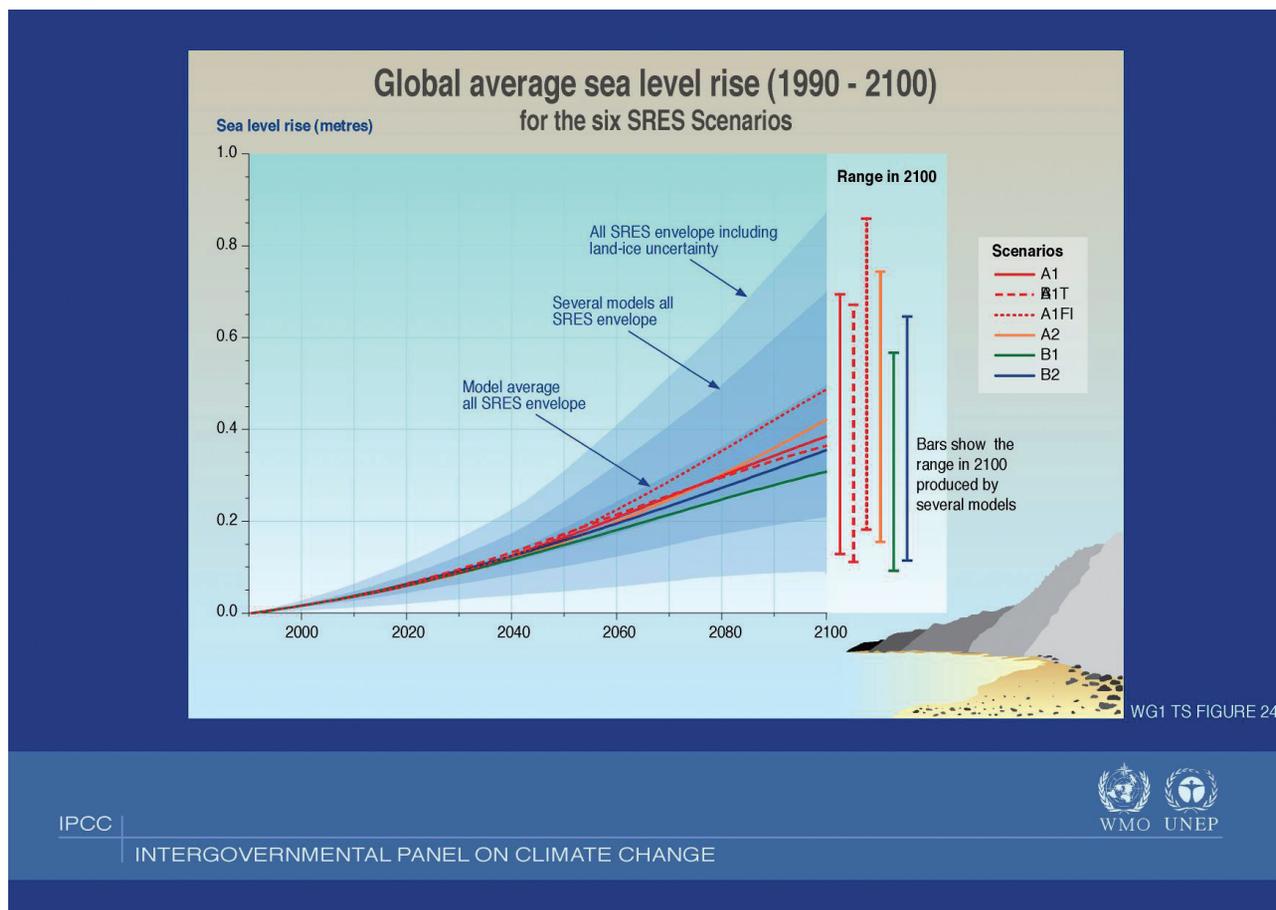


Fig. 7. — Projections de la hausse du niveau marin dans différents scénarios de l'IPCC (2001). <http://www.ipcc.ch/>

tante des P90 du niveau marin au *xxi*^e siècle (figure 8). Ils atteignent en moyenne plus de 40 cm NGF pour B2 et plus de 45 cm NGF pour A2 à la fin du *xxi*^e siècle. Le niveau > 40 cm est aujourd'hui le seuil à partir duquel le niveau marin devient géomorphologiquement actif dans le processus d'érosion du littoral du Golfe du Lion (Bruzzi, 1996). Ces niveaux représentent actuellement 1 % des jours par an (Ullmann, 2008). À la fin du *xxi*^e siècle, leur fréquence pourrait dépasser en moyenne 20 % des jours par an pour B2 et 30 % pour A2 (figure 8). Mais ces fréquences moyennes cachent des années durant lesquelles plus de 60 % (35 %) des jours pourraient être associés à des niveaux marins > 40 cm dans A2 (B2). Le littoral bas et sableux du Golfe du Lion va donc vraisemblablement devenir de plus en plus vulnérable à l'érosion, même en tenant compte des projections les plus optimistes.

Projections moyennes

Les estimations moyennes de la hausse du niveau marin moyen semblent actuellement les plus réalistes si la vitesse d'élévation du niveau marin moyen demeure identique à celle observée dans les 30 dernières années du *xx*^e siècle. Dans ce cas, les P90 annuels atteignent plus de 60 cm NGF pour B2 et plus de 75 cm NGF dans A2 à la fin du *xxi*^e siècle (figure 9). La fréquence des niveaux marins érosifs, soit > 40 cm, pourrait dépasser 80 % (90 %) des jours par an à la fin du *xxi*^e siècle pour B2 (A2). Autrement dit, le niveau marin pourrait atteindre de façon quasiment permanente

le seuil associé aujourd'hui aux phénomènes d'érosion et d'accrétion du littoral.

Les niveaux marins de 80 cm ont actuellement un temps de retour de 10 ans dans le Golfe du Lion (Pirazzoli *et al.*, 2007). Dans le scénario A2, leur occurrence serait en moyenne de plus de 5 % des observations annuelles, soit environ 9 jours par an, avec parfois plus de 15 jours par an à la fin du *xxi*^e siècle. Dans B2, la fréquence annuelle des niveaux marins > 80 cm reste très faible (figure 9). Il est donc important de noter qu'une différence de hausse du niveau marin moyen de seulement +0.7 mm/an entre A2 et B2 peut entraîner des écarts très importants dans la fréquence à venir des niveaux marins extrêmes. La vitesse à laquelle le niveau marin moyen s'élèvera va donc fortement influencer les temps de retour des niveaux marins considérés aujourd'hui comme extrêmes. En conséquence, notre impact sur le climat au niveau du réchauffement des températures atmosphériques et océaniques pourrait être particulièrement sensible en termes de fréquence et d'augmentation des pics de niveaux marins extrêmes dans le Golfe du Lion.

Projections hautes

Si le réchauffement de la planète se poursuit, il se pourrait que les vitesses de hausse du niveau marin moyen observées aujourd'hui s'accroissent fortement au *xxi*^e siècle. Dans ce cas, les P90 annuels pourraient dépasser 1 mètre pour A2 et 90 cm pour B2. Le niveau marin moyen pourrait

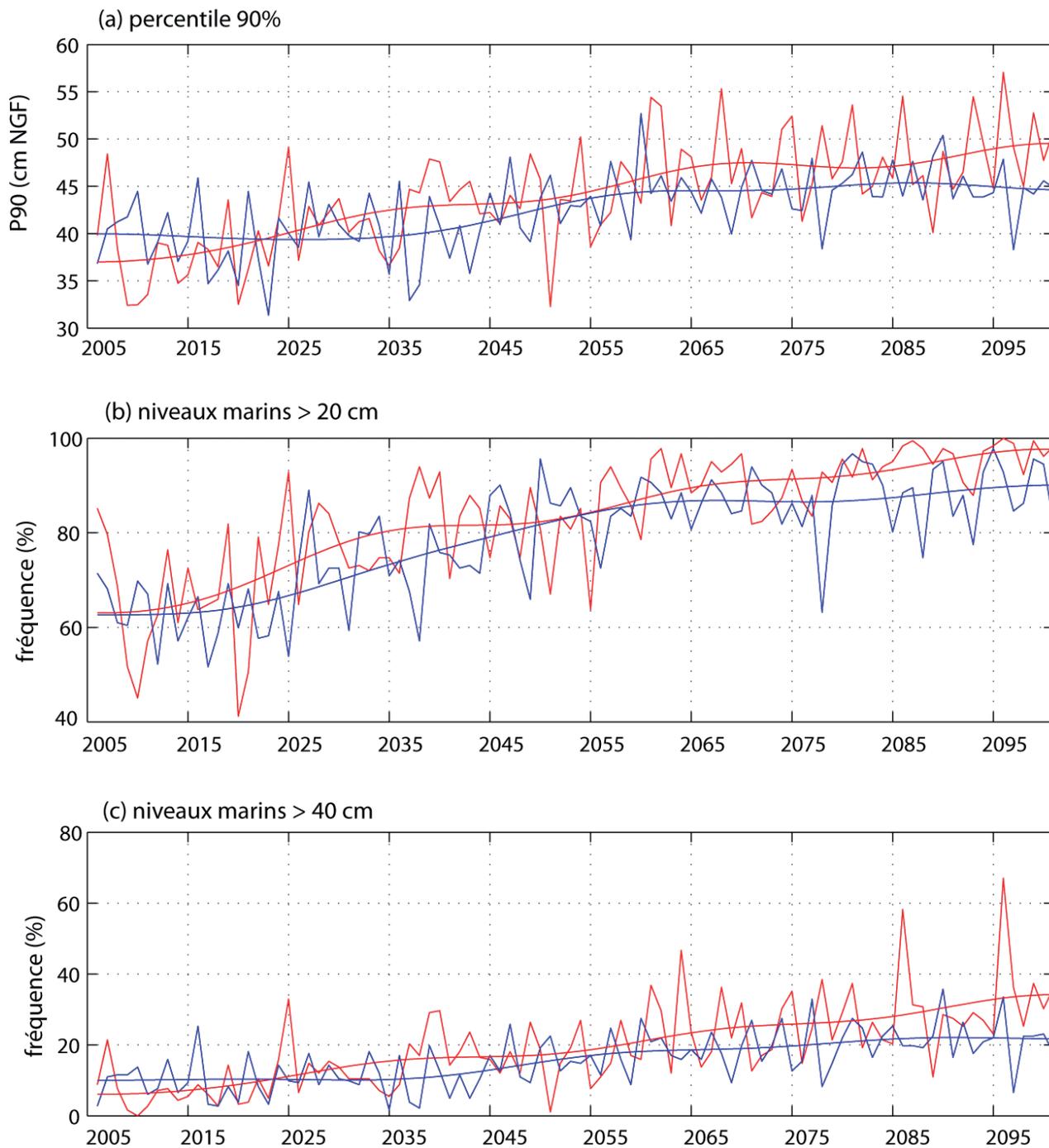


Fig. 8. — (a) Percentile (en cm NGF) annuel à 90%, (b et c) fréquence (en %) annuelle des niveaux marins > 20 et 40 cm dans A2 (rouge) et B2 (bleu) de 2005 à 2100, selon les estimations basses (+1 mm/an pour B2 et +1.5 mm/an pour A2) de remontée du niveau marin. En trait gras superposé, les variations filtrées par un filtre de Butterworth passe-bas ne retenant que les périodes plus longues que 30 ans.

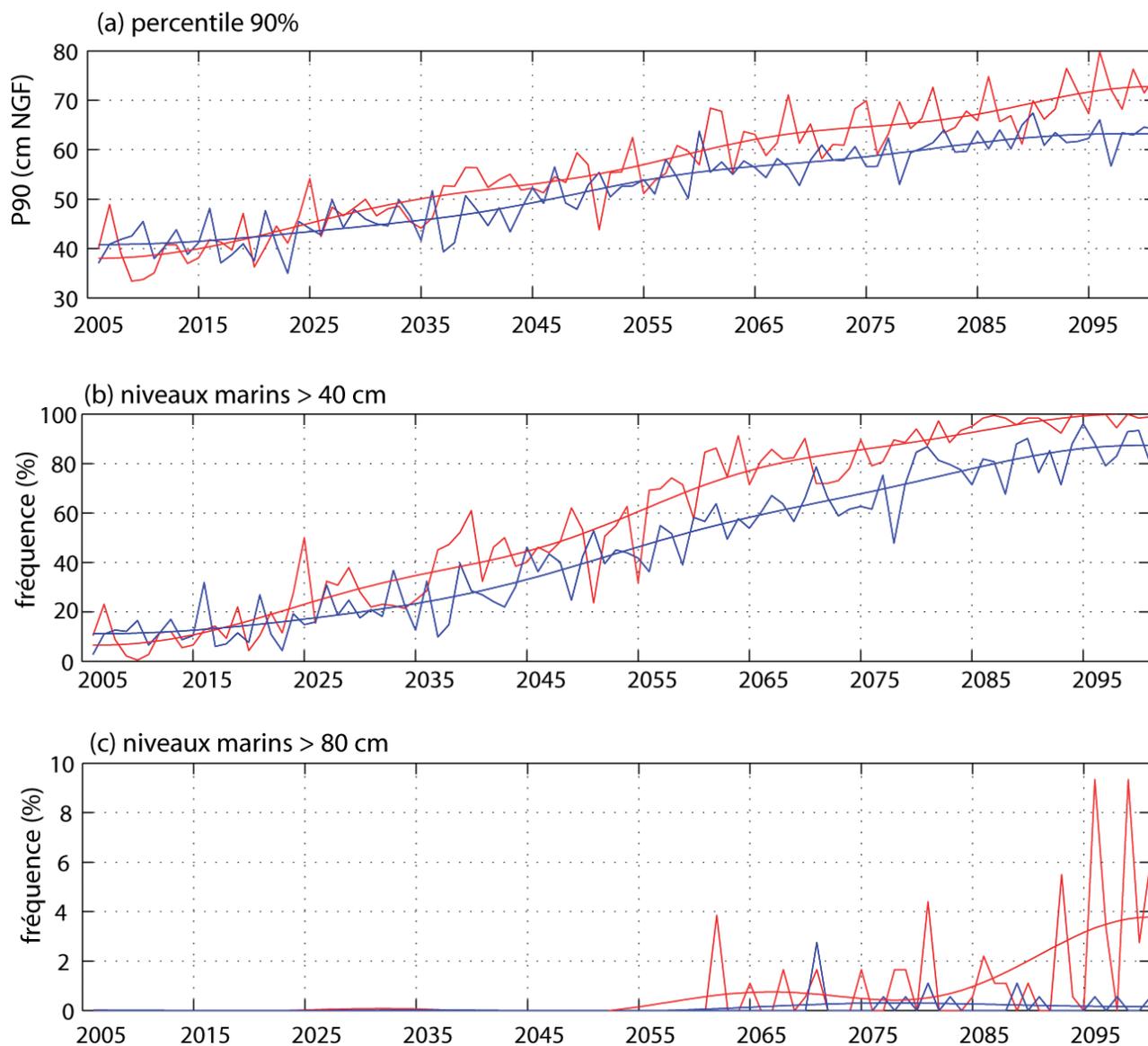


Fig. 9. — (a) Percentile (en cm NGF) annuel à 90%, (b et c) fréquence (en %) annuelle des niveaux marins > 40 et 80 cm dans A2 (rouge) et B2 (bleu) de 2005 à 2100, selon les estimations moyennes (+3.3 mm/an pour B2 et +4 mm/an pour A2) de remontée du niveau marin. En trait gras superposé, les variations filtrées par un filtre de Butterworth passe-bas ne retenant que les périodes plus longues que 30 ans.

franchir le seuil de 60 cm NGF à la fin du XXI^e siècle pour A2 et B2 et les niveaux > 1 mètre, aujourd'hui plus que centennaux (Pirazzoli *et al.*, 2007), seraient atteints plusieurs fois par an à l'horizon 2080 (figure 10).

3.4.3 Tempêtes destructrices : quelle fréquence au XXI^e siècle ?

Le 8 novembre 1982, le quotidien *La Provence* titrait : « Vent fou sur la Provence, [...] bateaux brisés : tempête de sud-est, rafales entre 90 et 100 km/h ». Le lendemain, le quotidien titrait : « Tempêtes : 11 morts et des dégâts considérables ; la mer a envahi les Saintes-Maries » en référence à ce qui s'était déroulé la veille. Le 18 décembre 1997, le quotidien *La Provence* titrait : « Neige et tempête sur toute la région [...] à Salins de Giraud, une digue frontale a cédé [...] vents de 120 km/h ». Le lendemain : « Tempête : l'inondation est venue

de la mer ». Ces épisodes restent encore aujourd'hui considérés comme les tempêtes particulièrement destructrices, en particulier pour les infrastructures côtières. Lors de ces deux tempêtes qui ont marqué le Golfe du Lion, la cote du niveau marin enregistré par le marégraphe du Grau-de-la-Dent, de Sète et de Port-Vendres a atteint 90 cm NGF (Ullmann, 2008). Cette cote a aujourd'hui une probabilité de retour de 95 ans (Pirazzoli *et al.*, 2007). La table 2 présente une synthèse de la prévision des fréquences annuelles des pics de niveau marin > 90 cm qui pourraient être atteintes au XXI^e siècle dans le scénario optimiste (B2) et pessimiste (A2) du changement climatique et selon les projections basses, moyennes et hautes de remontée du niveau marin moyen de chaque scénario. Il est tout d'abord intéressant de noter que la fréquence des pics de niveaux marins > 90 cm ne devrait pas augmenter significativement d'ici à 2025 même dans le scénario pessimiste du changement climatique (table 2). Dans le Golfe du

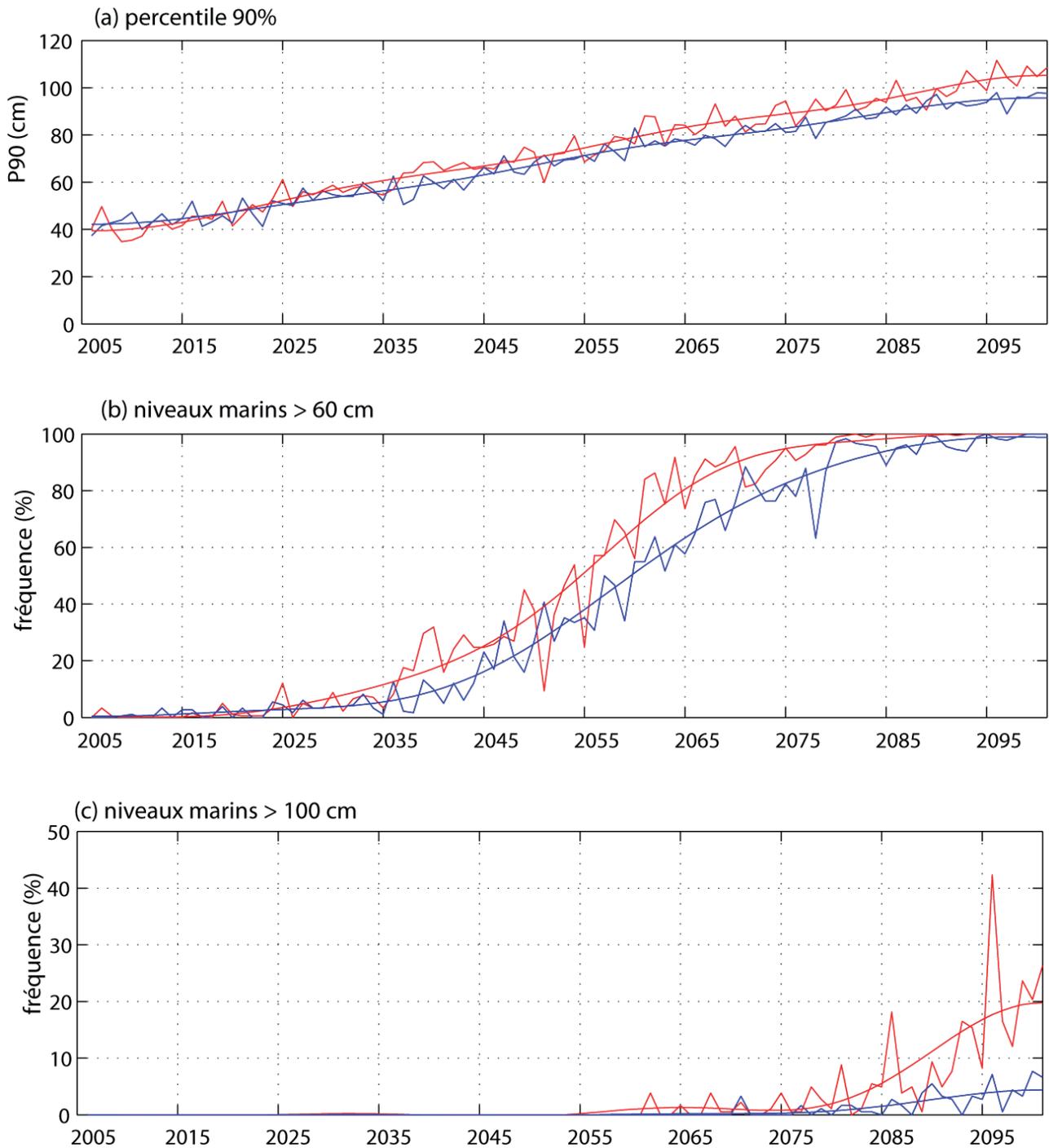


Fig. 10. — (a) Percentile (en cm NGF) annuel à 90%, (b et c) fréquence (en %) annuelle des niveaux marins > 60 et 100 cm dans A2 (rouge) et B2 (bleu) de 2005 à 2100, selon les estimations hautes (+6.5 mm/an pour B2 et +7.5 mm/an pour A2) de remonté du niveau marin. En trait gras superposé, les variations filtrées par un filtre de Butterworth passe-bas ne retenant que les périodes plus longues que 30 ans.

Lion, le changement climatique nous laisserait donc encore un peu plus d'une décennie de répit. En revanche, en 2050, les pics dépassant 90 cm pourraient se produire plusieurs fois par an même dans le scénario le plus optimiste du changement climatique (table 2). Si le niveau marin suit les projections hautes de l'IPCC, leur fréquence pourrait même atteindre entre 5 et 15 % des jours par an selon les scénarios envisagés. Enfin, à l'horizon 2100, il est clair que

ces pics extrêmes vont inéluctablement devenir largement pluriannuels, même dans le scénario le plus optimiste du changement climatique et cela en raison uniquement de la lente remontée du niveau marin moyen.

Les pics de niveau marin associés aux tempêtes jusqu'alors destructrices vont inéluctablement devenir de plus en plus fréquents. L'aléa associé aux principaux risques naturels du littoral du Golfe du Lion, c'est-à-dire la submersion et l'éro-

sion, va donc augmenter. Le devenir de ces risques va donc dépendre de la vulnérabilité des divers espaces littoraux du Golfe du Lion (espace d'habitation, touristique, industriel, agricoles,...) dont l'évolution va dépendre des mesures de gestion des risques et des trajectoires socio-économiques qui vont être prises pour le XXI^e siècle.

Tabl. 2. — Récapitulatif sur les prévisions des fréquences annuelles des niveaux marins quotidiens > 90 cm aux horizons 2025, 2050 et 2100, selon le scénario A2 et B2 du changement climatique et leur projection respective basse, moyenne et haute de remontée du niveau marin moyen

Vitesse de hausse du niveau marin moyen	A2			B2		
	+1,5 mm/an	+4 mm/an	+7,5 mm/an	+1 mm/an	+3,3 mm/an	+6,5 mm/an
2025	0,1%	0,1%	<1%	0,1%	0,1%	<1%
2050	<1%	2%	15%	<1%	1%	5%
2100	1%	4%	25%	1%	1-2%	15%

Conclusion

Dans le Golfe du Lion, le changement climatique risque vraisemblablement d'entraîner une intensification et multiplication des pics de niveaux marins extrêmes, comme ceux atteints lors de deux plus importantes tempêtes du Golfe du Lion au XX^e siècle et ayant causé des dégâts considérables le long du littoral. Cette recrudescence semble aujourd'hui inéluctable puisqu'elle n'est pas associée à une évolution probabiliste des tempêtes à l'échelle du Golfe du Lion mais à la lente remontée du niveau marin moyen sous l'effet du réchauffement. En effet, ce phénomène aujourd'hui avéré va inéluctablement se poursuivre en raison de l'inertie thermique des mers et des océans.

