



Dynamique des systèmes littoraux et des milieux marins côtiers

Zoom sur le littoral du Languedoc Roussillon

Octobre 2012

SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION	9
1.1.	CONTEXTE	9
1.2.	APPROCHES EXISTANTES	9
1.2.1.	APPROCHES QUANTITATIVES	9
1.2.2.	EVALUATION DE LA VULNERABILITE COTIERE	10
1.2.2.1.	<i>Principes de l'évaluation de la composante physique de la vulnérabilité côtière</i>	10
1.2.2.1.	<i>Critères d'évaluation</i>	10
1.2.2.2.	<i>Variantes de la méthodes (par exemple selon l'échelle de travail)</i>	10
1.2.2.3.	<i>Choix d'une normalisation, pondération et agrégation</i>	11
1.3.	APPORTS DE LA CARTOGRAPHIE DECISIONNELLE MULTICRITERES (CDM)	11
1.3.1.	CARACTERISTIQUES DU PROBLEME ETUDIE	11
1.3.2.	METHODES CDM	12
1.3.3.	CHOIX D'UNE METHODE CDM ADAPTEE	13
1.4.	OBJECTIF DE CE RAPPORT	13
2.	LE ZOOM LANGUEDOC-ROUSSILLON	15
2.1.	CONTEXTE REGIONAL	15
2.2.	EFFETS POTENTIELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES FORÇAGES COTIERS EN LANGUEDOC-ROUSSILLON : OBSERVATIONS ET PROSPECTIVE	16
2.2.1.	ELEVATION DU NIVEAU MARIN	16
2.2.1.1.	<i>Observations</i>	16
2.2.2.	REGIME DES TEMPETES	17
2.2.3.	REGIME DE VAGUES	18
2.2.4.	REGIME DES SURCOTES	18
2.2.5.	PRECIPITATIONS	19
2.2.6.	ALEAS COTIERS ET CHANGEMENT CLIMATIQUE EN LANGUEDOC-ROUSSILLON	20
2.2.6.1.	<i>En terme d'érosion</i>	20
2.2.6.2.	<i>En terme de submersion</i>	21
2.2.7.	CONNAISSANCE PREALABLE DES CONSEQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ALEAS COTIERS	22

2.3.	PROPOSITION DE SCENARIOS CLIMATIQUES REGIONALISES	23
2.3.1.	ELEVATION DU NIVEAU MARIN	23
2.3.2.	REGIME DES TEMPETES ET DES CYCLONES	24
2.3.3.	REGIME DES VAGUES	24
2.3.4.	REGIME DES SURCOTES.....	24
2.3.5.	REGIME DES PRECIPITATIONS	24
2.3.6.	INCERTITUDES	24
3.	DONNEES ET MISE EN ŒUVRE DE LA METHODE	26
3.1.	DONNEES.....	26
3.2.	MISE EN ŒUVRE DE LA METHODE	26
3.2.1.	DETERMINATION DES ENTITES SUR LESQUELLES PORTENT L'ANALYSE	26
3.2.1.1.	<i>Zonage préliminaire : détermination d'une zone côtière</i>	<i>27</i>
3.2.1.2.	<i>Zonage détaillé et détermination des indicateurs</i>	<i>28</i>
3.2.1.3.	<i>Facteurs d'état.....</i>	<i>28</i>
3.2.1.4.	<i>Facteurs de forçage et de contexte</i>	<i>35</i>
3.2.1.5.	<i>résultat obtenu a l'issue du zonage détaillé.....</i>	<i>36</i>
3.2.2.	MODELISATION CONCEPTUELLE DE MANIERE HIERARCHIQUE ET SYNTHESE DU JUGEMENT	37
3.2.2.1.	<i>Facteurs de forçage</i>	<i>37</i>
3.2.2.2.	<i>facteurs d'état</i>	<i>39</i>
3.2.2.3.	<i>facteurs de contexte.....</i>	<i>41</i>
3.2.2.4.	<i>Synthèse du jugement : indice de vulnérabilité physique.....</i>	<i>42</i>
3.2.3.	IMPLICATION DU GROUPE DE TRAVAIL	42
	QUESTIONS-REPONSES SUR LA METHODE UTILISEE :	44
4.	RESULTATS	46
4.1.	STRUCTURE DE LA BASE DE DONNEES SIG LIVREE	46
4.2.	REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE DES CLASSEMENTS EFFECTUES	47
4.2.1.	SCENARIO TENDANCIEL	47
4.2.1.1.	<i>Du delta du Rhône (Partie Région Languedoc-Roussillon) à Palavas-les-Flots.....</i>	<i>48</i>
4.2.1.2.	<i>De Palavas-Les-Flots à Cap d'Agde</i>	<i>49</i>
4.2.1.3.	<i>Du Cap d'Agde à Port-La-Nouvelle</i>	<i>50</i>
4.2.1.4.	<i>De Port-La-Nouvelle à Barcarès.....</i>	<i>51</i>
4.2.1.5.	<i>De Barcarès à la frontière espagnole.....</i>	<i>52</i>
4.2.2.	SCENARIO AVEC ELEVATION DU NIVEAU MARIN	53
4.2.2.1.	<i>Du delta du Rhône (Partie Région Languedoc-Roussillon) à Palavas-les-Flots.....</i>	<i>53</i>

4.2.2.2.	<i>De Palavas-Les-Flots à Cap d'Agde</i>	<i>54</i>
4.2.2.3.	<i>Du Cap d'Agde à Port-La-Nouvelle</i>	<i>55</i>
4.2.2.4.	<i>De Port-La-Nouvelle à Barcarès</i>	<i>56</i>
4.2.2.5.	<i>De Barcarès à la frontière espagnole</i>	<i>57</i>
4.2.3.	DIFFERENCES ENTRE LES SCENARIOS	58
4.2.3.1.	<i>Du delta du Rhône (Partie Région Languedoc-Roussillon) à Palavas-les-Flots.....</i>	<i>59</i>
4.2.3.2.	<i>De Palavas-Les-Flots à Cap d'Agde</i>	<i>60</i>
4.2.3.3.	<i>Du Cap d'Agde à Port-La-Nouvelle</i>	<i>61</i>
4.2.3.4.	<i>De Port-La-Nouvelle à Barcarès</i>	<i>62</i>
4.2.3.5.	<i>De Barcarès à la frontière espagnole</i>	<i>63</i>
5.	DISCUSSION	64
5.1.	ANALYSE DES RESULTATS.....	64
5.1.1.	SCENARIO TENDANCIEL ET SCENARIO AVEC ELEVATION DU NIVEAU MARIN	64
5.1.2.	CARTES REPRESENTANT LES ECARTS ENTRE LES DIFFERENTS SCENARIOS	65
5.2.	AVANTAGES ET LIMITES.....	65
5.2.1.	AVANTAGES.....	65
5.2.2.	LIMITES.....	66
5.2.3.	ENSEMBLE MINIMAL DE DONNEES NECESSAIRES A LA MISE EN ŒUVRE DE LA METHODE ET RECOMMANDATIONS	67
6.	CONCLUSION	69
	BIBLIOGRAPHIE	70
	ANNEXE 1	75
	ANNEXE 2	78

PREAMBULE

Le projet EXPLORE 2070, piloté par le MEDDE (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie) traite de « L'élaboration et évaluation des stratégies d'adaptation au changement climatique en France face à l'évolution des hydro-systèmes et des systèmes côtiers à l'horizon 2050-2070 ». Au sein de ce projet, le lot 6 s'attache essentiellement à la dynamique des systèmes littoraux et des milieux côtiers, plus particulièrement en termes d'érosion, et de submersion permanente et temporaire.

Le travail du lot 6 est centré sur la **caractérisation des aléas côtiers et de leur évolution avec le changement climatique**. Les enjeux, la vulnérabilité et le risque étant abordés dans le lot 7. Le lot 6 apporte également une **contribution à l'élaboration des stratégies d'adaptation** pour la réduction du risque dans les milieux côtiers sous forme de conseils et de propositions faisant référence à des travaux déjà existants sur le sujet.

Ce rapport présente les résultats du lot littoral concernant le zoom Languedoc-Roussillon. Une méthode de cartographie multicritère décisionnelle a été mise en œuvre pour cartographier la vulnérabilité physique des systèmes côtiers à l'érosion et à la submersion marine à l'échéance 2070, pour deux scénarios :

- un scénario tendanciel, dans lequel le niveau marin est supposé ne pas être modifié ;
- un scénario avec une élévation du niveau marin de 1m.

Ce rapport présente successivement :

- le contexte et les motivations de l'étude ;
- Le site d'étude ;
- les données utilisées ;
- l'approche utilisée pour mettre en œuvre la méthode ;
- les résultats obtenus et la structure de la base de données SIG livrée ;
- une discussion sur la portée des résultats, leurs conditions d'utilisations et leurs limites.

Les résultats se présentent sous la forme de cartes représentant un indice de vulnérabilité synthétique, résultant du croisement des critères choisis pour chacun des deux scénarios. Une troisième carte présente également les différences entre le scénario avec élévation du niveau marin et le scénario tendanciel (sans élévation du niveau marin).

En amont de cette approche qui s'adapte aux jeux de données existants et aux limites de la connaissance actuelle, il est nécessaire de mener des observations pérennes et régulières des milieux côtiers ainsi que des travaux de capitalisation de ces observations et de modélisation.

1. INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE

Bien qu'il soit pratiquement certain que l'élévation du niveau marin s'accélère au cours du XXIème siècle, notre capacité à évaluer les conséquences de ce processus dans la zone côtière demeure limitée. Il est attendu que l'élévation du niveau marin ait pour conséquence une aggravation des aléas côtiers existant actuellement (Nicholls et al., 2007). Pourtant, les quantifications de cette aggravation qui ont été proposées demeurent peu fiables (Yates et al., 2011).

Les aléas considérés dans cette étude sont les aléas côtiers suivants : submersion permanente ou temporaires de zones basses, érosion marine ainsi que les processus associés suivants : pression des vagues sur les infrastructures, affouillement, mise en mouvement de débris. Aux cours d'événements de tempêtes, ces processus interagissent entre eux, constituant une menace globale aux biens et aux personnes. Ce projet se propose d'évaluer cette menace dans sa globalité, à l'échéance 2070 et dans deux scénarios : avec ou sans élévation du niveau marin.

1.2. APPROCHES EXISTANTES

1.2.1. APPROCHES QUANTITATIVES

Les approches quantitatives et déterministes d'évaluation des aléas côtiers sont des méthodes répandues pour la cartographie de la vulnérabilité physique des zones côtières. Elles visent à quantifier directement et de manière très déterministe comment la côte sera érodée et/ou inondée sous une hypothèse donnée d'un certain niveau d'élévation du niveau de la mer. La question fondamentale concernant ces approches est celle des incertitudes. Connaissons-nous suffisamment l'érosion côtière potentiellement induite par l'élévation du niveau marin pour en donner une représentation déterministe permettant ultérieurement de discuter la pertinence de mesures d'adaptation ? La réponse peut être donnée à différents niveaux : en évaluant la variabilité des différentes lois existantes pour prédire le retrait du trait de côte (Yates et al., 2011) ou bien en s'interrogeant sur l'incertitude intrinsèque des modèles climatiques comme l'ont fait Roe and Baker (2007). Dans les deux cas, l'accent est mis sur la nécessité de considérer les incertitudes dans l'analyse des conséquences potentielles du changement climatique.

1.2.2. EVALUATION DE LA VULNERABILITE COTIERE

1.2.2.1. PRINCIPES DE L'EVALUATION DE LA COMPOSANTE PHYSIQUE DE LA VULNERABILITE COTIERE

Ceci a amené les scientifiques à rechercher des méthodes pour évaluer la vulnérabilité côtière aux aléas érosion et submersion. Il s'agit ici de procéder de manière inverse à l'approche classique quantitative et déterministe, en reconnaissant que le système côtier est trop complexe pour être modélisé de façon déterministe aux échelles de temps visées.

1.2.2.1. CRITERES D'EVALUATION

Ceci conduit à évaluer la vulnérabilité physique à partir d'un certain nombre de critères : topographie, géomorphologie, etc. Ces approches sont appelées multicritères. À titre d'exemple, l'indice de vulnérabilité des zones côtières développées par Gornitz et al. (1994) est une fonction des observations de l'érosion historique, des pentes de plage, des marées, des observations et des prédictions des variations du niveau de la mer, de l'exposition aux ondes de tempêtes et de la géomorphologie côtière. En pratique, ces indicateurs sont choisis parce-que ce sont les données existantes et jugées pertinentes à l'échelle choisie. Le projet Eurosion (2004), pour lequel d'autres sources de données sont disponibles, propose une agrégation d'autres indicateurs. Cependant, ces indicateurs peuvent systématiquement être regroupés en 3 catégories :

- les facteurs d'état, représentant la fragilité du territoire (topographie, géomorphologie) ;
- les facteurs de forçages (ici des facteurs marins), représentant l'agression sous forme de forçages (vagues, surcotes) ou de pressions (élévation du niveau marin) ;
- des éléments de contexte représentant la dynamique sédimentaire locale : la zone subit-elle un déficit chronique de sédiments liée par exemple à des changements de l'usage des sols et du réseau hydrographique ?

1.2.2.2. VARIANTES DE LA METHODES (PAR EXEMPLE SELON L'ECHELLE DE TRAVAIL)

Ainsi, il n'existe pas une mais plusieurs combinaisons de critères permettant d'évaluer la vulnérabilité des zones côtières. Les différentes combinaisons sont choisies selon l'échelle de travail, les données disponibles et les entités sur lesquelles porte l'analyse. Dans ce projet, les indicateurs choisis à l'échelle nationale et à l'échelle régionale ne sont donc pas les mêmes.

1.2.2.3. CHOIX D'UNE NORMALISATION, PONDERATION ET AGREGATION

Une fois les indicateurs choisis, il faut définir comment les différents critères seront normalisés, pondérés et agrégés en un indice de vulnérabilité unique. Gornitz et al. (1994) ont choisi une agrégation géométrique pour le « Coastal Vulnerability Index » (CVI), en raison de la robustesse des résultats lorsque des données manquent. D'autres auteurs (Vinchon et al., 2006) proposent d'intégrer le dire d'expert dans cette évaluation. Dans le projet Explore 2070, nous avons proposé une méthode de cartographie décisionnelle multicritère qui permettrait d'allier les avantages des deux approches issues de Gornitz et al. (1994) et de Vinchon et al. (2006), mais aussi de proposer une spatialisation de la vulnérabilité des territoires.

1.3. APPORTS DE LA CARTOGRAPHIE DECISIONNELLE MULTICRITERES (CDM)

La méthode choisie est une adaptation d'une approche par indicateurs prenant en compte le dire d'expert. Elle permet de palier à l'insuffisante explicitation du dire d'experts dans les réalisations précédentes.

1.3.1. CARACTERISTIQUES DU PROBLEME ETUDIE

L'étude de l'évolution des aléas côtiers dans le contexte du changement climatique présente ainsi les caractéristiques suivantes :

- caractère non stationnaire : dans la mesure où les processus sous-jacents des aléas côtiers évoluent avec le temps (exemple : élévation du niveau marin) ;
- caractère multi-aléas : compte tenu des échelles temporelles et spatiales considérées, l'érosion et la submersion marine doivent être considérées simultanément. Considérer un seul de ces aléas (par exemple la submersion) conduit nécessairement à faire des hypothèses fortes sur l'autre processus (par exemple faire l'hypothèse que la bathymétrie reste inchangée, i.e. qu'aucun processus érosif n'a lieu) et souvent à sur-utiliser des données altimétriques d'une précision et d'une exactitude insuffisantes. De fait, la cartographie de la sensibilité des côtes à l'élévation du niveau marin présentée dans EuroSION et dans le CVI (USGS) procède d'une intégration de ces deux aléas ;
- caractère non formalisé : le problème de l'aggravation possible des aléas côtiers ne peut pas

être complètement formalisé dans la mesure où la plupart du temps, il n'est pas possible de décrire de manière déterministe et précise comment évolueront les aléas côtiers. L'incertitude sur les processus côtiers à ces échéances de temps et d'espace est telle qu'aucun modèle numérique n'est pertinent pour réellement prendre la mesure des changements possibles ;

- caractère multicritère : les critères utilisés pour réaliser la cartographie de la vulnérabilité côtière sont multiples (forçages : vagues, vent, courants ; état : géologie, topographie ; pressions : apports de sédiments, niveau marin...). Ces critères sont utilisés comme des éléments concourants apportant un éclairage au problème et non dans une approche où les processus seraient réellement modélisés. Par ailleurs, le problème n'étant pas complètement formalisé, il existe plusieurs manières rationnelles d'agréger ces critères, ne conduisant à priori pas au même résultat ;
- caractère hétérogène des données : les données sont hétérogènes en qualité (ex : exactitude et précision des données altimétriques) et en quantité ;
- mais dans un contexte de relative abondance de données spatiales : si la théorie fait défaut pour analyser l'évolution des aléas côtiers, une relative abondance de données SIG géo-référencées permet une analyse assez fine du territoire, sans pour autant permettre de répondre directement à la question posée.

Il s'agit donc d'évaluer une situation dans un contexte incertain, à partir de données multiples et hétérogènes, mais relativement abondantes.

Dans une telle situation, les travaux de Chakar (2006) nous enseignent que la cartographie décisionnelle multicritères est un outil pertinent.

1.3.2. METHODES CDM

Dans les méthodes d'analyse décisionnelle multicritères, un certain nombre de critères sont utilisés comme autant d'éléments concourants pour apporter un éclairage au problème posé. En cartographie décisionnelle multicritères (CDM), l'analyse porte sur des objets géoréférencés. De manière simple, la cartographie décisionnelle multicritère peut être donc interprétée comme étant un outil permettant de combiner des données géographiques et des jugements de valeur (les préférences des décideurs) pour aider à la décision (Malczewski 2006).

Les méthodes CDM peuvent être utilisées pour l'aide à la décision, mais aussi pour évaluer une situation (Chakar, 2006). Ici, il s'agit d'analyser les aléas côtiers érosion et submersion et leur éventuelle aggravation dans le contexte du changement climatique.

L'avantage majeur de l'incorporation des méthodes d'aide à la décision dans les outils SIG est que les décideurs peuvent insérer des jugements de valeur (leurs préférences vis-à-vis des critères d'évaluation et des alternatives) dans le processus de décision du SIG, et reçoivent un feedback sur les implications de ces jugements au niveau de l'évaluation de la politique choisie. Un tel feedback permet d'améliorer la confiance du décideur dans les résultats (Malczewski 2006). Elle nous semble répondre au besoin de davantage d'explicitation du dire d'experts relevé dans la mise en œuvre du projet RESPONSE (Vinchon et al., 2009).

1.3.3. CHOIX D'UNE METHODE CDM ADAPTEE

Peu de travaux publiés utilisent explicitement ce type de méthodes pour des évaluations de vulnérabilité. En réalité, les travaux de recherche actuels portent sur la formalisation des méthodes CDM et l'intégration des méthodes d'aide à la décision et d'outils SIG (Chakar, 2006). A notre connaissance, le seul exemple d'utilisation d'une méthode CDM pour l'évaluation des risques a été mise en œuvre par le service volcanologique indonésien et le BPCTK pour la cartographie des risques volcaniques au Mérapi.

La mise en œuvre de la méthode comprend les phases suivantes :

- détermination du territoire sur lequel porte l'analyse: zonage ;
- modélisation du problème de manière hiérarchique à partir des critères de forçage, d'état et de contexte permettant d'évaluer l'aléa côtier ;
- évaluation par dire d'expert: importance relative entre les différentes composantes et sous-critères déterminés ;
- attribution des scores aux entités territoriales choisies ;
- synthétiser le jugement, comprenant un retour de l'expert sur la cartographie générale et sur les raisons qui ont motivé tel ou tel choix.

L'Analytical Hierarchy Process est donc un outil qui permet de lever certaines difficultés des approches précédentes, notamment celles relatives au besoin d'explicitation du dire d'expert.

1.4. OBJECTIF DE CE RAPPORT

Dans le projet Explore 2070, l'approche proposée par le Lot littoral est une analyse multicritères, intégrant le dire d'expert, qui est structurée par une méthode de Cartographie Multicritère

Décisionnelle : l'Analytical Hierarchy Process (Saaty, 1981 et 2000).

Les analyses multicritères définissent ainsi une fonction de vulnérabilité, recevant en entrée un certain nombre de critères, et propose en sortie un indice de vulnérabilité indiquant comment l'entité choisie se situe vis-à-vis des autres : est-elle plus ou moins vulnérable que telle autre entité ?