Les mesures récentes de hausse du niveau marin moyen par altimétrie montrent que la vitesse moyenne se situe en 3.4 et 4 mm/an (Rahmstorf *et al.*, 2007). Cette vitesse est cohérente avec les observations faites en Méditerranée (Cazenave *et al.*, 2001 ; Ullmann *et al.*, 2007a). Durant ces 8 dernières années, les émissions de CO₂ à l'échelle planétaire témoignent nettement que le scénario B2 est de moins en moins probable pour le XXI^e siècle et que nous nous rapprochons fortement du scénario A2 (Rahmstorf *et al.*, 2007). Si l'accélération de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre se poursuit au XXI^e siècle, il est fort probable que la hausse du niveau marin puisse être encore plus rapide que les projections moyennes de l'IPCC et atteindre alors les projections hautes du scénario A2.

Cette augmentation de la fréquence, mais également de la hauteur des pics de niveaux marins extrêmes va considérablement augmenter l'aléa météo-marin associé au risque d'inondation et de submersion des zones côtières basses et sableuses du Golfe du Lion. Face aux enjeux importants que cette évolution climatique quasi inéluctable soulève, le

devenir de la vulnérabilité (écologique et socio-économique) des espaces littoraux devient la question centrale dans la gestion à venir des risques.

Bibliographie

- BOULIGAND R. & PIRAZZOLI P. A., « Les surcotes et les déco-tes marines à Brest, étude statistique et évolution », *Oceanologica Acta*, 22, 1999, p. 153-166.
- BRUZZI C., « Impact morphosédimentaire des tempêtes sur les côtes de Provence », Thèse de doctorat, université Aix-Marseille I, 1996, 325 p.
- CABANES C., CAZENAVE A. & LE PROVOST C., « Sea level rise during past 40 years determined from satellite and in situ observations », *Science*, 294, 2001, p. 840-842.
- CAZENAVE A., CABANES C., DOMINH K. & MANGIAROTTI S., « Recent sea level change in the Mediterranean Sea revealed by Topex/Poseidon satellite altimetry », *Geophysical Research Letters*, 2001, p. 1607-1610.
- IPCC, « Climate Change 2007, The Physical Science Basis », *Cambridge University Press*, Cambridge, 2007, 940 p.
- LAMBECK K., JOHNSTON P., NAKADA M., « Holocene glacial rebound and sea-level change in NW Europe », *Geophysical Journal International*, 103, 1990, p. 451-468.
- LIONELLO P., BHEND J., BRUZZI A., DELLA-MARTA P.M., KRICHAK S., JANSÀ A., MAHERAS P., SANNA A., TRIGO I.F. & TRIGO R., « Cyclones in the Mediterranean region : climatology and effect on the environment », in LIONELLO P., MELANOTTE-RIZZOLI P., BOSCOLO R. (éd.), *Mediterranean Climate Variability*, Elsevier, Amsterdam, 2006, p. 324-372.
- MORON V., « L'évolution séculaire des températures de surface de la mer Méditerranée (1856-2000) », *Compte Rendus Geoscience*, 335, 2003, p. 721-727.
- NICHOLLS R. J. & HOOZEMANS F.M.J., « The Mediterranean vulnerability to coastal implications of climate change », *Ocean and Coastal Management*, 31, 1996, p. 105-132.
- PIRAZZOLI P.A., TOMASIN A., ULLMANN A., « Extreme sea levels in two northern Mediterranean areas », *La Méditerranée*, 108, 2007, p. 59-68.
- RAHMSTORF S., CAZENAVE A., CHURCH J.A., HANSEN J.E., KEELING R.F., PARKER D.E., SOMERVILLE R.C.J., « Recent Climate Observations Compared to projections », *Science express*, 1 February 2007, 10.1126/science.1136843.
- ROGERS J.C., « North Atlantic storm track variability and its association to both North Atlantic Oscillation and climate variability of Northern Europe », *Journal of Climate*, 10, 1997, p. 1635-1647.
- ROYER J.F., CARIOLLE D., CHAUVIN F., DÉQUÉ M., DOUVILLE H., HU R.M., PLANTON S., RASCOL A., RICARD J.L., MELIA D.S.Y., SEVAULT F., SIMON P., SOMOT S., TYTECA S., TERRAY L. & VALCKE S., « Simulation

- des changements climatiques au cours du XXI^e siècle incluant l'ozone stratosphérique », *Compte Rendus Geoscience*, 334, 2002, p. 147-154.
- SABATIER F. & SUANEZ S., « Evolution of the Rhône delta coast since the end of the 19th century », *Géomorphologie*, 4, 2003, p. 283-300.
- TOMASIN A., « The software "POLIFEMO" for tidal analysis », *Technical Note 202*. ISMAR-CNR, Venice, Italy, 2005.
- ULLMANN A. PIRAZZOLI P.A & TOMASIN A., « Sea surges in Camargue : Trends over the 20th century », *Continental Shelf Research*, 27, 2007a, p. 922-934.
- ULLMANN A., PIRAZZOLI P.A. & MORON V., « Sea surges around the Gulf of Lions and atmospheric conditions », *Global and Planetary Change*, doi : 10.1016/j.gloplacha.2007.10, 2007 b.
- ULLMANN A. & MORON V., « Configuration atmosphérique de vaste échelle spatiale et variabilité des surcotes dans le Golfe du Lion », *Cybergeo*, 406, 2007.
- ULLMANN A. & PIRAZZOLI P.A., « Caractéristiques spatiales de la formation des surcotes marines dans le Golfe du Lion », *Cybergeo*, 362, 2007.
- ULLMANN A & MORON V., « Weather regimes and sea surge variations over the Gulf of Lions during the 20th century », *International Journal of Climatology*, 28, 2008, p. 159-171.
- ULLMANN A., « Surcotes dans le Golfe du Lion et conditions atmosphériques : variabilité contemporaine et future (1905-2100) », Thèse de doctorat, université Aix-Marseille I, 2008, 250 p.

4 Océan de danger ou océan de richesses ? Accès aux ressources et aléas côtiers aux Philippines

J.-C. GAILLARD¹, Emmanuel A. MACEDA²,
Elodie STASIAK³, Iwan LE BERRE⁴ &
Maria Victoria O. ESPALDON⁵

1. U.M.R. 5194 Pacte, université de Grenoble, France.
jean-christophe.gaillard@ujf-grenoble.fr

2. Department of Geography, University of the Philippines
Diliman, Philippines.

emmanuel.a.maceda@accenture.com

3. Faculté des Géosciences et de l'Environnement, université
de Lausanne, Suisse.

elodie_stasiak@hotmail.fr

4. Laboratoire Geomer, U.M.R. 6554 LETG, université de
Bretagne Occidentale, France.

Iwan.Leberre@univ-brest.fr

5. School of Environmental Science and Management,
University of the Philippines Los Baños, Philippines.

voespaldon@yahoo.com

Résumé. — Cette étude montre les liens entre la vulnérabilité des populations face aux aléas naturels et leur accès aux ressources. Elle s'appuie sur l'exemple de la ville côtière de Borongan, sur l'île de Samar aux Philippines, qui est particulièrement exposée aux cyclones et aux marées de tempêtes. L'étude montre que : 1/ les pêcheurs sont souvent obligés de sortir en mer malgré la menace de cyclones ou de marées de tempête pour subvenir aux besoins de leur famille ; 2/ leur capacité à se protéger de ces menaces est contrainte par la fragilité de leurs ressources ; 3/ en cas de crise, les populations ont recours à des ajustements dans leur mode de vie quotidien qui dépendent de la résistance de leurs ressources. Afin de réduire la vulnérabilité des populations et d'accroître leurs capacités à faire face aux aléas naturels, une méthode participative s'appuyant sur des maquettes en trois dimensions est proposée.

Mots-clés. — Aléas naturels, vulnérabilité, capacité, ressources, Philippines.

Title. — *Access to Resources and Coastal Hazards in the Philippines*

Abstract. — *The present study investigates into the link between people's vulnerability in the face of natural hazards and access to resources. It focuses on the coastal city of Borongan, on the island of Samar in the Philippines, which is exposed to a large array of natural hazards, including typhoons and storm surges. This research shows that: 1/ local fishermen are often compelled to go out fishing despite pending typhoon or storm surge to sustain the daily needs of their family; 2/ the capacity of these people to*

protect themselves from the threat is constrained by poor and fragile resources; 3/ in the event of a crisis, people resort to a range of adjustments on their daily life which is rooted in the strength of their resources. To reduce people's vulnerability and enhance capacities to face natural hazards, a participative methodology based on Participatory 3-Dimensional Models is finally suggested.

Keywords. — *Natural Hazards, Vulnerability, Capacity, Resources, Philippines.*

Introduction

L'accès aux ressources est une composante essentielle de la vulnérabilité des sociétés face aux aléas naturels (e.g. Cannon, 1994 ; Wisner *et al.*, 2004). Il conditionne très souvent la capacité à vivre dans des lieux sûrs et à construire un habitat résistant aux menaces de la nature. Il commande aussi la capacité à faire face aux situations de crises. Au lendemain de catastrophes, l'ampleur et la diversité des ressources constituent également un élément fondamental de la capacité des victimes à récupérer rapidement. Les ressources ici évoquées tiennent aux moyens économiques permettant de satisfaire les besoins alimentaires et de logement. L'accès aux ressources renvoie aussi aux réseaux sociaux et culturels assurant le maintien des liens communautaires et à la représentation politique permettant de revendiquer ses droits. Pour satisfaire ces besoins élémentaires d'ordre quotidien, de nombreux individus choisissent délibérément de s'exposer à des aléas naturels rares et extrêmes (Gaillard, 2007). Pour se nourrir au quotidien et échapper à des systèmes agraires féodaux, on accepte ainsi de s'exposer à une éruption volcanique décennale ou à un typhon saisonnier. La vulnérabilité aux phénomènes naturels et la capacité à se protéger ne peuvent donc s'envisager en dehors du contexte économique, social, culturel et politique plus large. Réduire la vulnérabilité des populations doit passer par un accès durable aux ressources (Chambers, 1995 ; Cannon *et al.*, 2003), qui renvoie aux politiques de développement et d'aménagement du territoire au sens large. Dans cet article, nous nous proposons d'étayer cette approche au travers d'une étude de cas menée au sein d'une petite municipalité littorale de l'île de Samar aux Philippines. Les première et seconde parties présenteront le cadre de l'étude et la méthodologie de travail. Les troisième, quatrième et cinquième parties mettront en lien la vulnérabilité des populations et l'accès aux ressources. Dans une sixième partie, nous évoquerons une méthodologie participative originale offrant de nouvelles

perspectives en matière de réduction de la vulnérabilité et d'accroissement des capacités.

4.1 Borongan : une petite ville littorale des Philippines

Les Philippines sont un des pays du monde les plus touchés par des catastrophes identifiées à des phénomènes naturels. Entre 1900 et 2006, la base de données EMDAT du Centre de Recherche sur l'Epidémiologie des Désastres (CRED) liste 385 événements catastrophiques ayant chacun fait au moins 10 morts, altéré la vie de 100 personnes ou nécessité un appel à l'aide internationale (Centre for Research on Epidemiology of Disasters, 2007). Ces désastres ont causé des pertes économiques évaluées à sept milliards de dollars US et fait plus de 48 000 victimes. Les sinistrés se comptent par millions. Nombre de ces catastrophes ont frappé des régions rurales ou littorales à l'image des désastres associés aux glissements de terrain et crues de fin 2004 à l'est de Luçon, au glissement de terrain du sud de Leyte en février 2006 et aux cyclones Milenyo et Reming en septembre et décembre 2006. Ces seuls événements ont fait près de 5 000 victimes.

Bien qu'épargnée jusqu'à aujourd'hui, la petite ville de Borongan présente de nombreuses similitudes avec les secteurs évoqués ci-dessus. Elle se situe sur le littoral pacifique de l'île de Samar (figure 1) et ses alentours sont connus pour l'acuité de problèmes environnementaux tels que la déforestation, la destruction des mangroves et la déplétion des réserves coralliennes. Borongan est la capitale de la province d'Eastern Samar et comptait 59 354 habitants lors du dernier recensement en 2007 (National Statistics Office, 2008). La province d'Eastern Samar est l'une des plus pauvres des Philippines. L'Indice de Développement Humain (IDH) ne dépassait par 0,511 en 2000 (contre 0,625 pour l'ensemble du pays). D'autre part, le Produit Intérieur Brut (PIB) par habitant était évalué à moins de 200 dollars US par an. 47 % de la population vit en dessous du seuil de pauvreté admis aux Philippines. L'immense majorité de la population d'Eastern Samar (74 % en 1997) et de Borongan dépend du produit de la pêche et de l'agriculture pour subvenir à ses besoins quotidiens (Eastern Samar Provincial Planning and Development Office, 2004). Les ressources agricoles et piscicoles sont cependant menacées par des glissements de terrain, des inondations, des crues, des cyclones, des séismes, des tsunamis et des marées de tempêtes (ou « *dulok* » dans la langue locale *waray*). Les deux événements les plus marquants sont survenus en 1984 et 1988 lorsque les cyclones Undang et Yuning ont balayé l'île de Samar et le centre de l'archipel philippin. Le premier a fait plus de 1 000 victimes et le second près de 300 dans l'ensemble du pays. Les marées de tempête sont des événements fréquents qui frappent de manière saisonnière, entre les mois de décembre et mai, durant la saison des pluies appelée « *amihan* », du nom des vents du nord-est.

4.2 Méthodologie

Cet article s'appuie sur un travail de terrain réalisé à Borongan en trois temps : en juin 2005, puis entre mai et août 2006 et enfin en août-septembre 2007.

Une première série d'entretiens qualitatifs ont été menés en 2005 afin d'identifier les principaux enjeux de la gestion des ressources à Borongan. Ces entretiens ont concerné des représentants des principaux services municipaux et provinciaux et des chercheurs des universités locales.

En 2006, une campagne d'enquêtes par questionnaires auprès des populations et des chefs de village a permis de mesurer l'ampleur des problèmes d'accès aux ressources et la teneur des réponses sociales en mettant un accent particulier sur les changements environnementaux tels que la destruction de la mangrove et la déplétion des récifs coralliens. Six des 61 villages de Borongan ont été sélectionnés au regard de leur représentativité géographique. Au sein de chaque village, 20 % des foyers ont été sélectionnés de manière aléatoire. 259 foyers ont ainsi été enquêtés à l'aide d'un questionnaire d'une quarantaine de questions (Demidov, 2006). L'enquête a été menée en langue locale *waray*.

Une nouvelle série d'entretiens qualitatifs auprès des principaux acteurs institutionnels de la gestion des ressources a ensuite permis de soulever la question de la vulnérabilité aux aléas naturels. Ces entretiens ont été menés auprès de représentants du conseil municipal pour la coordination des catastrophes, du service d'aménagement du territoire, du bureau des affaires sociales, du ministère de l'intérieur, et des services de l'agriculture et du tourisme. Au niveau provincial, nous avons interrogé des officiels en charge de la réduction des catastrophes, du tourisme, de l'aménagement du territoire et de la gestion des ressources naturelles. Des interviews ont aussi été menées auprès de leaders de communautés locales.

En 2007, une nouvelle campagne d'enquêtes par questionnaire auprès de 50 des 132 foyers de la petite île de Divinubo, au large de Borongan, a approfondi les liens entre accès aux ressources et vulnérabilité face aux phénomènes naturels. Cette dernière enquête a été accompagnée de trois Focus Groupes avec les membres de l'organisation citoyenne de l'île. Les *Focus Groupes* ont fourni des profils des aléas naturels, des ressources et des réponses sociales pour l'île de Divinubo qui a été choisie au regard de son exposition aux menaces côtières. De plus la survie des foyers de l'île dépend presque exclusivement des ressources marines et agricoles.

Les travaux de terrain ont été complétés par une revue de la littérature grise et des travaux scientifiques ainsi que sur une revue de presse auprès des journaux nationaux et régionaux qui ont fourni des informations complémentaires sur les politiques de gestion des catastrophes et des ressources naturelles.

À Borongan, les enquêtes réalisées en 2006 et 2007 soulignent que l'ampleur, la diversité et la résistance des ressources commandent 1/ l'exposition aux aléas naturels, 2/ la fragilité face à ces phénomènes et 3/ la capacité à faire face à une situation de crise.

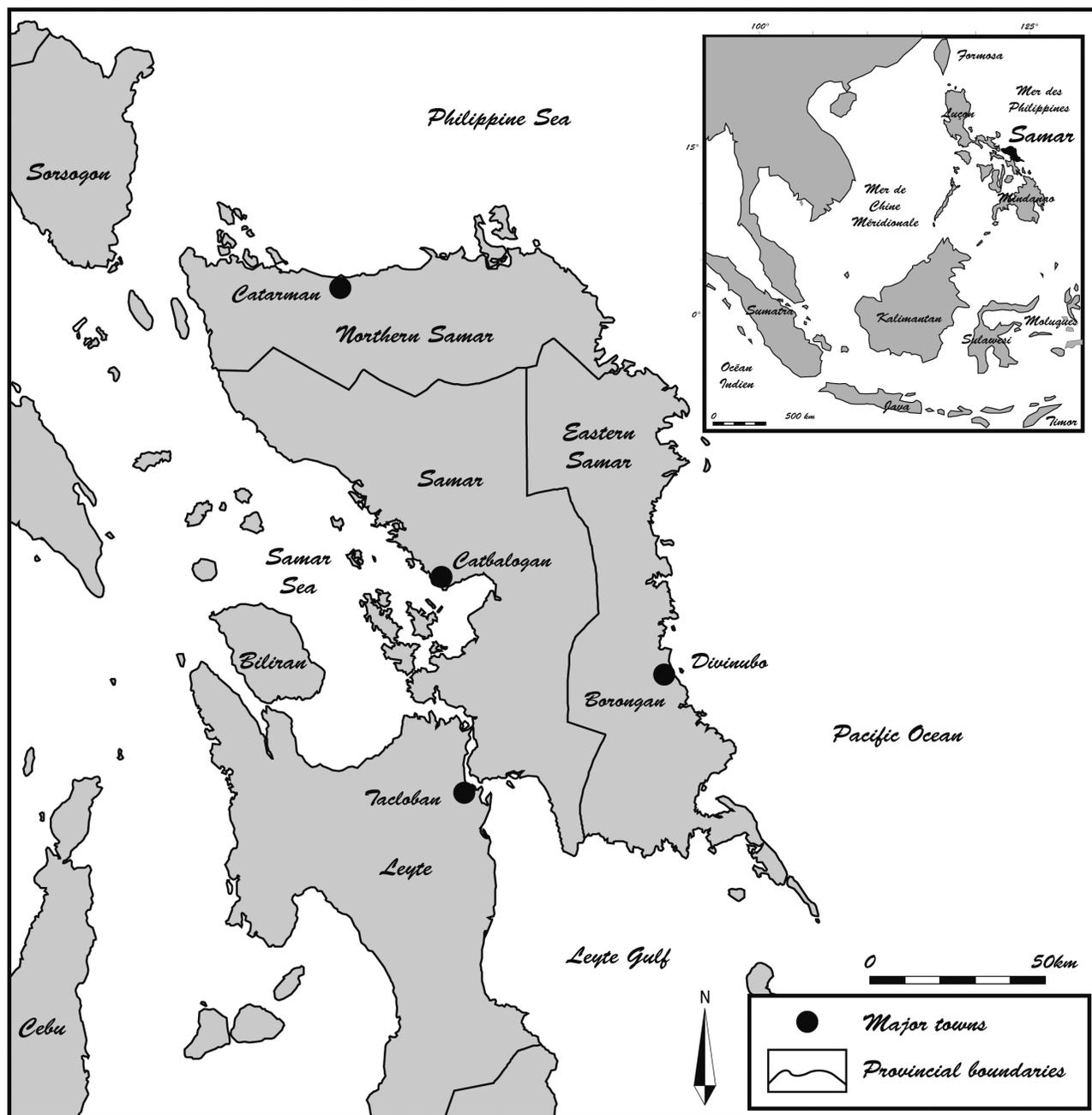


Fig. 1. — Localisation de Borongan sur l'île de Samar aux Philippines.

4.3 Ressources et exposition aux aléas naturels

Les premières victimes des cyclones et des marées de tempêtes sont les pêcheurs qui ne peuvent sortir en mer et donc subvenir aux besoins alimentaires de leur famille. En effet, la capacité à acheter du riz, élément de base du régime alimentaire, dépend avant tout du produit de la pêche (seulement 22 % des pêcheurs conservent le produit de leur pêche pour leur consommation personnelle). Seuls 39 % des pêcheurs bénéficient d'autres sources de revenus, principalement issus de l'agriculture (pour 46 % d'entre eux) mais aussi de petits travaux contractuels dans la construction ou la menuiserie (26 %). La pêche s'exerce en

haute mer pour 43 % des pêcheurs, dans la zone intertidale pour 37 % et au sein des barrières de corail pour près de 15 %. Pour subvenir aux besoins toujours plus importants d'une population croissante (+2,72 % par an entre 1995 et 2000), les pêcheurs de Borongan avouent aujourd'hui devoir sortir en mer par des conditions de forte houle qui les auraient repoussés il y a quelques années. Ils choisissent donc délibérément de s'exposer aux menaces naturelles. Outre la contrainte démographique, les pêcheurs doivent aussi faire face à une dépletion progressive des ressources marines. Près de 40 % des pêcheurs interrogés avouent avoir observé une réduction du produit de la pêche durant ces dernières décennies. La crise de la pêche est liée à l'utilisation massive de la dynamite et du cyanure dans

les années 1970 et 1980. Bien que la grande majorité des pêcheurs respectent aujourd'hui l'interdiction d'utiliser ces techniques qui permettaient d'accroître les rendements, la plupart souffrent des destructions imposées aux récifs coralliens. La régression de la couverture forestière littorale, notamment la mangrove, a également affecté les zones de reproduction des poissons (Mendoza et Alura, 2001). La hausse du prix du gasoil (citée par 6 % des enquêtés), la baisse des cours du poisson (notée par 21 % des individus), la pollution par les déchets ménagers et la concurrence des navires de pêche commerciale en provenance de Taiwan constituent d'autres contraintes à la pêche.

4.4 Ressources et protection face aux aléas naturels

Lorsqu'ils choisissent de s'aventurer en mer par temps de cyclone ou de marée de tempête, les pêcheurs de Borongan sont particulièrement vulnérables car les techniques de pêche sont rudimentaires et les outils sont très fragiles. La plupart des pêcheurs en haute mer sortent de manière hebdomadaire et utilisent des pirogues à balanciers et à moteur, accompagnés de harpons, de filets et de lignes afin de capturer des thons, des maquereaux et des marlins principalement. Seulement 18 % de ces pêcheurs possèdent la pirogue sur laquelle ils pêchent. Cela signifie souvent qu'une partie du produit de la pêche (souvent 25 %) doit être reversée au propriétaire du bateau suivant des conditions imposées par celui-ci. La partie restante ainsi que les dépenses (notamment le gasoil) sont réparties entre les pêcheurs qui sont le plus souvent liés par des attaches familiales ou amicales. La pêche en haute mer reste la plus rentable mais aussi la plus vulnérable. Les accidents se multiplient selon les responsables locaux du *Department of Social Welfare and Development*. En 2005, deux accidents ont ainsi coûté la vie à dix pêcheurs. Ces accidents sont dûs à la fragilité intrinsèque des embarcations, à leur sur-utilisation (notamment pour les moteurs) et à leur entretien parfois défaillant pour des raisons financières.

Les individus qui pêchent dans la zone intertidale s'appuient sur des techniques de plongée à partir de pirogues à balancier sans moteur, armées de harpons, de filets et de lignes. Les pirogues sans moteur sont pour la plupart la propriété des pêcheurs qui sortent de manière quotidienne. Durant la saison humide et cyclonique, les pêcheurs en haute mer se rabattent bien souvent sur la pêche intertidale pour assurer leurs revenus et moduler leurs sorties en fonction des conditions climatiques plus aléatoires.

La pêche à pied quotidienne et la collecte de coquillages et autres mollusques sont également répandues sur les platiers. Elle repose sur des instruments rudimentaires (lignes, filets, paniers, etc.). Les femmes et les enfants se joignent alors souvent aux hommes. La pêche à pied est la moins rentable mais aussi la moins vulnérable aux aléas naturels.

La vulnérabilité face aux aléas naturels tient aussi à la fragilité de l'habitat. En 2000, la plupart des maisons de

Borongan étaient constituées de bambou et de feuilles de palme très fragiles lors des vents violents qui accompagnent les cyclones. Seules 20 % des habitations étaient en matériaux durs (ciment, brique ou pierre). 26 % étaient en bois (surtout à l'intérieur des terres) et 15 % étaient en bois et en matériaux durs (Borongan Municipal Planning and Development Office, 2005). Sur la petite île de Divinubo, au large de Borongan, 59 % des maisons sont construites de bambou et de feuilles de palme. À l'approche de cyclones, près d'un tiers des foyers de l'île tentent modestement de renforcer les murs et le toit de leur frêle habitation à l'aide de filets de pêche.