La mise en œuvre pratique de cette approche à l'échelle du zoom Languedoc-Roussillon est présentée dans ce rapport. Ce rapport est organisé comme suit :

- Une première partie (introduction) présente le contexte de l'étude, l'approche utilisée et les objectifs
- Une deuxième partie présente le site d'étude
- Une troisième partie présente la méthode et les données
- Une quatrième partie les résultats
- Une cinquième partie propose une discussion critique de ces résultats ainsi que de leur utilisation potentielle dans des études ultérieures

2. LE ZOOM LANGUEDOC-ROUSSILLON

Une étude complète de l'impact potentiel du changement climatique sur les zones côtières en Languedoc-Roussillon a été réalisée dans Yates et Le Cozannet (2010). Nous reprenons ici les conclusions principales utiles pour le projet Explore 2070, concernant les conditions météorologiques et hydrodynamiques en Languedoc-Roussillon afin de justifier les hypothèses qui ont été faites pour l'étude.

2.1. CONTEXTE REGIONAL

Le Languedoc-Roussillon est bordé par la Méditerranée, sur 215 km de littoral caractérisé par :

- des falaises rocheuses paléozoïques avec des baies sableuses au sud entre la frontière avec Espagne et Collioure
- Un système côtier sableux, qui s'étend d'Argelès au Grau-du-Roi (à l'ouest du delta du Rhône), localement interrompu par des éperons rocheux composés de basaltes et de calcaires cénozoïques (Agde, Cap Leucate) et ou de calcaires mésozoïques (Sète).

Les plages sableuses, qui constituent 90% du linéaire de la côte, sont souvent étroites et raides avec, en avant plage, des systèmes de barres submergées. Elles sont souvent associées à des systèmes de dunes basses (de moins de 5m) ou « lidos ». Ceux-ci séparent les lagunes et les marais de la mer. Ils sont traversés par des chenaux étroits (« graus ») qui permettent l'échange de l'eau avec la mer ; ces graus initialement divaguant ont pour la plupart été stabilisés.

Les étangs sont bordés de zones humides, plus ou moins transgressifs sur un arrière-pays constitué de plaine alluviales quaternaires, au pied des formations mésozoïques calcaires

Cette configuration génère le découpage du littoral en cellules sédimentaires au sein desquelles est décrit un transport sédimentaire côtier (dérive sédimentaire).

Cinq cellules principales sont ainsi définies (CNEXO, date non définie, RESPONSE, 2006):

- Entre le Nord d'Argelès et Port-Vendre, avec une dérive du Nord vers le Sud puis le Sud- Ouest ;
- Entre le Nord d'Argelès et Narbonne-Plage, avec une dérive du Sud vers le Nord puis vers l'Est à hauteur de Gruissan ;

- Entre Frontignan et Narbonne- Plage, avec une dérive venant du Sud-Est au droit de Frontignan, et s’orientant ensuite vers l’Ouest puis le Sud-Ouest;
- Entre Frontignan et Grau-du-Roi, avec une dérive venant du Sud au droit de Frontignan, et s’orientant vers le Nord-Est.
- Entre le Delta du Rhône et le Grau-du-Roi, la dérive sédimentaire, proche de la côte, est orientée vers l’Ouest puis le Nord-Ouest.
- Un flux sédimentaire est également décrit plus au large, entre le Delta du Rhône et Frontignan. Il est orienté Ouest-Sud-Ouest au départ, puis Nord-Ouest au droit de Frontignan et génère les dérives opposées décrites ci-dessus de part et d’autre de Frontignan.

Dans le Golfe du Lion, les vents les plus forts soufflent en hiver (Sabatier, 2001) principalement de secteur 315°-360° (localement appelés mistral et tramontane) et en second lieu de 90° à 180°. Les vents de secteur Nord et Nord-Ouest ont moins d’impact sur le littoral du Languedoc-Roussillon alors que les vents du sud influencent les climats de vagues et de surcotes dans la région.

2.2. EFFETS POTENTIELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES FORÇAGES COTIERS EN LANGUEDOC-ROUSSILLON : OBSERVATIONS ET PROSPECTIVE

En Languedoc-Roussillon, les évaluations de l’impact du changement climatique sur les forçages côtiers sont tout particulièrement limitées par un manque de données sur le long terme et par les incertitudes des modèles. La résolution des modèles globaux ne suffit pas pour représenter le terrain complexe de la Méditerranée, où la topographie des montagnes a un effet important sur la circulation atmosphérique et les interactions entre l’atmosphère et l’océan. C’est la raison pour laquelle les projections régionales à partir des modèles globaux ne sont pas pertinentes dans la région Méditerranéenne (Lionello et al., 2008a). Enfin, les modèles régionaux comportent eux aussi de nombreuses incertitudes.

Nous présentons ci-dessous un état des conséquences régionales du changement climatique en Languedoc-Roussillon pour les aléas érosion et submersion.

2.2.1. ELEVATION DU NIVEAU MARIN

2.2.1.1. OBSERVATIONS

En Languedoc-Roussillon, les facteurs principaux qui contribuent à l'élévation du niveau de la mer sont l'élévation du niveau marin absolu et, en particulier dans la région du delta du Rhône, la subsidence à cause de la compaction et de la compression des sédiments (Provansal et Sabatier, 2000). Cependant, Belair (2007) considère que les taux de subsidence sont bien trop lents pour être comparées à l'élévation du niveau marin.

Diverses observations et estimations de l'élévation du niveau marin ont été faites à partir de marégraphes à l'échelle régionale du Languedoc-Roussillon. Les observations actuelles ont montré une élévation relative du niveau marin de :

- 2 mm/an (intervalle de confiance de 99%) entre 1905 et 2005 au Grau-de-La Dent, avec une contribution d'approximativement 1mm/an à cause de la subsidence (Ullman et al., 2007) ;
- 2,9 mm/an à Sète entre 1986 et 1999 (MICORE, 2009).

Les prédictions et les estimations dissemblables de l'élévation du niveau de la mer au 21^{ème} siècle en Languedoc-Roussillon amènent les études en cours à prendre en compte des valeurs différentes selon les projets:

- 1-1,5 mm/an recommandé dans le projet EUROSION (2004), en extrapolant les données de marégraphes disponibles à la date de publication de cette étude ;
- 0 mm/an avec une modélisation à l'échelle de la Méditerranée pour le scénario A2 du GIEC dans l'étude de Tsimplis et al. (2008).
- 1 mm/an et 7mm/an à l'échéance de 2030, et 3,5 mm/an et 10 mm/an à l'échéance de 2100 utilisé dans le projet MISEEVA (Vinchon et al., 2009).

Au total, les observations et les estimations des modèles à l'échelle locale, suggèrent des élévations du niveau marin est de 0 à 3 mm/an pour la période actuelle. Les estimations futures, issues d'analyses à l'échelle globale et avec des modèles climatiques ou semi-empiriques, produisent des estimations comprises entre 1 et 10 mm/an.

2.2.2. REGIME DES TEMPETES

Les tendances sur les tempêtes sont assez difficiles à estimer sur les côtes Méditerranéennes, d'une part à cause de la pertinence des modèles évoquée ci-dessus et d'autre part car les vents de Méditerranée sont influencés par des processus à une échelle plus globale (par exemple la NAO, Oscillation Atlantique Nord), qui montrent une variabilité interannuelle très forte.

L'influence de la NAO étant difficile à distinguer de l'influence du changement climatique, les tendances attribuées au changement climatique ne sont pas parfaitement fiables. Malgré ces limitations, quelques travaux ont tenté d'estimer l'évolution des régimes de tempête à travers l'étude des vents et de la pression.

- Lionello et al. (2002) ont montré une faible diminution de la fréquence des tempêtes en comparant une simulation de l'état actuel et une simulation représentative d'un climat avec un doublement de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les changements d'intensité n'ont pas été étudiés ;
- Dequé (2003), dans le cadre du projet IMFREX, a trouvé une diminution faible de la fréquence des tempêtes en comparant une simulation de la situation 2070-2099 à une simulation de référence ;
- Ullman (2008) a trouvé une augmentation faible de l'intensité et de la durée maximale des tempêtes.

Alors que les tendances sont faibles, les études initiales montrent une diminution faible de la fréquence des tempêtes, mais une augmentation faible de l'intensité et la durée.

2.2.3. REGIME DE VAGUES

Les estimations de l'impact du changement climatique sur les vagues actuelles sont limitées par le manque de données sur le long terme en Méditerranée. Le projet MICORE (2009) n'a pas décelé de tendances significatives avec 20 ans d'observations (de 1989 à 2009) de houlographes, mais en termes de modélisation, deux études récentes (dont MICORE) ont trouvé des tendances faibles pour l'évolution du climat de vagues :

- MICORE (2009) : une augmentation faible de la fréquence des houles de tempêtes, depuis 1970, mais il n'existe pas de tendance dans la période entière des simulations (de 1958 à 2001) ;
- Lionello et al (2008b) : une diminution de la hauteur extrême et une diminution de la hauteur significative des vagues pendant toute l'année sauf l'été, en comparant deux simulations des vagues entre la période de 2071 à 2100 et de 1961 à 1990.

Les observations de durée de court terme (20 ans), et les divergences entre les tendances déduites d'observations et de simulations, suggèrent que le régime de vagues ne présente pas de tendance fiable à long terme.

2.2.4. REGIME DES SURCOTES

Les observations des marégraphes au Golfe de Lion ont montré une hausse de l'amplitude des

surcotes pendant la deuxième moitié du 20^{ème} siècle. Ces observations au Grau-de-la-Dent (entre 1905 et 2005) ont montré une hausse des niveaux marins extrêmes de 0,32cm/an. Cette hausse est attribuée à l'élévation du niveau marin (0,20cm/an) et à l'augmentation de l'amplitude des surcotes elles-mêmes (0,12cm/an). Pourtant, les simulations des surcotes au 21^{ème} siècle de Ullman (2008) et Ullman et Moron (2010) prédisent que les amplitudes des surcotes resteront stationnaires.

Même s'il est estimé que le régime des surcotes restera inchangé à l'avenir, l'impact des surcotes sera de plus en plus important avec l'élévation du niveau marin. Par exemple, avec une élévation du niveau marin de 20 cm (prolongeant de manière linéaire les observations du marégraphe de Grau-de-la-Dent), les niveaux marins observés pendant la tempête de 3-4 décembre 2003, de 1,5m à Port-Vendres et 1,3m au Port de Saint-Cyprien et d'Argèles (basées sur des témoignages visuels, source : DRE), seront élevés à 1,7m et 1,5m, respectivement, sans changement de l'amplitude de la surcote. En définitive, l'impact des surcotes augmentera probablement sur le Languedoc-Roussillon au XXI^{ème} siècle, mais le changement du régime des surcotes sera avant tout lié à l'élévation du niveau de la mer et non à une modification des surcotes elles-mêmes.

2.2.5. PRECIPITATIONS

En Languedoc-Roussillon, les tendances principales observées et prédites sont :

- Pujol et al. (2007) constatent une diminution des événements pluvieux en utilisant 56 ans de données.
- IMFREX prédit une augmentation des jours sec en été, une légère augmentation possible des jours pluvieux d'hiver, et une diminution des précipitations moyennes annuelle au cours du XIX^{ème} siècle, en comparant deux simulations des précipitations de 1960 à 1999 et de 2070 à 2099 ;
- MEDCIE prédit une diminution des jours pluvieux (jours de plus de 10mm/jour), et une diminution entre 5 et 27.5cm des précipitations moyennes annuelles à l'horizon 2080 ;

En général, les tendances des jours pluvieux ne sont pas très homogènes, mais la globalité montre une diminution des précipitations moyennes. Ceci pourrait avoir pour effet une diminution des apports sédimentaires à la côte, mais de nombreux autres paramètres peuvent rentrer en compte et il est prématuré de tirer des conséquences actuellement.

2.2.6. ALEAS COTIERS ET CHANGEMENT CLIMATIQUE EN LANGUEDOC-ROUSSILLON

2.2.6.1. EN TERME D'EROSION

Les scénarios au niveau des forçages n'apportent pas de réponse simple au questionnement sur les effets du changement climatique. On pourrait ainsi se demander si, en Languedoc-Roussillon, le changement climatique ne pourrait pas réduire les apports sédimentaires en raison de la diminution des cumuls de précipitations. On peut considérer également que l'augmentation de la fréquence des événements pluvieux en hiver pourrait augmenter l'érosion des sols et par conséquent augmenter les apports sédimentaires.

Il existe peu d'études à l'échelle régionale qui évaluent les changements des apports sédimentaires. Maillet et al. (2006) ont examiné les changements du delta du Rhône depuis le XIX^{ème} siècle avec des cartographies historiques pour évaluer l'impact de l'hydrologie du fleuve aux variations du trait de côte. Ils ont conclu que lorsqu'il n'y a pas compensation par la fraction sableuse des apports fluviaux, l'évolution de la morphologie du delta est contrôlée par la redistribution sédimentaire par les houles. L'endiguement du Rhône a fixé la position de l'embouchure (en 1895), et cette stabilisation a réduit l'impact des apports fluviaux sur l'évolution du trait de côte parce que les sédiments s'accumulent à proximité de l'embouchure et sont peu redistribués sur le littoral deltaïque (Maillet et al., 2006). Les fleuves sont une source importante de sédiments en Languedoc-Roussillon, et depuis la deuxième guerre mondiale, la magnitude des apports sédimentaires a diminué à cause de la construction des barrages, la reforestation et la divergence des fleuves (Durand, 1999). La modélisation à l'échelle globale et régionale des écoulements et débits des fleuves prédisent à l'avenir des diminutions (Alcamo et al., 2007 ; Lespinas, 2008 ; Dankers and Feyen, 2008) qui aggraveront l'aléa érosion actuel.

Par exemple, dans l'étude IMPLIT (2007), les données entre 1842 et 1977 ont montré qu'il n'existe pas de tendance d'évolution globale du rivage en Languedoc-Roussillon, mais qu'il faut raisonner à l'échelle de zones bien précises. Cette évolution est influencée par beaucoup de facteurs : la diminution des apports sédimentaires fluviaux, la lente montée de la mer, et l'artificialisation du rivage (depuis les années 60) notamment, les amènent à conclure que

« l'impact du changement climatique est difficile à appréhender du fait du rôle important de la diminution des apports fluviaux et des ouvrages de défense côtière qui perturbent les dynamiques naturelles. ».

De plus, Sabatier (2008) a modélisé l'évolution des dunes en Camargue pendant des tempêtes variées. Il a identifié que la houle a actuellement un rôle plus important que le niveau de l'eau dans les processus d'érosion, et que des augmentations dans la force et/ou la durée des forçages causeront une érosion plus significative dans le futur. Cette étude a indiqué une possible augmentation de l'érosion des dunes en Languedoc-Roussillon dans le cas d'une évolution du régime de vagues.

Les lidos sont également fragiles face au changement climatique, en particulier l'élévation du niveau marin (Sallenger et al., 1987). Une étude (Durand and Heurefeux, 2006) du système cordon littoral dans la lagune de Vic et de Pierre Blanche (en Languedoc-Roussillon) a estimé le recul de trait de côte en 2050 par extrapolation des tendances linéaires historiques en utilisant des photographies aériennes et des données variées depuis 1937. Ils prédisent un recul par roll-over sur des dizaines de mètres qui varient le long de la côte selon l'hétérogénéité des dunes, de manière similaire à plusieurs autres études (Taylor and Stone, 1997 ; Penland et al., 1998). Ils prédisent également l'ouverture de brèches lors de tempêtes qui pourraient transformer certains lidos en îles-barrières. Par conséquent, les lidos en Languedoc-Roussillon sont des zones fragiles. Il convient de noter que les changements des lidos impactent aussi des lagunes situées en arrière.

2.2.6.2. EN TERME DE SUBMERSION

2.2.6.2.1. Plages, dunes et lidos

Les plages, les dunes et les lidos représentent la majorité de la zone côtière en Languedoc-Roussillon. Les zones basses sont considérées comme plus exposées à l'aléa de la submersion permanente lié à l'élévation relative du niveau marin. Il existe actuellement trop peu de données pour évaluer l'aléa submersion à une échelle régionale, que ce soit au niveau de la mesure de l'élévation du niveau marin relativement à la côte ou bien pour correctement représenter l'altitude des zones côtières potentiellement impactées.

Une augmentation des surfaces affectées par la submersion temporaire est prévue à cause de

l'élévation du niveau de la mer, alors que la hauteur de la surcote elle-même resterait inchangée. Autrement dit, les zones impactées, pour une même amplitude de surcote, seront situées à des altitudes plus élevées, à cause de l'élévation du niveau de la mer.

2.2.6.2.2. Marais

La submersion permanente menace les marais marins et les marais qui bordent des étangs et les lagunes en Languedoc-Roussillon à cause de l'élévation relative du niveau de la mer. Comme les lagunes échangent de l'eau avec la mer, l'élévation du niveau marin va correspondre à une élévation du niveau d'eau dans les lagunes également. Toutefois, d'autres processus affectent le niveau de l'eau dans les lagunes, comme la sédimentation.

Des processus de subsidence et de sédimentation qui ne sont pas nécessairement liés directement au changement climatique, pourraient aggraver ou diminuer le taux de l'élévation du niveau marin (Ericson et al., 2006). De plus, les marais ne répondent pas passivement à l'élévation du niveau marin et ont la possibilité de voir augmenter la sédimentation si les apports sédimentaires sont suffisants et la végétation demeure efficace dans sa fonction de captage de sédiments (Morton, 2002). Selon la Mission Littoral du DIREN en 2002 en Languedoc-Roussillon, le comblement des lagunes par les apports terrigènes est une des menaces principales de ces milieux au même titre que l'augmentation de leur caractère marin. Ces comblements pourraient compenser les effets de l'élévation du niveau de la mer (Bélair, 2007). Dans les marais et étangs en Languedoc-Roussillon, les facteurs principaux qui contrôlent le niveau relatif de l'eau sont le bilan entre l'élévation du niveau de la mer et la sédimentation. La bonne santé écologique des marais influence également considérablement leur capacité à s'adapter à une élévation du niveau d'eau. Sans chiffres exacts pour estimer les effets de la sédimentation comme compensation de l'élévation du niveau marin, une méthode souvent utilisée pour estimer les impacts reste de croiser le niveau marin avec le meilleur MNT existant.

2.2.7. CONNAISSANCE PREALABLE DES CONSEQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ALEAS COTIERS

Le projet RESPONSE (2006) a évalué l'exposition du linéaire côtier aux aléas érosion et submersion en Languedoc-Roussillon, afin d'identifier les zones affectées par les aléas côtiers, actuellement et à l'avenir en raison du changement climatique. Cette cartographie avait pour but d'aider au développement de stratégies de gestion et d'adaptation. Des

« hotspots » sont définis comme des zones avec un niveau élevé des risques érosion et submersion actuels et à l'avenir. L'étude est basée sur des observations, des événements historiques, l'analyse des tendances actuelles de l'évolution du trait de côte, ainsi que par élicitation (« dire d'expert »). Ainsi, les hotspots identifiés comme les plus menacés sont :

- Sainte-Marie : aléas érosion et submersion dans les zones urbaines et touristiques ;
- Les cabanes de Fleury : aléa submersion dans les zones touristiques et environnementales, avec une possible augmentation de l'aléa érosion des plages et des dunes ;
- Lido de Sète à Marseillan : aléas érosion et submersion qui impactent le lido entier, en particulier l'infrastructure de communication et des enjeux de tourisme et d'agriculture ;
- Lido de Maguelone à Les Arresquiers : aléas érosion et submersion qui impactent le lido entier, en particulier la saliculture et la viticulture près de Maguelone et des activités urbaines et touristiques vers Frontignan ;
- Petite Camargue : l'aléa érosion qui pourrait impacter le tourisme et l'aléa submersion des zones humides et de la saliculture ;
- Port La Nouvelle : les aléas érosion et submersion, en particulier la submersion de la zone industrielle du port ;
- Port Leucate : les aléas érosion et submersion, en particulier un village au nord du port et la conchyliculture ;
- Sainte Geneviève à Portiragnes-plage : l'aléa érosion d'un site de camping et des plages à vocation récréatives ;
- Valras-plage : les aléas érosion et submersion, en particulier dans la région urbanisée entre les embouchures des fleuves Orb et Aude.

2.3. PROPOSITION DE SCENARIOS CLIMATIQUES REGIONALISES

2.3.1. ELEVATION DU NIVEAU MARIN

En l'absence de données fiables sur l'élévation du niveau marin en 2050-2070, la proposition est de retenir une hypothèse de 1m d'élévation du niveau marin. Cette hypothèse se situe entre les scénarios « pessimistes » et « extrêmes » des recommandations de l'Observatoire national sur les Effets du Changement Climatique (ONERC, 2010) émises en février 2010. Par

ailleurs, d'autres valeurs plus fines ne seraient pas toujours exploitables, notamment dans les zones où le MNT le plus précis disponible est celui de l'IGN.

2.3.2. REGIME DES TEMPETES ET DES CYCLONES

A défaut de résultats convergents et significatifs en termes d'intensité sur l'évolution des régimes de tempêtes, la proposition est de retenir l'hypothèse de régimes de tempêtes et de cyclones inchangés en 2070.

2.3.3. REGIME DES VAGUES

De la même manière, les résultats actuellement disponibles concernant le régime des vagues ne permettent pas de conclure quant à son évolution. La proposition est de considérer le climat de vagues inchangé.