4.5 Ressources et capacité à faire face aux crises

En cas de crises associées à des cyclones ou à des marées de tempêtes, l'île de Divinubo est isolée et ne peut compter sur une aide extérieure. Les habitants ont donc recours à des mesures autochtones permettant de subvenir à leurs besoins quotidiens, à commencer par la nécessité de se nourrir (tableau 1). 76 % des foyers modifient leur régime alimentaire en intégrant plus de légumes, tubercules (manioc principalement) et fruits, et en mangeant moins de riz, de poisson et de viande. 69 % réduisent aussi la quantité de nourriture à chaque repas alors que 59 % vont jusqu'à sauter un des repas quotidiens. 71 % des familles tendent à épargner de la nourriture en prévision des cyclones et des marées de tempêtes. 71 % annulent ou repoussent aussi les cérémonies telles que les anniversaires. Les mariages et les baptêmes sont très rarement programmés en saison des pluies.

Tabl. 1. — Mesures adoptées par les habitants de Divinubo pour faire face aux crises associées à l'occurrence d'aléas naturels ($n = 51$)

Mesures pour faire face aux crises	% d'individus adoptant ces mesures
Accentuation des prières	100 %
Évacuation temporaire	86 %
Réduction des dépenses quotidiennes	78 %
Modification du régime alimentaire	76 %
Épargne de nourriture en prévision de la saison humide	71 %
Emprunts	71 %
Annulation des cérémonies (anniversaires, baptêmes, etc.)	71 %
Réduction de la quantité de nourriture par repas	69 %
Décalage des échéances de remboursement de dettes	63 %
Reduction du nombre de repas quotidiens	59 %
Épargne monétaire en prévision de la saison humide	49 %
Travail des enfants	31 %
Recours à des activités secondaires	24 %
Mise en gage de biens	12 %
Vente de biens	6 %
Relogement temporaire	4 %

La seconde série de mesures prises par les habitants de Divinubo porte sur la capacité financière à acheter de la

nourriture et à satisfaire les autres besoins prioritaires. 78 % des foyers réduisent ainsi leurs dépenses quotidiennes (vêtements, éducation des enfants, alcool, cigarette, jeu). 71 % des familles ont également recours à des emprunts, avant tout auprès de membres de la famille mais aussi auprès d'amis proches. 63 % négocient le report des échéanciers de remboursement de dettes précédemment contractées. 49 % des foyers essaient de faire de maigres économies en préparation pour la saison humide. 31 % des familles s'appuient sur des revenus générés par leurs enfants alors que 24 % ont recours à des activités complémentaires (lessive, repassage, préparation de plats cuisinés). La vente et la mise en gage de biens (pirogues, filets, bijoux, téléphones portables) sont peu répandues (respectivement 6 et 12 % des foyers).

Les femmes jouent un rôle particulièrement important en période de crise. Ce sont elles qui ont recours à des activités économiques complémentaires qu'elles valorisent auprès de leurs voisins les plus fortunés. Elles sont également chargées de négocier les prêts auprès de la famille et des amis. Les réseaux sociaux sont également activés lorsque les habitants de Divinubo doivent évacuer puisque la plupart d'entre eux avouent s'abriter chez leurs proches ou leurs voisins. La religion tient aussi une place fondamentale : 100 % des individus avouent renforcer leurs prières en temps de crise. Enfin, l'île ne compte aucun médecin et les urgences médicales doivent être gérées par trois femmes du village formées aux premiers soins.

La grande majorité des mesures prises par les habitants de Divinubo pour faire face aux cyclones et aux marées de tempêtes sont ancrées dans la vie quotidienne. La plupart sont des ajustements des activités régulières plutôt que l'adoption de mesures extraordinaires pour faire face à des phénomènes rares et extrêmes. La capacité à adapter son quotidien aux situations de crises dépend fortement de la diversité, de l'ampleur et de la résistance des ressources. Les familles dont les revenus reposent sur la seule vente du poisson sont en grande difficulté lorsque la houle empêche les pêcheurs de sortir en mer. Ceux-ci sont cependant une minorité (seulement 8 % des enquêtés). Au contraire des habitants du reste de la municipalité de Borongan, la très grande majorité des foyers de Divinubo s'appuient sur plusieurs types de ressources et combinent le plus souvent pêche et agriculture (28 % des ménages). L'intérieur de l'île est en effet dédié aux cocotiers dont les noix fournissent du coprah. Seulement 50 % des cocotiers appartiennent aux agriculteurs qui les cultivent et qui doivent ainsi reverser une partie de leurs revenus aux propriétaires. Ces mêmes exploitants doivent aussi faire face à la baisse des cours du coprah (de 21 centimes d'euro à 14 centimes d'euro le kilo entre 2004 et 2006). La vente du coprah assure des revenus quatre fois par an. Sous les cocotiers sont souvent plantés des légumes, des tubercules et des arbustes fruitiers. Les légumes et les tubercules servent de compléments alimentaires. Quelques familles élèvent également des porcs. Lorsqu'elle n'est pas combinée à l'agriculture, la pêche est soutenue par le petit commerce de proximité, la charpenterie ou des tâches ménagères. 12 % des familles sont également dépendantes des revenus de travailleurs expatriés à l'étranger. Les prémices d'une activité écotouristique constitue une autre source de revenus d'appoint.

4.6 Quelles solutions pour réduire la vulnérabilité des populations et accroître leur capacité à faire face aux aléas naturels ?

L'étude menée à Borongan montre que la vulnérabilité des populations face aux aléas naturels est ancrée dans leur difficulté quotidienne à accéder à des ressources résistantes et durables. Le système institutionnel philippin de lutte contre les catastrophes apparaît en décalage avec ce constat. Il est en effet réactif et met l'accent sur la gestion de crises associées à des phénomènes naturels extrêmes et rares (Bankoff, 2003 ; Delfin et Gaillard, 2008). Il s'appuie notamment sur des mesures exceptionnelles de secours et d'aide matérielle aux victimes. L'obtention de moyens financiers est dépendante d'une déclaration d'Etat de Calamité (*State of Calamity*). A Borongan, il faut pour cela que le littoral soit affecté. Les pêcheurs qui disparaissent en mer par forte houle ne sont donc pas couverts par ces mesures et les secours et recherches sont souvent assurés par les familles et amis des pêcheurs. Ceux-ci peuvent espérer une maigre compensation financière de 17 ou 35 euros si la pirogue portée disparue est enregistrée par les services de l'Etat ; ce qui n'est pas toujours le cas.

La longue liste des catastrophes ayant frappé les Philippines ces dernières années confirme le décalage entre les maux et les remèdes. Un intérêt croissant est donc aujourd'hui porté à des stratégies alternatives permettant de réduire durablement les risques (e.g. Heijmans et Victoria, 2001 ; The World Bank and National Disaster Coordinating Council, 2004). Parmi les initiatives récentes, les programmes de gestion basés sur la participation des communautés menacées sont les plus prometteurs (e.g. Anderson and Woodrow, 1989 ; Maskrey, 1989). En effet, ces projets s'avèrent être l'une des manières les plus efficaces pour réduire la vulnérabilité des personnes face aux phénomènes naturels et ainsi réduire le nombre de catastrophes. Les programmes en question mettent en avant la participation des communautés locales dans l'évaluation de leur propre vulnérabilité et dans la mise en place de solutions adéquates.

Parallèlement, l'utilisation de maquettes à l'échelle et en trois dimensions montées de manière participative est de plus en plus courante au sein des programmes de développement des pays émergents, notamment dans le domaine de la gestion des ressources naturelles et la résolution de conflits territoriaux. Ces maquettes facilitent l'interprétation, l'assimilation et la compréhension de l'information géographique en la rendant évidente et tangible à chacun (Rambaldi & Callosa-Tarr, 2002). Les maquettes en trois dimensions révèlent la conscience locale des territoires. Elles sont des outils efficaces pour la planification du développement et l'organisation des communautés locales.

Ce type de maquette en trois dimensions a été appliqué à la gestion des risques sur la petite île de Divinubo. Ce projet s'est appuyé sur l'organisation citoyenne locale et les autorités municipales. Il avait pour double objectif 1/ d'impliquer les populations locales dans l'évaluation de leurs propres vulnérabilité et capacités face aux aléas naturels, et 2/ d'identifier des mesures économiquement, socialement, culturellement et politiquement acceptables pour réduire la vulnérabilité et accroître les capacités. La



Fig. 2. — Construction participative de la maquette en trois dimensions de l'île de Divinubo en août 2007 (cliché J.-C. Gaillard).

méthodologie développée est facilement reproductible. Elle a impliqué tous les secteurs de la société (sexe, âge, classes sociales) et s'est appuyée sur des matériaux de récupération (cartons) ou peu coûteux (fils de laine, épingles à couture, punaises de couleur, peinture acrylique). Dans un premier temps, la communauté de Divinubo s'est mobilisée pour la construction de la maquette reproduite à l'échelle (figure 2). Les habitants ont ensuite cartographié l'occupation du sol et positionné les infrastructures (route, école, église, maisons, bâtiments publics, etc.) puis les zones exposées aux aléas naturels majeurs (cyclones, marées de tempêtes et tsunamis) (figure 3). La maquette ainsi réalisée a servi de support à des discussions collectives sur les éléments exposés, leur vulnérabilité et leurs capacités suivant la méthodologie développée par Anderson et Woodrow (1989) et perfectionnée par Abarquez et Murshed (2004). Une liste de mesures simples destinées à réduire la vulnérabilité et à accroître les capacités a ensuite été suggérée. Ces mesures se sont accompagnées de recommandations en matière de gestion de crise, particulièrement en cas de tsunami qui est le phénomène face auquel la communauté locale est la moins préparée. Ces recommandations ont ensuite été directement transposées sur la maquette (points de rassemblement, routes d'évacuation, points d'évacuation, répartition des responsabilités pour mettre à l'abri les ressources essentielles à la communauté).

Cette méthodologie expérimentale de gestion participative des risques s'avère prometteuse. Elle permet en effet de mobiliser l'ensemble d'une communauté autour d'une réalisation concrète et commune qui s'avère peu onéreuse et facilement reproductible. La maquette facilite la conscience du territoire. Elle permet aussi une cartographie participative des aléas naturels et des éléments exposés assortis de leur vulnérabilité et capacités. Au delà de sa seule utilisation pour la gestion des risques, la maquette réalisée doit servir à la gestion des ressources, à l'aménagement du territoire ou encore à la résolution de conflits territoriaux. Elle peut également constituer un excellent outil de collecte de données scientifiques pouvant être intégrées dans un Système d'Information Géographique. Ce type de maquette doit enfin faciliter la collaboration entre scientifiques, O.N.G., organisations citoyennes et autorités locales. Cette coopération est essentielle à la réussite de ce type de projet. Les meilleurs résultats ne peuvent être atteints par les seuls scientifiques ou les seules O.N.G. L'expérience menée à Divinubo montre que les scientifiques s'avèrent capables de coordonner la construction de la maquette et de mener des discussions collectives autour de l'évaluation des risques. Cependant, la mise en application des mesures envisagées pour réduire la vulnérabilité et accroître les capacités doit bénéficier de la présence de structures organisationnelles



Fig. 3. — Identification et localisation participatives des éléments exposés aux aléas naturels sur la maquette en trois dimensions de l'île de Divinubo en août 2007 (cliché J.-C. Gaillard).

locales du type O.N.G. Cela apparaît comme une des garanties préalables à la pérennité du projet. Il est en effet essentiel que la réduction de la vulnérabilité soit durable et s'inscrive dans une perspective d'accès continu aux ressources.

Remerciements

Le travail de terrain nécessaire à la rédaction de cet article a été financé par le programme Duo France, l'université de Bretagne Occidentale et l'association Planet Risk.

Bibliographie

- ABARQUEZ I. & MURSHED Z., « *Community-based disaster risk management : field practitioners handbook* », Asian Disaster Preparedness Center, Pathumthani, 2004.
- ANDERSON M. & WOODROW P., « *Rising from the ashes : development strategies in times of disasters* », Westview Press, Boulder, 1989.
- BANKOFF G., « *Cultures of disaster : society and natural hazard in the Philippines* », Routledge, Londres, 2003.
- Borongon Municipal Planning and Development Office, « *Comprehensive land use plan of Borongan* », Municipal Planning and Development Office, Borongan, 2005.
- CANNON T., « *Vulnerability analysis and the explanation of 'natural' disasters* », Collectif, sous la direction de A. VARLEY— *Disasters, development and environment* — J. Wiley & Sons, Chichester, 2004, p. 13-30.
- CANNON T., TWIGG J. & ROWELL J., « *Social vulnerability, sustainable livelihoods and disasters* », Conflict and Humanitarian Assistance Department and Sustainable Livelihoods Support Office, Department for International Development, London, 2003.
- Center for Research on Epidemiology of Disasters, « *EM-DAT : the OFDA/CRED international disaster database* », université catholique de Louvain, Bruxelles, www.cred.be/emdat consulté le 12 juin 2006.
- CHAMBERS R., « *Poverty and livelihoods : whose reality counts ?* », *Environment and Urbanization*, vol. 7, n° 1, 1995, p. 171-204.

- DELFIN Jr. F. G. & GAILLARD J.-C., « Extreme vs. quotidien : addressing temporal dichotomies in Philippine disaster management », *Public Administration and Development*, vol. 28, n° 3, sous presse.
- DEMIDOV G.-I., « *Farmers and fishermen of Borongan (Eastern Samar, Philippines) : contributions to a socio-economic profile* », Mémoire de Master 2, université de Bretagne Occidentale, Brest, 2006.
- Eastern Samar Provincial Planning and Development Office, « *Province of Eastern Samar socio-economic profile : where the Philippines meets the Pacific* », Eastern Samar Provincial Planning and Development Office, Borongan, 2004.
- GAILLARD J.-C., « De l'origine des catastrophes : phénomènes extrêmes ou âpreté du quotidien? », *Natures Sciences Sociétés*, vol. 15, n° 1, 2007, p. 44-47.
- HEIJMANS A., VICTORIA L.P., « *Citizenry-based and development oriented disaster response : experiences and practices in disaster management of the Citizens' Disaster Response Network in the Philippines* », Center for Disaster Preparedness, Quezon City, 2001.
- MENDOZA A. B. & ALURA D.P., « Mangrove structure on the Eastern coast of Samar island, Philippines », Collectif, sous la direction de D.E. SCOTT, R.H. MOHTAR & G.C. STEINHARDT (1999) – *Sustaining the global farm ? Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting, May 24-29, 1999, West Lafayette, IN* — International Soil Conservation Organization/ United States Department of Agriculture/ Agricultural Research Service/ National Soil Erosion Research Laboratory/ Purdue University, West Lafayette, 2001, p. 423-425.
- National Statistics Office, « *2007 census of population and housing* », www.census.gov.ph consulté le 28 juillet 2008.
- MASKREY A., « *Disaster mitigation : a community-based approach* », Development Guidelines n° 3, Oxfam, Oxford, 1989.
- RAMBALDI G. & CALLOSA-TARR J., « *Participatory 3-dimensional modelling : guiding principles and applications* », ASEAN Regional Centre for Biodiversity Conservation (ARCBC), Los Baños, 2002.
- The World Bank, National Disaster Coordinating Council, « *Natural disaster risk management in the Philippines : enhancing poverty alleviation through disaster prevention* », The World Bank et National Disaster Coordinating Council, Manila, 2004.
- WISNER B., BLAIKIE P., CANNON T., DAVIS I., « *At risk : natural hazards, people's vulnerability, and disasters* », Routledge, London, 2004.

5 Caractérisation de la vulnérabilité du littoral de Suscinio : l'importance du facteur patrimonial

Soazig PIAN & Hervé REGNAULD

Université Haute Bretagne – Rennes 2

Laboratoire COSTEL U.M.R. LETG 6554

Place du Recteur Henri le Moal

soazig.pian@uhb.fr

Herve.regnauld@uhb.fr

Résumé. — La vulnérabilité du littoral face au risque d'érosion est souvent appréhendée dans un cadre analytique, en quantifiant les endommagements résultant du recul du trait de côte. Dès lors, la présence de sites archéologiques côtiers, non associés à des usages économiques, est rarement prise en compte. Pourtant, la répartition de tels sites est relativement dense en Bretagne Sud, notamment à Suscinio, où l'occupation du littoral est très ancienne. De plus, ces sites sont menacés par la remontée du niveau marin et le recul du trait de côte. Leur disparition constituerait une perte définitive de connaissance scientifique. Aussi, l'analyse a cherché à caractériser la vulnérabilité de ce littoral en intégrant le risque associé à la disparition de ces sites. Les résultats permettent d'affirmer que l'introduction de ce nouveau facteur augmente la vulnérabilité du littoral, alimentant ainsi les discussions sur la définition et la mesure de la vulnérabilité.

Mots-clés. — Prédiction du risque d'érosion, patrimoine archéologique, vulnérabilité.

Title. — *Assessing the Vulnerability of the Suscinio Coast (South Brittany – France: Importance of the Heritage Factor).*

Abstract. — *Coastal vulnerability linked to coastal retreat is usually assessed in an analytic framework, by evaluating damages resulting from coastal retreat. As a consequence, the risks associated to the disappearance of coastal heritages are rarely taken into consideration, as they are not associated with economic uses. However, such sites are densely distributed along the South coast of Brittany, and especially around Suscinio where the coast has been settled since early ages. Moreover, these heritages sites are threatened by sea level rise and coastal retreat, although their disappearance would lead to a definitive loss of scientific knowledge. In such a context, this analysis aims at characterising the vulnerability of the Suscinio coast by integrating the risk of coastal heritages losses. Results clearly put forward that the introduction of a new factor increases the vulnerability of the coast, feeding by this way the debate about the definition and the measure of coastal vulnerability.*

Keywords. — *Prediction of Coastal Retreat, Archeological Heritages, Vulnerability.*

Introduction

Dans le contexte actuel de remontée du niveau des mers (2.6 à 3 mm/an en Bretagne pour les trente dernières années¹), une attention particulière a été accordée au risque d'érosion, généralement assimilé au recul du trait de côte. Un certain nombre de travaux, à la suite de Bruun (1962), ont surtout concentré leurs efforts sur l'explication et la modélisation des processus physiques contrôlant l'évolution des rivages. Parallèlement, d'autres études se sont employées à quantifier et caractériser la vulnérabilité susceptible d'être induite par les mouvements du trait de côte. Dans cette optique, la vulnérabilité des littoraux face au risque d'érosion est souvent appréhendée de manière quantitative, dans un cadre analytique, à l'intérieur duquel sont estimés les endommagements potentiels pouvant résulter des processus d'érosion. Dès lors, les éléments anthropogéniques participant à la définition de la vulnérabilité sont généralement des objets dont l'utilité ou la valeur peuvent être estimées à travers des valeurs monétaires. Ainsi, l'analyse du risque d'érosion consiste généralement à évaluer les endommagements susceptibles d'affecter d'une part l'utilisation socio-économique des formes littorales, et d'autre part, l'ensemble des aménagements localisés sur la côte (Carter, 1999 ; Nicholls, 2004 ; De Pippo *et al.*, 2007). Les limites de telles approches ont été discutées dans la littérature, notamment par Pigeon (2005), et des méthodes plus synthétiques ont cherché à incorporer à l'analyse des notions permettant de caractériser le comportement des systèmes étudiés et leur capacité de réponse à des contraintes extérieures, notamment à travers la notion de résilience. La notion de résilience est utilisée depuis les années 70 pour désigner la capacité d'un système à supporter un stress émanant de l'extérieur tout en gardant la possibilité de revenir dans son état initial. Actuellement, le terme de résilience est de plus en plus perçu comme une qualité permettant de réduire la vulnérabilité des systèmes sociétaux et/ou environnementaux (Klein *et al.*, 2003). En géomorphologie littorale, les travaux de Suanez *et al.* (2007) ont, par exemple, cherché à analyser le risque de submersion de la plage du Vougot (Bretagne) en intégrant à l'analyse la résilience du cordon dunaire. Toutefois, ces diverses approches permettent rarement d'intégrer à l'analyse du risque la perte d'éléments anthropogéniques, dont la présence sur le littoral n'est associée à aucun

1. Les rythmes d'élévation du niveau marin en Bretagne ont été obtenus à partir des données du marégraphe de Brest, traitées par le P.S.M.L., et issues du rapport de l'Observatoire départemental de l'Environnement du Morbihan sur les impacts de l'élévation du niveau marin sur le littoral du département du Morbihan (novembre 2005).

usage économique, mais possédant néanmoins une valeur intrinsèque non négligeable. Il en résulte que la dimension patrimoniale des territoires littoraux est rarement prise en compte dans l'évaluation de leur vulnérabilité face aux processus d'érosion. En effet, rares sont les études qui se sont intéressées à ce sujet, à l'exception des travaux de Clus-Auby *et al.* (2006) qui ont cherché à analyser les conséquences de la remontée actuelle des niveaux marins sur le patrimoine foncier du conservatoire du littoral. Par ailleurs, une part importante des héritages patrimoniaux est constituée de sites archéologiques et historiques dont la destruction, causée par l'érosion des littoraux, constituerait une perte définitive de connaissance scientifique (Hook, 1998). Bien entendu, sont exclus de ce propos les sites déjà dotés d'un fort potentiel touristique et économique, à l'image des menhirs de Carnac ou du château de Suscínio, classé monument historique. Les sites dont il est question sont au contraire peu connus du grand public et difficilement identifiables sans connaissance scientifique spécifique. En Bretagne Sud, la distribution spatiale de tels sites est relativement dense, alors qu'un certain nombre d'entre eux n'ont que peu ou prou été fouillés. Les données que nous avons pu obtenir ont par ailleurs mis en évidence que le littoral situé à l'est de la Presqu'île de Rhuys, au niveau de la baie de Suscínio était riche de tels sites. Dans ce contexte, il a paru intéressant d'examiner la vulnérabilité de la baie de Suscínio (figure 1) face au risque de recul du trait de côte, en intégrant à l'analyse le risque lié à la perte de ces sites à forte valeur patrimoniale et faible valeur économique. Ce faisant, les résultats obtenus pourront contribuer à alimenter la discussion relative aux interactions entre l'analyse du risque côtier, la définition de la vulnérabilité et le choix des éléments anthropogéniques associés à l'analyse.

5.1 Présentation du terrain d'étude

La baie de Suscínio est localisée sur le littoral sud Breton, à l'extrême est de la presqu'île de Rhuys. Le secteur étudié s'étend des *grèves de Suscínio* jusqu'à la pointe de Penpins, et s'apparente à un vaste système dune-plage, soumis à un régime de marée macro à méso-tidale, à l'arrière duquel s'étendent des marais maritimes, anciennement poldérisés. L'ensemble du site est orienté sud, et apparaît ainsi exposé perpendiculairement aux houles dominantes. En effet, le littoral sud Breton est battu par des houles provenant majoritairement d'un secteur ouest-nord ouest alors que les houles les plus fortes sont orientées ouest-sud ouest (Tessier, 2006). De la même façon, les vents les plus forts proviennent majoritairement d'un quart ouest-sud ouest (Pirazzoli *et al.*, 2000). Ainsi, le littoral étudié se situe dans un environnement relativement dynamique.

Bien qu'ancienne comme en témoigne la présence du château de Suscínio, la pression anthropique n'est pas trop élevée dans ce secteur. À l'arrière du cordon dunaire, s'étendent majoritairement des marais maritimes, anciennement poldérisés, mais dont une bonne part n'est plus utilisée pour des usages agricoles. Des données issues d'un travail de photo-interprétation ont permis de mettre en évidence la présence de deux noyaux d'urbanisation autour de Suscínio et de Penpins où des habitations sont

construites dans la zone des 100 mètres. Quelques terres agricoles sont cependant intercalées entre les marais et ces noyaux d'urbanisation.

5.2 Cartographie du risque du recul du trait de côte en Baie de Suscínio

De manière à cartographier le risque associé au recul du trait de côte, un modèle semi quantitatif a été utilisé, permettant d'une part de modéliser le recul du trait de côte d'ici 2100, dans un contexte d'élévation du niveau des mers, et d'autre part d'analyser le degré de vulnérabilité associé à ces mouvements de la ligne de rivage.