2.3.4. REGIME DES SURCOTES

Les études menées dans ce domaine suggèrent que les évolutions des régimes des surcotes seront variables localement et que leur impact sur l'aléa de submersion sera négligeable devant les effets de l'élévation du niveau marin. Aussi, on considère le régime des surcotes inchangés.

2.3.5. REGIME DES PRECIPITATIONS

Les précipitations jouent un rôle qu'il est difficile de quantifier actuellement dans les processus d'érosion et d'accrétion. Par ailleurs, elles jouent un rôle lorsqu'il y a des phénomènes de cooccurrence de tempêtes marines et de précipitations importantes. Dans ce cas, le risque d'inondation est accru aux embouchures des fleuves.

2.3.6. INCERTITUDES

Les incertitudes des scénarios climatiques régionalisés sont bien évidemment très importantes, notamment pour ce qui concerne l'amplitude future du niveau marin. Ces incertitudes justifient le recours à plusieurs scénarios dans les phases ultérieures de l'étude.

3. DONNEES ET MISE EN ŒUVRE DE LA METHODE

3.1. DONNEES

Les données utilisées sont les suivantes :

- géomorphologie côtière (Données EuroSION) et trait de côte HistoLitt (SHOM / IGN);
- topographie (Couche zones basses du Cetmef, complétée avec des données IGN ;
échelle de restitution 1 :100 000) ;
- géologie au 1 : 50 000 (BRGM) ;
- occupation des sols (BD Corine Land Cover, 1:100 000) ;
- base de données hydrologique (BD Carthage compatible avec l'échelle 1 :50000) ;
- données de zonage de l'extension des aléas côtiers érosion et accrétion (issues du
projet RNACC 2 – 2011)

Ces données sont compatibles avec l'échelle de restitution (1 :100 000).

3.2. MISE EN ŒUVRE DE LA METHODE

Ce paragraphe présente comment ont été mises en œuvre les différentes phases de l'AHP :

- 1) la **détermination des entités** sur lesquelles porte l'analyse ;
- 2) la **modélisation conceptuelle** du problème de manière hiérarchique et la **synthèse du jugement** ;
- 3) la revue par un **groupe de travail**¹.

La **cartographie des résultats** est présentée dans le chapitre résultats.

3.2.1. DETERMINATION DES ENTITES SUR LESQUELLES PORTENT L'ANALYSE

Le rapport bibliographique a présenté de nombreux travaux concernant les risques côtiers et le changement climatique en Languedoc-Roussillon. Nous avons utilisés une partie de ces

¹ La composition de ce groupe de travail est précisée dans les annexes reprenant les comptes rendus de ses réunions.

travaux dans l'analyse multicritères présentée ici. Il s'agit essentiellement de l'étude de vulnérabilité du Cetmef et des études RNACC (Yates et al., 2011).

3.2.1.1. ZONAGE PRELIMINAIRE : DETERMINATION D'UNE ZONE COTIERE

Il s'agit ici de déterminer une zone côtière contenant toutes les zones potentiellement affectées par les aléas érosion et submersion marine.

Le zonage préliminaire est effectué de la manière suivante : une zone côtière contenant les zones potentiellement affectées par les aléas érosion et submersion marine est obtenue en faisant l'union :

- **des zones dont l'altitude est inférieure à 20m** (selon le modèle numérique de terrain de l'IGN).
- **des zones potentiellement en érosion** selon l'étude RNACC (Yates et al., 2011) : les zones potentiellement en érosion prises en compte sont ici des polygones dessinés autour du trait de côte de la base de données Corine Land Cover sur laquelle ont été reportées les informations de Eurosion (2004). Ils incluent :
 - o toutes les zones potentiellement érodées en projetant les tendances de retrait du trait de côte observées autour de toutes les côtes érodables ;
 - o en incorporant également les zones potentiellement concernées par les effets de l'élévation du niveau marin sur l'érosion marine.

Ces zones sont créées en utilisant l'outil DSAS de l'USGGS.

- **une zone tampon de 200m est appliquée à l'ensemble des zones ainsi créées** afin de prendre en compte d'éventuelles inexactitudes planimétriques des MNTs et des erreurs de positionnement des différentes couches géographiques les unes par rapport aux autres (par exemple, le trait de côte n'est pas le même pour la couche géologie, pour l'occupation du sol et pour la couche HistoLitt).
- **A chaque fois qu'une entité de la couche vectorielle « Géologie » est intersectée, elle est intégrée entièrement dans le zonage sans préjudice sur les traitements ultérieurs.** Ceci vise à corriger des erreurs liées aux modèles numériques de terrain.

- **Enfin, des corrections manuelles sont effectuées :**

- o pour incorporer des zones non prises en compte en raison d'erreurs de positionnement des couches géographiques les unes par rapport aux autres
- o pour exclure des zones dont le fonctionnement est considéré « non concerné » par les aléas côtiers d'ici à 2070, sous les hypothèses d'élévation du niveau marin retenues. Par exemple, concernant le fleuve Aude, seul le voisinage de l'étang de Vendres est pris en compte. Le scénario tendanciel est pris en compte en retenant des valeurs différentes pour les deux scénarios (par exemple : +2mNGF pour une tempête centennale dans le scénario tendanciel contre +3m NGF dans le scénario avec élévation du niveau marin) ;

A l'issue de cette étape, nous disposons d'un zonage englobant toutes les zones potentiellement affectées par les risques côtiers dans le contexte du changement climatique entre aujourd'hui et 2070.

3.2.1.2. ZONAGE DETAILLE ET DETERMINATION DES INDICATEURS

Dans cette étape, nous utilisons la zone côtière définie en 3.2.1.1 pour définir de manière détaillée chacune des entités côtière qui fera l'objet de l'analyse par la méthode AHP. D'autre part, nous définissons les indicateurs de base qui seront ultérieurement intégrés dans l'arbre hiérarchique.

La zone côtière ainsi définie est divisées en zones homogènes sur le plan morphodynamique. Ceci est effectué en conservant, pour chacune des couches 3.2.1.1, les différentes entités les constituant. A titre d'exemple, seront conservés tous les découpages selon l'altitude, la géologie et les différentes autres couches intersectées. Les paragraphes suivants présentent de manière détaillée la mise en œuvre de cette étape.

3.2.1.3. FACTEURS D'ETAT

Les facteurs d'état traduisent les caractéristiques du terrain qui font qu'il est plus ou moins vulnérable à la submersion et l'érosion. Les différentes composantes de ces facteurs sont ici des représentations cartographiques de la morphodynamique côtière et de la submersion marine, évaluées en tenant compte des tendances historiques, des aléas d'inondation

tendanciels ou avec prise en compte de la montée du niveau de la mer.

3.2.1.3.1. Morphodynamique côtière

Dans le scénario tendanciel, l'érosion future est estimée par extrapolation des observations passées du recul du rivage suivant les données de Yates et al. (2011) issues du projet RNACC. En pratique, cette approche soulève quelques difficultés puisque les levés ont été réalisés à des moments différents selon les endroits, mais aussi parce que le taux d'érosion peut changer pendant la période d'observation, par exemple dans les cas suivants : mise en place de défenses côtières pendant la période d'observations, ou bien survenance d'un événement extrême juste avant ou pendant la période d'observation, ou encore après rechargement artificiel de sable.

Une première amélioration est donc apportée à cette approche très déterministe en introduisant un gradient d'incertitudes : la zone située en-deçà de la ligne représentant l'extrapolation de la tendance d'érosion observée peut être considérée comme « certainement érodée » (zone appelée Z1 ci-après), la zone obtenue en multipliant par deux le taux observé est considérée comme « peut-être érodée » (Z2), les zones restantes sont considérées comme « probablement pas érodées » (Z3). Cette proposition de zonage a été revue par le groupe de travail. Elle est directement inspirée des travaux menés par Ouranos (organisme québécois en charge de la coordination d'études sur le changement climatique) dans le domaine de l'adaptation au changement climatique des zones côtières (Savard, 2011). En utilisant la table de correspondance entre niveaux qualitatifs et quantitatifs (Tableau 1), Z1 est associée à la note 0.73, tandis que la zone éventuellement érodé reçoit 0,21 et les zones restantes obtiennent 0,06. Le Tableau 2 montre comment est ensuite construite la matrice AHP, qui, après un calcul dont les détails sont exposés dans le rapport d'étape 1 et dans Saaty (2008), permet d'obtenir une note correspondant à l'importance relative que revêt le problème de l'érosion dans chacune des zones Z1, Z2 et Z3.

Importance	Définition	Explication
1	Importance égale	Les deux critères présentent des importances équivalentes
3	Un peu d'importance	L'expérience du jugement favorise légèrement un critères (ou une entité) par rapport à un autre
5	Beaucoup d'importance	L'expérience du jugement favorise fortement un critères (ou une entité) par rapport à une autre
7	Beaucoup plus d'importance	On constate en pratique qu'un critère (ou une entité) est très nettement favorisé
9	Importance Absolue	L'évidence montre qu'un critère (ou une entité) est clairement favorisée par rapport à l'autre
2,4,6,8	Valeurs intermédiaires	Lorsque le jugement est porté à consensus

Tableau 1: Table de correspondance entre niveaux quantitatifs et qualitatifs (adapté de Saaty, 2008)

	Z1: Zone "certainement érodée ": situé dans la tendance observée extrapolée	Z2: Zone "peut-être érodée ": situé dans le double de la tendance extrapolée observée	Z3: Zone "probablement pas érodée": d'autres domaines	Note obtenue selon la méthode AHP ² : importance relative que revêt le problème de l'érosion dans chacune des zones Z1, Z2 et Z3
Z1: Zone "certainement érodée ": situé dans la tendance observée extrapolée	1	5: les experts estiment la vulnérabilité physique plus forte en Z2 que dans Z1	9: la vulnérabilité physique est de manière évidente plus forte en Z2 que dans Z1	0.7352
Z2: Zone "peut-être érodée ": situé dans le double de la tendance extrapolée observée	1/5	1	5: les experts estiment la vulnérabilité physique plus forte en Z2 que dans Z1	0.2067
Z3: Zone "probablement pas érodée": d'autres domaines	1/9	1/5	1	0.0581

Tableau 2: Table de correspondance entre niveaux quantitatifs et qualitatifs (adapté de Saaty, 2008)

En outre, une deuxième amélioration est faite en évaluant l'érodabilité du « sol ». Cette information peut être dérivée de la géologie (Figure 1). Pour cela, chaque type géologique présent dans la zone d'intérêt a été évalué au regard de son érodabilité. Par exemple, le recul du rivage ne sera finalement pas appliqué aux formations crétacées (comme par exemple dans la ville de Sète), mais seulement aux « sols » peu cohésifs tels que les sables de l'Holocène ou des dépôts de sédiments fins en bordure des étangs. Toutes les caractéristiques géologiques du Languedoc Roussillon ont été hiérarchisées selon leur érodabilité sur une échelle de 7 niveaux entre « très érodable » et « presque pas érodable ». Le tableau récapitulatif est présenté en annexe 1.

La démarche est la même pour le scénario de 1m de hausse du niveau marin : l'érosion supplémentaire due à l'élévation du niveau de la mer est calculée en utilisant une formule proposée par le projet Eurosion (2004), qui combine l'érosion attendue en raison de l'élévation du niveau de la mer et celle issue de processus déjà en cours, tels que révélés par les observations passées du trait de côte. Le recul du trait de côte est ainsi la somme d'un taux résultant de l'extrapolation des taux observés et d'un terme correspondant à la règle de Bruun, appliquée à l'accélération de l'élévation du niveau marin :

$$R_{future} = R_{historical} + \frac{(S_{future} - S_{historical})}{P \cdot \tan(\alpha)}$$

² Les détails de ce calcul sont exposés dans le rapport d'étape 1 et dans Saaty (2008).

Où S sont les taux passés et futurs d'élévation du niveau marin, $\tan(\alpha)$ la pente de la plage et P est la proportion de sédiments ayant une taille de grain suffisamment grande pour rester dans le profil de plage active. Ici, les données utilisées sont celles de la DREAL Languedoc-Roussillon³. Ces calculs d'érosion du littoral induits par l'élévation du niveau de la mer sont très peu fiables (voir par exemple, Cooper et Pilkey, 2004). Aussi, nous introduisons quatre niveaux d'incertitudes⁴ («probablement érodé», «peut-être érodée», «éventuellement érodé», «probablement pas érodée»). La notation associée à chacun de ces niveaux est calculée en utilisant la formulation Saaty. Puis, comme pour le cas précédent, les zones potentiellement érodées sont croisées avec l'érodabilité qui est extraite de la géologie. Ceci fournit une carte raffinée dans laquelle chaque entité géographique est classée en fonction de sa susceptibilité à l'érosion (Figure 1).

La Figure 1 présente donc les différentes étapes du processus utilisé pour évaluer la composante «morphodynamique côtière» de l'évaluation. Dans l'encart A est représentée la géologie. La géologie est utilisée pour évaluer l'érodabilité (encart B). Cette étape est donc réalisée en traduisant l'information géologique en information concernant l'érodabilité : à titre d'exemple, les sables dunaires sont considérés très érodables alors que les sols crétacés le sont peu. Parallèlement, les encarts C et D représentent des zones susceptibles de subir une érosion en 2070, obtenues simplement par extrapolation des tendances ou bien par une loi de Bruun ajustée. En croisant les cartes B et C et B et D, on obtient les cartes E et F respectivement : ces cartes représentent le classement obtenu pour chaque entité géographique élémentaire, de la plus probablement érodée en 2070 à la moins probablement érodée en 2070.

³ Le détail des calculs est présenté dans Yates et al. (2011).

⁴ En cohérence avec le plus haut niveau d'incertitude associé lorsque l'élévation du niveau marin est prise en compte

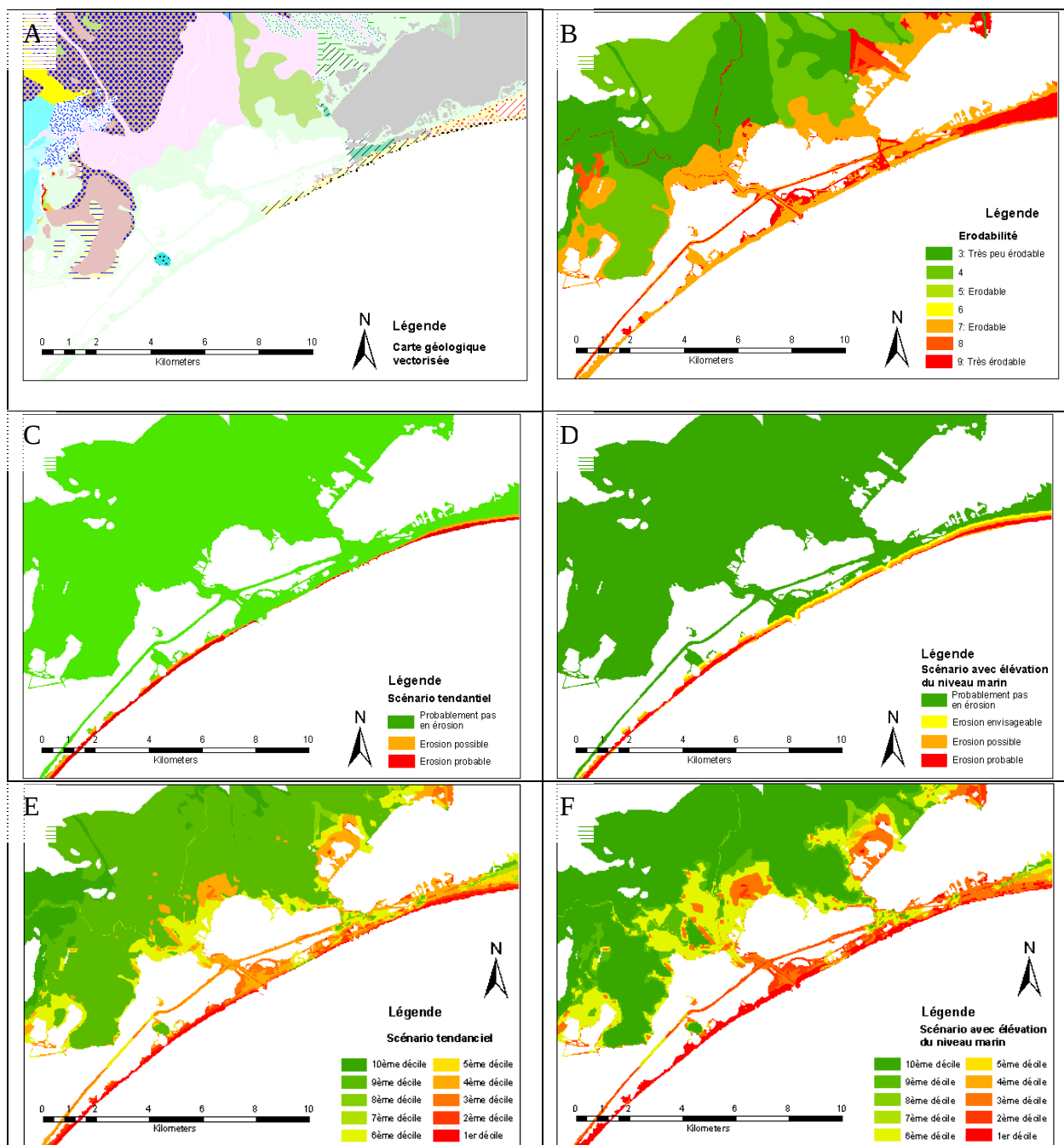


Figure 1: Croquis montrant le processus utilisé pour estimer la vulnérabilité physique de la zone côtière à l'érosion et à la submersion marine dans deux scénarios: la carte géologique (A), à partir de laquelle des renseignements sur la sensibilité à l'érosion (B) sont dérivés. La carte B est croisée avec une estimation approximative de recul du rivage estimée à partir des tendances observées (C) et en tenant compte de 1m du niveau des mers (D); Ainsi, une carte détaillée est obtenue en croisant les reculs supposés du rivage avec la susceptibilité à l'érosion : la carte (E) pour le scénario tendanciel et la carte (F) pour le scénario avec élévation du niveau marin.

3.2.1.3.2. Submersibilité

Concernant les submersions marines, deux sources d'information sont utilisées: une carte topographique et la carte géologique.

La carte topographique utilisée est la carte de zones basses, produite par le CETMEF en utilisant des données IGN. Leur résolution et leur mode de production (ces données sont dérivées de la BD Alti, d'une résolution verticale de 1m) font qu'elles ne sont pas conçues pour réaliser des études précises de submersion marine. La production programmée de données LiDAR dans le cadre du programme Litto-3D du SHOM-IGN conduira à la mise à disposition d'un MNT de haute précision en 2012.

Sans données LiDAR à disposition dans les délais du projet Explore 2070, il est malgré tout possible d'améliorer le zonage des zones basses en utilisant à nouveau la carte géologique (Annexe 2, Figure 2).

Un premier apport de la carte géologique est que la géométrie des zones potentiellement inondables est améliorée par rapport aux isolignes de la donnée topographique (Couche Zones Basses, Cetmef). Cette donnée topographique résulte en effet d'interpolation des isolignes de 5m des cartes IGN, contraintes par certains points de référence et les talwegs. Un second apport de l'utilisation de la donnée géologique est que des zones potentiellement inondables qui n'apparaissaient pas comme telles dans la carte « zone basses » sont introduites : c'est le cas par exemple pour les alluvions récentes et actuelles, dont l'altitude peut parfois excéder 3mNGF d'après la carte topographique, alors que ces zones sont exposées à un aléa de submersion pendant les tempêtes combinant précipitations abondantes et tempêtes marines.

Les submersions marines ne sont donc pas complètement séparées des inondations continentales dans l'exercice de cartographie réalisé ici. Ceci est plutôt un apport bénéfique de l'information géologique, dans la mesure où il est fréquemment impossible en pratique d'attribuer une cause unique à une inondation a-posteriori, les phénomènes se combinant entre eux.

Il peut également exister des cas où une même formation géologique n'implique pas les mêmes reliefs partout (cas de mouvements verticaux sur le très long terme). Cependant, pour l'exercice prospectif qu'est le projet Explore 2070, la combinaison des deux informations permet en définitive d'enrichir la représentation des zones basses exposées à la submersion.

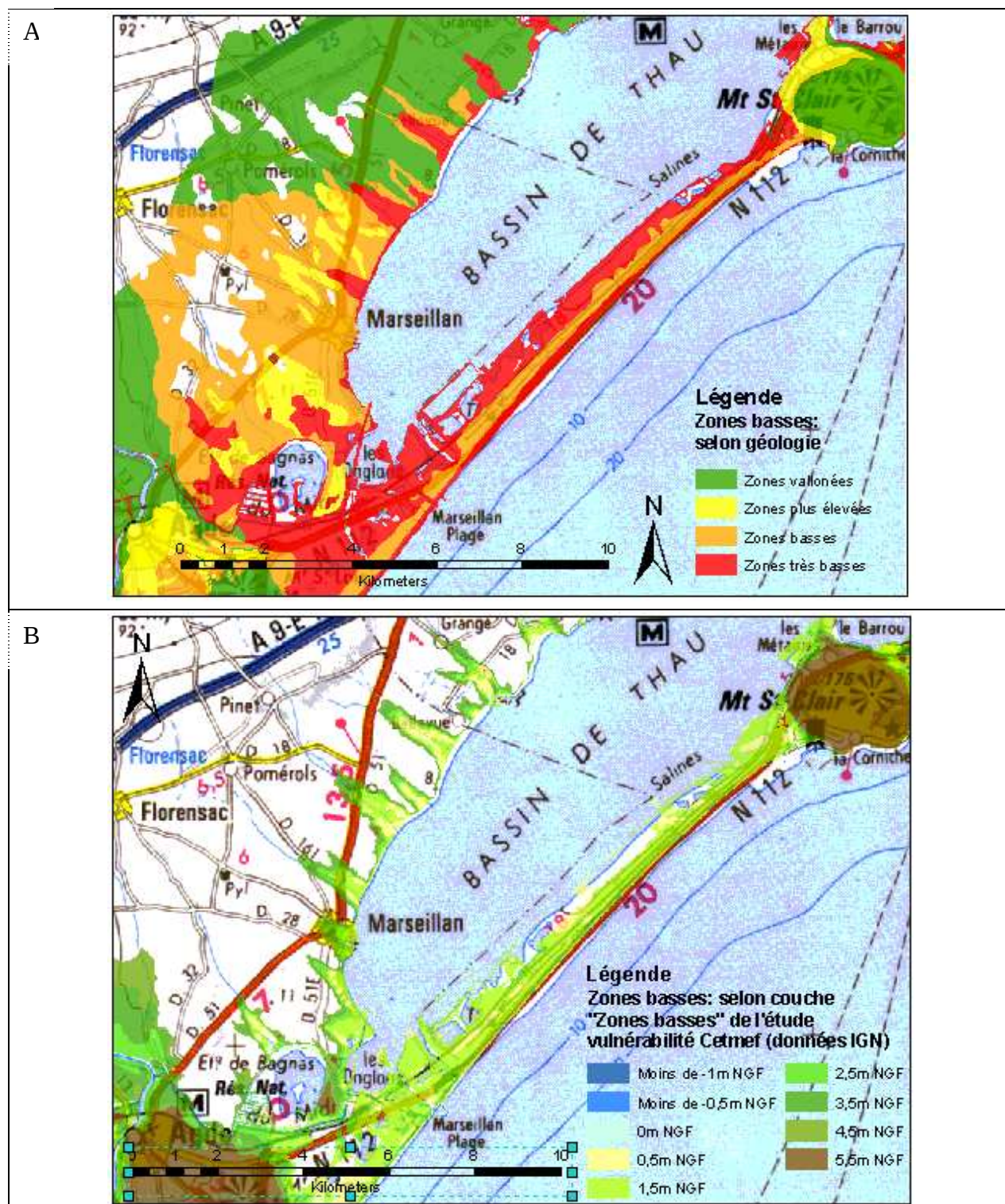


Figure 2: Zonage des zones basses réalisé à partir de la carte géologique (A) et de la carte topographique (B). (Données BRGM, CETMEF, IGN sur fond de carte IGN; réalisation BRGM⁵).

⁵ L'annexe 2 permet de reconstruire cette carte.

Une fois les zones basses caractérisées, le scénario tendanciel et le scénario avec élévation du niveau marin sont distingués de la manière suivante. Les zones situées sous le niveau NGF 1m sont considérées comme potentiellement affectées par un aléa de submersion côtière décennal alors que ceux situés entre 1m et 2m NGF sont considérés comme potentiellement affectés par un aléa de submersion côtière centennal. Ces valeurs sont valables en Méditerranée (DREAL Languedoc-Roussillon, voir Le Cozannet et al., 2009). Ces niveaux sont translatés vers le haut sous un scénario d'élévation du niveau de la mer. Les niveaux de zones plus ou moins basses retenus d'après la carte géologique permettent d'utiliser la même approche pour distinguer le scénario avec élévation du niveau marin par rapport au scénario tendanciel.

3.2.1.4. FACTEURS DE FORÇAGE ET DE CONTEXTE

Deux facteurs secondaires sont évalués : les facteurs de forçage et les facteurs de contexte. Ces facteurs viennent compléter les facteurs d'état en majorant l'indice de vulnérabilité de zones géographiques qui sont davantage exposées à un forçage marin ou pour lesquelles le contexte de morphodynamique sédimentaire est défavorable.

Ainsi, les facteurs de forçage sont construits de la manière suivante : l'indice de vulnérabilité physique des zones exposées aux vagues et aux tempêtes est majoré par rapport aux autres zones d'une part. D'autre part, il est augmenté également, de manière plus modérée, lorsque les entités sont proches d'étangs, de fleuves ou des rivières. Cette étape vise à majorer l'indice de vulnérabilité physique des zones exposées aux vagues et aux inondations des étangs, fleuves et rivières de la zone côtière⁶.

Les facteurs de contexte résultent ici d'une évaluation, par bassin versant, de la perturbation induite par les activités humaines sur la mobilité des sédiments. L'hypothèse sous-jacente est que des niveaux plus élevés d'urbanisation et d'usage des sols à des fins agricoles (Tableau 3) limitent la possibilité, pour les sédiments grossiers (sables), de migrer vers les zones en érosion et ainsi compenser, au moins partiellement, les pertes en charge solide. En effet, des hauts niveaux d'urbanisation se traduisent par des ouvrages hydrauliques multiples qui bloquent les mouvements de sédiments. De manière similaire, la mise en agriculture de zones

⁶ En pratique, cette étape est réalisée de la même manière que dans les étapes précédentes en créant trois zones : « zones les plus exposées aux effets des vagues » ; « zones les plus exposées à la submersion d'étangs » et « zones les moins exposées aux submersions ».

se traduit généralement dans un premier temps par un apport plus important de sédiments grossiers, puis dans un deuxième temps par des apports de sédiments fins et une réduction des apports de sables à l'estuaire (Paskof, 2001). La réduction des apports de sédiments grossiers à l'estuaire est ainsi un phénomène qui est observé en pratique, par exemple dans le cas du Rhône, et relié aux pressions anthropiques s'exerçant à l'échelle du bassin versant.

Le Tableau 3 est ainsi un indicateur de la disponibilité de sédiments grossiers par région hydrographique. La limite de cette approche est que les sédiments mobilisés par la suite par les processus côtiers ne sont pas pris en compte lorsqu'ils franchissent les régions hydrographiques. En pratique, le delta du Rhône est ici le bassin le plus touché, en cohérence avec la réduction des apports de sédiments grossiers constatée.

Bassin versant	Surface totale du bassin versant (km ²)	Surfaces urbanisées (km ²)	Pourcentage de surfaces urbanisées	Surfaces agricoles (km ²)	Pourcentage de surfaces agricoles
Rhône (Hors Suisse)	90 600	4 470	4,9%	36 300	40,1%
Côtiers de l'Aude à L'Hérault inclus	4 420	160	3,7%	1 530	34,7%
Côtiers de la frontière espagnole - l'Aude et el Segre (bassin français)	5 220	240	4,6%	1 430	27,3%
L'Aude de sa source à la Méditerranée	5 350	130	2,5%	2 600	48,6%
Côtiers de L'Hérault au petit Rhône	3 130	380	12,0%	1 420	45,3%

Tableau 3: Usage des sols à des fins agricoles ou urbaines sur les régions hydrographiques considérées

3.2.1.5. RESULTAT OBTENU A L'ISSUE DU ZONAGE DETAILLE

A l'issue de cette étape, la zone côtière définie précédemment est divisée en zones homogènes sur le plan morphodynamique. Ainsi, chaque zone est construite de telle sorte qu'elle n'ait qu'une unique combinaison d'attributs qui lui soit propre (par exemple en termes d'érodabilité, d'altitude, etc...). Ceci est effectué en intersectant toutes les couches géographiques construites pour chacun des critères : ainsi, si une zone « potentiellement érodée en 2070) comprend une partie « très érodable » et une partie « très peu érodable », elle est coupée en deux. In fine, ces découpages successifs font que l'analyse porte sur près de 50,000 entités. Ce zonage préliminaire a été effectué en mettant en place une chaîne de

traitement de l'information géographique utilisant le « model builder » d'ArcGIS et des scripts VBA.

3.2.2. MODELISATION CONCEPTUELLE DE MANIERE HIERARCHIQUE ET SYNTHESE DU JUGEMENT

Dans cette étape, nous utilisons les entités géographiques et les indicateurs de base définis ci-dessus pour les intégrer et les agréger dans un arbre hiérarchique. Nous présentons comment cet arbre hiérarchique et la pondération des différents critères ont été définis.

L'arbre hiérarchique a pour objet d'ordonner une série de critères qui contribuent à la note de vulnérabilité finale de chaque entité. Comme cela a été indiqué, trois types de facteurs sont pris en compte : les facteurs de forçage, les facteurs d'état et les facteurs de contexte. Les paragraphes ci-dessous expliquent comment les différents facteurs et critères détaillés dans le paragraphe précédent sont ordonnés dans l'arbre hiérarchique et leur pondération pour obtenir l'évaluation finale de l'indice synthétique de vulnérabilité.

Pour chacun de ces facteurs, la pondération est définie en se référant à l'échelle numérique de Saaty (Tableau 1).

3.2.2.1. FACTEURS DE FORÇAGE

L'arbre hiérarchique correspondant aux facteurs de forçage a pour but de majorer l'indice de vulnérabilité des zones basses exposées aux vagues, puis en second lieu celles exposées à des submersions par les étangs.

En cohérence avec les recommandations du projet Eurosion (2004), nous avons considéré que les forçages côtiers pouvaient s'exercer de manière aussi intense en n'importe quel endroit de la côte, sur une largeur de 500m au maximum et seulement pour les zones érodables ou basses. Nous avons également considéré une bande de 500m autour des étangs et des fleuves côtiers.

D'une manière simplifiée, cela se traduit par l'arbre hiérarchique ci-dessous (Figure 3).

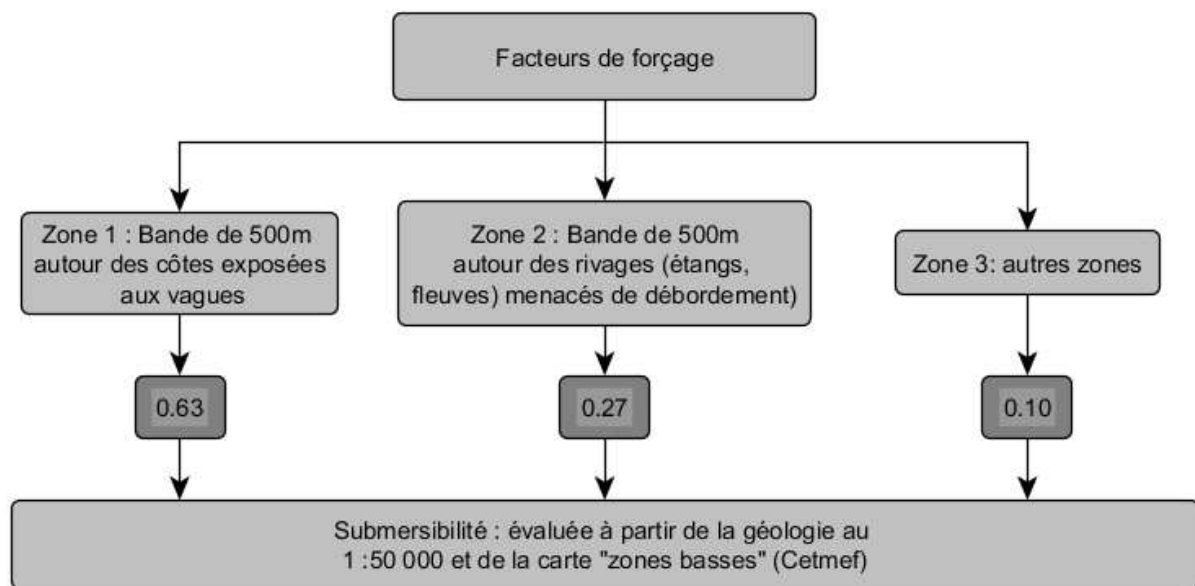


Figure 3: Arbre hiérarchique simplifié correspondant aux facteurs de forçage.

L'arbre hiérarchique détaillé qui a été utilisé dans le modèle est présenté dans la Figure 4. Il répond à la demande de considérer 2 scénarios : (i) tendanciel et (ii) avec élévation du niveau marin. Cet arbre duplique la même structure (issue de la Figure 3), pour distinguer deux cas : avec (sous-arbre 1) ou sans (sous-arbre 2) élévation du niveau marin. Pour l'évaluation avec élévation du niveau marin par exemple, nous utilisons les pondérations issues de l'échelle numérique de Saaty pour conférer au sous-arbre 2 la pondération la plus importante (différence d'importance évidente). Ceci permet notamment d'utiliser le même arbre hiérarchique (avec des pondérations différentes) dans les deux scénarios tout en suivant la logique de l'approche générale. Ceci permet aussi d'introduire un certain niveau d'incertitude dans le zonage des facteurs de forçage.

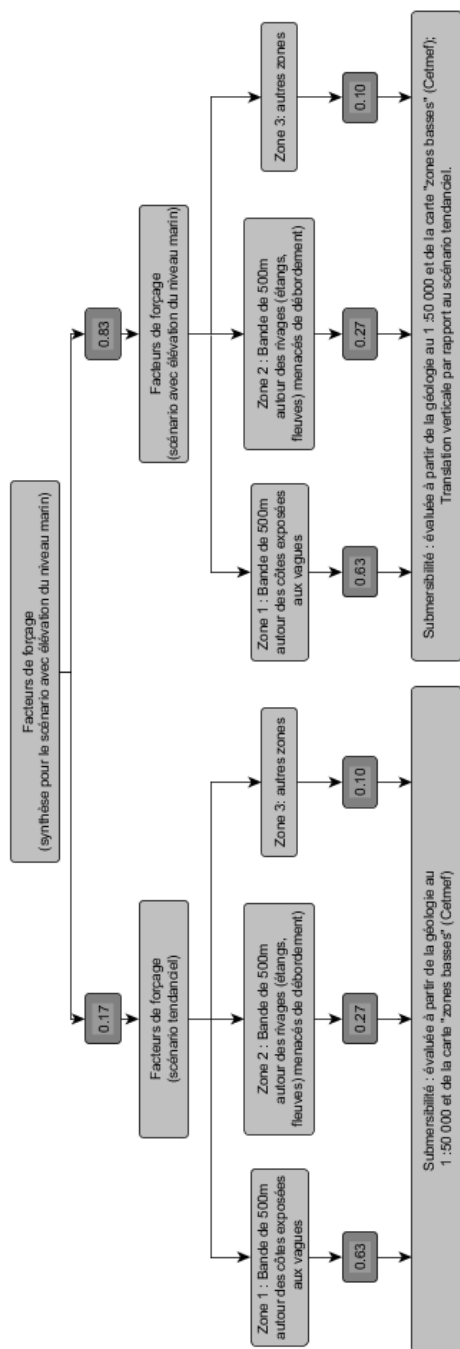


Figure 4: Arbre hiérarchique détaillé correspondant aux facteurs de forçage dans le cas du scénario avec élévation du niveau marin).

3.2.2.2. FACTEURS D'ETAT

Nous utilisons ici les zonages géomorphologiques, géologiques de la submersibilité décrits dans la partie 3.2.1.3. Les indicateurs issus de ce zonage sont ordonnés et pondérés de la

manière décrite dans les Figure 5 (Scénario tendanciel) et Figure 6 (Scénario avec élévation du niveau marin).

Les deux arbres présentés ci-dessous agrègent donc l'information de la manière suivante :

- Dans le scénario tendanciel, les facteurs d'état dépendent en premier lieu de la submersibilité tendancielle et de la morphodynamique tendancielle
- Dans le scénario avec élévation du niveau marin, les facteurs d'état dépendent en premier lieu de la submersibilité et de la morphodynamique prenant en compte l'élévation du niveau marin

Dans les deux cas, il est imposé une grande différence d'importance, basée sur le jugement et l'expérience de l'expert.

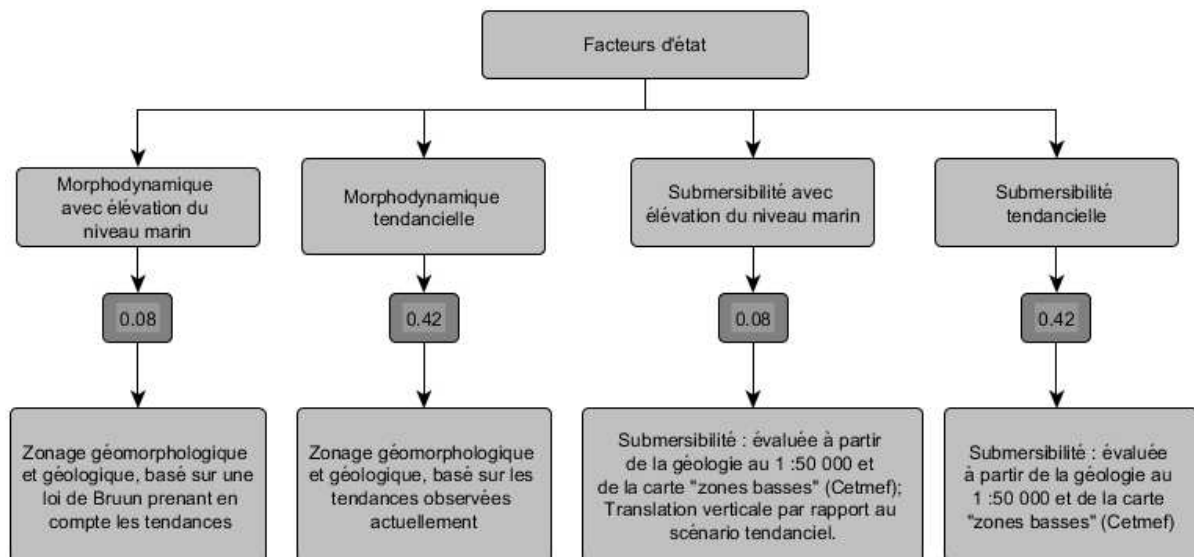


Figure 5: Arbre hiérarchique pour l'évaluation des facteurs d'état : scénario tendanciel.

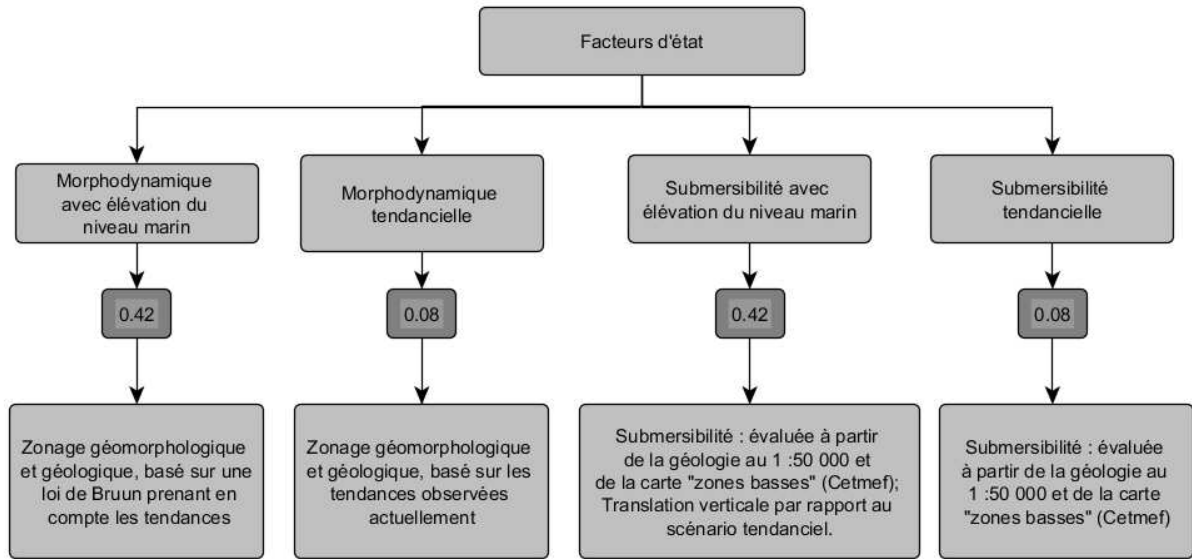


Figure 6: Arbre hiérarchique pour l'évaluation des facteurs d'état : scénario avec élévation du niveau marin.

3.2.2.3. FACTEURS DE CONTEXTE

Il s'agit ici d'évaluer dans quelle mesure le contexte du voisinage de chaque zone influence son devenir morphodynamique. Ceci est effectué à l'échelle des bassins versants de la zone d'étude comme exposé en 3.2.1.4. Les critères choisis pouvant s'exprimer de manière quantitative, l'importance relative que prend chacune des régions hydrologiques s'effectue simplement par calcul de la proportion. Les résultats par bassin versant sont ensuite croisés avec le critère d'érodabilité issu de la couche géologie (Figure 7).