5.2.1 Modélisation prédictive de l'évolution du littoral d'ici 2100

Afin de modéliser le recul du trait d'ici 2100, plusieurs types d'analyse ont été menés, aussi bien à partir de photographies aériennes que de mesures de terrain. Les analyses menées à partir de photographies aériennes ont permis de quantifier les mouvements enregistrés par le trait de côte entre 1952 et 2004. Les mesures effectuées sur le terrain ont, quant à elles, permis de caractériser les paramètres, telle la pente de la plage, nécessaires à la modélisation. Elles ont essentiellement consisté à lever des profils de plage à rythme mensuel à bi-mensuel. À partir de ces données et dans la continuité de travaux publiés récemment (Ferreira *et al.*, 2006), le recul actuel du trait de côte a été, dans un premier temps, extrapolé de manière à obtenir la position du trait de côte en 2100. Puis, dans un second temps, ces premiers résultats ont été affinés en prenant en compte les effets susceptibles d'être induits, d'une part par l'accélération du niveau des mers et d'autre part, par le rôle des tempêtes.

Quantification du recul du trait de côte

Les vitesses actuelles du recul du trait de côte ont été obtenues à partir d'une analyse diachronique, menée à l'aide de photographies aériennes, datant de 1952, et de l'orthophotographie de 2004. L'utilisation de données de photographies aériennes a été largement éprouvée et discutée en géomorphologie littorale (Moore 2002 ; Graham *et al.*, 2003 ; Fletcher *et al.*, 2003 ; Parker, 2003 ; Duffy *et al.*, 2005). Dans un premier temps, les photographies aériennes de 1952 ont été numérisées à une résolution de 1000 dpi de manière à obtenir une taille de pixel relativement proche de celle de l'orthophotographie. Puis, les clichés aériens numérisés ont été géo-rectifiés à partir de l'orthophotographie à l'aide du logiciel ArcGis 9.2. Une fois géo-rectifiés, les clichés aériens ont été assemblés en mosaïque afin d'obtenir un document numérique comparable à l'orthophotographie de 2004. Dans un second temps, les positions occupées par le trait de côte en 1952 et 2004 ont été numérisées sous forme de polygones, à l'aide de l'outil Editor, toujours à partir d'ArcGis 9.2. L'indicateur géomorphologique retenu pour identifier la position du trait de côte est la limite sable/végétation dunaire. L'utilisation de cet indicateur sur une plage caractérisée par un régime de marée meso-tidale a été

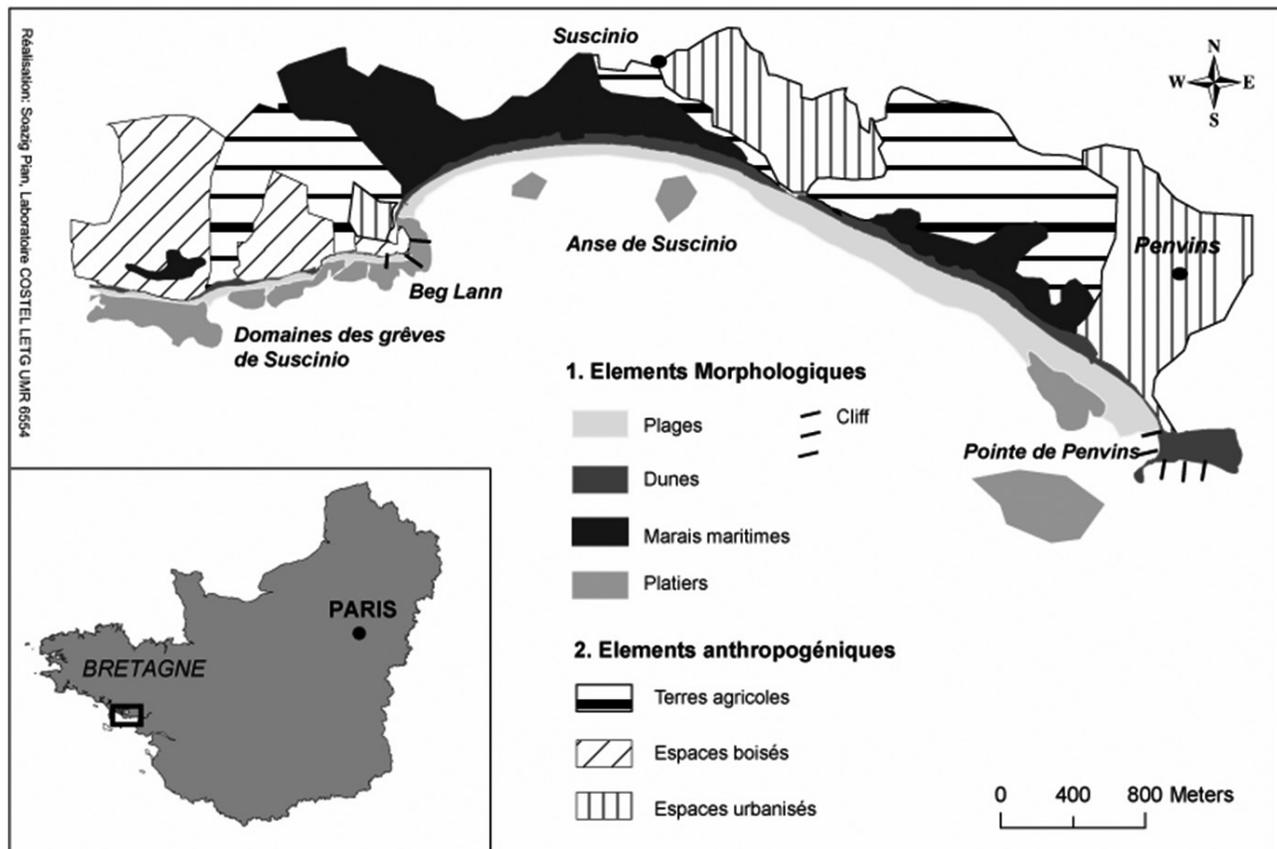


Fig. 1. — La baie de Suscinio : un littoral entre nature et société, au Sud de la Bretagne.

largement éprouvé et accepté dans la littérature (Battiau Queney *et al.*, 2002 ; Robin, 2002 ; Anuso *et al.*, 2007). Par la suite, les deux polygones représentant les traits de côte de 1952 et 2004 ont été assemblés sur une même couche, puis converties en polygone. Les marges d'erreur associées aux traitements présentés précédemment ont été calculées et extraites de l'analyse. L'erreur maximale totale est inférieure à 4.2 m. Les mouvements enregistrés par le trait de côte ont ensuite été analysés et mesurés à partir de cette dernière couche.

Le tableau 1 présente les principaux résultats obtenus. Au regard de cette analyse, il apparaît que plus de 49 % du linéaire côtier enregistre un recul de la ligne de rivage entre 1952 et 2004. Les vitesses moyennes d'érosion s'élèvent à 0,07 m/an.

Tabl. 1. — Évolution du trait de côte entre 1952 et 2004 en Baie de Suscinio

	Surfaces en m ²	Valeur moyenne en m des mouvements du trait de côte (surface totale rapportée à la longueur du linéaire côtier)	Taux moyen de migration du trait de côte
Surface en accrétion	5 930	7,28	0,14 m/an
Surface en érosion	9 158	3,74	0,07 m/an

Modélisation de la position du trait côte en 2100

Afin de déterminer la position occupée par le trait de côte en 2100, les valeurs obtenues précédemment ont, d'abord, été extrapolées en multipliant pour la période de prédiction les vitesses d'érosion et d'accrétion. Cette méthode repose sur une double hypothèse : d'une part les mouvements du trait de côte observés sur la période de référence correspondent à une tendance sur le moyen terme, et d'autre part, le comportement du système littoral ne devrait enregistrer aucun changement majeur durant la période de prédiction. En ce qui concerne le littoral de la baie de Suscinio, des études antérieures ont mis en évidence que le système dune-plage avait tendance à répondre toujours de manière semblable aux mêmes types de forçages météo-marins (Regnauld *et al.*, 2004). Dans ce contexte, l'utilisation d'un tel modèle a pu être justifiée. Ainsi, dans un premier temps, la position susceptible d'être occupée par le trait de côte en 2100 (S1) a été obtenue à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Équation (1)} \quad S1 = t \cdot r$$

où t représente la période de prédiction et r le taux de migration du trait de côte, en m/an. Afin de différencier les secteurs en érosion des secteurs en accrétion, des valeurs négatives ont été attribuées à r lorsque l'évolution du trait de côte correspond à un recul vers l'intérieur des terres. Toutefois, ce premier modèle demeure fort insuffisant dans la mesure où il ne permet pas d'appréhender le rôle joué par les divers agents des dynamiques littorales. En particulier, il ne permet pas de prendre en compte les effets de l'élévation du niveau des mers, ni le rôle des tempêtes

qui jouent un rôle non négligeable dans l'occurrence des processus érosifs (Forbes *et al.*, 2004 ; Lozano *et al.*, 2004). Aussi, les mouvements du trait de côte susceptibles d'être induits par l'élévation du niveau des mers ont été calculés, puis ajoutés au modèle. Afin de modéliser l'évolution du trait de côte dans un contexte d'élévation du niveau des mers, de nombreuses études s'appuient sur le loi de Bruun qui reste le modèle de référence, bien que non exempt de critiques tant sont restrictives ses conditions d'utilisation (Cooper *et al.*, 2004). En ce qui concerne la baie de Susicinio, certaines hypothèses requises pour utiliser la loi de Bruun ne semblaient pas vérifiées. En effet, le modèle fonctionne essentiellement pour des plages en état d'équilibre dynamique, or un certain nombre de profils de plages, pris entre 2006 et 2008 ne permettent pas d'affirmer que l'ensemble du système dune-plage se trouve dans un tel état. Aussi, une méthode alternative récemment appliquée par Suanez *et al.* (2007) a été choisie pour mesurer les variations du trait de côte résultant d'une élévation des mers. Cette méthode est présentée à travers l'équation 2 :

$$\text{Équation (2)} \quad S2 = r [(E21 - E20)/ P]$$

où E21 représente la valeur du niveau des mers prédite pour 2100, E20 la valeur annuelle de remontée du niveau des mers multipliée par la durée de la période de prédiction et P la pente de la plage en %.

Ainsi, la position du trait de côte en 2100 a été déterminée par l'expression suivante :

$$\text{Équation (3)} \quad S_{2100} = S1 - (r [(E21 - E20)/ P])$$

Cette position a ensuite été cartographiée (figure 2) de manière à pouvoir analyser la vulnérabilité du littoral induite par ces mouvements du trait de côte. En se référant aux travaux de Suanez *et al.* (2007), le paramètre E20 a été estimé à 0,11 m/an, alors que la valeur du paramètre E21 a été déterminée en utilisant les prédictions maximales produites par le rapport IPCC (2007), soit +0,58 m. Le tableau 2 présente les principaux résultats obtenus, en différenciant bien les secteurs en érosion entre 1952 et 2004 des secteurs en accrétion. Pour les secteurs en accrétion, seuls les cas extrêmes ont été calculés, en supposant que la remontée du niveau des mers vienne contrarier la tendance à l'accrétion, de manière à cartographier le risque maximal d'érosion.

Tabl. 2. — Valeur des migrations du trait de côte estimée pour la période 2004-2100

	r	S1	S ₂₁₀₀
Secteur en accrétion	+ 0,14 m/an	+ 13,44 m	+ 13,43
Secteur en érosion	- 0,7 m/an	- 6,72 m	- 6,76

Enfin, de manière à intégrer au modèle le rôle des tempêtes, la valeur du *wave setup* a été calculée et cartographiée afin de déterminer la position extrême du trait de côte pour 2100 (figure 2). Le *wave setup* correspond globalement à l'augmentation de la quantité d'eau à la côte provoquée par le déferlement des vagues (Masselink & Hughes, 2003). De cette façon, l'extension de la surface littorale susceptible de

subir l'influence des vagues de tempête a pu être estimée pour 2100. La formule retenue pour calculer le *wave setup* est celle de Komar (1998), récemment citée dans les travaux de Benenvete *et al.* (2006) :

$$\text{Équation (4)} \quad h = 0.36g^{0.5} H^{0.5} T \tan \beta$$

où H représente la hauteur des vagues, T leur période et β la pente de la plage en degré. Elle été calculée en prenant en compte la hauteur maximale des vagues enregistrées à Belle-île ainsi que leur période correspondante. La distance obtenue s'élève à 3,55 m.

5.2.2 Analyse de la vulnérabilité du littoral

Une fois la position du trait de côte en 2100 ainsi obtenue, l'analyse de la vulnérabilité du littoral a pu être menée. Dans un premier temps, l'analyse a été conduite sans prendre en compte le risque de perte de sites archéologiques côtiers de manière à pouvoir analyser par la suite les conséquences de l'introduction d'un élément nouveau dans la définition de la vulnérabilité.

Définition de la vulnérabilité à partir de données classiques

Afin de définir et cartographier la vulnérabilité du littoral face aux processus d'érosion, cette étude s'est essentiellement appuyée sur une approche qualitative. Dans un premier temps, les éléments anthropogéniques susceptibles d'être menacés ou endommagés par le recul du trait de côte ont été identifiés à partir de l'orthophotographie de 2004 (Williams *et al.*, 2001). Puis, les limites maximales du risque d'érosion ont été superposées à l'orthophotographie afin d'identifier les secteurs au sein desquels les éléments anthropogéniques participant à la définition du littoral étaient susceptibles d'être endommagés ou de disparaître du fait du recul du trait de côte.

Le tableau 3 synthétise les éléments intégrés à l'analyse. Ces derniers ont été classés en deux classes en fonction de leur degré d'adaptabilité à l'évolution du littoral. La première classe regroupe l'ensemble des éléments qui par leur nature, les usages qui leur sont associés ou leur valeur économique peuvent difficilement être déplacés ou abandonnés sans coût important. Lorsqu'au moins un de ces éléments, telle une habitation, est menacé par l'évolution du trait de côte, un degré de vulnérabilité élevé a été attribué au littoral. La seconde classe regroupe des éléments anthropogéniques dont l'utilisation est plus flexible par rapport à l'évolution du trait de côte, tel un chemin côtier, et en conséquence a été associée à un degré de vulnérabilité moindre. Enfin, lorsque le recul de la ligne de rivage ne semble menacer aucun élément anthropogénique, ni aucun usage, un degré de vulnérabilité nul a été affecté au littoral. De plus, il convient de préciser, que l'usage récréatif qui est fait des plages dans ce secteur n'a pas été considéré comme élément susceptible de contribuer à définir la vulnérabilité de ce site dans la mesure où l'érosion mesurée ici concerne le front de dune, et par conséquent renvoie essentiellement à un amaigrissement du haut de plage, mais pas nécessairement à un déficit généralisé de sédiments susceptible d'affecter l'ensemble du système dune-plage. En effet, les travaux de Regnauld *et al.* (2004) ont mis en évidence que si le haut de plage avait tendance à démaigrir, le bas de plage, à

l'inverse continuait à être alimenté en sédiment. Toutefois, les vitesses de transfert sédimentaire, entre le bas et le haut de plage, ne permettent pas, sur le moyen terme, de neutraliser les processus érosifs en haut de plage.

Tabl. 3. — Principaux éléments anthropogéniques, intégrés à l'analyse de la vulnérabilité du littoral de la baie de Suscinio

Classe 1	Classe 2
Routes Habitations Infrastructures Parking Terres agricoles Propriétés privées	Chemins côtiers Camping

La figure 2 présente les résultats obtenus. Il apparaît clairement que les secteurs urbanisés sont caractérisés par des degrés de vulnérabilité plus importants alors que l'ensemble du linéaire côtier en arrière duquel s'étendent les marais maritimes sont nettement moins vulnérables aux risques engendrés par le recul du trait de côte.

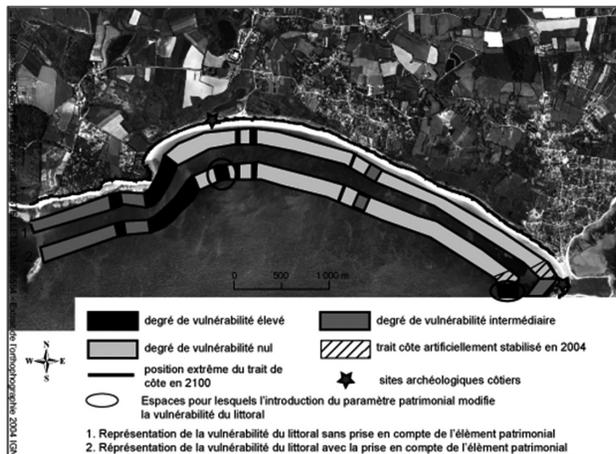


Fig. 2. — La vulnérabilité du littoral de la baie de Suscinio face au risque de recul du trait de côte.

Intégration des sites archéologiques à l'analyse

Toutefois, cette première analyse ne prend pas en compte l'ensemble des endommagements susceptibles d'être provoqués par le recul du trait de côte, puisque le risque d'une perte à valeur patrimoniale, à travers la disparition de sites archéologiques côtiers peu ou pas étudiés, n'a pas été pris en compte. Ainsi, dans un second temps, la vulnérabilité du littoral face aux risques engendrés par le recul du trait de côte a de nouveau été définie, mais, en intégrant cette fois la présence de sites archéologiques comme éléments anthropogéniques susceptibles de participer à la définition de la vulnérabilité. Parmi l'ensemble des sites archéologiques localisés sur la frange littorale, deux sont situés sur le périmètre susceptible d'être affecté par le recul du trait de côte et ont été cartographiés sur la figure 2. La liste des sites archéologiques disponibles sur ce site a été

fournie par le Service régional de l'Archéologie de Bretagne. De manière à simplifier l'analyse, il a été considéré que chacun de ces sites était d'égale valeur scientifique, et par conséquent le même degré de vulnérabilité a été associé aux secteurs dans lesquels ils étaient localisés.

Les résultats obtenus ont été cartographiés (figure 2). Ils mettent clairement en évidence que l'introduction du paramètre patrimonial est, dans certains secteurs, à même de modifier l'analyse de la vulnérabilité de l'espace. Ainsi, au centre de la baie, au niveau des marais maritimes, aucun élément anthropogénique généralement intégré aux analyses de la vulnérabilité du littoral n'est menacé par le recul du trait de côte, et en conséquence la vulnérabilité de cette portion du littoral paraît de prime abord relativement faible. Toutefois, une fois que le risque de dégradation susceptible d'affecter des sites archéologiques est analysé, les résultats diffèrent et l'introduction de ce nouveau paramètre contribue à augmenter la vulnérabilité de ces sites.

5.3 Discussion

Ainsi, force est de constater qu'un certain nombre de sites archéologiques sont directement menacés par le recul du trait de côte, bien que cette menace soit faiblement prise en compte dans l'analyse de la vulnérabilité du littoral. Il en résulte que les effets de leur disparition s'inscrivent difficilement dans les approches traditionnelles, qui cherchent à évaluer quantitativement les endommagements susceptibles de menacer le littoral. Pourtant, la disparition de ces sites entraînerait une perte de connaissance, à valeur patrimoniale, concernant notamment l'ancienneté de l'occupation du sol. En outre, l'historique de l'occupation du sol apparaît comme un facteur essentiel dans l'évolution du système littoral, permettant de mieux comprendre son fonctionnement actuel. De la même manière, les traces de l'occupation ancienne des sols sur la frange littorale constituent souvent des témoins précieux des positions occupées anciennement par le trait de côte, et permettent ainsi de valider, par rétroaction, les modèles prédictifs quant à l'évolution des systèmes littoraux. Ces derniers points sont essentiels dans le secteur de Suscinio où les sites situés sur la dune grise, à l'avant des marais maritimes, pourraient apporter des informations sur l'ancienneté de l'artificialisation de ces espaces. De telles données peuvent devenir fondamentales afin de développer une bonne compréhension des dynamiques de l'espace littoral sur le long terme. Dans un tel contexte, la valeur des sites archéologiques côtiers dépasse largement leur intérêt patrimonial, et l'identification des sites menacés ainsi que la prise en compte de leur existence dans la définition de la vulnérabilité des littoraux apparaissent comme un nouvel enjeu pour la gestion des risques en zone côtière.

Conclusion

Ainsi, ces résultats mettent en exergue que la définition de la vulnérabilité du littoral dépend étroitement des éléments anthropogéniques intégrés à l'analyse, qui dépendent eux mêmes, en partie, des postulats posés au départ, concernant

la valeur des divers objets ou usages composant le territoire étudié. L'intégration de la présence de sites archéologiques menacés illustre parfaitement ce dernier point puisqu'elle met en évidence que l'introduction d'un paramètre nouveau, à savoir la dimension patrimoniale de l'espace littoral, engendre, localement, une modification de la cartographie de la vulnérabilité du littoral. Ces résultats soulignent d'une part le risque de dégradation susceptible d'affecter les sites archéologiques, et témoignent d'autre part d'une certaine subjectivité liée aux postulats posés au préalable par le chercheur : le degré de vulnérabilité attribué au même littoral fluctue en fonction des paramètres intégrés à l'analyse, qui dépendent eux-mêmes de la définition du cadre analytique adopté par le chercheur. Ainsi, la vulnérabilité des littoraux face au risque de recul du trait de côte semble souvent appréhendée à travers des cadres analytiques bien spécifiques, reposant sur des méthodes et des postulats influant, dans une certaine mesure, sur les résultats.

Bibliographie

- ANFUSO G., DOMINGUEZ L. & GRACIA E.J., « Short and medium-term evolution of a coastal sector in Cadiz, SW Spain », *Catena* 70, 2007, p. 229-242.
- BATTIAU-QUENEY Y., BILLET J.F., CHAVEROT S. & LANOY-RATEL P., « Recent shoreline mobility and geomorphologic evolution of macrotidal sandy beaches in the north of France », *Marine Geology*, 194, 2003, p. 31-45.
- BENAVENTE J., DEL RIO L., GRACIA F.J. & MARTINEZ-DEL-POZO J.A., « Coastal flooding hazard related to storms and coastal evolution in Valdelagrana spit (cadiz bay natural park, SW spain) », *Continental Shelf Research*, 26, 2006, p. 1061-1076.
- BRUUN P., « Sea Level rise as a cause of shore erosion », *Journal of Waterway and Harbors Division*, ASCE, New York 88, 1962, p. 117-130.
- CARTER R.W.G., « *Coastal environments, an introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines* », Academic Press, San diego, 1999, 617 p.
- CLUS-AUBY C., PASKOFF R. & VERGER F., « Le patrimoine foncier du Conservatoire du littoral et le changement climatique : scénarios d'évolution par érosion et submersion », *Annales de Géographie*, 648, 2006, p. 115-132.
- COOPER J.A.G. & PILKEY O.H., « Sea level rise and shoreline retreat : Time to abandon the bruun rule », *Global and Planetary Change*, 43, 2004, p. 157-171.
- DE PIPPO T., DONADIO C., PENNETTA M., PETROSINO C., TERLIZZI F. & VALENTE A., « Coastal hazard assessment and mapping in northern campania, Italy », *Geomorphology*, doi : 10.1016/j.geomorph.2007.08.015, 2007.
- DUFFY M., PSUTY N.P. & PACE J.P., « *Geomorphological monitoring protocol* », part I ocean shoreline position, 2005, p. 1-60.
- FERREIRA O., GARCIA T., MATIAS A., TABORDA R. & DIAS A., « An integrated method for the determination of setback lines for coastal erosion hazards on sandy shores », *Continental Shelf Research*, 26, 2006, p. 1030-1044.
- FLETCHER C., ROONEY J., BARBEE M., LIM SIANG C. & RICHMOND B., « Mapping shoreline change using digital orthophotogrammetry on mauï, Hawaii », *Journal of Coastal Research*, 38, 2003, p. 106-124.
- FORBES D.L., PARKES G.S., MANSON G.K., KETCH L.A., « Storms and shoreline retreat in the southern gulf of St Lawrence », *Marine Geology*, 210, 2004, p. 169-204.
- GRAHAM D., SAULT M. & BAILEY J., « National ocean service shoreline, past, present and future », *Journal of Coastal Research*, 38, 2003, p. 14-32.
- HOOKE J., « *Coastal Defense and Earth Science Conservation* », The Geological Society, Bath, 1998, 270 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), « *Climate change 2007 : The physical science basis. Summary for policymakers* », Suisse, 18p, <http://ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>, 2007.
- KLEIN R.J.T., NICHOLLS R.J. & THOMALLA F., « Resilience to natural hazards : How useful is this concept ? », *Environmental Hazards*, 5, 2003, p. 5-45.
- KROON A., LARSON M., MÖLLER I., YOKOKI H., ROZYNSKI G., COX J. & LARROUDE P., « Statistical analysis of coastal morphological data sets over seasonal to decadal time scales », *Coastal Engineering*, doi : 10.1016/j.coastaleng.2007.11.006., 2008.
- LOZANO I., DEVOY R.J.N., MAY W., ANDERSEN U., « Storminess and vulnerability along the Atlantic coastlines of Europe : Analysis of storm records and of a greenhouse gases induced climate scenario », *Marine Geology*, 210, 2004, p. 205-225.
- MASSELINK G. & HUGHES M., « *Introduction to coastal processes and geomorphology* », Hodder Arnold, London, 2003, 354 p.
- MOORE L.J. & GRIGGS G.B., « Long term cliff retreat and erosion hotspots along the central shores of the Monterey bay national marine sanctuary », *Marine Geology*, 181, 2002, p. 265-283.
- NICHOLLS R.J., « Coastal flooding and wetland loss in the 21st century : Changes under the SRES climate and socio-economic scenarios », *Global Environmental Change*, 14, 2004, p. 69-86.
- PARKER B.B., « The difficulties in measuring a consistently defined shoreline : The problem of vertical referencing », *Journal of Coastal Research*, 38, 2003, p. 44-56.
- PIGEON P., « *Géographie critique des risques* », Paris, Economica, 2005, 217 p.
- PIRAZZOLI P.A., « Surges, atmospheric pressure and wind change and flooding probability on the atlantic coast of France », *Oceanologica Acta*, 23, 2000, p. 643-661.
- REGNAULD H., PIRAZZOLI P.A., MORVAN G. & RUZ M., « Impacts of storms and evolution of the coastline in Western France », *Marine Geology*, 210, 2004, p. 325-337.
- ROBIN M., « Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique », p. 95-116, in *Littoral, regards*,

savoir, collectif sous la direction de BARON YELLÈS N., GOELDNER-GIANELLA L. & VELUT S., 2002, 367 p.