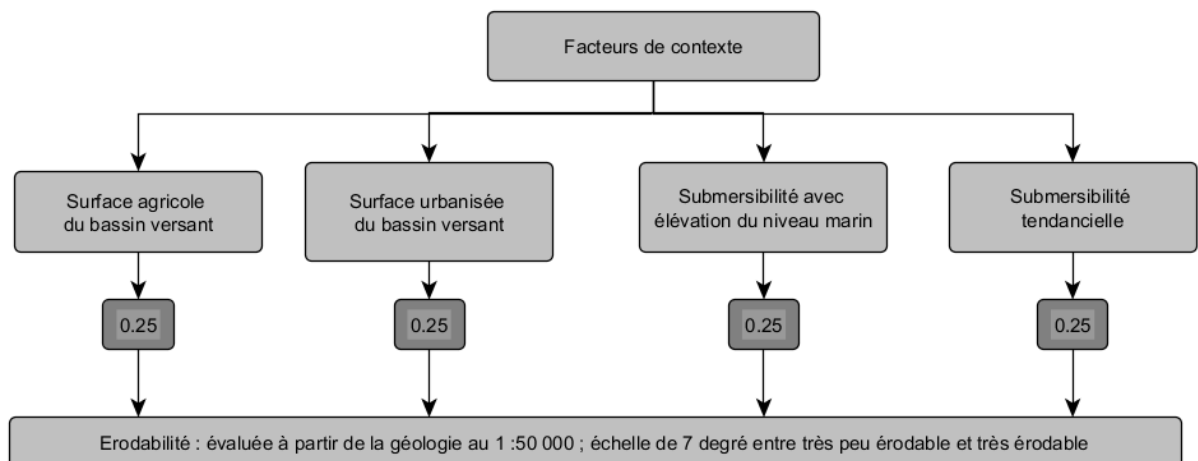


Figure 7: .Arbre hiérarchique pour l'évaluation des facteurs de contexte

3.2.2.4. SYNTHESE DU JUGEMENT : INDICE DE VULNERABILITE PHYSIQUE

Les trois facteurs d'état, de forçage et de contexte sont agrégés pour obtenir la « synthèse du jugement », c'est-à-dire une note finale de vulnérabilité physique.

Le groupe de travail mobilisé pour l'étude a considéré que les facteurs d'état revêtaient une importance relative légèrement plus grande (faible différence d'importance basée sur l'expérience et le jugement d'expert) que les autres facteurs. En utilisant la table de correspondance entre niveaux qualitatifs et quantitatifs (Tableau 1), ceci se traduit par l'arbre hiérarchique et les pondérations présentées ci-dessous (Figure 8).

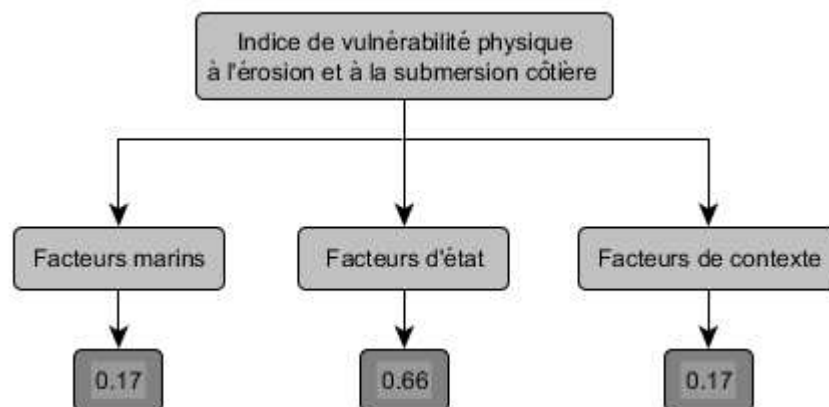


Figure 8: Arbre hiérarchique de synthèse

Les différents poids accordés à chacune des entités pour chacun des indicateurs sont calculés en utilisant les pondérations de l'arbre hiérarchique. A l'issue de ce traitement, deux classements sont ainsi disponibles : celui correspondant au scénario tendanciel et celui correspondant au scénario avec élévation du niveau marin.

3.2.3. IMPLICATION DU GROUPE DE TRAVAIL

D'une manière générale, les cartes de vulnérabilité physique ne peuvent pas être validées stricto-sensu: elles représentent l'état actuel des connaissances, et sont considérées comme valables et validées lorsqu'elles satisfont ceux qui les ont produites et les experts ayant une bonne connaissance du terrain. Pour cette raison, il est nécessaire de souligner que de telles

cartes peuvent être améliorées en permanence : par exemple, lorsqu'un nouvel ensemble de données est produit, lorsque les processus sous-jacents sont mieux modélisés ou compris, ou bien lorsque les observations ont montré que la vulnérabilité a été sur- ou sous-estimée. Une étape importante de la cartographie de la vulnérabilité physique est donc l'examen critique des résultats par des experts.

Pour la carte présentée ici, nous avons fait appel à un groupe de travail pour examiner les cartes de vulnérabilité physique. Ses membres ont été invités à commenter le résultat final et à expliquer dans quels cas ils trouvent de la vulnérabilité physique est sur ou sous-estimée. Cette étape a permis d'améliorer la cartographie finale, par exemple en modifiant les scores affectés à certaines formations géologiques. Le compte rendu de la réunion de ce groupe de travail est donné en annexe 1.

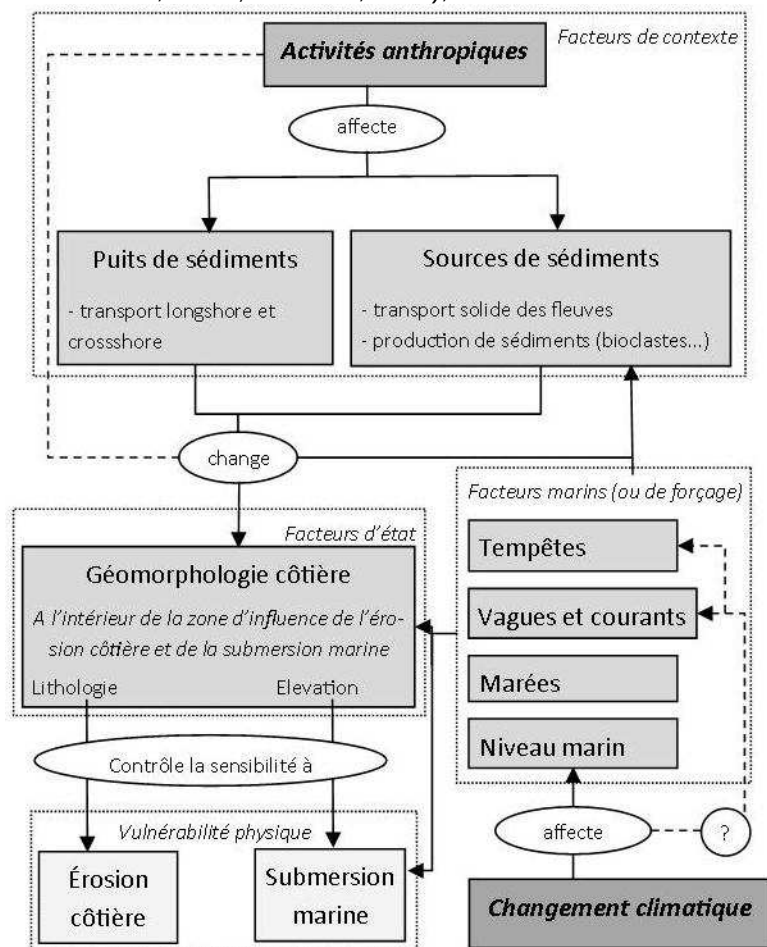


QUESTIONS-REponses SUR LA METHODE UTILISEE :

Comment se justifient les critères utilisés pour la méthode AHP à l'échelle nationale et à l'échelle des zooms (zoom Languedoc et zoom La Réunion) ?

La figure ci-dessous présente schématiquement les relations entre les différents facteurs et processus contrôlant la vulnérabilité physique du littoral. Ces critères sont donc choisis car ce sont ceux qui expliquent la mobilité du trait de côte aux échelles de temps pluri-décennales.

Ils peuvent être évalués ou approchés à l'aide d'une donnée existante : par exemple, la sensibilité à l'érosion de la lithologie peut être évaluée à partir d'une carte lithologique ou géologique, avec l'aide d'un géologue spécialiste des formations récentes. Dans certains cas (effets des activités anthropiques sur la géomorphologie côtière, via des terrassements par exemple), les changements ne sont pas pris en compte car non prédictibles. Notons que dans des études précédentes (Exemple : Gornitz et al., 1991 ; EuroSION, 2004), les critères choisis étaient similaires.



Pourquoi travailler sur l'évaluation d'une vulnérabilité physique et non pas sur l'évaluation de deux aléas (érosion et submersion) ?

Les méthodes consistant à évaluer séparément l'aléa submersion puis l'aléa érosion donnent des résultats incertains (Voir Yates et al., 2011). In-fine, elles ne permettent pas de savoir si telle zone sera effectivement affectée ou non par une érosion ou une submersion aggravée avec un degré de confiance suffisant, ce qui limite la capacité de ces méthodes à fournir une aide à la décision. On note également que les processus d'érosion et de submersion interagissent aux échelles de temps pluri-décennales : par exemple, si la bathymétrie proche se creuse, les caractéristiques des vagues à la côte seront différentes, modifiant ainsi l'aléa submersion.

Dans l'étude Explore 2070, le Lot 6 a fourni une base de données SIG répondant à la question : **« quelle sont les zones côtières les plus sûres (ou les plus dangereuses) au regard de l'aggravation des aléas côtiers érosion et submersion d'ici à 2070 ? »**. Contrairement aux approches dans lesquelles on essaie d'évaluer de manière très déterministe chacun des aléas, notre approche se propose ainsi d'évaluer à long terme la vulnérabilité physique des zones côtières à l'érosion et la submersion. "La vulnérabilité physique" signifie ici la «sensibilité de l'environnement physique, des zones côtières elles-mêmes", à des risques d'érosion et de submersion dans le contexte du changement climatique (voir Romieu et al., 2010).

Que représente le classement final ?

Le classement final représente l'importance de la vulnérabilité de chaque entité relativement à toutes les autres. Ainsi, dans le cas des « Zooms », si 3 entités obtiennent les scores 0.1, 0.4 et 0.5, la plus vulnérable sera la 3^{ème}, suivi de la 2^{ème}, puis de la 1^{ère}. On pourra dire également que la vulnérabilité de la 2^{ème} et de la 3^{ème} entité sont relativement proches. Conséquence pratique : dans le cas où l'on souhaite construire une infrastructure de durée de vie longue pour laquelle on souhaite qu'elle soit le plus épargnée possible des aléas érosion et submersion, il sera préférable de l'installer dans l'entité 1. Cependant, une autre entité pourra être préférée si par exemple, pour des raisons économiques, on souhaite que l'infrastructure soit plus accessible. Dans ce cas, les coûts de l'adaptation de l'infrastructure à l'aggravation des aléas érosion et submersion pourront être évalués dans le cadre d'une analyse coûts-avantages.

4. RESULTATS

Ce chapitre présente les résultats obtenus : la base de données livrée et sa structure, puis une représentation cartographique des classements effectués.

4.1. STRUCTURE DE LA BASE DE DONNEES SIG LIVREE

La base de données livrée comprend 51620 entités géographiques classées selon les deux scénarios. La table attributaire comprend les champs suivants :

- FID : numéro de l'entité ;
- SHAPE : géométrie de l'entité (Polygone) ;
- AHP_Tr : Index de vulnérabilité physique obtenu dans le scénario tendanciel. La somme des 51620 index de vulnérabilité physique est de 10^5 ⁽⁷⁾ ;
- AHP_NM : Index de vulnérabilité physique obtenu dans le scénario avec élévation du niveau marin. La somme des 51620 index de vulnérabilité physique est de 10^5 ;
- RG_Tr : rang de l'entité (compris entre 1 et 51620) à l'issue du classement dans le scénario tendanciel ;
- RG_NM : rang de l'entité (compris entre 1 et 51620) à l'issue du classement dans le scénario avec élévation du niveau marin ;
- ECART : présente, pour chaque entité, l'écart de classement entre les deux scénarios. Il est égal à la différence RG_Tr-RG_NM divisée par 100x51620 ($ECART = (RG_Tr - RG_NM) / (100 \times 51620)$).

Les données peuvent être représentées aux échelles comprises entre 1 :250 000 et 1 :100 000.

⁷ Le fait de mettre en facteur 10^5 permet de limiter la taille de la base de données.

4.2. REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE DES CLASSEMENTS EFFECTUES

Les cartes présentées ci-après représentent les 40620 entités les plus vulnérables. Un examen des résultats permet en effet de constater que la vulnérabilité physique à l'érosion et à la submersion marine des 11000 dernières entités du classement est négligeable.

4.2.1. SCENARIO TENDANCIEL

Ce paragraphe montre les cartes (Figure 9, Figure 10, Figure 11, Figure 12 et Figure 13) représentant l'indice synthétique de vulnérabilité dans le scénario tendanciel, sur l'ensemble du littoral du Languedoc-Roussillon, de la Camargue aux Pyrénées.

4.2.1.1. DU DELTA DU RHONE (PARTIE REGION LANGUEDOC-ROUSSILLON) A PALAVAS-LES-
FLOTS

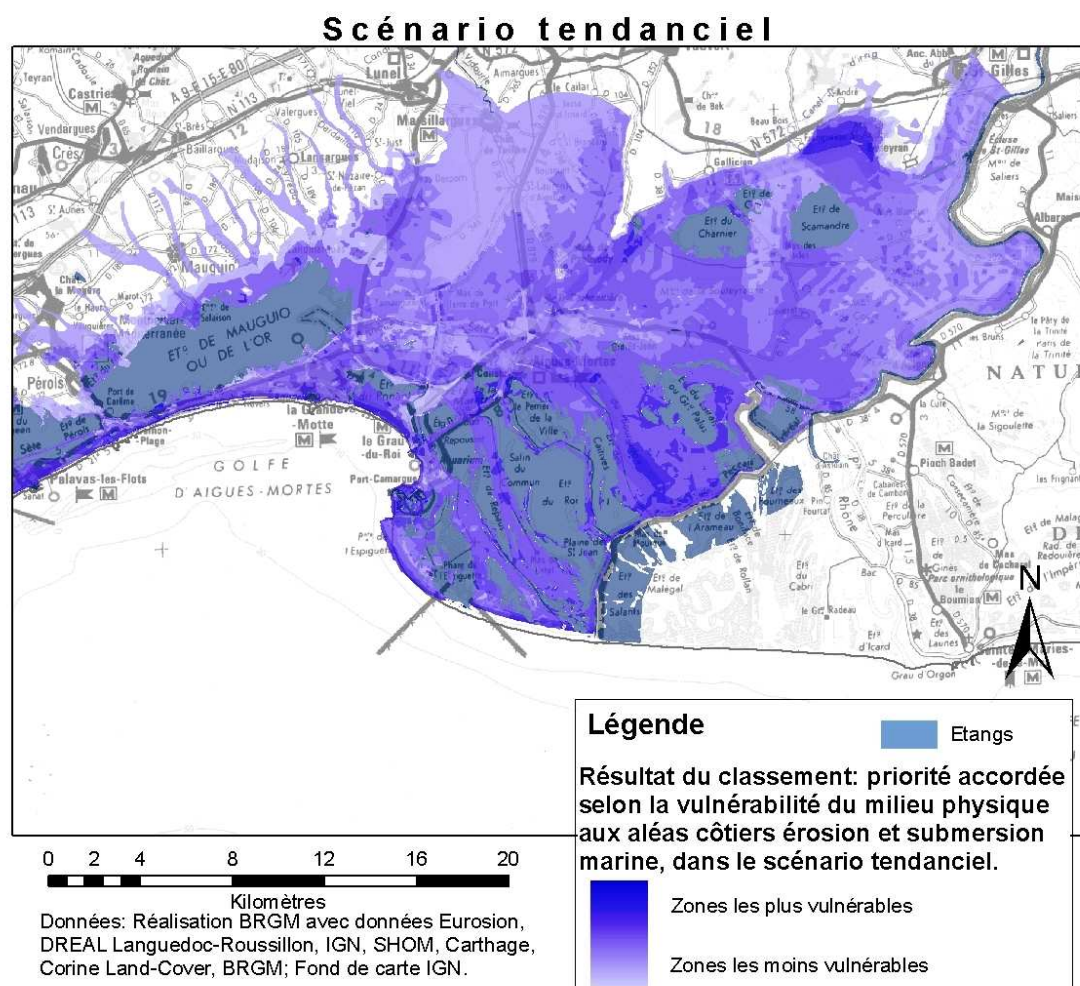


Figure 9: Représentation du classement obtenu pour la vulnérabilité physique de la zone côtière de la région Languedoc-Roussillon (Du delta du Rhône (Partie Région Languedoc-Roussillon) à Palavas-les-Flots), en 2070 sous une hypothèse tendancielle, sans élévation du niveau marin.

4.2.1.2. DE PALAVAS-LES-FLOTS AU CAP D'AGDE

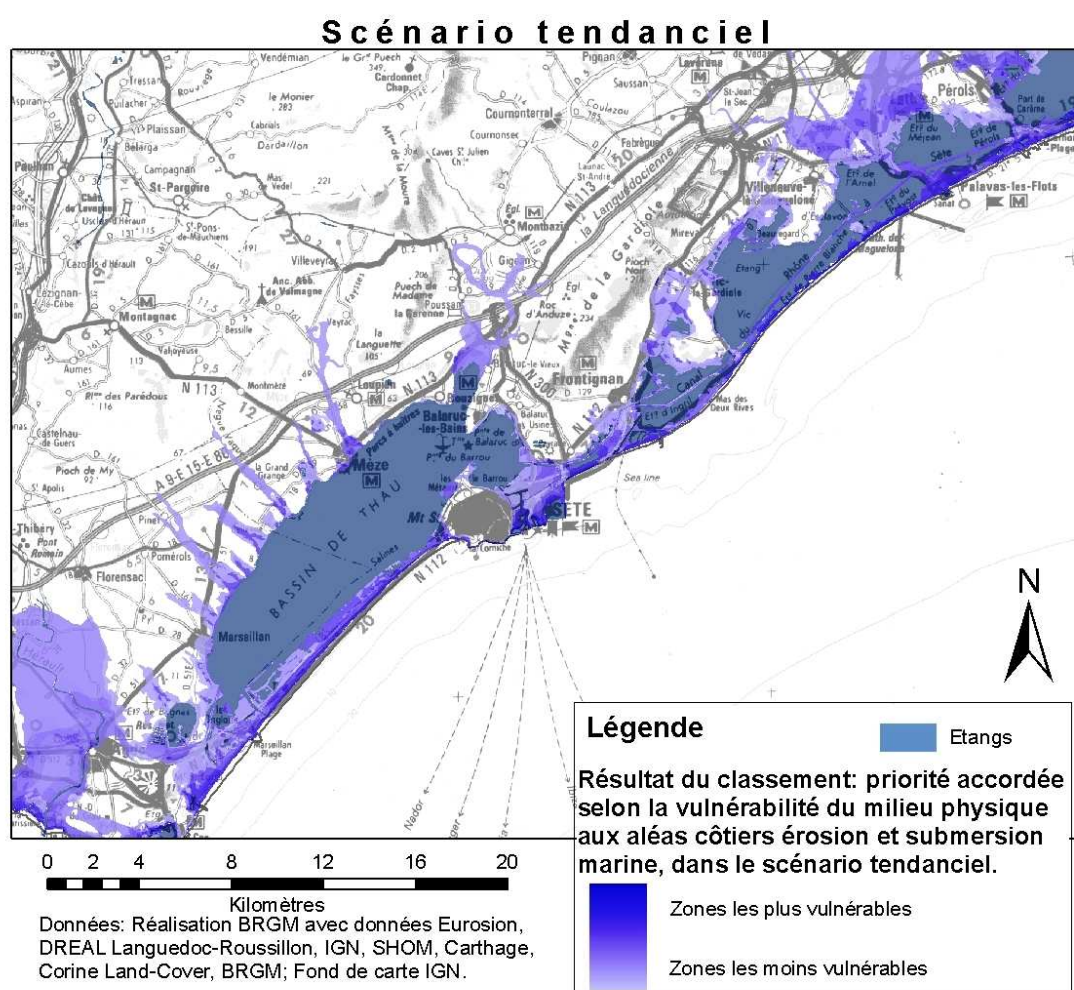


Figure 10: Représentation du classement obtenu pour la vulnérabilité physique de la zone côtière de la région Languedoc-Roussillon (De Palavas-Les-Flots au Cap d'Agde), en 2070 sous une hypothèse tendancielle, sans élévation du niveau marin.

4.2.1.3. DU CAP D'AGDE A PORT-LA-NOUVELLE

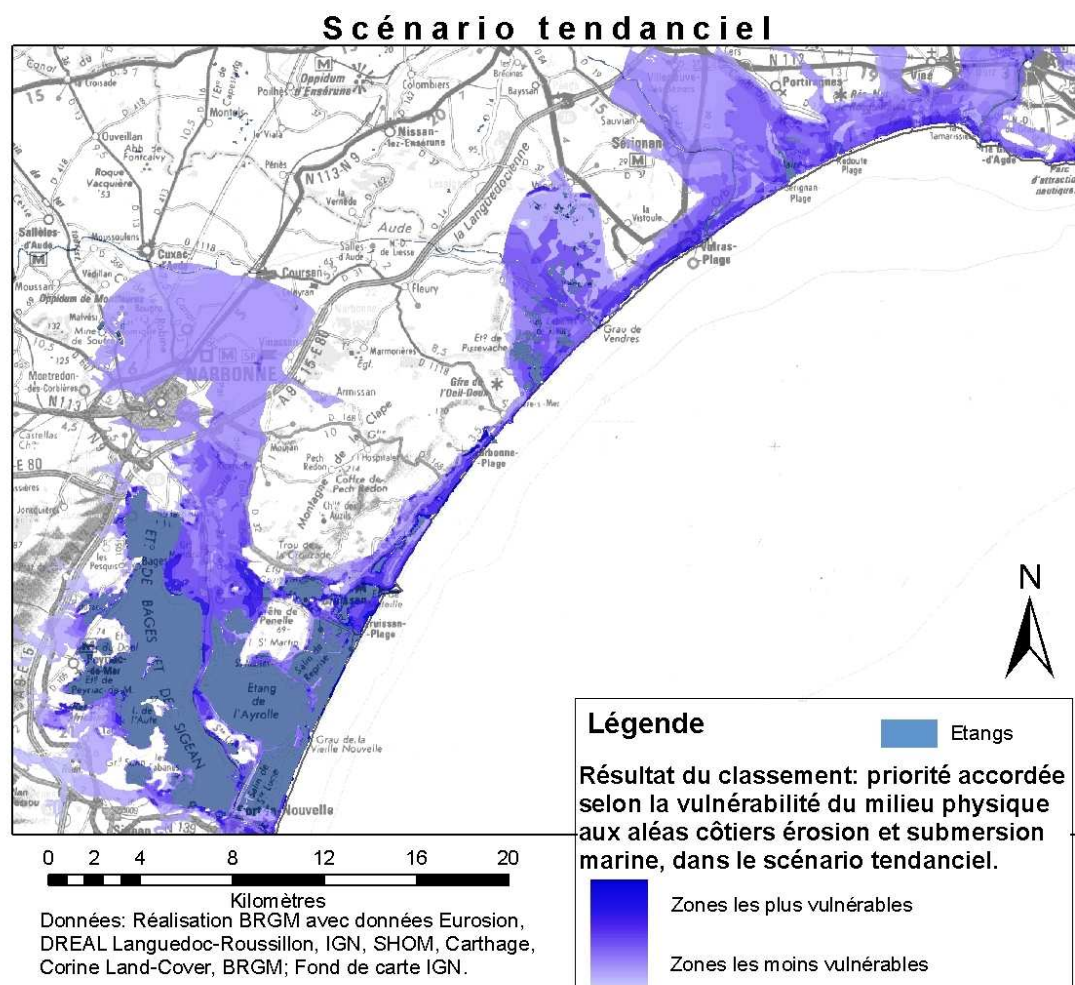


Figure 11: Représentation du classement obtenu pour la vulnérabilité physique de la zone côtière de la région Languedoc-Roussillon (Du Cap d'Agde à Port-La-Nouvelle), en 2070 sous une hypothèse tendancielle, sans élévation du niveau marin.

4.2.1.4. DE PORT-LA-NOUVELLE A BARCARES

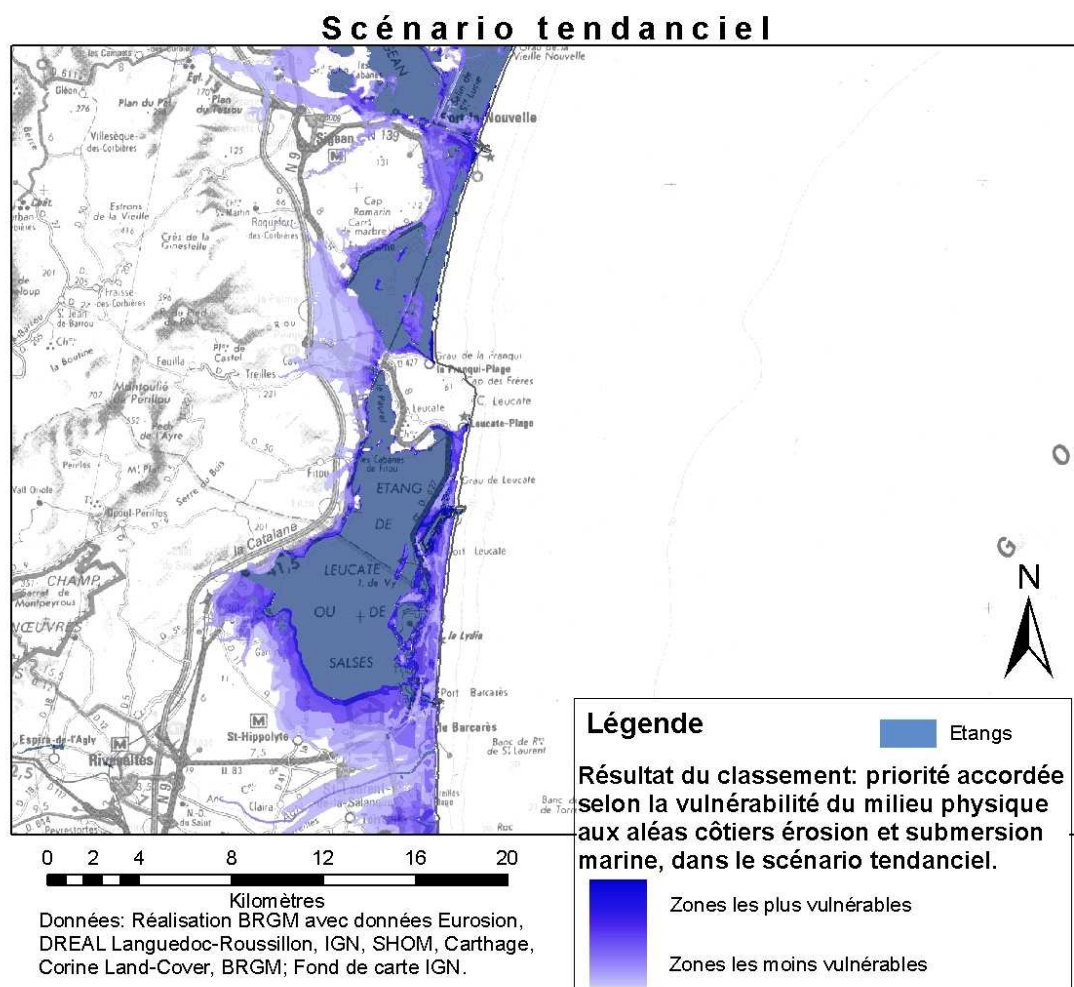


Figure 12: Représentation du classement obtenu pour la vulnérabilité physique de la zone côtière de la région Languedoc-Roussillon (De Port-La-Nouvelle à Barcarès), en 2070 sous une hypothèse tendancielle, sans élévation du niveau marin.

4.2.1.5. DE BARCARES A LA FRONTIERE ESPAGNOLE

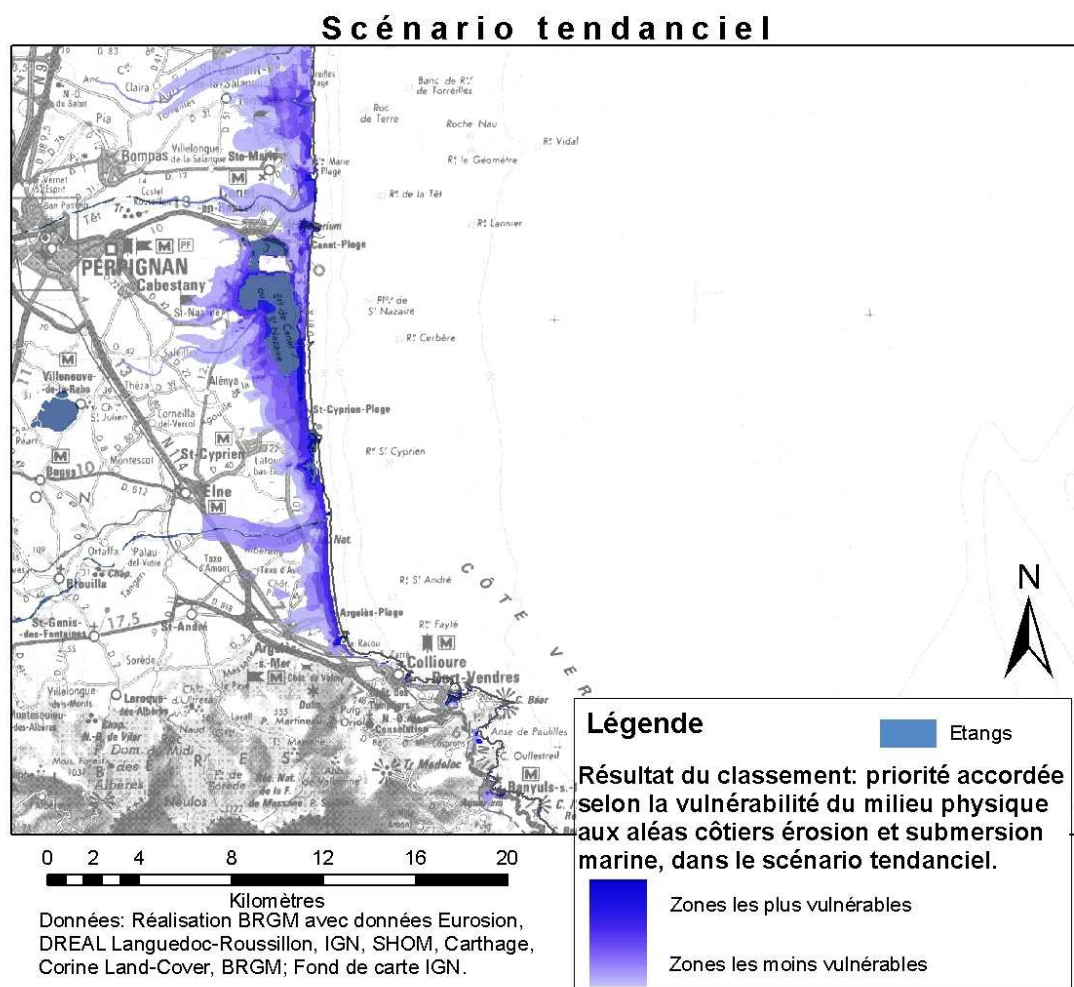


Figure 13: Représentation du classement obtenu pour la vulnérabilité physique de la zone côtière de la région Languedoc-Roussillon (De Barcarès à la Frontière espagnole), en 2070 sous une hypothèse tendancielle, sans élévation du niveau marin.

4.2.2. SCENARIO AVEC ELEVATION DU NIVEAU MARIN

Ce paragraphe montre les cartes (Figure 14, Figure 15, Figure 16, Figure 17 et Figure 18) représentant l'indice synthétique de vulnérabilité dans le scénario avec élévation du niveau marin.

4.2.2.1. DU DELTA DU RHONE (PARTIE REGION LANGUEDOC-ROUSSILLON) A PALAVAS-LES- FLOTS

Scénario: avec 1m d'élévation du niveau marin

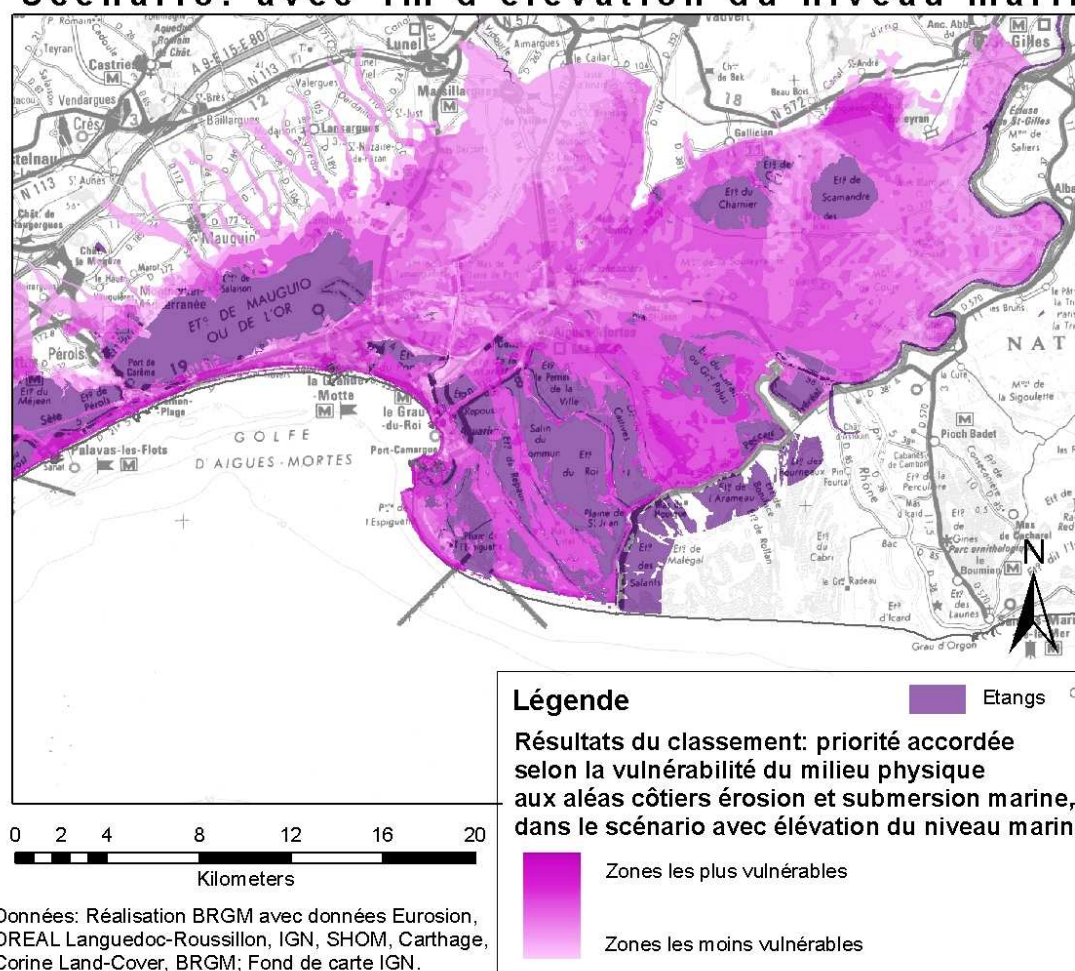


Figure 14: Représentation du classement obtenu pour la vulnérabilité physique de la zone côtière de la région Languedoc-Roussillon (Du delta du Rhône (Partie Région Languedoc-Roussillon) à Palavas-les-Flots), en 2070 sous une hypothèse de 1m d'élévation du niveau marin.

4.2.2.2. DE PALAVAS-LES-FLOTS AU CAP D'AGDE

Scénario: avec 1m d'élévation du niveau marin

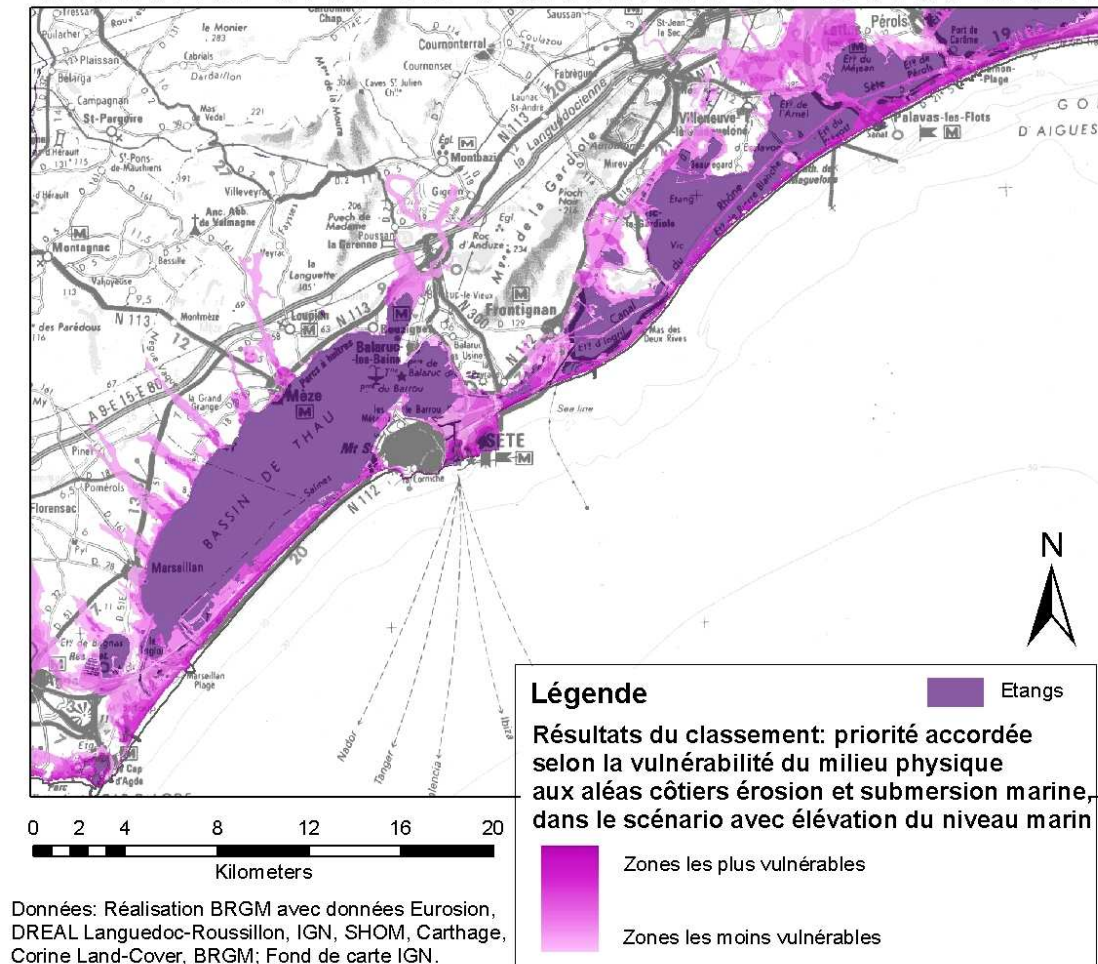


Figure 15: Représentation du classement obtenu pour la vulnérabilité physique de la zone côtière de la région Languedoc-Roussillon (De Palavas-Les-Flots au Cap d'Agde), en 2070 sous une hypothèse de 1m d'élévation du niveau marin.

4.2.2.3. DU CAP D'AGDE A PORT-LA-NOUVELLE

Scénario: avec 1m d'élévation du niveau marin

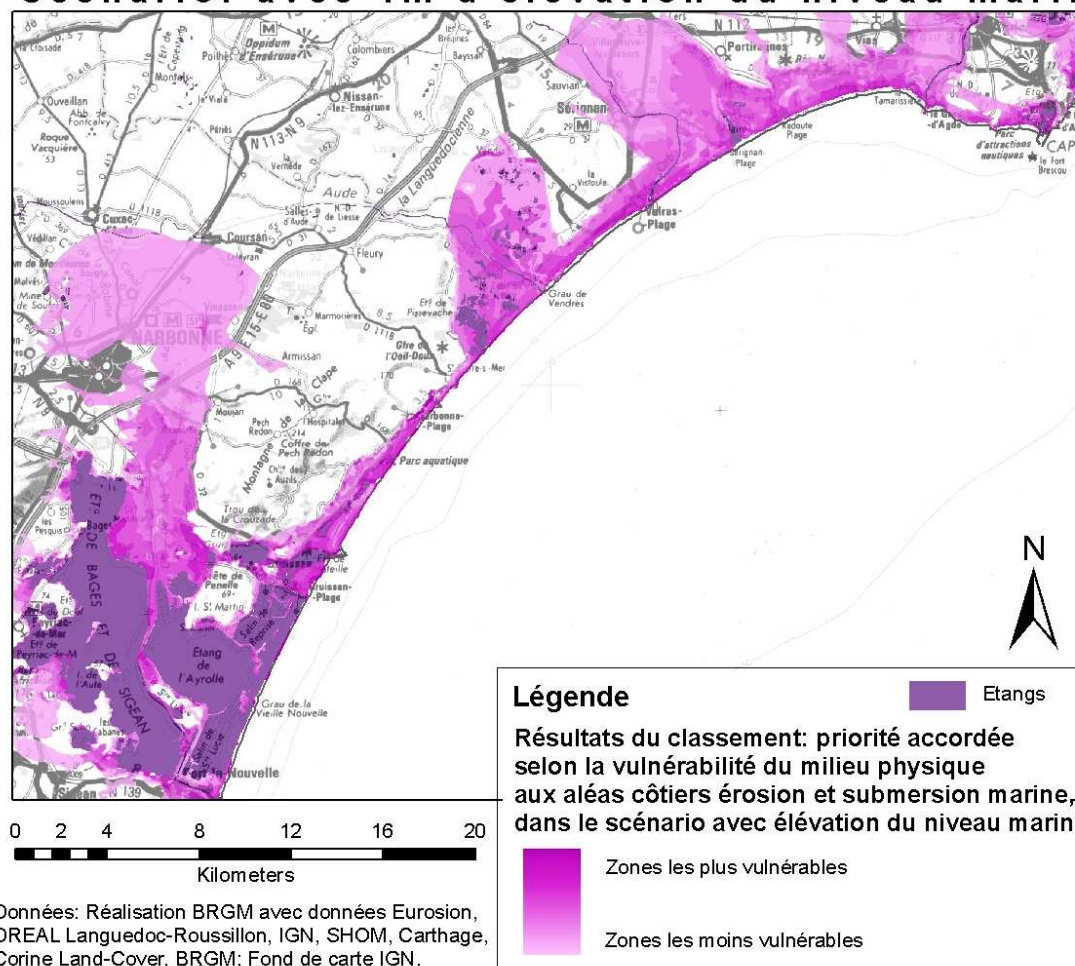


Figure 16: Représentation du classement obtenu pour la vulnérabilité physique de la zone côtière de la région Languedoc-Roussillon (Du Cap d'Agde à Port-La-Nouvelle), en 2070 sous une hypothèse de 1m d'élévation du niveau marin.