SUANEZ S, FICHAUT B & SPARFEL L., « Méthode d'évaluation du risque de submersion des côtes basses appliquée à la plage du Vougot, Guissény (Bretagne) », *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 4, 2007, p. 319-334.

TESSIER C., « *Caractérisation et dynamique des turbidités en zone côtière : l'exemple de la région marine bretagne sud* »,

Thèse de doctorat, université de Bordeaux 1, 2006, 428 p.

WILLIAMS A.T., ALVEIRINHO-DIAS J., NOVO G., GARCIA-MORO M.R., CURR R. & PEREIRA A., « Integrated coastal dune management : Checklists », *Continental Shelf Research*, 21, 2001, p. 1937.

6 La gestion des risques côtiers en France métropolitaine : évolution des doctrines, inerties des pratiques ?

Catherine MEUR-FÉREC, Yannick LAGEAT

& Alain HÉNAFF

Géomer, U.M.R. 6554-LETG, université de Bretagne Occidentale
Institut universitaire européen de la Mer, Technopôle Brest-

Iroise, place N. Copernic, 29280 Plouzané

catherine.meurferec@univ-brest.fr

yannick.lageat@univ-brest.fr

alain.henaff@univ-brest.fr

Résumé. — En France métropolitaine, la gestion des risques côtiers est désormais fondée sur des principes qui dénoncent la tentation traditionnelle du durcissement du rivage. Ils s'appuient avant tout sur l'examen de l'adéquation des protections aux enjeux et sur la comparaison préalable du coût et des avantages de ces opérations de protection. Différents exemples considérés sur les rivages français montrent cependant qu'à l'exception de quelques initiatives particulières, on observe des écarts importants entre la doctrine et la mise en pratique de ces principes généraux : face aux risques de submersion et d'érosion du rivage, l'utilisation des solutions alternatives est encore inhabituelle. Pour autant, le recours aux solutions techniques lourdes de grande ampleur n'est pas systématique. Une série de freins psychologiques et administratifs, une certaine méfiance vis-à-vis de solutions nouvelles ainsi que les incertitudes concernant l'avenir conduisent, dans la réalité, à la multiplication des petits ouvrages de défense mis en place dans l'urgence.

Mots-clés. — France, risques côtiers, gestion, théorie, pratique.

Title. — *Coastal Risks Management in France: Evolution of the Doctrines, Inertia of the Practises*

Abstract. — *In France, coastal risk management is based now on principles that denounce the traditional temptation of using static structures to protect the coast. These principles lean on the adaptation of coastal protections to the stakes and on comparison between costs and benefits of defences. However, except some particular cases, examples taken on the French coasts show there is a large way between the doctrine and the application of its principles. Facing risks of flooding and coastal erosion, coastal alternative solutions are unusually used. However large coastal engineering structures are not systematically applied. A set of administrative and psychological brakes, some hesitations facing new solutions and uncertainties for the future bring coastal risks manager to multiply small coastal structures built immediately after disasters.*

Keywords. — *France, Coastal Risks, Management, Theory, Practises.*

Introduction

La concentration croissante d'enjeux sur la frange côtière est le résultat d'une évolution qui s'est faite, le plus souvent, sur des critères d'intérêts particuliers, sans vision à long terme, ni choix clair en matière de politique publique. Au regard des aménités apportées par la proximité immédiate de la mer et des revenus qui en sont tirés, les fortes contraintes environnementales qui pèsent sur la frange côtière n'ont souvent pas été perçues dans toute leur importance, comme en témoigne la densification des installations en bord de mer qui ne se dément pas (Robin et Verger, 1996). La mobilité intrinsèque de la ligne de rivage exprime le dynamisme des milieux côtiers : trop négligée, elle est responsable de deux types d'aléas, puisque l'érosion et la submersion constituent une menace pour les biens imprudemment implantés dans les espaces littoraux sur le quart des côtes métropolitaines (figure 1).

La protection des intérêts économiques et récréatifs a fréquemment conduit au durcissement du trait de côte, et ce déni des contraintes naturelles, qui se matérialise encore par des projets de nouvelles constructions dans des zones de fort aléa, accroît considérablement les enjeux et donc la vulnérabilité.

La tentation serait grande pour le géomorphologue de s'émouvoir des solutions « lourdes » s'il n'était lui-même géographe, et donc attentif aux préoccupations des sociétés riveraines, et conscient de la distance qui sépare l'incantation des principes de la réalité des terrains.

6.1 Théorie et doctrines de la gestion des risques littoraux

À la suite d'une initiative du Parlement européen, la Direction générale de l'environnement de la Commission européenne s'est préoccupée de la question de l'érosion côtière. Lancé en 2001, le projet *Eurosion* s'est proposé d'évaluer les incidences sociales, économiques et écologiques du repli des côtes européennes et d'étudier des moyens d'action pour sa gestion. Quatre recommandations principales ont été émises :

- prendre en compte le coût de l'érosion côtière dans les décisions d'aménagement et d'investissement ;
- anticiper l'érosion côtière et planifier des solutions à long terme pour y remédier ;
- renforcer la résistance côtière en rééquilibrant le bilan sédimentaire ;



Fig. 1. — Localisation des sites appelés dans le texte (fond de carte adapté de *L'Atlas du littoral de France*, 1994).

– consolider la base des connaissances en matière de gestion et de planification de l'érosion côtière pour garantir l'adoption de décisions avisées et l'application des meilleures pratiques.

La doctrine française de gestion des risques côtiers est finalement très proche de ces recommandations européennes. Comme, bien souvent, ce ne sont pas les orientations générales qui suscitent des discussions, mais l'articulation des principes et des pratiques. L'apport majeur de l'étude *EuroSION* est probablement la généralisation et la diffusion du message suivant : toutes les sections côtières ne pourront être protégées, et des choix stratégiques s'imposeront à terme. Les décisions restent ensuite éminemment politiques, le guide de bonne conduite européen ne fournissant aucune solution au cas par cas. Quoiqu'il en soit, un consensus s'est dégagé, en France, sur plusieurs options possibles, et il est exprimé dans divers

rapports et circulaires des ministères de l'Environnement et de l'Équipement (aujourd'hui regroupés au sein du MEEDDAT¹) qui appellent de leurs vœux la promotion d'approches globales pour la protection du littoral (L'Her, 2004).

6.1.1 Protéger à tout prix, quand la sécurité l'impose...

S'opposer massivement aux forces naturelles peut être une option envisageable dans certains cas, quand l'exige la protection de villes situées sous le niveau de la mer ou en bord de falaise, ou, par exemple, des centrales nucléaires. La construction d'ouvrages de défense efficaces contre la mer, comme les digues et les barrages, est techniquement possible, et les Néerlandais fournissent un exemple mondialement célèbre de cette maîtrise avec le Plan Delta.

1. L'article a été rédigé en 2008, et le Meeddat est devenu entre-temps le Meeddm, ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer.

6.1.2 Adopter des méthodes flexibles, quand les enjeux le justifient...

Dans le cas de stations balnéaires, où la conservation de la plage et le maintien de la position du trait de côte constituent des enjeux économiques majeurs, une alternative au « barricadage » peut être l'emploi de méthodes dites « souples » (Paskoff, 2005). Leur principe se fonde sur un rééquilibrage artificiel du bilan sédimentaire et/ou l'utilisation de processus dynamiques naturels. On peut regrouper dans cette catégorie toutes les techniques de rechargement par camions, par refoulement hydraulique, par *by-pass*, etc., ainsi que les techniques de drainage des plages de type « éco-plage » (ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 1998).

6.1.3 Accompagner le recul, quand la sensibilité des populations l'autorise...

En offrant la possibilité d'une alternative à la défense du trait de côte, la loi du 2 février 1995, dite « loi Barnier », marque un tournant notable dans les politiques publiques de gestion des risques côtiers. Elle introduit, en effet, la possibilité d'un retour en arrière au regard de la tendance au « glissement » des constructions et des activités vers le trait de côte. Il ne s'agit plus seulement de limiter la croissance de la vulnérabilité en empêchant le développement d'enjeux en zone de forts aléas (plans de prévention des risques, P.P.R.), mais aussi de réduire la vulnérabilité en détruisant certains enjeux. Cette nouvelle option, celle du « retrait », permet donc de sortir de la logique des « coups partis ». De plus, par ses retombées médiatiques, elle devrait avoir une action dissuasive et pédagogique. Les coûts étant supportés par la collectivité, on peut même espérer une progressive prise de conscience qui limiterait le « désir de rivage » bâti.

Partout où la chose est acceptable, les pouvoirs publics et les collectivités locales devraient privilégier l'indemnisation des biens menacés par le recul du trait de côte plutôt que la défense obstinée contre l'avancée de la mer. C'est ce que prévoit la loi française du 2 février 1995 qui a substitué les plans de prévention des risques (P.P.R.) aux plans d'exposition aux risques (P.E.R.) : la puissance publique peut procéder à l'expropriation d'une habitation là où un danger avéré menace des vies humaines, mais, parmi la quarantaine de dossiers en cours d'instruction à travers la France métropolitaine, un seul, pour le moment, concerne le littoral, celui de la falaise de Criel-sur-Mer.

La question a été partiellement résolue sur des sections du littoral français par la création, le 10 juillet 1975, du Conservatoire de l'espace littoral et des rivages lacustres, auquel était assignée la mission de « mener une politique foncière de sauvegarde de l'espace littoral, de respect des sites naturels et de l'équilibre écologique ». Au 1^{er} juin 2008, cet établissement public national avait acquis, en France métropolitaine 860 km de linéaire côtier. Une fois acquis, les terrains prennent un caractère inaliénable, ce qui garantit leur transmission aux générations futures. À l'horizon 2050, ce sont 2 000 km dont le Conservatoire espère pouvoir se rendre propriétaire, à condition que lui soient octroyés les moyens de sa politique foncière. Il ne fait guère de doute que cette maîtrise par appropriation publique constitue le moyen le plus sûr pour assurer une préservation efficace des espaces naturels. Il est parfois

reproché au Conservatoire de « jeter l'argent public à la mer » lorsqu'il abandonne ses terrains à l'érosion marine, mais il investit précisément pour défendre les dynamiques naturelles, sa position à ce sujet ayant été clairement exposée dans les résultats d'une étude prospective qui postule la submersion, d'ici à la fin du XXI^e siècle, de 1 350 ha au sein des sites acquis, soit 3 % de leur surface (Clus-Auby, Paskoff et Verger, 2005).

Dans ces espaces de nature, laisser jouer les processus naturels d'érosion ou de sédimentation semble relever de l'évidence. À partir du postulat que le risque est soumis à l'existence d'enjeux, le recul du trait de côte dans un secteur préservé ne constitue pas un risque en soi, même si, paradoxalement, il est des écologistes pour soutenir qu'un habitat naturel ne doit pas être modifié (ne serait-ce par la dynamique naturelle) et qu'il constitue donc un enjeu à défendre contre l'érosion. On ne s'étonnera pas que des élus locaux, à la recherche d'arguments pour la construction de digues, se rallient à de telles positions « fixistes ». Ces considérations sur la « libre érosion » du rivage n'ont, bien sûr, de sens que s'il n'existe pas, en arrière, d'enjeux indirectement menacés, comme, par exemple, des zones inondables habitées ou exploitées, ou des espèces gravement menacées de disparition.

Toutefois, « les riverains, dont la mémoire collective reste marquée par des siècles de lutte contre les sables ou contre la mer, accepteront-ils ce retour à une nature romantique et sauvage ? », s'interrogeait R. Paskoff en décembre 1998 (*Pour la Science*, n° 254), à propos du déboisement des dunes fixées, au Danemark et en Angleterre, ou de la remise en eau de polders, en Allemagne et aux Pays-Bas...

Les trois options, que nous avons rappelées, offrent donc une palette de choix clairs, à appliquer en cohérence avec la situation propre à chaque site. Pourtant les pratiques de terrain ne reflètent pas nécessairement les consensus doctrinaux et même les mesures réglementaires car, dans nombre de sections littorales confrontées au *coastal squeeze*¹, force est de composer avec les situations héritées et les habitudes acquises.

6.2 De la théorie à la réalité : la rareté des choix alternatifs

Une meilleure connaissance du fonctionnement des systèmes côtiers et une prise de conscience de la valeur environnementale des bords de mer expliquent l'émergence d'approches qualifiées de « douces » ou « souples » parce qu'elles cherchent à « composer avec la mer plutôt que s'y opposer » (ministère de l'Environnement, 1998).

6.2.1 De rares opérations « pionnières »

Il est symptomatique que les praticiens du littoral peuvent, en France, spontanément associer à ces choix alternatifs des sites parfaitement identifiés.

Crozon ou la dépoldérisation active

Il s'agit là d'un acte symbolique consistant à rendre délibérément à la mer les terres basses que l'homme avait

1. Cette expression imagée des auteurs britanniques désigne la réduction de l'espace pris en étau entre un rivage en recul et des installations fixes.



Fig. 2. — Photographies d'une des maisons détruites à Criel-sur-Mer. Source : Jean Mauger, maire de Criel-sur-Mer.

endiguées. En France, même si plusieurs projets existent, une seule dépoldérisation a été volontairement réalisée pour le moment, à Crozon (29), les autres restitutions à la mer ayant toutes été accidentelles (Le Carmel dans la baie des Veys, Graveyron, Mortagne, île de la Maréchale...). Même si les coûts des travaux de renforcement et de rehaussement des digues finissent par excéder la valeur des terres agricoles situées en arrière, une telle renaturalisation ne rencontre guère l'adhésion de l'opinion publique car elle est considérée comme un renoncement après des siècles de gains patients sur la mer (Goeldner-Gianella, 2007).

Criel-sur-Mer, ou l'expropriation imposée

La Loi Barnier de 1995 autorise le recours pour cause d'utilité publique à l'expropriation des biens exposés à des risques naturels majeurs menaçant la vie humaine. Ainsi, à Criel-sur-Mer, en Seine-Maritime, où la procédure a débuté en juin 1997, onze habitations, directement menacées par le retrait de la falaise crayeuse, évalué à 10 m en quatre ans, ont été détruites entre janvier et avril 2006 après que leurs propriétaires ont été indemnisés à hauteur de la valeur du bien estimée en l'absence de risque, pour un coût total de 900 000 euros, malgré la longue résistance d'une Association de défense des falaises regroupant une soixantaine d'adhérents (figure 2).

Châtelailon ou le rechargement sédimentaire

Dans cette station balnéaire de Charente-Maritime, la plage bordée d'une digue-promenade avait quasiment disparu au début des années 1980, et la fréquentation touristique, après avoir connu des heures de gloire à la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle, avait chuté à environ 4 000 visiteurs par an. Les travaux de rechargement, décidés par la municipalité en 1989, se sont déroulés en plusieurs étapes de 1989 à 2004. Au total, ce sont environ 500 000 m³ qui ont été apportés des fonds sous-marins proches et répartis sur 1 800 m de long, pour un coût de près de 5 millions d'euros, soit environ 2 700 euros par mètre linéaire en moyenne, auquel s'ajoute l'entretien annuel de l'ordre de 50 000 euros

pour réapprovisionner en sable, par camions, l'amont de la dérive littorale (Pupier-Dauchez, 2002). Techniquement « douce », cette méthode ne l'est donc pas financièrement. Les travaux ont été financés par la mairie, le Conseil général et des fonds européens FEDER. L'opération a permis de redynamiser de manière exemplaire l'économie locale, faisant remonter le chiffre de fréquentation touristique à 44 000 visiteurs en 2000.

Cette solution, qui n'a toutefois été introduite que fort récemment en France sur une soixantaine de sites, peut d'évidence remédier aux problèmes locaux d'érosion. C'est aussi l'option choisie par La Baule depuis 2004, où les travaux, qui s'élevaient à 5 millions d'euros, ont été financés à 20 % par la ville, le reste étant pris en charge par l'État, le conseil régional et le Conseil général. L'importance des enjeux touristiques et immobiliers justifie l'investissement, mais nombre d'élus demeurent réticents face à une méthode jugée coûteuse qui peut connaître des échecs conjoncturels dus essentiellement à deux causes dynamiques qu'a rappelées S. Pupier-Dauchez (2002) : un sous-dimensionnement granulométrique des sédiments d'emprunt par rapport aux sables en place, et un sous-dimensionnement volumétrique au regard du stock sédimentaire nécessaire à la reconstruction des plages réceptrices. Par ailleurs, cette solution nécessite un suivi et un entretien réguliers et coûteux en raison de pertes souvent chroniques de sable (rechargements d'entretien à prévoir périodiquement).

Il convient, en outre, de ne pas négliger les difficultés structurelles, notamment la disponibilité « naturelle et réglementaire » des sources de matériaux. Cette option doit donc s'appuyer sur des plans de gestion des sédiments côtiers en vue de rétablir la résistance du littoral. En effet, ce principe, que R. Paskoff (2005) appelle « l'assistance sédimentaire aux plages », requiert de répertorier des « réserves stratégiques de sédiments » dans des secteurs où les prélèvements ne compromettent pas le bilan sédimentaire du système côtier ni les équilibres écologiques. Ces plans de gestion des sédiments font, pour l'instant, défaut en France, bien que certaines initiatives locales aillent dans

ce sens. Ainsi, à la suite de l'expérience de Châtelailon, le Conseil général de Charente-Maritime organise la gestion des ressources en sable à une échelle départementale, et, de leur côté, le Syndicat mixte de la Côte d'Opale et le Conseil régional du Nord-Pas-de-Calais (2003) ont développé un Plan Local d'Action pour la Gestion de l'Érosion (PLAGE). Une autre variante de rechargement est le système, dit de *by-pass*, de transfert hydraulique de sable, par pompage et réinjection, de part et d'autre d'un obstacle, afin de rétablir le transit sédimentaire. Ce système n'a été adopté que par quelques rares stations, comme Saint-Denis-d'Oléron (Charente-Maritime) ou Capbreton (Landes) et n'en est encore, en France, qu'à ses balbutiements.

On fonde aussi des espoirs sur la technique d'origine danoise baptisée Écoplage qui consiste, en assurant le drainage gravitaire des estrans sableux, à favoriser l'infiltration du jet de rive afin de diminuer la quantité d'eau disponible pour la nappe de retrait plus érosive. Là encore, l'application ne concerne que quatre sites-tests en France : Les Sables-d'Olonne en Vendée, Villers-sur-Mer dans le Calvados, et les plages d'Agay et de la Garonnette dans le Var.

Comme le notent Lambert *et al.* (2007), « l'emploi de méthodes alternatives reste largement anecdotique sur les côtes françaises, pour diverses raisons. Ces méthodes sont mal connues des gestionnaires en charge des côtes, qui sont souvent sceptiques quant à leur efficacité et leur préfèrent les méthodes traditionnelles. Elles sont donc peu employées et manquent — de fait — de validation expérimentale. Elles ont également un coût important, dû notamment aux études préalables à leur implantation, mais également à l'absence de généralisation de ce type de procédés ».

6.2.2 D'exceptionnelles interventions massives

Il est plus réjouissant de constater que rares sont les sites où, faute de choix alternatifs, des opérations de défense d'envergure ont dû être entreprises : l'exemple le plus spectaculaire est livré par la Côte des Basques à Biarritz, une ville rattrapée par sa falaise (Albinet, 1995).

Sur une longueur de 1 240 m, l'escarpement côtier, taillé, sur une hauteur d'une cinquantaine de mètres, dans des marnes éocènes surmontées d'alluvions sablo-graveleuses, subissait un fort retrait, dû à la conjonction de plusieurs processus, les plus efficaces étant des mouvements de masse réactivés par une puissante attaque marine responsable du déblaiement des matériaux glissés. Des mesures planimétriques ont permis d'évaluer à 27 000 m² la surface perdue entre 1938 et 1982, soit 610 m²/an, et, sous la pression du danger représenté par le recul de la falaise en plein cœur du tissu urbain, une stratégie de défense a été élaborée au début des années 1980. Sur les conseils du B.R.G.M., un traitement d'ensemble a été proposé qui a consisté en une lutte simultanée contre tous les processus contribuant au recul : drainage des formations superficielles, consolidation du pied de falaise par une digue, et, surtout, remodelage total du profil pour en réduire la pente d'ensemble et, ainsi, neutraliser les glissements (figure 3).

Le problème majeur ne concerne pas tant la maîtrise technique que les coûts d'investissement et d'entretien occasionnés, ce qui implique des choix de société. Ces grands travaux, réalisés de 1983 à 1992, se sont élevés à quelque 150 000 F par mètre linéaire, et la station, en dépit d'importantes ressources financières propres, a dû

faire appel à des aides extérieures (Albinet, 1995). C'est payer cher l'absence de prévoyance du passé puisque les dynamiques qui affectent la falaise étaient connues dès 1845, et que le risque était donc prévisible. Le développement anarchique de la station, à partir du Second Empire, n'a pas permis d'anticiper le recul, donc d'éviter l'urbanisation aux approches de la falaise.

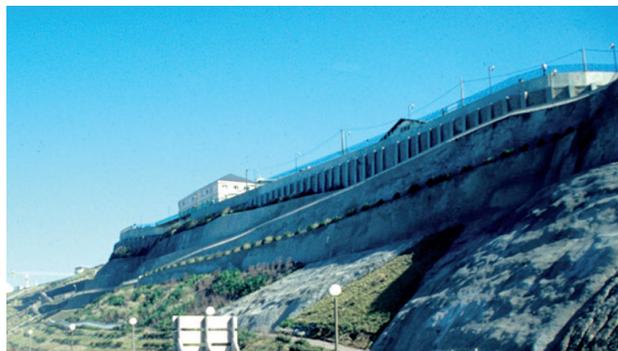


Fig. 3. — La falaise de Biarritz entièrement reprofilée (photographie d'A. Miossec).

Un autre exemple d'artificialisation totale, Ault, dans la Somme, peut surprendre, alors que le sommet de la Côte crayeuse d'Albâtre, longue de 130 km, était historiquement inoccupé. En fait, des bas quartiers s'étaient construits au pied d'une falaise morte sur la racine antérieure de l'actuel poulier du Hourdel, et cet abrupt a été « ressuscité » par l'attaque directe de la mer dès la fin du XVIII^e siècle après que la bourgade s'était réfugiée à son sommet. La lutte contre la mer, qui a emporté trois casinos, n'a, depuis lors, pas cessé. La construction réitérée d'épis depuis 1823 n'ayant pas permis la reconstitution d'un cordon de galets protecteur, un traitement d'ensemble a été appliqué sur une longueur de 500 m, entre 1981 et 1986, associant un puissant enrochement et une casquette de couronnement, pour un coût de plus de 36,5 millions de francs (dont plus du tiers a dû être emprunté par la municipalité qui ne compte que 2 000 habitants). La falaise, remodelée et indurée, a été délibérément « tuée », mais c'est l'existence même d'une agglomération qui était en jeu (figure 4).

6.2.3 La généralisation des petits ouvrages de défense

Ph. Deboudt (2002) évoque, à partir du milieu du XIX^e siècle, une véritable « institutionnalisation de la défense contre la mer marquée par la création de groupements de propriétaires », conformément à la loi du 16 septembre 1807 qui, n'imposant aucune obligation d'intervention à l'État, a suscité la création d'associations syndicales.

On pouvait imaginer que, depuis la loi Littoral de 1986, s'observerait un ralentissement de l'artificialisation du trait de côte. La loi interdit, en effet, la reconstruction des protections dont l'effet aggravant sur l'érosion est avéré, tout en privilégiant les opérations « ayant un caractère expérimental ou exemplaire quant à la méthode mise en œuvre ». Les nouvelles directives auraient dû sonner théoriquement le glas du *hard engineering*. Or, comme le note Ph. Deboudt, « les vingt dernières années ne sont pas marquées par un arrêt de la mise en place des ouvrages de

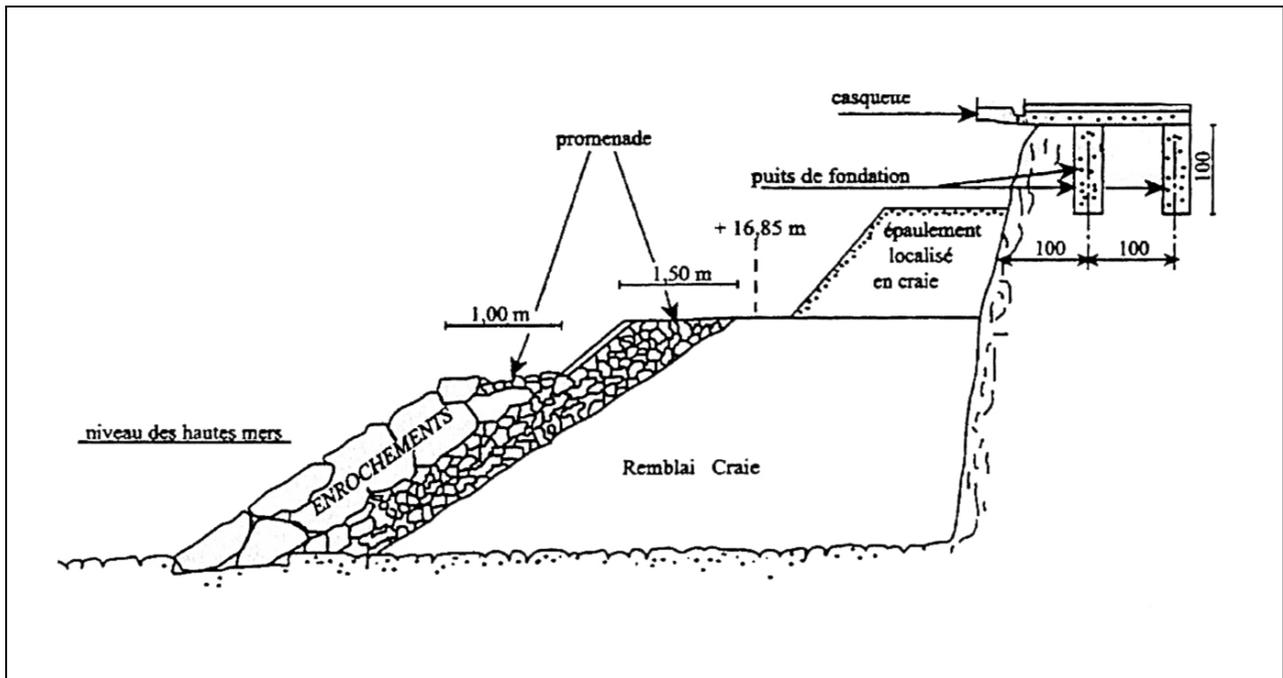


Fig. 4. — Profil des aménagements d'Ault (R. Regrain, 1992).

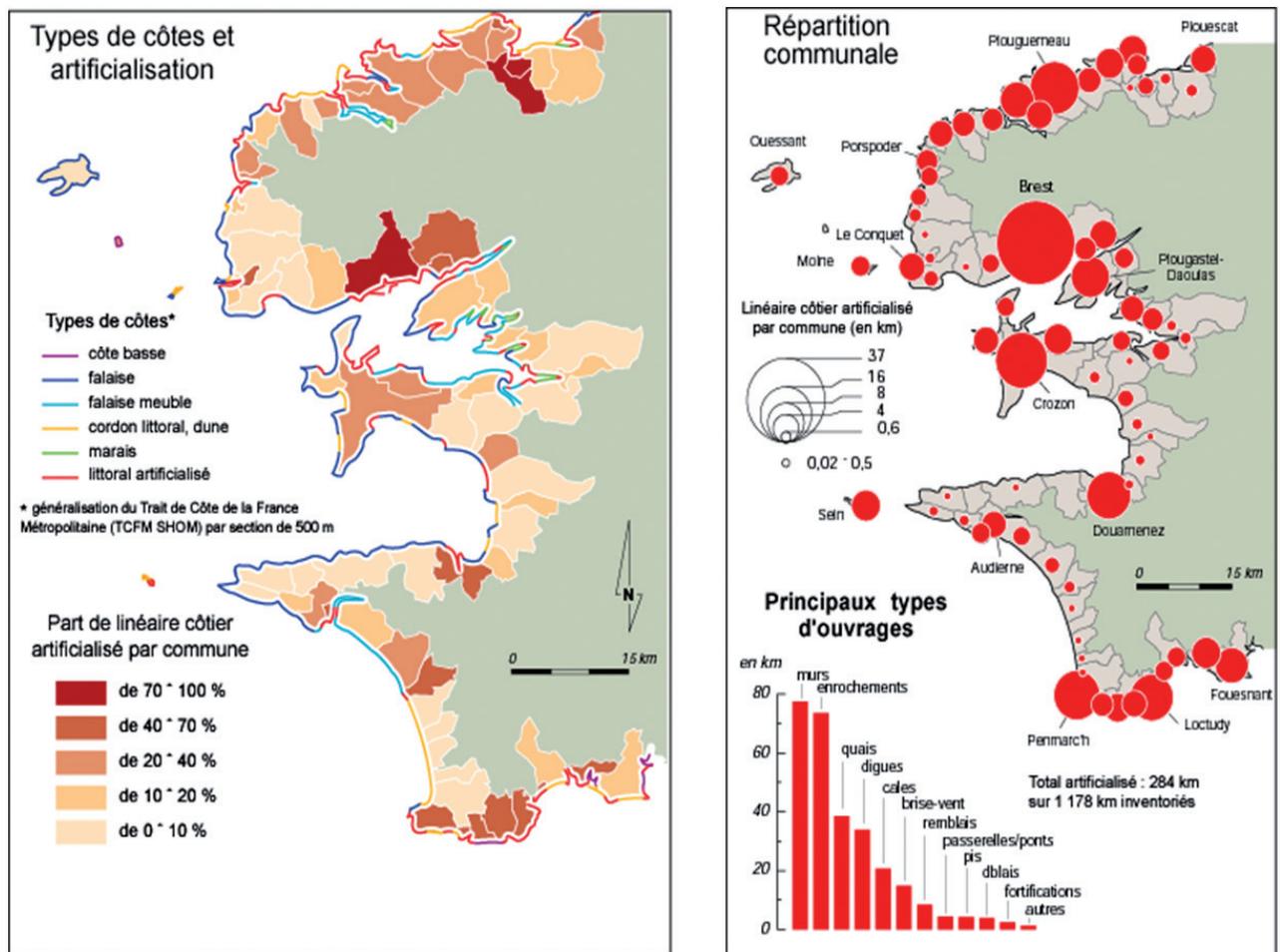


Fig. 5. — L'artificialisation du rivage de l'ouest du Finistère en 1998 (Le Berre & Hénaff, 2001 ; réalisation L. Pourinet, 2001).

défense du trait de côte : c'est un constat intéressant au regard du changement considérable du cadre réglementaire de l'intervention humaine sur le littoral pendant cette période et des évolutions dans la conception de protection des rivages ».

Ainsi, dans le Finistère, en moins de dix ans, de 1989 à 1998, le linéaire côtier enroché est passé de 54,5 km (Hallégouët, 1989) à 73,6 km (Le Berre et Hénaff, 2000 ; 2003), la part des enrochements dans l'ensemble des structures artificialisant le rivage passant ainsi de 28 % à 35 % (figure 5). De tels choix ne sont cependant pas sans conséquence, puisque les effets néfastes de ces structures défensives peuvent être observés à plus ou moins long terme nécessitant alors de nouvelles interventions pour protéger les secteurs littoraux proches.

Ce choix du durcissement du littoral, même en l'absence de forts enjeux, est évidemment troublant. A. Guilcher (1990a) s'en étonnait à propos de l'exemple du littoral de la commune de Plouguerneau dans le Léon qui s'inscrit dans les *heads* pléistocènes alternant avec des affleurements granitiques, type parfait de la côte contraposée dont l'évolution « conduit très normalement à l'accentuation des rentrants et l'irrégularisation de plus en plus grande de la ligne de rivage. C'est là une évolution tout à fait naturelle [...]. Vouloir s'y opposer par des murs de blocs est à notre avis chimérique. » Tout aussi généralisés sont les enrochements en pied de dunes dont les effets pervers sont connus puisqu'ils interrompent les échanges de sédiments avec les estrans sableux (figure 6).



Fig. 6. — Enrochements à Trégastel (22).

Soigneusement construits et correctement entretenus, les murs et enrochements, épis et brise-lames sont dotés d'une incontestable efficacité pour la protection contre la mer des constructions de première ligne (habitations, ports, industries...), mais cette stratégie de défense passive fait désormais l'objet de sévères critiques car elle n'apporte pas de remèdes aux causes du recul des côtes et condamne à terme les plages (Paskoff, 2006). « Pénélope ne manquera pas d'ouvrage et la voix de Cassandre n'a pas fini de retentir », selon l'heureuse formule d'A. Miossec (1986). On peut s'interroger sur les raisons de ce décalage entre une doctrine faisant l'objet d'un relatif consensus et les réalisations sur le terrain qui s'en éloignent manifestement.

6.3 Les freins à la mise en œuvre des solutions alternatives : les principes de réalité

La tentation est grande d'insister sur le contraste entre deux conceptions de la gestion littorale, en les tenant très éloignées de toute querelle corporatiste, dont J.-P. Pinot (2002) a ainsi résumé les inspirations : « À la gestion en force des ingénieurs (contrer la mer) s'oppose la gestion en douceur des géographes (utiliser les mécanismes naturels pour que la mer fasse elle-même la transformation souhaitée). » Convient-il de s'obstiner à vouloir maintenir un état de la côte qui serait condamné par les forces de la Nature ? La réponse serait contenue dans la question si la gestion n'exigeait, de la part des géographes, de connaître non seulement les processus qui commandent l'évolution morphosédimentaire, mais aussi les mécanismes qui règlent les aspirations de la société. En l'occurrence, les municipalités, dans l'exigeante obligation de mettre à l'abri les populations et les biens, sont confrontées à la fois aux attentes de leurs électeurs, aux préconisations des services de l'État, aux difficultés de réunir les financements et, finalement, comme tous, aux incertitudes de l'avenir.

6.3.1 Les réflexes immédiats ou comment parer au plus pressé...

Les principes de gestion raisonnable de l'érosion côtière, sont, dans nombre de cas, rapidement oubliés, lorsque les tempêtes occasionnent des dommages spectaculaires et brutaux. Le recours aux dispositifs lourds de défense (enrochements et perrés, notamment) constitue alors le réflexe défensif, dont l'avantage immédiat est de rassurer les populations riveraines et d'éviter les soupçons d'indifférence de la part des autorités.

Ainsi, à la pointe de Moustierlin en Fouesnant (Finistère), les coups de vent de novembre et décembre 2007 ont fait reculer de quelques mètres un secteur de dune en arrière duquel, dans une zone submersible, les permis de construire délivrés au cours des dernières décennies ont progressivement augmenté la vulnérabilité des lieux. L'urgence de la situation et la pression des riverains, d'ailleurs antérieure à ces dégâts et fortement relayée par la presse, ont, quelques semaines plus tard, justifié la mise en place d'un enrochement d'une quarantaine de mètres de longueur qui a été autorisé par une procédure d'urgence permettant de se passer d'études préalables et de certaines autorisations administratives. Or, l'analyse ultérieure des évolutions passées a montré que la section littorale concernée était stabilisée, et même en progradation locale, au cours des dernières décennies du fait de sa position en aval-dérive d'une accumulation littorale, même si des périodes d'érosion y sont enregistrées épisodiquement. À quelques décennies d'intervalle, toujours à Fouesnant sur un autre cordon littoral dunifié, la destruction des plantations de pins sur le revers du cordon et l'importante déflation générées, sur la plage et le front dunaire, par l'ouragan du 15-16 octobre 1987 avaient, de la même manière, légitimé l'extension d'un enrochement dans la partie proximale de l'accumulation, alors même que les conditions marines (faible coefficient de marée notamment) au passage de l'ouragan n'avaient pas permis à la mer d'atteindre le haut de l'estran sableux.

Il s'agit là d'un réflexe habituel, au cours du dernier demi-siècle, notamment depuis les années 1970, comme le révèle la coïncidence entre la chronologie des dégâts occasionnés sur les rivages de la Bretagne, pour l'essentiel par les fortes tempêtes, et la chronologie des travaux de protection de ceux-ci contre l'érosion (Hénaff, 2004) (figure 7).

C'est le même constat que dresse Ph. Deboudt (2001) sur le littoral de Sangatte, où il met en évidence une étroite corrélation entre la multiplication des aménagements « durs » et l'occurrence des tempêtes, de 1863 aux années 1970, jusqu'à l'acquisition d'une partie de l'avant-dune par le Conservatoire qui, lui, en l'occurrence, peut « voir venir ». Toujours dans le Pas-de-Calais, le cas de la station balnéaire de Wissant présente un nouvel exemple de ce réflexe défensif échappant à tout principe de gestion raisonnée (Battiau-Queney, 2008). Suite à un épisode tempétueux, et en raison de l'érosion chronique de la plage, la digue-promenade bordant le front de mer urbanisé a de nouveau cédé en mars 2007. Quelques jours plus tard, des blocs d'enrochement ont été déposés par les services maritimes sur et au pied de la digue éventrée, alors qu'un projet de ré-ensablement massif, en étude depuis cinq ans et en cours de montage financier, faisait consensus auprès de tous les acteurs.

Même si l'on sait que les systèmes physiques côtiers sont dotés de nombreux mécanismes de résilience qui peuvent leur permettre de récupérer, notamment, après de violentes tempêtes, on doit aussi admettre que le temps de la Nature n'est pas celui de l'Homme, celui de la saison touristique ou même du mandat électoral. La tentation reste donc

grande de réaliser, dans un souci d'efficacité immédiate, des ouvrages sous la pression d'événements destructeurs. Mais, à côté de tant d'enrochements dont la mise en place n'est pas justifiée par les enjeux, il est des interventions qui ne paraissent pas déraisonnables. On a dénoncé l'« acharnement thérapeutique » que constituerait le maintien dans sa position actuelle de la section proximale de la flèche de Hourdel après que la tempête de février 1990, par l'ouverture de brèches dans le cordon, a entraîné la submersion de 3 000 hectares sur les 4 300 des Bas-Champs dans la Somme (R. Regrain, 1992). Mais quel édile prendrait la responsabilité du repli auprès des 4 000 habitants, dont 3 000 vivent à Cayeux-sur-Mer, après abandon de l'entretien de la batterie d'épis et des rechargements réguliers en galets ? Quel autre, prenant acte de la tendance séculaire au recul de l'isthme de Penthièvre, s'accommoderait du retour à l'insularité de Quiberon ?

6.3.2 Le poids des traditions ou comment se rassurer...

Sans parler de fièvre obsidionale, psychose collective frappant une population assiégée, il convient d'admettre que, même en France, la solution du repli face à l'avancée de la mer se heurte d'évidence à des mentalités collectives qui évoluent avec lenteur et restent très majoritairement favorables à la mise en place de barricades. Il n'est pas sûr qu'elles soient très éloignées, quatre-vingts ans après, de l'argument avancé par tel conseiller général de Seine-Maritime dans une note adressée à l'ingénieur en chef des

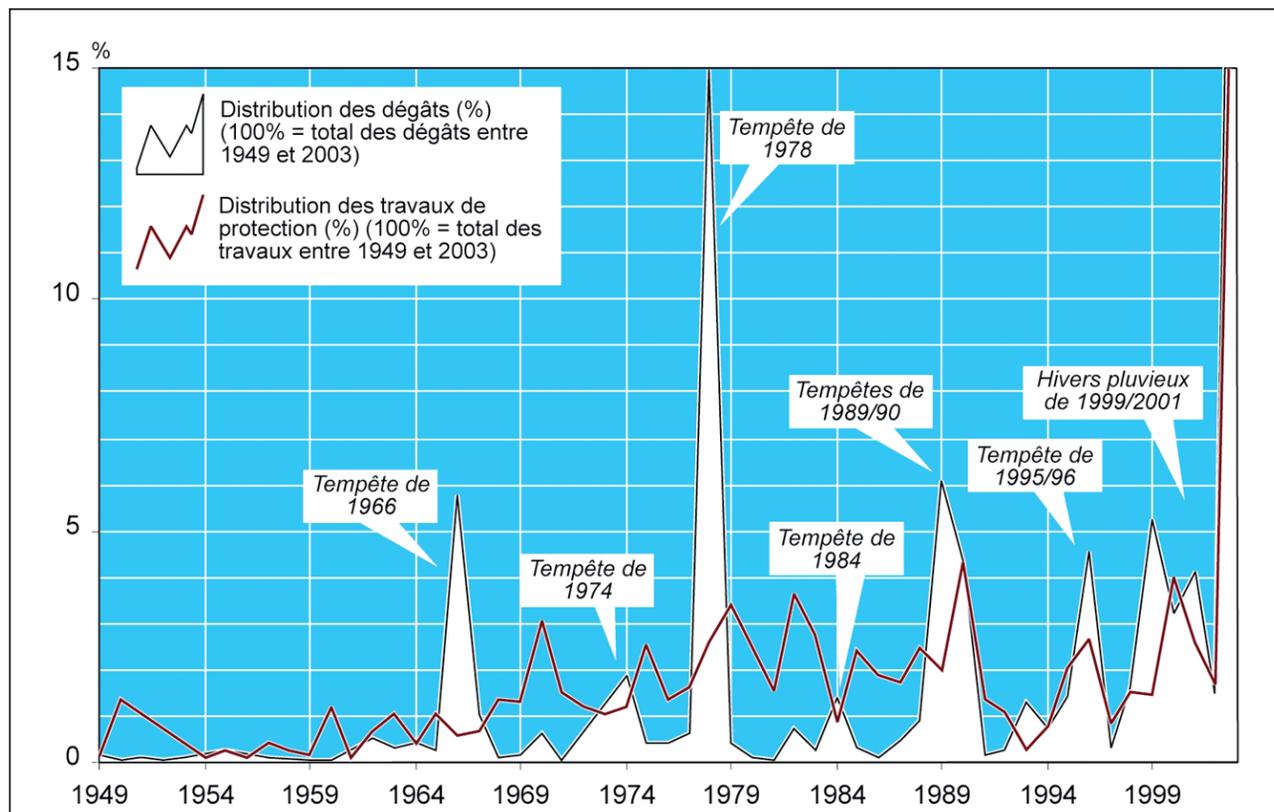


Fig. 7. — Chronologie comparée des dégâts côtiers et des travaux de protection du rivage contre l'érosion en Bretagne entre 1949 et 2004 (Hénaff, 2004).

Ponts et Chaussées, appelant de ses vœux l'élévation d'une « barrière morale » contre la mer (Lageat, 2004).

Cette tentation est suffisamment ancrée pour que la mitigation du risque qu'occasionne le recul du trait de côte ne puisse passer par la seule prévention. L'exemple du quartier des Minimes à La Rochelle est, de ce point de vue, éloquent (Albinet, 2003). À la suite d'un changement de majorité municipale en 1971, il fut décidé de reculer de plusieurs dizaines de mètres les constructions et de transformer en espaces verts les terrains situés en bordure immédiate de la falaise afin de se prémunir contre son retrait. Ce dernier, que la comparaison des plans cadastraux permettait d'évaluer à moins d'une dizaine de cm par an, était intégré dans la nouvelle opération d'urbanisme en sorte qu'aucun bâtiment d'habitation n'était menacé de destruction pendant sa durée de vie ou le temps d'amortissement de son coût. On aurait donc pu parler d'opération exemplaire si l'inertie des comportements n'avait conduit à recourir à des travaux de génie civil pour fixer la ligne de rivage avec la construction, en 1982, d'une digue longue de plusieurs centaines de mètres... Il est tout aussi significatif qu'il ait fallu un quart de siècle pour commencer à supprimer les enrochements sur le sillon de Talbert (Côtes-d'Armor).

La multiplication des « associations de défense des falaises » est, en l'occurrence, révélatrice du refus de préserver l'évolution naturelle de formes littorales qui n'existent que parce qu'elles reculent. On ne peut guère s'étonner que le retrait, même accompagné de la relocalisation des hommes et de leurs activités, soit perçu comme un renoncement.

Ainsi, en mai 2001, s'est constituée, en Trébeurden (Côtes-d'Armor), « l'association de défense et de préservation des falaises de la baie de Pors-Mabo » (formulation cocasse puisque le recul ne peut être bloqué qu'en renonçant à la forme). Cette association s'émouvait qu'aucune action ne fût proposée par les pouvoirs publics, alertés depuis 1982, pour entraver le recul d'un escarpement côtier tout entier taillé dans des formations superficielles d'âge pléistocène, associant limons éoliens et *heads* solifluidaux. Dès 1978, sur 300 m de longueur à sa base, un enrochement avait été installé qui fut impuissant à empêcher un retrait de 7 m en dix ans. De fait, une étude réalisée par J.-P. Pinot confirma que les glissements ne sont pas dus à l'attaque par la mer, mais à l'évolution normale d'un versant terrestre dans des terrains meubles. Tirant argument de cette expertise, la préfecture informa le maire que, seuls, les travaux de défense contre l'érosion marine étaient éligibles à une subvention de l'État. La municipalité fut donc invitée à assurer une meilleure collecte des eaux pluviales et usées afin d'éviter la saturation du sous-sol et le franchissement du seuil de plasticité : ces travaux de recueillement des eaux d'infiltration ont été réalisés au cours de l'année 2004, mais, à cette date, l'association, ne désarmait pas, forte d'une nouvelle proposition d'action formulée par un cabinet d'étude. Le cas de la falaise nord de Wimereux, dans la Pas-de-Calais, présente une frappante similarité (Meur-Ferec et Morel, 2004) (figure 8).

Par ailleurs, il apparaît que la servitude de passage de piétons sur le littoral (S.P.P.L.), imposée par la loi du 31 décembre 1976 dans une bande de trois mètres en arrière du Domaine Public Maritime (D.P.M.), est au cœur des préoccupations de nombreuses communes. Beaucoup



Fig. 8. — Falaise nord de Wimereux où une maison qui menaçait de s'effondrer à dû être détruite en 2001.

doivent prendre la décision de fermer des sections et de mettre en place des déviations. Ainsi, en raison du recul du sommet de la falaise de Pors-Mabo, les riverains ont insisté pour que le sentier côtier soit repoussé en arrière de leurs propriétés. Les élus sont légitimement inquiets des responsabilités qui leur sont imposées en matière de sécurité sur ces cheminements, malgré leur allègement dans le code pénal en 2000 (Biville et Van Waerbeke, 2003). « On ne peut continuer à laisser faire la nature en raison des dangers », dit une délibération du Conseil municipal de Plougrescant (Côtes-d'Armor) en 1996, s'insurgeant que la DIREN, du fait du classement en zone remarquable par la loi Littoral, n'ait pas autorisé des enrochements.

6.3.3 Les inconnues des expertises ou comment agir dans un monde incertain...

On sait que la loi Barnier de 1995 prévoit la possibilité d'opter pour le retrait du trait de côte et la destruction des enjeux riverains, si « les coûts de sauvegarde et de protection de la population sont supérieurs aux indemnités d'expropriation et aux coûts de démolition des constructions menacées ». Le principe est clair dans son énoncé, et il serait théoriquement convaincant si le calcul ne comportait plusieurs inconnues. Comment évaluer la profondeur du repli à échéance de cent années ? C'est l'ambition des P.P.R.N., mais la vitesse de retrait de la côte ne peut faire l'objet que d'estimations. Certes, les analyses de l'évolution passée, à partir de cartes anciennes et de photographies aériennes fournissent des indications précieuses, mais le prolongement des courbes de tendances dans l'avenir est toujours hasardeux. Or, dans le cas du modèle coût-bénéfice, ce rythme de recul détermine une des variables clés de l'équation, à savoir le nombre des constructions qu'il met en danger.