4.2.2.4. DE PORT-LA-NOUVELLE A BARCARES

Scénario: avec 1m d'élévation du niveau marin

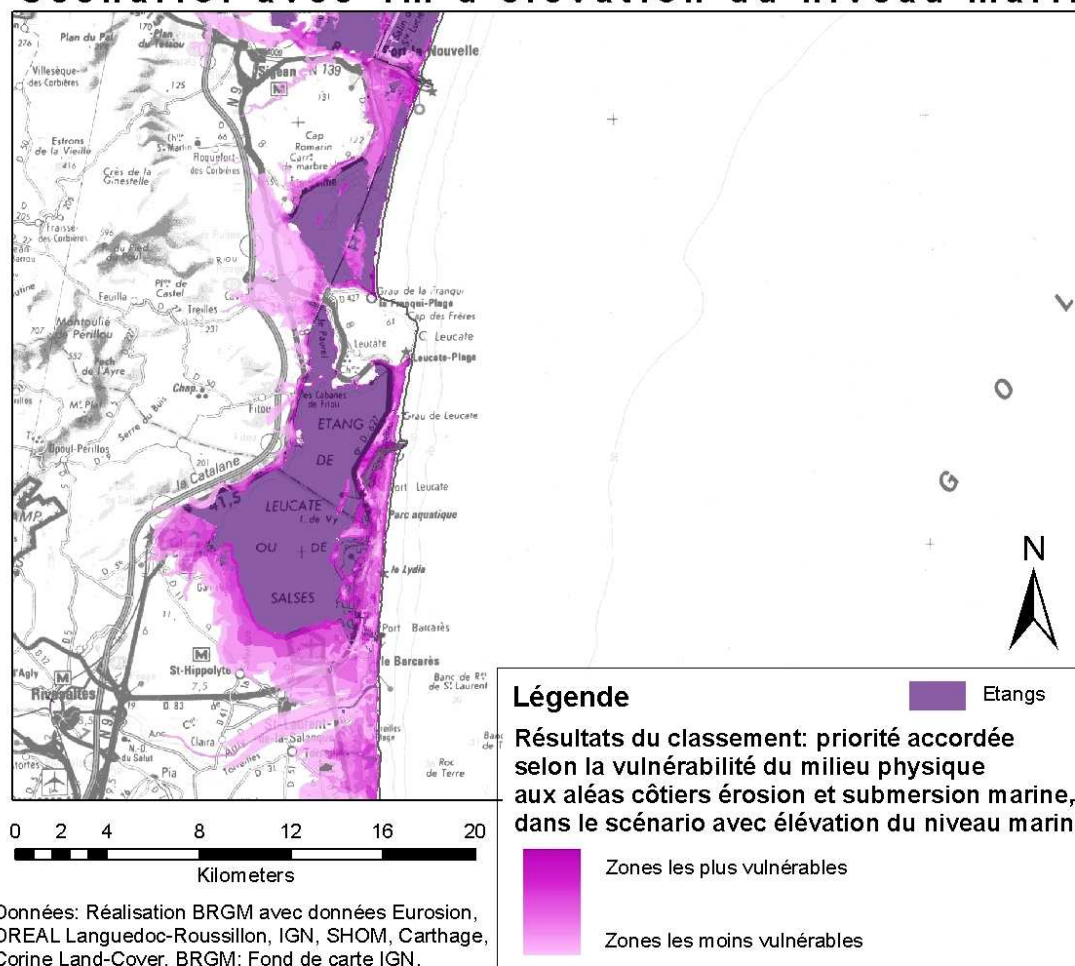


Figure 17: Représentation du classement obtenu pour la vulnérabilité physique de la zone côtière de la région Languedoc-Roussillon (De Port-La-Nouvelle à Barcarès), en 2070 sous une hypothèse de 1m d'élévation du niveau marin.

4.2.2.5. DE BARCARES A LA FRONTIERE ESPAGNOLE

Scénario: avec 1m d'élévation du niveau marin

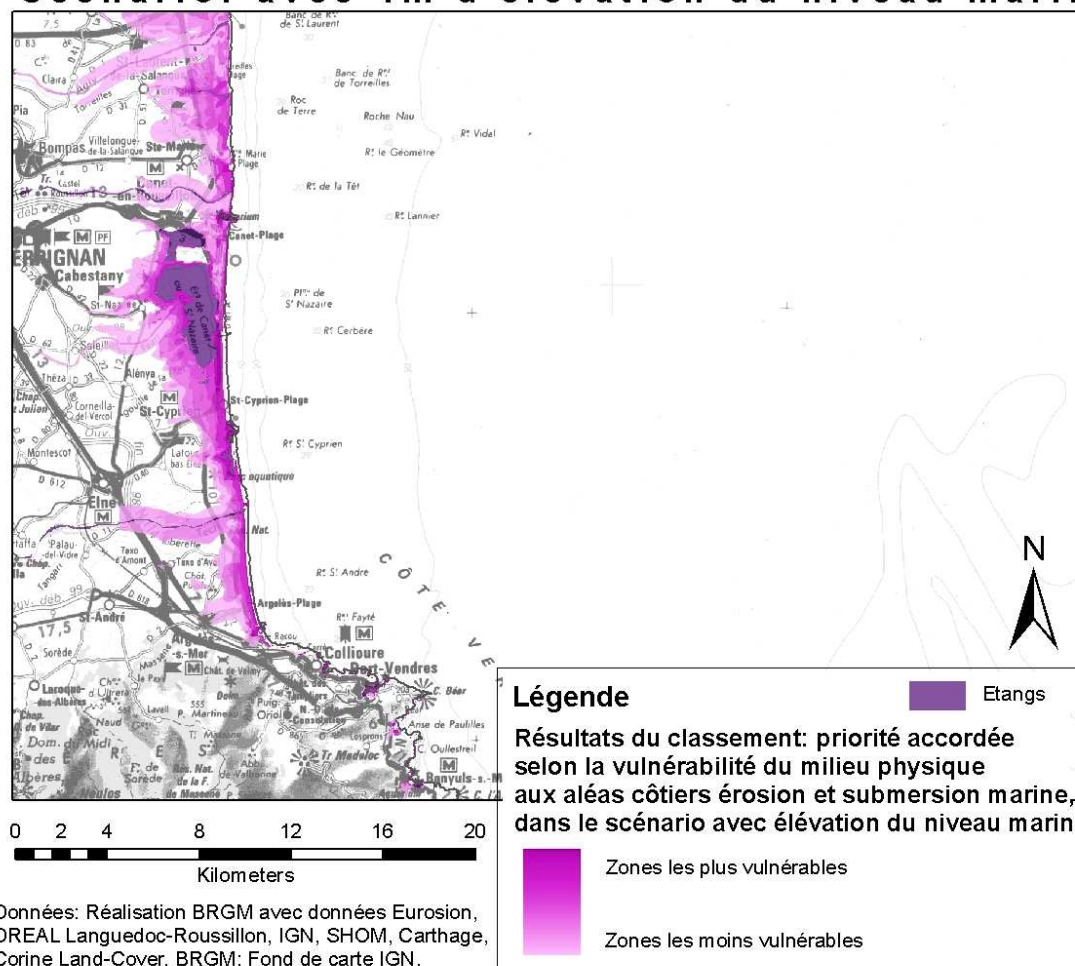


Figure 18: Représentation du classement obtenu pour la vulnérabilité physique de la zone côtière de la région Languedoc-Roussillon (De Barcarès à la Frontière espagnole), en 2070 sous une hypothèse de 1m d'élévation du niveau marin.

4.2.3. DIFFERENCES ENTRE LES SCENARIOS

Ce paragraphe présente des cartes représentant des écarts de classement entre les deux scénarios.

Compte tenu du nombre d'entités (51620) et si l'on classe les entités par ordre décroissant de vulnérabilité (la plus vulnérable occupe le rang n°1, la moins vulnérable le rang n°51620), il est possible de ranger les entités par centiles. Le centile des entités les plus vulnérables (le 1^{er}) regroupe les entités des rangs n°1 à n°516 (1% des entités) ; le 2^{ème} centile, des rangs n°517 à n°1032, et ainsi de suite. La restitution des écarts entre les scénarios pour chaque entité est faite en référence au centile auquel appartient l'entité dans le scénario tendanciel et au centile auquel appartient la même entité dans le scénario avec élévation du niveau de la mer.

Par exemple, pour un écart de un centile, le rang de l'entité considérée est avancé de 1%, soit de 516 places (elle passe du n^{ème} centile au n-1^{ème} centile). Cette valeur permet d'identifier les entités pour lesquelles la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer fait remonter l'entité dans la hiérarchie des entités les plus vulnérables. Cet écart peut mesurer aussi l'effet inverse.

Ce paragraphe montre les cartes de ces écarts (Figure 19, Figure 20, Figure 21, Figure 22 et Figure 23). Dans ces cartes :

- une avancée de 1 décile (1/10) correspond à une remontée de 10 centiles, soit 5162 places.
- une avancée de 1 vingtile (1/20) correspond à une remontée de 5 centiles soit 2580 places.
- une avancée de 1 cinquantile (1/50) correspond à une remontée de 2 centiles soit 1032 places.

4.2.3.1. DU DELTA DU RHONE (PARTIE REGION LANGUEDOC-ROUSSILLON) A PALAVAS-LES- FLOTS

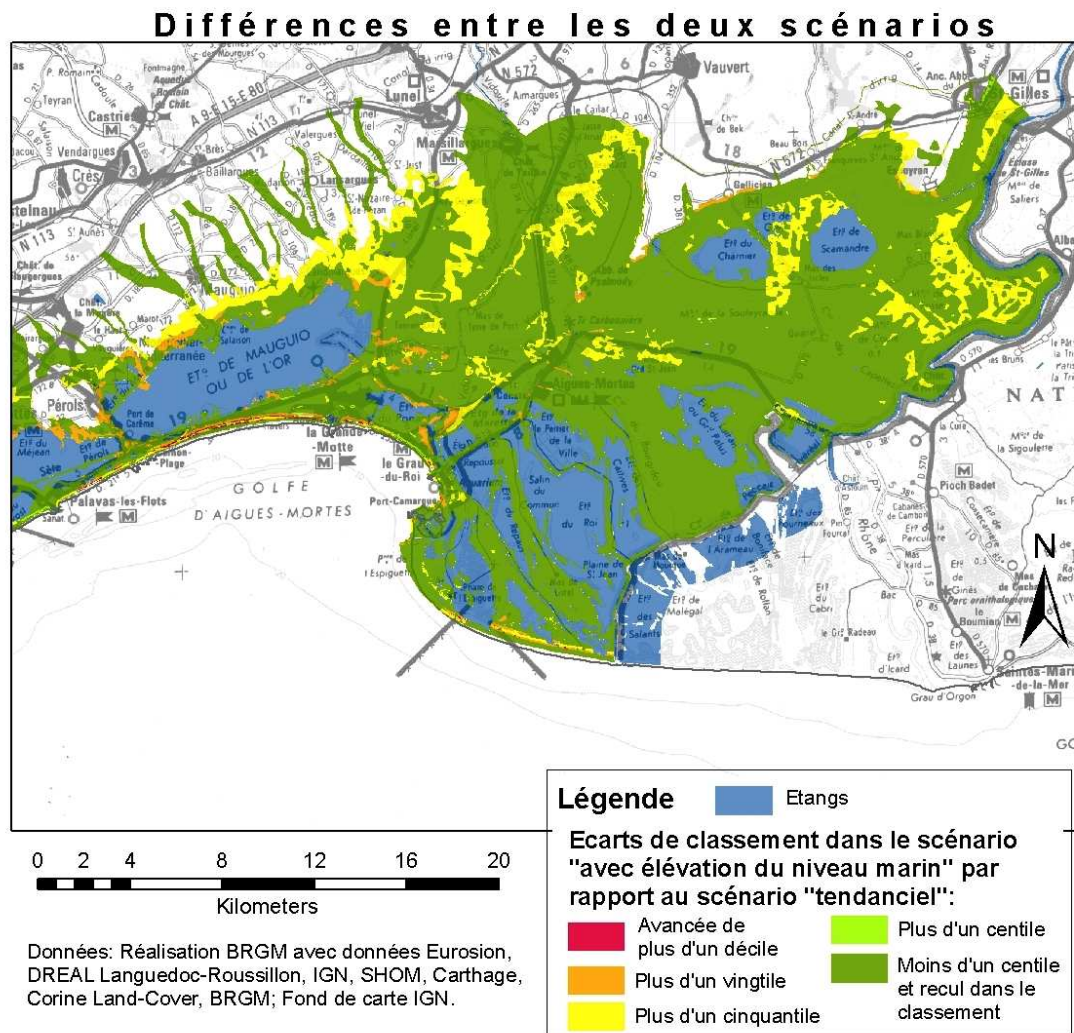


Figure 19: Représentation des écarts de classement obtenus pour la vulnérabilité physique de la zone côtière de la région Languedoc-Roussillon (Du delta du Rhône (Partie Région Languedoc-Roussillon) à Palavas-les-Flots), en 2070, entre le scénario avec élévation du niveau marin et tendanciel. Lecture de la carte : les zones en jaunes représentent celles pour lesquelles leur rang est avancé de plus d'un cinquante et de moins d'un vingtile dans le scénario avec élévation du niveau marin par rapport au scénario sans élévation du niveau marin

4.2.3.2. DE PALAVAS-LES-FLOTS AU CAP D'AGDE

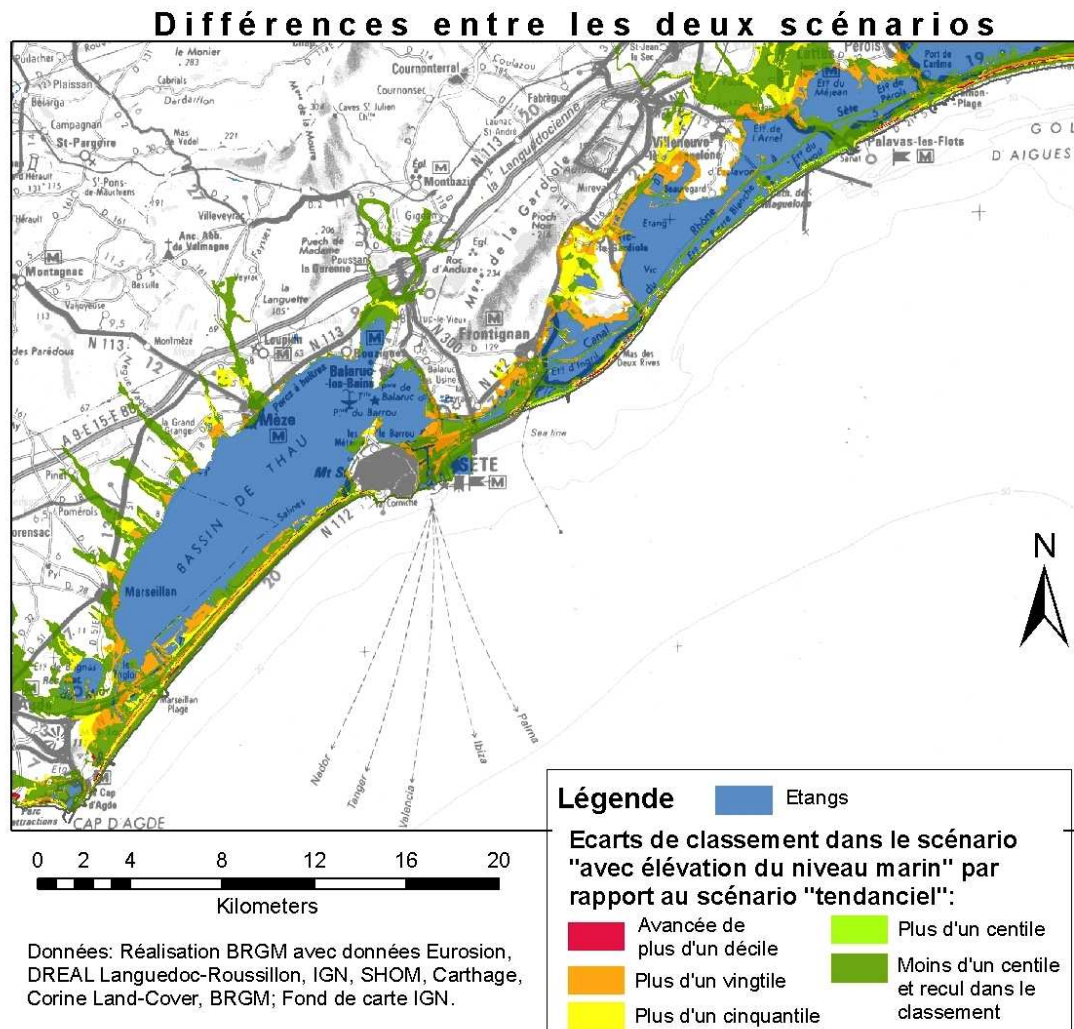


Figure 20: Représentation des écarts de classement obtenus pour la vulnérabilité physique de la zone côtière de la région Languedoc-Roussillon (De Palavas-Les-Flots au Cap d'Agde), en 2070, entre le scénario avec élévation du niveau marin et tendanciel. Lecture de la carte : les zones en jaunes représentent celles pour lesquelles leur rang est avancé de plus d'un cinquanteile et de moins d'un vingtile dans le scénario avec élévation du niveau marin par rapport au scénario sans élévation du niveau marin