Le cas du P.P.R. de Wimereux (Pas-de-Calais) illustre bien les dilemmes que ce modèle peut engendrer. Prescrit par le préfet du Pas-de-Calais en 1999, élaboré par le CETE et les services maritimes, le « P.P.R. Falaises » a été soumis en 2001 à l'avis des élus municipaux. D'après les calculs du CETE, calés sur le rythme du recul depuis une cinquantaine d'années, une dizaine de maisons seraient menacées d'ici un siècle. Le conseil municipal a émis à l'unanimité un avis défavorable sur ce projet, estimant que le recul était sous-évalué. Ce type d'objection est plutôt rare car, en règle générale, les élus locaux considèrent que les services de

l'État tendent à exagérer les aléas pour se « couvrir » en cas de catastrophe. Toutefois, à Wimereux, le Conseil espérait la construction d'une digue et un confortement de falaise. Dans cette perspective, il considérait que la « zone rouge » proposée par l'État était soit trop étroite en l'absence de travaux de protection de la falaise, soit trop large si ces travaux étaient réalisés. Or, une autre « expertise », commandée à un bureau d'études par la commune et cofinancée par les fonds européens *Interreg II*, estime qu'en l'absence d'ouvrage, près de deux cents maisons seraient menacées d'ici un siècle. Le désaccord entre services de l'État et municipalité rend difficile le calcul du bilan coût de la protection-coût du retrait. D'après les évaluations de la municipalité, le coût de travaux (6 millions d'euros, dont 80 % demandés en subventions à l'État et aux collectivités territoriales) serait nettement inférieur au coût d'expropriation (38 millions d'euros pour 170 maisons). À l'heure actuelle, l'estimation des services de l'État a été confirmée et le dossier porté à l'enquête publique par décision du préfet. Le maire n'a pas obtenu les subventions pour les travaux prévus, car l'utilité publique ne semble pas clairement démontrée pour les services de l'État. Pendant ce temps, le recul de la falaise se poursuit. Les riverains, regroupés en association, dénoncent l'immobilisme des pouvoirs publics et même de la mairie face à l'urgence de la situation. Un article de la *Voix du Nord* titrait déjà le 24 janvier 2001 : « La falaise recule, que le dossier avance ! » Dans ce contexte de fort aléa et en l'absence de mesures de prévention, la vulnérabilité s'accroît..., mais comment prendre des décisions en se fondant sur une équation à tant d'inconnues ?

Conclusion

Il est peu d'écosystèmes qui n'aient été autant soumis aux transformations humaines que les milieux littoraux, alors que, même à l'état naturel, de modestes variations des processus sont susceptibles de leur apporter des changements substantiels. En contrariant la dynamique morphogénique, les sociétés riveraines introduisent dans les systèmes côtiers des modifications souvent préjudiciables à la durabilité des aménagements humains. Il serait toutefois trop simple de poser pour principe que toute technique lourde est nocive et que toute technique douce est efficace, et J.-P. Pinot lui-même (2002), si prompt à dénoncer l'ingénierie, concédait que « si un enrochement est assez bien fait pour ne pas provoquer d'effets pervers, il est préférable à des ganivelles mal implantées ».

Est-ce à dire que l'Homme devrait se borner à infléchir le cours de la Nature sans en contrecarrer l'action ? Avec sagesse, A. Guilcher (1990b) suggérait de « ne pas s'enfermer dans des principes rigides et universels. La gestion du littoral ne doit pas suivre des règles générales et inflexibles [...]. La philosophie des rivages à laquelle je suggère que l'on parvienne devrait être une philosophie du coup par coup. » Il est des cas où il serait, en effet, insensé de s'opposer à une artificialisation efficace, comme il en est d'autres où il serait absurde de sauvegarder coûte que coûte des sections sans enjeux... Mais comment mesurer ces derniers à l'aune d'aléas dont l'intensité est définie par

une connaissance de plus en plus fine des événements du passé et dans une ignorance de plus en plus avérée des tendances du futur (Callon *et al.*, 2001) ?

Bibliographie

- ALBINET V., « La gestion défensive des falaises en France : pratiques et carences d'une tradition persistante », *Hommes et Terres du Nord*, n° 1-2, 1995, p. 65-72.
- ALBINET V., « La gestion du risque engendré par le recul d'une falaise en zone urbanisée : l'exemple du quartier des Minimes à La Rochelle (Charente-Maritime, France) dans les années 1970-1980 », *Hommes et Terres du Nord*, n° 1, 2003, p. 44-54.
- BATTIAU-QUENEY Y., « Le temps de la nature et le temps de l'action : comment concilier les deux pour une gestion intégrée des systèmes côtiers ? », in *Colloque le littoral subir, dire, agir*, 16-18 janvier 2008, Lille, Actes sur www.ifresi.univ-lille1.fr/, 2008.
- BIVILLE M. & VAN WAERBEKE D., « Les risques induits par le recul des falaises meubles sur les côtes nord-bretonnes : difficultés croissantes de la gestion du sentier côtier », *Hommes et Terres du Nord*, n° 1, 2003, p. 55-63.
- CALLON M., LASCOUME P. & BARTHES Y., « *Agir dans un monde incertain : essai sur la démocratie technique* », Le Seuil, coll. « La couleur des idées », Paris, 2001, 358 p.
- CLUS-AUBY C., PASKOFF R. & VERGER F., « Chaud et froid sur le littoral. Impact du changement climatique sur le patrimoine du Conservatoire du littoral ; Scénarios d'érosion et de submersion à l'horizon 2100 », Actes de l'atelier du Conservatoire, Paris, 5 avril 2005, www.conservatoire-du-littoral.fr/tmp/Actes%20Atelier%20Chaud%20&%20Froid.pdf
- DEBOUDT Ph., « Géohistoire de la lutte contre l'érosion côtière sur le littoral du Pas-de-Calais », éd. du C.T.H.S., Paris, 2002, p. 221-237.
- GOELDNER-GIANELLA L., « Dépoldériser en Europe occidentale », *Annales de Géographie*, n° 656, 2007, p. 339-360.
- GUILCHER A., « Sur le recul actuel des rivages meubles de la Bretagne de l'Ouest », *Revue archéologique de l'Ouest*, Supplément n° 2, 1990a, p. 31-36.
- GUILCHER A., « Vers une philosophie des rivages », *Cahiers Nantais*, n° 35-36, 1990b, p. 3-15.
- HALLÉGOUËT B., « Problèmes d'érosion côtière et ouvrages de protection contre la mer sur le littoral breton », Acte du second forum du GFG, Caen, 24-25 nov. 1988, *Bulletin du Centre de Géomorphologie de Caen*, n° 36, 1989, p. 181-184.
- HÉNAFF A., « Les aménagements des littoraux de la région Bretagne en vue de leur défense contre l'érosion depuis 1949 », *Bulletin de l'association de géographes français*, n° 3, 2004, p. 346-359.
- HÉNAFF A. & MOREL V., « La Direction départementale de l'Équipement en quête d'une nouvelle approche

- des solutions à apporter aux problèmes de l'érosion côtière », *Larus*, n° 6, 1997, p. 13-15.
- HÉNAFF A. & LE BERRE I., « Fonctionnement hydro-sédimentaire et artificialisation du littoral. Le cas de la côte occidentale du Finistère », *Cahiers nantais*, n° 59, 2003, p. 75-88.
- LAGEAT Y., « Géomorphologie et gestion des littoraux », *Bulletin de l'association de géographes français*, n° 3, 2002, p. 360-370.
- LAMBERT A. *et al.*, « Lutte contre l'érosion littorale : efficacité des méthodes de stabilisation par drainage de plage », *Méditerranée*, n° 108, 2007, p. 105-117.
- LE BERRE I. & HÉNAFF A., « Artificialisation du trait de côte en Finistère », *Atlas permanent de la Mer et du Littoral*, U.M.R. 6 554, n° 5, 2001, p. 13.
- L'HER J., « Activités du centre d'études techniques maritimes et fluviales (CETMEF) dans le domaine de l'aménagement du littoral », *Bulletin de l'association de géographes français*, n° 3, 2004, p. 315-320.
- MEUR-FÉREC C. & MOREL V., « L'érosion sur la frange côtière : un exemple de gestion des risques », *Natures sciences et sociétés*, 12, 2004, p. 263-273.
- Ministère de L'aménagement du Territoire et de L'Environnement, *La défense des côtes contre l'érosion marine, pour une approche globale et environnementale*, 1998, 142 p.
- MIOSSEC A., « Cassandre et Pénélope... À propos de quelques cas d'aménagement sur le littoral de la Bretagne et de la Vendée », *Noréis*, t. 33, n° 132, 1986, p. 505-515.
- PASKOFF R., *Les plages vont-elles disparaître ?*, éd. Le Pommer, coll. « Les petites pommes du savoir », Paris, 2005, 58 p.
- PINOT J.-P., « La prise en compte du recul des falaises de loess par les S.M.V.M. du nord de la Bretagne (France) », *Cahiers nantais*, n° 47-48, 1997, p. 339-343.
- PINOT J.-P., « Géographie des littoraux en France : évolution d'une discipline », in *Le littoral, regards, pratiques et savoirs. Études offertes à Fernand Verger*, Éd. de la Rue d'Ulm, Paris, 2002, 380 p., p. 27-58.
- PUPIER-DAUCHEZ S., *Le rechargement sédimentaire : de la défense des côtes à l'aménagement du littoral (analyse des pratiques sur la côte atlantique française)*, thèse de l'université de Bretagne occidentale (discipline « Géographie »), 2002, 510 p.
- REGRAIN R., « Protéger le littoral ouest des Bas-Champs de Cayeux ? », in *Les littoraux en France : risques et aménagement*, C.R.D.P. de Picardie, Amiens, 1992, p. 49-78.
- ROBIN M. & VERGER F., « Pendant la protection, l'urbanisation continue », *Les ateliers du Conservatoire du Littoral*, n° 13, 1996, 48 p.

7 Estimation de l'aléa tsunami par simulation numérique

Hélène HÉBERT & François SCHINDELÉ

CEA, DIF, DAM, Bruyères-le-Châtel, 91297 Arpajon Cedex

helene.hebert@cea.fr

francois.schindele@cea.fr

Résumé. — La simulation numérique permet de reproduire la source d'un tsunami (séisme ou effondrement gravitaire), sa propagation et son impact côtier. Depuis l'essor des calculateurs modernes, les modèles peuvent être multipliés et permettent de caractériser l'aléa tsunami, en terme de cartes d'inondabilité, de courants dans les ports, et contribuent à la prévention du risque. En Polynésie française, les Plans de Prévention des Risques s'appuient sur de telles approches, et rappellent la forte exposition de l'archipel des Marquises. Les méthodes doivent être confrontées aux observations, disponibles depuis longtemps dans le Pacifique, et très abondantes dans l'Océan Indien depuis 2004. Là aussi, des études de prévention seraient nécessaires, pour accompagner la mise en place des systèmes d'alerte et mieux préparer les populations et les littoraux. En Méditerranée occidentale, où l'aléa est modéré, mais le risque croissant, un système d'alerte est en construction, et s'appuiera sur de nombreux capteurs temps réel et sur des modélisations pré-calculées.

Mots-clés. — Tsunami, aléa, simulation numérique, Océan Indien, Méditerranée occidentale.

Title. — *Tsunami Numerical Modeling: Constraints for Hazard Assessment*

Abstract. — *Numerical modelling has proved efficient to simulate the tsunami triggering mechanism (either an earthquake or a landslide), the propagation and the coastal impact. The constant computational improvement has allowed to increase the number of parameters to be tested, to better characterize the tsunami hazard. In French Polynesia, Risk Prevention Plans have been built using such a modelling approach, and underline the strong tsunami exposure of the Marquesas Islands. The modelling methods have to be compared to observation databases which have been gathered for years in the Pacific Ocean, but which have been available only very recently in the Indian Ocean. As in other oceanic areas, hazard assessment studies are necessary to support the deployment of warning systems and to better prepare populations and coastal places. In the western Mediterranean, while the hazard is moderate, the risk is always growing, and a warning system is currently under development. It will rely on numerous realtime sensors as well as on pre-computed tsunami modellings.*

Keywords. — *Tsunami, Hazard, Numerical Modelling, Indian Ocean, Western Mediterranean.*

Introduction

C'est en décembre 2004, lors du tsunami catastrophique de l'Océan Indien, que le grand public a découvert le risque tsunami. Connu de longue date des géophysiciens qui essaient de comprendre la mécanique des tremblements de terre et leurs effets, connus également des chercheurs travaillant à la vulnérabilité des littoraux côtiers, cet aléa était pourtant largement méconnu par ailleurs. Dans l'Océan Pacifique, les périodes de retour, plus courtes pour ces événements (plusieurs fois par siècle en moyenne), ont sensibilisé de nombreuses populations côtières exposées, depuis parfois plusieurs générations. Dans l'Océan Indien, où de tels phénomènes étaient rares depuis le XIX^e siècle, la perception de ce risque auprès des populations était faible, et d'autant plus pour les nombreux touristes européens présents, dont très peu pouvaient concevoir que des plages paradisiaques puissent être balayées par une mer sortant de son « lit ».

Cinq ans après cette catastrophe, la connaissance du risque tsunami s'est accrue, de nombreuses recherches ont été initiées, tant pour favoriser des études d'aléa sur des sites toujours plus nombreux, que pour réfléchir à protéger les côtes par des systèmes d'alerte efficaces.

Dans ce qui suit, nous présenterons les applications des modélisations numériques de l'aléa, en terme de prévention, mais également dans le domaine de la mise au point des systèmes d'alerte.

7.1 Méthodes utilisées pour la simulation

Comme pour la plupart des méthodes de simulation des aléas, l'enjeu est de pouvoir fournir des éléments quantitatifs aidant à une meilleure prévention (gestion de l'aménagement du littoral...), et d'intervenir pour améliorer les systèmes opérationnels (alertes aux tsunamis), en particulier dans un contexte de « temps réel ». La simulation permet également de mieux comprendre les processus physiques mis en jeu lors de la génération, de la propagation et de l'impact sur les zones côtières.

7.1.1 Modéliser les sources

Un tsunami trouve son origine dans une brusque perturbation de la couche océanique, soit lorsqu'un séisme

déforme soudainement le fond de l'eau, soit lorsque, sur des fortes pentes sous-marines, un effondrement gravitaire est mis en branle (d'ailleurs parfois après un séisme, mais pas toujours), soit, enfin, lorsqu'un flanc de montagne ou de volcan s'affaisse en mer. La première partie de la modélisation vise donc à reproduire ce phénomène naturel perturbateur, initiateur du tsunami.

Pour les séismes, les modèles physiques décrivant les déformations du sol, suite à la rupture sur la faille en profondeur, sont relativement bien connus, et s'appuient sur la théorie de l'élasticité. Les contraintes accumulées pendant des dizaines ou centaines d'années se relâchent soudainement en quelques minutes, et conduisent une déformation des sols. Des modèles élastiques simples (Okada 2005) rendent très bien compte de cette déformation et sont mis en œuvre pour initier le tsunami, en considérant que la déformation du fond océanique se transmet intégralement et instantanément à la surface de l'eau. Les paramètres décrivant la géométrie de la zone de rupture, introduits dans le modèle élastique, sont généralement obtenus par des études sismologiques et géodésiques du séisme.

Pour les sources gravitaires, la physique est plus complexe et dépend de davantage de paramètres (les densités des roches, leur viscosité, les forces de friction...). On peut ainsi traiter les glissements comme des blocs non déformables, comme une succession de blocs agissant entre eux (Tinti *et al.*, 2000), ou bien comme des fluides à rhéologie variable. Dans ce dernier cas, il est possible de correctement modéliser les déformations de la masse glissante, et de les coupler avec la couche d'eau pour initier puis propager le tsunami (Heinrich *et al.*, 2001 ; Hébert *et al.*, 2002).

Ces modèles ne seront pas présentés ici, car nous nous intéresserons aux tsunamis générés par les séismes, qui sont les seuls capables de conserver leur énergie à longue distance (sauf pour des cas extrêmes liés aux chutes de météorites, ou aux explosions de volcan comme le Santorin en 1630 et Krakatoa en 1883). Les tsunamis fréquemment les plus destructeurs sont ainsi ceux liés aux grands séismes, particulièrement dans les zones de subduction.

7.1.2 Modéliser les tsunamis générés et leurs effets à terre

Lorsque la couche d'eau a été perturbée, le retour à l'équilibre se traduit par une propagation d'ondes, que les équations classiques de la mécanique des fluides permettent de modéliser, d'autant plus facilement que les grandes dimensions impliquées (le séisme déforme plusieurs centaines à milliers de kilomètres carrés) par rapport à la couche d'eau (au plus de quelques kilomètres) impliquent que le tsunami ne « voit » pas l'épaisseur de la mer : c'est l'approximation en couche mince. Cela se traduit en particulier par une célérité des ondes, dépendant simplement de la profondeur d'eau en tout point, et pas de la description tridimensionnelle de l'océan.

À partir de ces hypothèses, les méthodes de simulation calculent les amplitudes et les vitesses du tsunami en utilisant des méthodes de résolution des équations de la mécanique des fluides, avec les termes non linéaires pour bien rendre compte des fortes amplitudes près des côtes, et sous réserve de connaître la bathymétrie en tout nœud des grilles de calculs. Des méthodes de résolution par éléments finis (Piatanesi *et al.*, 1998) ou différences finies (Heinrich *et al.*, 1996) sont mises en œuvre.

Ce dernier point illustre d'ailleurs une difficulté majeure pour les modélisateurs, qui est de disposer de données bathymétriques très détaillées, en particulier près des côtes, lorsque les modèles s'affinent, et surtout s'il faut cartographier les zones inondées. Il faut alors avoir recours à des données topographiques également très détaillées. Souvent, pour une étude de site très poussée, des acquisitions spécifiques de données entre -100 et +20 m devront être réalisées. Dans ces conditions, le calcul des inondations à terre (pour reproduire notamment les altitudes maximales atteintes par les flots : les hauteurs de *run-up*) se fait en extrapolant dans les mailles de calcul « sèches » les quantités calculées dans les mailles voisines « mouillées ».

7.2 Maîtriser l'aléa en Polynésie française

7.2.1 La prévention

Les statistiques disponibles et les événements connus (Soloviev et Go, 1974 et 1975) montrent que l'Océan Pacifique constitue le bassin le plus fréquemment touché par les tsunamis transocéaniques. Le territoire de Polynésie française, localisé au centre de cet océan, est potentiellement exposé à tous les grands tsunamis provenant des zones de subduction entourant la zone, ce qui se produit 5 à 7 fois par siècle. Les études des événements passés ont montré que certaines îles polynésiennes étaient systématiquement plus touchées que les autres : les îles Marquises (Schindelé *et al.*, 2006). Dans cet archipel, les larges baies sont ouvertes directement sur l'océan, sans récif corallien protecteur, et des inondations s'y sont produites plusieurs fois par siècle. Localement, la langue marquisienne possède d'ailleurs un terme particulier (*Tai Toko*) pour ce phénomène remarqué de débordement anormal de la mer (Candelot 1996).

Des études ont été menées à l'aide de la simulation numérique, notamment dans le cadre d'un projet multirisques coordonné par le BRGM en 2004-2005, le projet ARAI (*protéger* en polynésien), dans lequel les estimations d'aléa sismique et tsunami ont été proposées pour le compte du territoire polynésien. Les résultats ont confirmé la vulnérabilité des baies marquisiennes, principalement pour les tsunamis originaires des zones de subduction d'Amérique du Sud, mais également des Aléoutiennes, des Kouriles, ou des Tonga. La probabilité d'inondations atteignant plus de 3 m d'altitude peut y être estimée supérieure à 4 fois par siècle. Les modélisations, en s'appuyant sur une série de sources historiques ou probables, parmi les plus majorants, ont permis de cartographier les zones inondables cumulées (Sladen *et al.*, 2007). Sur les baies de Atuona et Tahauku (île de Hiva Oa, Marquises), les résultats reproduisent ainsi les inondations connues historiquement, et permettent de délimiter les zones exposées (figure 1). Les autres archipels polynésiens sont moins sensibles, certains tels que les archipels de la Société et des Australes pouvant cependant être affectés par des vagues montant jusqu'à 3 m, 2 fois par siècle. Ces travaux ont permis de contribuer à l'élaboration des Plans de Prévention des Risques (P.P.R.), en cartographiant les zones inondables pour le risque tsunami, et devraient donc à terme participer à une gestion optimale de ce

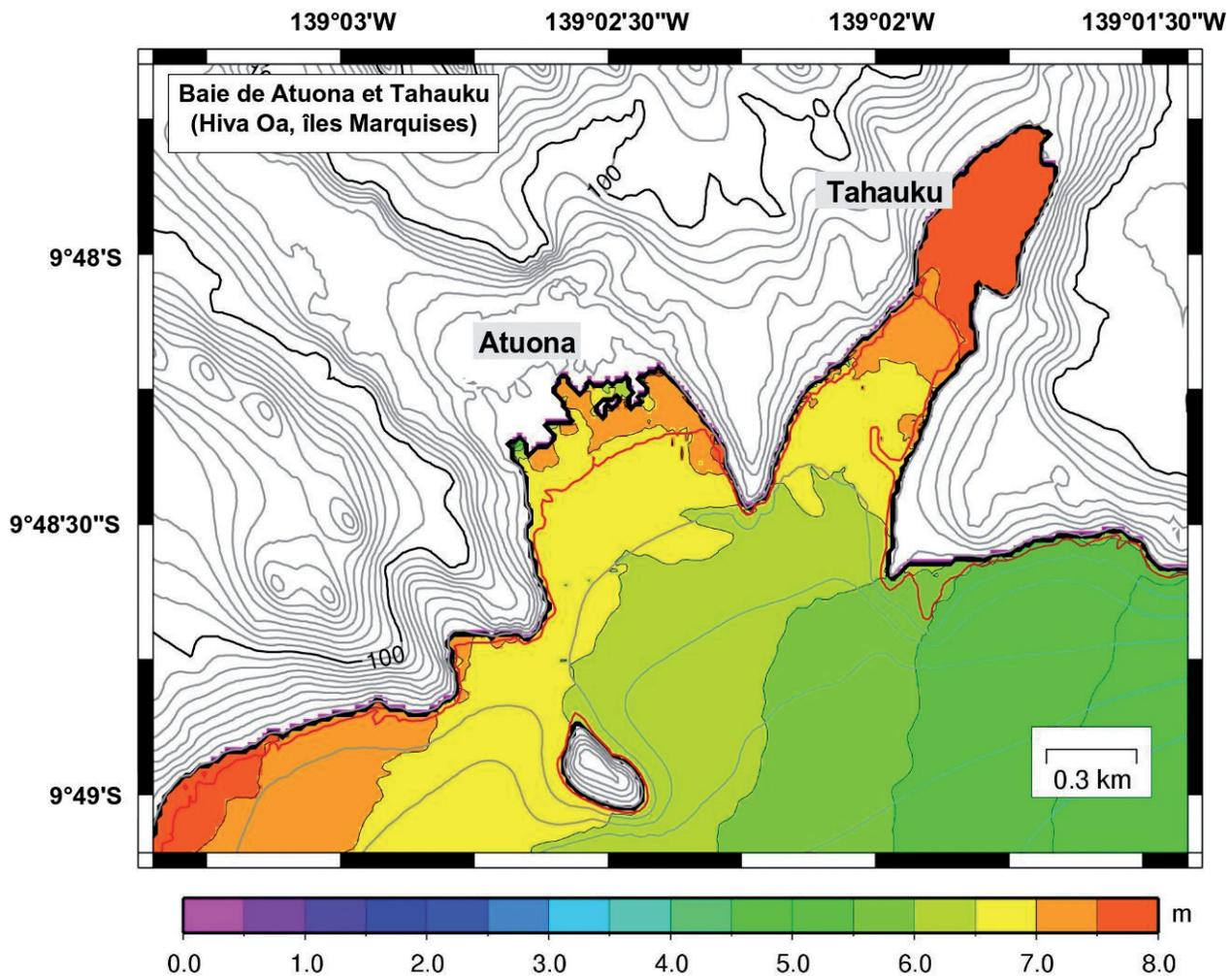


Fig. 1. — Hauteurs maximales d'inondation pour deux baies marquisiennes, calculées pour 5 scénarios de tsunami trans-Pacifique maximisants. Le trait de côte initial est la ligne rouge, montrant des inondations horizontales pouvant atteindre 300 m (Atuona), voire 600 m (Tahauku). Au xx^e siècle, de telles inondations se sont produites 3 à 4 fois dans ces baies.

type d'aléa en Polynésie française, notamment en matière d'aménagement du littoral.

7.2.2 La prévision

Dans les années 1960, à la suite de nombreux tsunamis catastrophiques dans l'Océan Pacifique (1946, 1952, 1957, 1960...), qui avaient pour la plupart durement touché Hawaï, le premier système d'alerte aux tsunamis s'est déployé dans le Pacifique, sous l'égide internationale de la Commission Océanographique Intergouvernementale de l'UNESCO. Le centre opérationnel a été installé à Hawaï. Le laboratoire de Géophysique de Tahiti, implanté par le CEA dès les années 1960, a pris part à ce système d'alerte dès les premières années de sa mise en place, et cette contribution résulte aujourd'hui dans le plus ancien centre d'alerte aux tsunamis géré par la France : le Centre Polynésien de Prévention des Tsunamis, basé à Tahiti.

Dès qu'un fort séisme se produit sous la mer dans le Pacifique, les capteurs sismiques caractérisent rapidement sa magnitude, sa localisation, et, si l'hypocentre est superficiel et la magnitude suffisamment forte (supérieure

à 7), la procédure d'alerte est lancée. Les premiers messages sont envoyés aux services de protection civile environ 30 min après le séisme, puis, au fur et à mesure que des observations anormales du niveau de la mer sont disponibles (mesurées sur les marégraphes dans les ports ou sur des capteurs de pression au fond des océans), il devient possible de mieux définir l'éventuel tsunami en cours de propagation. Un tel système repose donc sur de nombreux capteurs qui transmettent les données en temps réel, et sur des infrastructures nationales très entraînées pour relayer les informations auprès des mairies, des services locaux de Sécurité civile, des gendarmeries et services de police (notamment par le biais des plans d'alerte et de secours spécialisé).

À Tahiti, le système est en amélioration constante, avec par exemple des marégraphes de plus en plus nombreux, des installations de sirènes le long des littoraux.

Un tel système reposant sur la technologie n'est pas infaillible, et il n'est pas conçu pour alerter en cas de tsunami lié à une source gravitaire (les délais sont trop courts), mais il a fait ses preuves en de nombreuses occasions. Surtout, il doit s'accompagner d'une éducation poussée des populations

à la culture du risque tsunami (lié à un séisme ou non). Les bons réflexes doivent être en permanence répétés, pour toutes les générations, pour les futurs touristes, pour les personnes qui sentent les séismes ou non, pour, dans tous les cas, en bord de mer, réagir correctement lorsque la mer se retire anormalement, change de couleur ou d'odeur : il s'agit de se diriger vers les hauteurs et de ne pas rester à la côte où la mer peut très rapidement inonder et tout détruire, en Polynésie ou ailleurs.

7.3 Un tournant : Océan Indien, 2004

Comme pour de nombreuses communautés scientifiques travaillant sur les risques, l'événement de 2004 est sans précédent. Au-delà de la prise de conscience générale du phénomène et de l'aléa, l'événement a produit une base de données très complète d'observables permettant de mieux caractériser les tsunamis, ce qui constitue un exemple précieux sur lequel les modélisateurs doivent s'appuyer. En outre, la survenue d'une telle catastrophe a aussi dynamisé les programmes de recherche sur le sujet, ainsi qu'une impulsion globale pour mettre en place des systèmes d'alerte efficaces.

Grâce aux bases de données exceptionnelles, les outils de simulation numérique ont pu être testés, et montrer leurs marges d'incertitude. Les résultats obtenus montrent que des simulations s'appuyant sur une connaissance précise de la topographie locale permettent de très bien reproduire le film des inondations catastrophiques à Banda Aceh (Sumatra) (figure 2), et soulignent que la friction du sol à terre est un paramètre clé qui doit être pris en compte lorsque les inondations atteignent des terrains très plats comme à Banda Aceh ou Lhok Nga (Lavigne *et al.*, 2009). Ainsi, une zone urbanisée comme Banda Aceh semble requérir un paramètre de friction plus important que la zone plus marécageuse de Lhok Nga, alors que les deux sites sont caractérisés par des pentes semblables. Les méthodes modernes prenant en compte des aspects tridimensionnels permettront peu à peu de rendre compte de comportements très locaux (zones de déferlement, de résonances), et d'envisager de coupler avec l'occupation du sol (rôle du bâti, des végétations différentes).

Plus loin, en Thaïlande, des modèles réalisés sans tenir compte de données côtières très détaillées ont aussi permis de souligner l'exposition très prononcée des sites proches de Khao Lak (figure 3). À ces latitudes, la bathymétrie au large définit une sorte de ride convergeant vers Khao Lak, et la remontée des fonds favorise le piégeage, et donc l'amplification des tsunamis vers les sites côtiers correspondants. Un tel comportement est prévisible pour la plupart des séismes tsunamigéniques le long de la subduction d'Andaman ; selon les magnitudes, l'impact serait plus ou moins notable, mais il est probable que l'impact dans la région de Khao Lak y serait relativement plus important que sur d'autres sites. Des recherches de dépôts anciens pourraient aider à mieux contraindre cette tendance.

De telles modélisations montrent que, comme en Polynésie française, des études de prévention peuvent être réalisées pour préparer les populations et les réponses

politiques locales, sous réserve de concevoir des scénarios sismologiques crédibles. La difficulté est souvent de leur attribuer une probabilité d'occurrence : les périodes de retour des grands séismes peuvent être estimées, mais leur potentiel à générer un tsunami n'est pas toujours simple à définir. De nombreuses côtes indonésiennes exposées aux tsunamis pourraient néanmoins être étudiées, comme la zone de Padang où de grands séismes peuvent encore se produire, ou bien à Java, où l'aléa tsunami est assez méconnu, mais où l'événement de 2006 rappelle la possibilité d'événements très particuliers (les *tsunami earthquake* lorsqu'un séisme déclenche un tsunami très fort par rapport à sa magnitude) (Kanamori 1972).

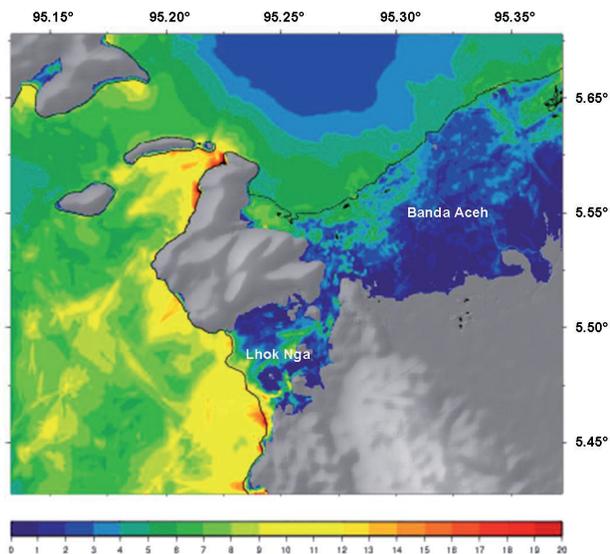


Fig. 2. — Hauteurs maximales d'eau (en mètres) pour la région de Banda Aceh (pointe nord de Sumatra), simulée en utilisant un Modèle Numérique de Terrain précis. Ce test tient compte d'une faille additionnelle possible (*splay fault*), en plus du plan de subduction classique. Mais aucune friction sur le sol n'est considérée (d'après Loevenbruck *et al.*, 2007).

7.4 L'alerte aux tsunamis en Méditerranée

7.4.1 Une impulsion internationale

Depuis 2004, à nouveau dans un contexte post-catastrophe, et toujours sous l'égide de l'UNESCO, la communauté internationale a initié depuis 2005 des systèmes d'alerte pour l'ensemble des bassins exposés, soit l'Océan Indien, les Caraïbes et la zone couvrant la Méditerranée et l'Atlantique nord-est. Sur ce dernier bassin comme partout ailleurs, la mise en place s'appuiera sur des initiatives nationales qui émanent dans cette région du Portugal, de la France, de l'Italie, de la Grèce et la Turquie, chaque pays contribuant plus spécifiquement à une zone d'intérêt (respectivement Atlantique nord-est, Méditerranée occidentale, Méditerranée centrale, Méditerranée orientale et Mer de Marmara). Pour la Méditerranée occidentale, un Centre d'Alerte français doit être installé au CEA (Bruyères le Châtel) pour être opérationnel à la fin de 2011.

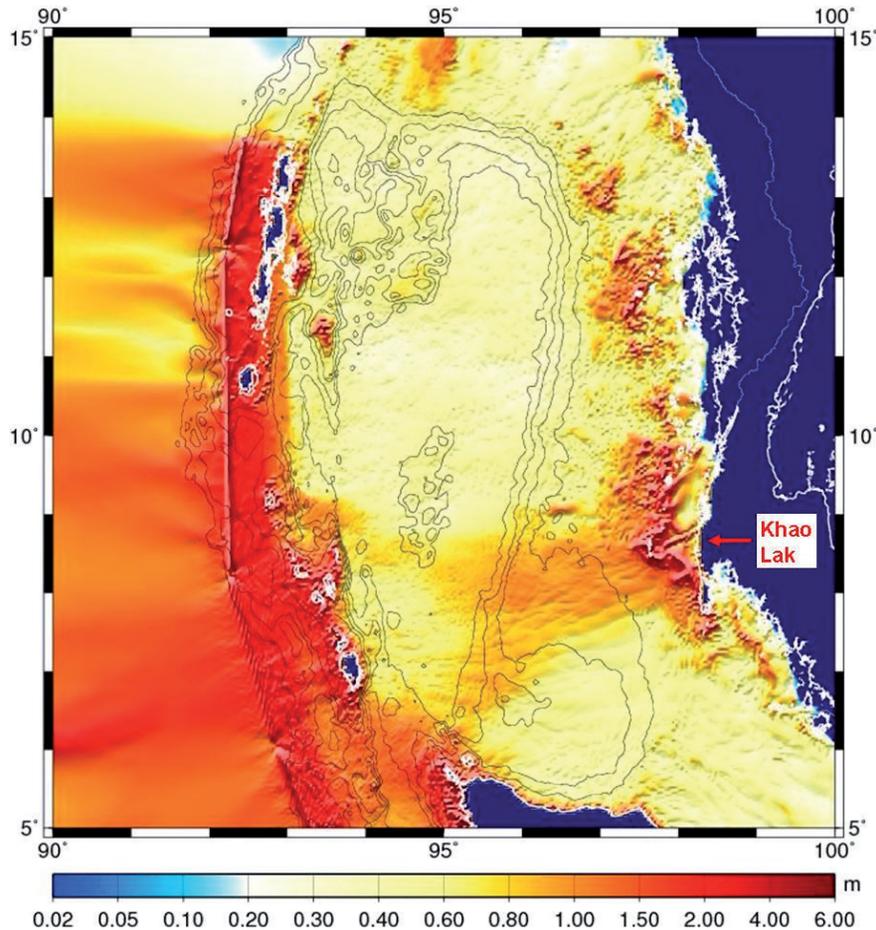


Fig. 3. — Hauteurs maximales d'eau au large de la Thaïlande, 4 h après le séisme de Sumatra. La simulation met en évidence une focalisation de l'énergie vers la latitude de Khao Lak, l'un des sites les plus durement touchés.

7.4.2 Un contexte particulier

Compte tenu des délais très courts en Méditerranée (Schindelé *et al.*, 2008), ce Centre impliquera des personnels de permanence 24 h/24 h. En effet, même si la Méditerranée occidentale n'est pas très profonde (les tsunamis s'y propagent environ à 500 km/h, contre parfois 800 km/h dans le Pacifique), les dimensions réduites impliquent une propagation en moins d'une heure d'une rive à l'autre.

Par ailleurs, les événements attendus y sont d'une magnitude plus modérée que dans le Pacifique ou l'Océan Indien : en Méditerranée occidentale, un séisme de magnitude supérieure à 7 à 7.5 sera exceptionnel. Ainsi, c'est le tsunami de mai 2003, généré par le séisme de Boumerdès (magnitude 6.8), qui a rappelé les possibilités de tsunamis méditerranéens notables. Si cet événement fut largement observé aux Baléares, sur des marégraphes et par de nombreux témoignages et des dégâts (Alasset *et al.*, 2006), ses effets plus lointains, en particulier sur les côtes françaises, étaient méconnus encore récemment. Seule une enquête de terrain, réalisée en 2007 (les marégraphes français ne permettaient pas à l'époque de bien enregistrer un tsunami), a permis de montrer que huit ports de plaisance de la Côte d'Azur avait connu des purges de bassins, de forts tourbillons et courants, des embarcations endommagées,

des déplacements de corps morts, compatibles avec des phénomènes de résonances portuaires (Sahal *et al.*, en révision).

Une telle recherche d'observations très localisées (encore méconnues au-delà de la frontière vers l'Italie) est précieuse pour mieux connaître les effets qu'on attend en cas de tsunami modéré, effets qui auront avant tout un impact économique. Pour autant, des tsunamis plus conséquents sont aussi envisageables, comme ce fut vraisemblablement le cas en 1856 (Roger et Hébert, 2008), événement pour lequel les observations sont quasi inexistantes, et également lors de cas plus anciens (1365) (Yelles-Chaouche, 1991).

La vulnérabilité littorale croissant significativement sur la Méditerranée, où les plages sont parmi les plus fréquentées, l'efficacité du Centre d'Alerte se mesurera en sachant détecter des tsunamis modérés à forts, et ce en quelques minutes (figure 4). De nombreux capteurs seront adaptés ou installés et transmettront en temps réel, pour détecter le séisme et le tsunami en quelques minutes. Par ailleurs, comme c'est de plus en plus fréquent dans le Pacifique ou l'Océan Indien, le système d'alerte s'appuiera sur des simulations numériques des tsunamis, soit au moyen de situations pré-calculées et exploitées en quelques minutes (tenant compte essentiellement des critères sismologiques), soit en concevant des systèmes de calcul très performants

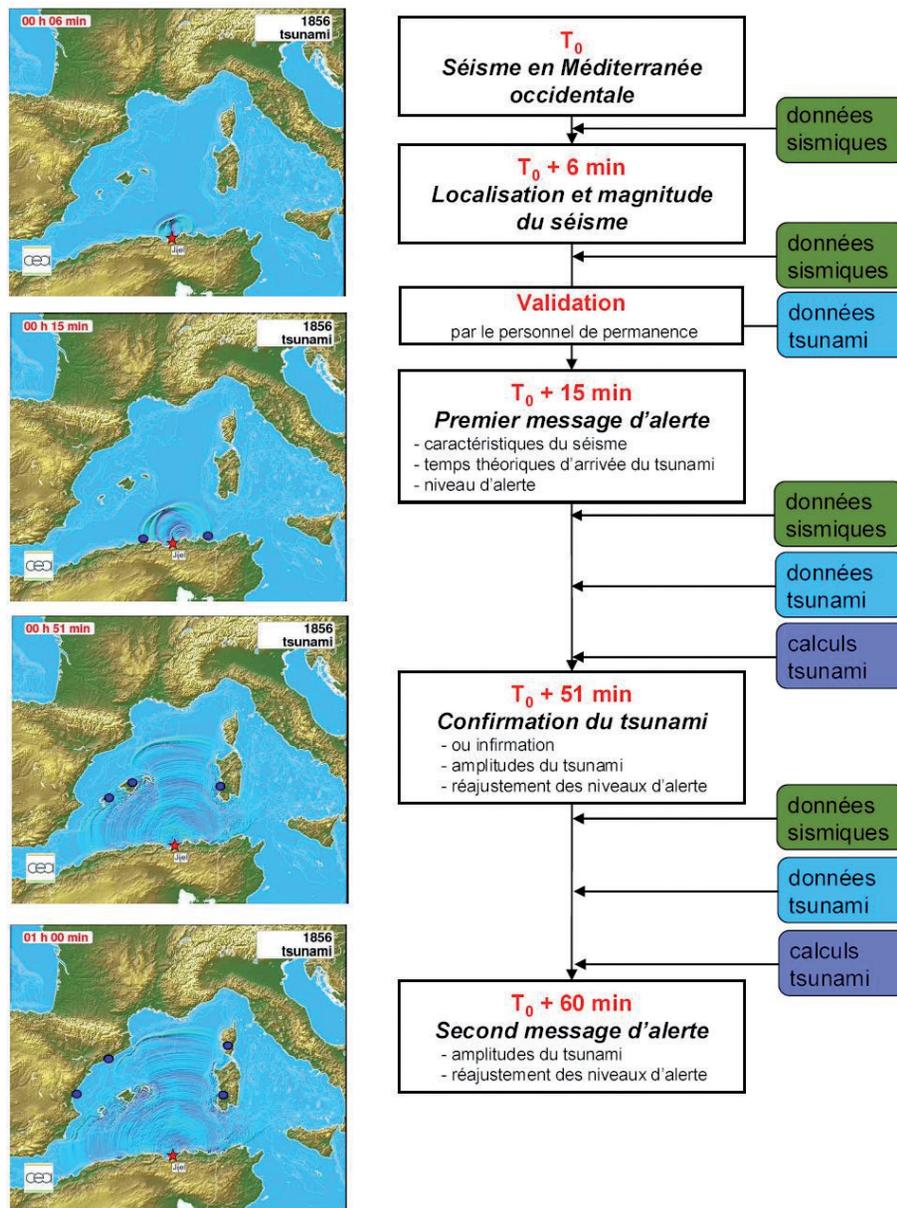


Fig. 4. — Schéma de fonctionnement d'un Système d'alerte aux tsunamis pour la Méditerranée occidentale. Les marégraphes côtiers sont représentés par les disques bleus. Les premières données utilisées sont les données sismiques, et les données tsunami et de pré-calculs servent au fur et à mesure de la propagation, pour caractériser le tsunami en cours.

capables de réaliser les modèles en temps réel (calcul massivement parallèle) : l'objectif étant d'envoyer dans les 15 minutes des messages comprenant un maximum de paramètres et d'information pertinents.

Conclusions

La simulation numérique des tsunamis a pris son essor depuis les années 1980, lorsque les ordinateurs ont permis d'envisager de nombreux scénarios et ont pu traiter des données de résolution toujours croissante. Ces outils numériques complètent les catalogues historiques souvent

très partiels, qui n'autorisent que rarement des approches probabilistes comparables aux études d'aléa sismique. Il est donc possible de proposer aujourd'hui des cartographies des zones inondables intégrant les Plans de Prévention des Risques, d'étudier des événements historiques méconnus, de mieux comprendre les séismes à l'origine des tsunamis, et d'étudier les comportements de structures à la côte (résonances portuaires). Pour valider les méthodes de simulation, les observations de terrain sont indispensables et doivent en permanence être confrontées aux modèles. Les missions de recueil de données après les tsunamis sont donc à encourager, en parallèle aux modernisations des marégraphes portuaires, qui sont en cours pour les futurs systèmes d'alerte.

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet ANR Cattell TSUMOD (contrat ANR-05-CATT-016-01) et du projet européen TRANSFER (contrat 037058). La plupart des figures ont été créées avec le logiciel GMT (Wessel et Smith, 1998).

Bibliographie

- ALASSET P.J., HÉBERT H., CALBINI V., MAOUCHE S. & MEGHRAOUI M., « The tsunami induced by the 2003 Zemmouri earthquake (Mw = 6.9, Algeria) : modelling and results », *Geophysical Journal International*, 166, 2006, p. 213-226.
- CANDELOT, J.L., « Tai toko ! ou l'imminence d'un cataclysme », *Marquises*, Éditions Polyèdre Culture, Pirae (Tahiti), 1996, p. 222-230.
- HEINRICH P., GUIBOURG S. & ROCHE R., « Numerical modeling of the 1960 Chilean tsunami. Impact on French Polynesia », *Journal of Physics and Chemistry of the Earth*, 21, 12, 1996, p. 19-25.
- HEINRICH, P., PIATANESI A. & HÉBERT H., « Numerical modelling of tsunami generation and propagation from submarine slumps : the 1998 Papua New Guinea event », *Geophysical Journal International*, 145, 2001, p. 97-111.
- HÉBERT H., PIATANESI A., HEINRICH P., SCHINDELÉ F. & OKAL E.A., « Numerical modeling of the Sept 13 1999 Fatu Hiva Island (French Polynesia) landslide and tsunami », *Geophysical Research Letters*, 29, 10, doi : 10.1029/2001GL013774, 2002.
- KANAMORI H., « Mechanism of tsunami earthquakes », *Phys. Earth Planet. Inter.*, 6, 1972, p. 246-259.
- LAVIGNE F., PARIS R., GRANCHER D., WASSMER P., BRUNSTEIN D., VAUTIER F., LEONE F., FLOHIC F., DE COSTER B., GUNAWAN T., GOMEZ C., SETIAWAN A., CAHYADI R. & FACHRIZAL, « Reconstruction of tsunami inland propagation on December 26, 2004 in Banda Aceh, Indonesia, through field investigations », *Pure and Applied Geophysics*, 166, 2009, p. 259-281.
- LOEVENBRUCK A., HÉBERT H., SCHINDELÉ F., SLADEN A., LAVIGNE F., BRUNSTEIN D., WASSMER P. & PARIS R., « Detailed Modeling of the 2004 Tsunami Flooding in the Banda Aceh and Lhok Nga Districts (Sumatra, Indonesia) », *American Geophysical Union Fall Meeting*, San Francisco, États-Unis, 10-14 décembre 2007, *Eos Trans. AGU*, 88 (52), Fall Meet. Suppl., Abstract S53A-1042, 2007.
- OKADA Y., « Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space », *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 1985, p. 1135-1154.
- PIATANESI A. & TINTI S., « A revision of the 1693 eastern Sicily earthquake and tsunami », *Journal of Geophysical Research*, 103, 1998, p. 2749-2758.
- ROGER J. & HÉBERT H., « The 1856 Djijelli (Algeria) earthquake and tsunami : source parameters and implications for tsunami hazard in the Balearic Islands », *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 4, 2008, p. 721-731.
- SAHAL A., ROGER J., ALLGEYER S., HÉBERT H., SCHINDELÉ F. & LAVIGNE F. (en révision), « The tsunami triggered by the 21 May 2003 Boumerdes-Zemmouri (Algeria) earthquake : field investigations on the French Mediterranean coast and tsunami modelling », *Natural Hazards and Earth System Sciences*.
- SCHINDELÉ F., HÉBERT H., SLADEN A. & REYMOND D., « L'aléa tsunami en Polynésie française : synthèse des observations et des mesures », *C.R. Geoscience* 338, 2006, p. 1133-1140.
- SCHINDELÉ F., LOEVENBRUCK A., & HÉBERT H., « Strategy to design the sea-level monitoring networks for small tsunamigenic oceanic basins : the Western Mediterranean case », *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 5, 2008, p. 1019-1027.
- SLADEN A., HÉBERT H., SCHINDELÉ F. & REYMOND D., « L'aléa tsunami en Polynésie française : apports de la simulation numérique », *C.R. Geoscience*, 339, 2007, p. 303-316.
- SOLOVIEV S.L. & GO C.N., « *A catalogue of tsunamis on the western shore of the Pacific Ocean* », Academy of Sciences of the USSR, Nauka Publishing House, Moscow, 310 p. Canadian Translation of Fisheries and Aquatic Sciences No. 5 077, 1984, translation available from Canada Institute for Scientific and Technical Information, National Research Council, Ottawa, Ontario, Canada K1A OS2, 1974, 447 p.
- SOLOVIEV S.L. & GO C.N., « *A catalogue of tsunamis on the eastern shore of the Pacific Ocean* », Academy of Sciences of the USSR, Nauka Publishing House, Moscow, 204 p. Canadian Translation of Fisheries and Aquatic Sciences No. 5 078, 1984, translation available from Canada Institute for Scientific and Technical Information, National Research Council, Ottawa, Ontario, Canada K1A OS2, 1975, 293 p.
- TINTI S., BORTOLUCCI E. & ROMAGNOLI C., « Computer simulations of tsunamis due to sector collapse at Stromboli, Italy », *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 96, 2000, p. 103-128.
- WESSEL P. & SMITH W.H.F., « New, improved version of Generic Mapping Tools released », *Eos Trans. AGU*, 79 (47), 1998, p. 579.
- YELLES-CHAOUCHE A.K., « Coastal Algerian Earthquakes : a potential risk of tsunamis in western Mediterranean ? Preliminary investigation », *Science of Tsunami Hazards*, 9(1), special issue, 1991, p. 47-54.

Collection « Géorisques »

TITRES DÉJÀ PARUS
DANS LA MÊME COLLECTION

- *Quelles archives aujourd’hui pour mieux gérer les risques demain ? Approches géographiques et historiques*, N. MESCHINET DE RICHEMOND, 2010.
- *La mise en carte des risques naturels — Diversité des approches*, F. LEONE & F. VINET, 2008.
- *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles — Analyses géographiques*, F. LEONE & F. VINET, 2006.



PRESSES UNIVERSITAIRES DE LA MÉDITERRANÉE
(Université Paul-Valéry Montpellier 3)
pulm@univ-montp3.fr
www.pulm.fr

Dépôt légal : 1^{er} trimestre 2013