4.2.3.3. DU CAP D'AGDE A PORT-LA-NOUVELLE

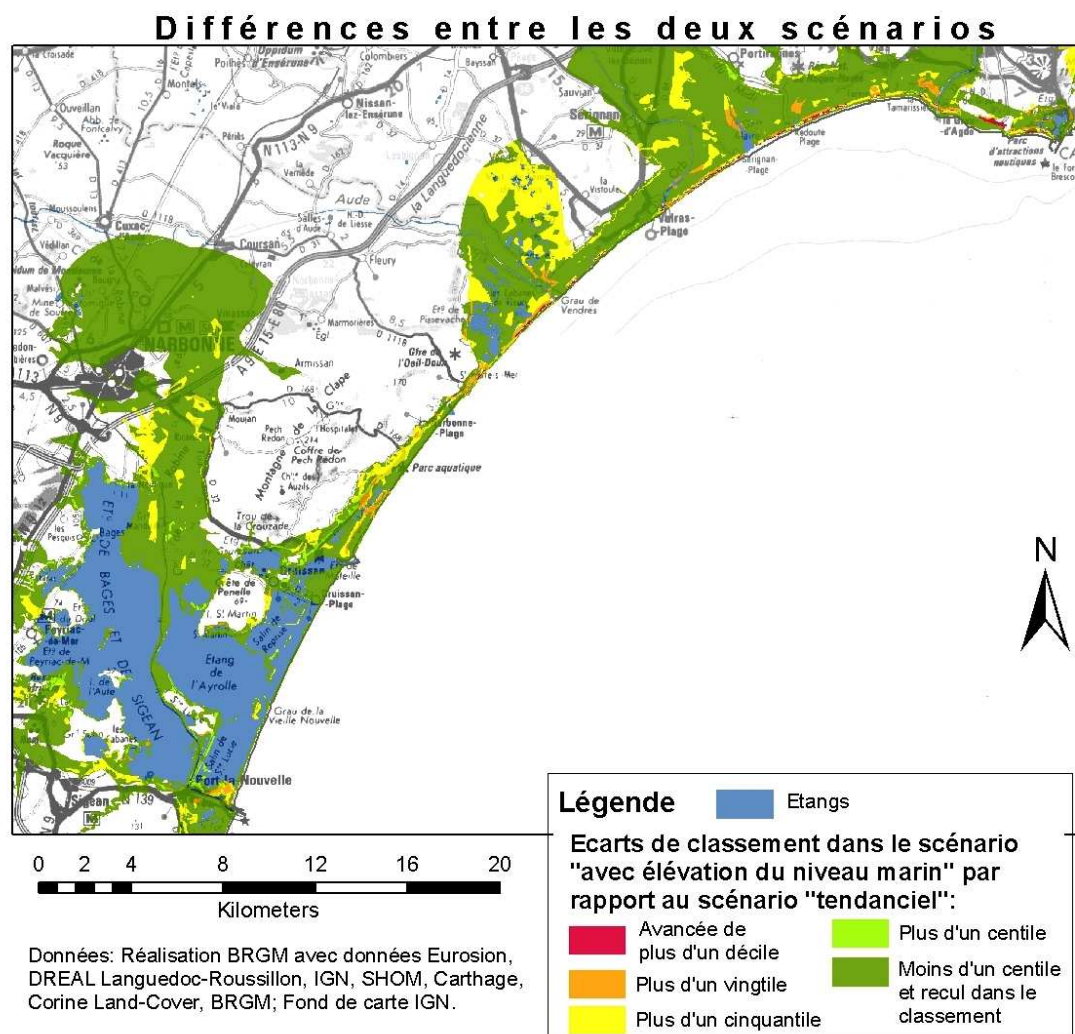


Figure 21: Représentation des écarts de classement obtenus pour la vulnérabilité physique de la zone côtière de la région Languedoc-Roussillon (Du Cap d'Agde à Port-La-Nouvelle), en 2070, entre le scénario avec élévation du niveau marin et tendanciel. Lecture de la carte : les zones en jaunes représentent celles pour lesquelles leur rang est avancé de plus d'un cinquante et de moins d'un vingtile dans le scénario avec élévation du niveau marin par rapport au scénario sans élévation du niveau marin

4.2.3.4. DE PORT-LA-NOUVELLE A BARCARES

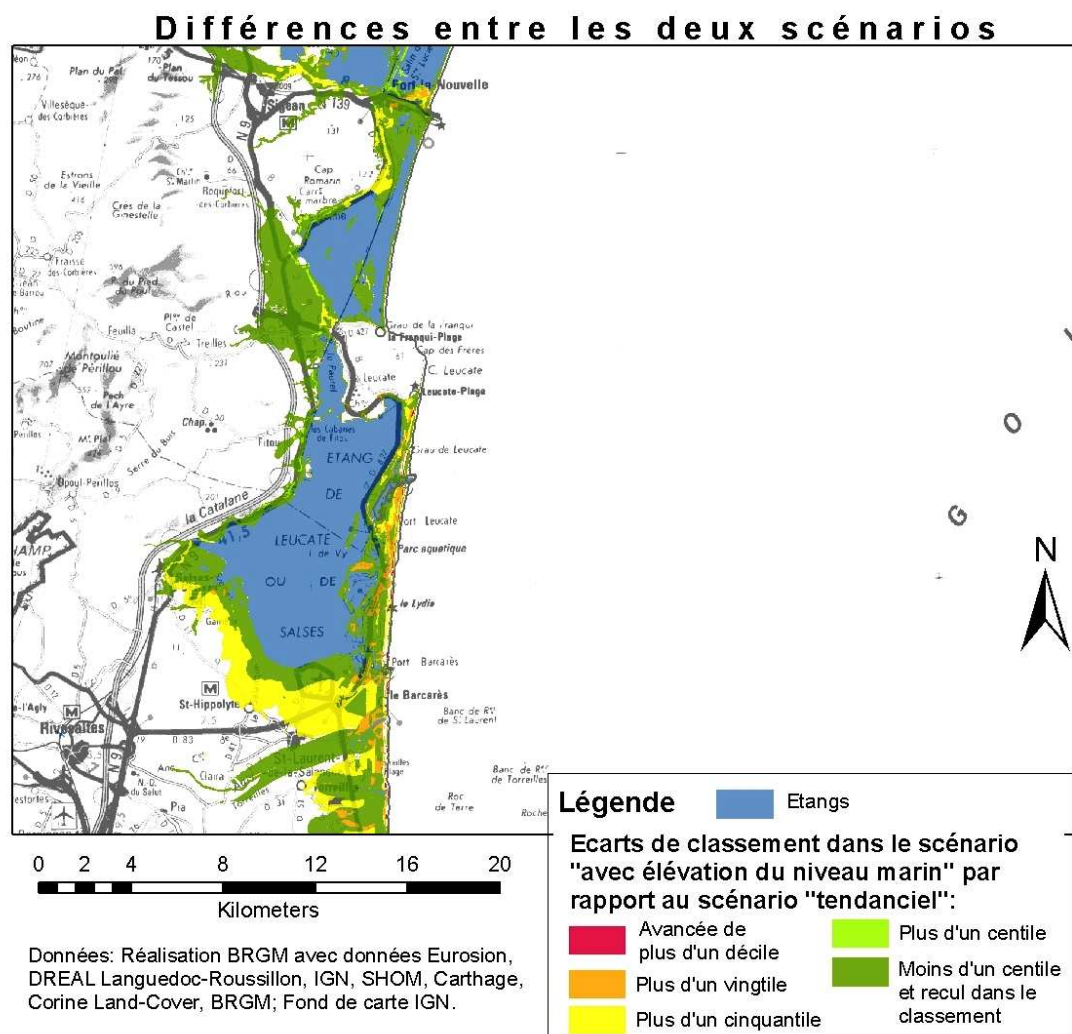


Figure 22: Représentation des écarts de classement obtenus pour la vulnérabilité physique de la zone côtière de la région Languedoc-Roussillon (De Port-La-Nouvelle à Barcarès), en 2070, entre le scénario avec élévation du niveau marin et tendanciel. Lecture de la carte : les zones en jaunes représentent celles pour lesquelles leur rang est avancé de plus d'un cinquante et de moins d'un vingtile dans le scénario avec élévation du niveau marin par rapport au scénario sans élévation du niveau marin

4.2.3.5. DE BARCARES A LA FRONTIERE ESPAGNOLE

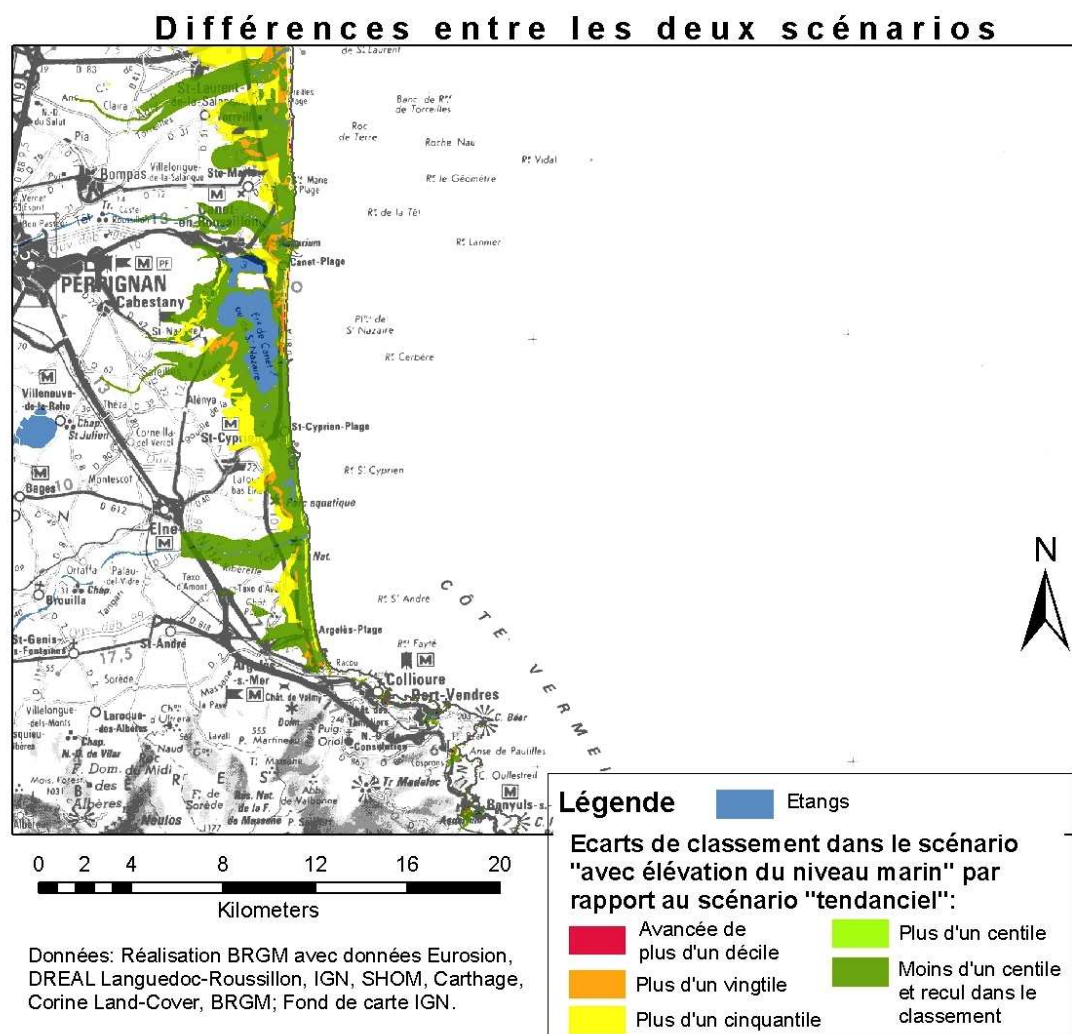


Figure 23: Représentation des écarts de classement obtenus pour la vulnérabilité physique de la zone côtière de la région Languedoc-Roussillon (De Barcarès à la frontière espagnole), en 2070, entre le scénario avec élévation du niveau marin et tendanciel. Lecture de la carte : les zones en jaunes représentent celles pour lesquelles leur rang est avancé de plus d'un cinquante et de moins d'un vingtile dans le scénario avec élévation du niveau marin par rapport au scénario sans élévation du niveau marin

5. DISCUSSION

Ce chapitre présente une analyse des résultats et fait quelques propositions simples pour les étapes ultérieures du projet, concernant l'adaptation. Il propose également une revue critique de l'application de la méthode AHP au cas de l'étude de la vulnérabilité physique de la zone côtière à l'érosion et à la submersion marine, puis une revue des données nécessaires à sa mise en œuvre, et des recommandations concernant l'amélioration des données existantes.

5.1. ANALYSE DES RESULTATS

5.1.1. SCENARIO TENDANCIEL ET SCENARIO AVEC ELEVATION DU NIVEAU MARIN

Dans les deux scénarios (tendanciel et avec élévation du niveau marin), les résultats présentés mettent en évidence la vulnérabilité physique plus importante des **zones basses** (par exemple rives des étangs de Sigean ou de Leucate), de **lidos** (par exemple de Carnon à Frontignan) et des **formations deltaïques** (tout particulièrement en Camargue).

Les cartes mettent aussi en évidence le fait que les **lits majeurs des rivières** (i.e. les dépôts sédimentaires récents) sont des zones plus exposées aux aléas de débordement, notamment lors d'événements combinant précipitations importantes (crues) et tempête marine (surcotes).

On peut par ailleurs noter un détail visible sur cette cartographie : sur certains lidos (par exemple à l'est de Carnon-Plage), on constate qu'il existe une première ligne vulnérable en vis-à-vis de la mer, puis une zone moins vulnérable, puis à nouveau une zone plus vulnérable sur le bord de l'étang. Ce cas se produit lorsque les taux d'érosion constatés sont peu importants ou lorsque le lido est suffisamment large : le recul affecte la plage et une bordure de la dune. Le reste de la dune (situé à 2 ou 3m NGF d'altitude) n'est pas affecté. Enfin, la bordure de l'étang est à nouveau considérée comme davantage vulnérable, du fait de sa faible altitude (typiquement 0 à 1m NGF).

5.1.2. CARTES REPRESENTANT LES ECARTS ENTRE LES DIFFERENTS SCENARIOS

Les cartes montrant les écarts positifs de classement (respectivement négatifs) entre les deux scénarios permettent d'identifier les entités pour lesquelles la vulnérabilité physique s'accroît (respectivement décroît) plus que la moyenne entre deux scénarii. Dans ces cartes, on peut noter que les zones suivantes sont celles pour lesquelles la vulnérabilité physique s'accroît davantage que la moyenne :

- **sur les côtes sableuses développées, une bande située un peu en retrait du trait de côte** (par exemple entre La Grande-Motte et Carnon-Plage). Ceci correspond effectivement à une réalité physique bien traduite par le fait que les formules utilisées pour représenter l'érosion dans le cas de l'élévation du niveau marin conduisent à des taux de recul plus important que la simple extrapolation des tendances actuelles.
- **des zones basses situées en bordure des étangs** qui pourraient être submergées de manière récurrente (par exemple en bordure du Bassin de Thau vers Marseillan). Ceci correspond aux zones les plus basses en bordure des étangs et est conforme à une réalité physique.
- **des zones basses situées à 2 ou 3 mètres d'altitude, ou sur des formations holocènes de dépôts sédimentaires** (Par exemple vers Saint Cyprien). Ceci correspond à l'idée que des zones aujourd'hui faiblement exposées à un aléa (peut-être d'occurrence centennale ou moins) verraient la fréquence de cet aléa augmenter. Les zones concernées avancement souvent entre un centile et un cinquantile dans le classement. Cela ne signifie pas pour autant que cet aléa soit préoccupant puisqu'il peut correspondre à l'augmentation d'un danger très faible.

5.2. AVANTAGES ET LIMITES

Le traitement effectué est à notre connaissance le premier exemple d'application d'une méthode de cartographie multicritère décisionnelle (l'AHP) au problème de cartographie de la vulnérabilité physique des systèmes côtiers. A l'issue de ce traitement, un certain nombre d'avantages et de limites peuvent être mis en évidence.

5.2.1. AVANTAGES

Les principaux **avantages** sont les suivants :

- L'approche de cartographie multicritères est bien adaptée au traitement du problème de la vulnérabilité physique du milieu à la submersion et l'érosion marine aux échelles

de temps considérées. En effet, en croisant des lois simples, en ajoutant différents niveaux d'incertitudes et en exploitant la richesse des données existantes, il est possible de réaliser une cartographie relativement détaillée qui résiste au jugement des experts ayant une bonne connaissance du terrain et des effets du changement climatique.

- Comparativement à d'autres méthodes de cartographie multicritères, le cadre donné par l'AHP pour convertir une information qualitative en information quantitative (Tableau 1) permet de lever les difficultés rencontrées habituellement pour trouver une pondération adéquate des différents critères. L'opérateur peut ainsi se référer à une table qui permet de calculer une pondération correspondant à la perception de l'importance relative de diverses entités. L'intégration de l'avis d'expert (rarement exprimé de manière quantitative) est ainsi rendu plus aisée qu'avec des agrégations additives ou géométriques. Par exemple, la méthode d'agrégation du CVI de l'USGS est principalement justifiée par sa moindre sensibilité au manque de données disponibles localement, et non par une perception réelle des experts.
- L'AHP fournit également un cadre qui permet de traiter les incertitudes des méthodes d'évaluation de l'érosion et de la submersion marine sur des échelles de temps longues et dans le contexte du changement climatique. Ceci est une amélioration significative par rapport aux approches déterministes dans lesquelles un seul taux de recul du trait de côte est calculé en chaque lieu.

5.2.2. LIMITES

Les **limites principales** que nous avons identifiées nous semblent être les suivantes :

- Le fait que les jeux de données de départ soient hétérogènes ou présentent des problèmes de géométrie complexifie considérablement le prétraitement nécessaire à l'exercice de cartographie multicritère décisionnelle. Un effort important de traitement des données est alors nécessaire. Pour le zoom Languedoc-Roussillon, nous avons rencontré des difficultés importantes relatives au positionnement du trait de côte dans les différentes bases de données (les écarts constatés peuvent atteindre et dépasser 100m, soit les taux de recul retenus), mais aussi des difficultés de manipulation de la couche SIG « zones basses » qui présentaient notamment des problèmes de géométrie. Enfin, l'utilisation de la carte géologique vectorisée de 4 départements différents a mis en évidence le besoin d'harmoniser les légendes (attributs des données vectorisées) entre les départements voisins, pour faciliter les applications à petite échelle (grande emprise).
- Dès lors que le nombre d'entités à classer augmente, la mise en œuvre de l'AHP

devient très complexe à mettre en œuvre : un programme a été développé en Matlab pour effectuer ces opérations. En pratique, le classement des 51160 entités a nécessité une approche spécifique : pour chaque critère évalué, les entités à comparer ne sont pas les mêmes stricto-sensu. Par exemple, pour le critère « morphodynamique tendancielle », 3 entités sont comparées (probablement érodée, peut-être érodée, probablement pas érodée), puis croisées avec l'érodibilité du terrain. Pour le critère des facteurs d'état, 3 autres entités sont retenues (exposé aux vagues, aux submersions par débordement, autres) puis croisées avec un critère altimétrique. La théorie de l'AHP prévoit que les entités comparées entre-elles soient les mêmes dans toutes les branches de l'arbre hiérarchique. Ici, le nombre d'entités sélectionnées (51160) fait qu'il n'est pas possible de procéder ainsi. L'adaptation qui est présentée ici permet de tirer parti des avantages de l'AHP (voir paragraphe précédent) tout en gérant un grand nombre d'entités. La revue de la carte par les experts nous semble valider l'adaptation que nous avons faite de la méthode AHP.

- Enfin, ces cartes doivent être naturellement observées de manière critique : les rangs élevés de vulnérabilité physique occupés par certaines zones urbaines ou portuaires (par exemple à Sète) ne doivent pas faire oublier que ces cartes sont réalisées uniquement sur la base de lois physiques simples de la géologie, et de la topographie. En milieu urbain et portuaires, les principaux vecteurs de changement sont bien évidemment l'homme lui-même et non le changement climatique. Aux échelles de temps considérées, d'innombrables aménagements peuvent être réalisés par l'homme (rehaussement de quais dans les zones portuaires) sans pour autant que cela n'apparaisse clairement comme une mesure attribuée spécifiquement à l'adaptation au changement climatique. En l'occurrence, il s'agirait plutôt d'une mesure qui serait attribuée à la gestion du port.

5.2.3. ENSEMBLE MINIMAL DE DONNEES NECESSAIRES A LA MISE EN ŒUVRE DE LA METHODE ET RECOMMANDATIONS

Les exigences minimales en ce qui concerne les données pour appliquer cette méthode sont l'existence de données topographiques et de données décrivant le trait de côte, c'est à dire la géomorphologie, les taux observés d'érosion ou d'accrétion.

Par ailleurs, nous pensons que l'utilisation de la carte géologique au 1 :50 000 améliore significativement le résultat final. Une fois l'information géologique traduite en termes d'érodabilité et de topographie, la cartographie finale hérite de la géométrie de la couche

géologique. L'interprétation de cette donnée demeure cependant complexe dans son format actuel.

En pratique, ce sont souvent les taux d'érosion ou d'accrétion observés qui font défaut : comme cela a été évoqué plus haut, cette donnée est difficile à estimer de manière homogène sur un linéaire de côte important. Ainsi, dans la base de données EuroSION, aucun taux d'érosion n'est calculé. Seule l'information « en érosion », « stable » ou « en accrétion » est disponible. Ceci est parfaitement légitime s'agissant d'une base de données européenne, agrégeant des données hétérogènes de nombreux pays. Ici, nous avons bénéficié des données fournies par la DREAL Languedoc-Roussillon. Dans d'autres cas où cette donnée ne serait pas disponible, il serait difficile d'appliquer strictement la méthode proposée.

Enfin, dans le but de faciliter l'utilisation de l'information disponible sur le trait de côte (par exemple géomorphologie, etc...), nous recommandons de reporter les attributs de la base de données EuroSION sur un trait de côte ayant une géométrie satisfaisante (par exemple Histolitt).

6. CONCLUSION

La méthode mise en œuvre dans le cadre du projet a permis d'évaluer et de cartographier la vulnérabilité du milieu physique à l'érosion et à la submersion marine, en région Languedoc-Roussillon à l'horizon 2050-2070, dans deux scénarios : scénario tendanciel et avec élévation du niveau marin.

A l'issue de ces travaux, les entités territoriales homogènes sur le plan de leur évolution morphodynamique les plus vulnérables ont été identifiées, cartographiées et classées de la plus vulnérable à la moins vulnérable. Les résultats sont présentés sous la forme de cartes dans ce rapport, à titre d'illustration et à une échelle réduite. Une base de données SIG permettant d'effectuer des traitements ultérieurement dans le cadre de l'intégration du projet (Lot intégrateur) est livrée. Les données peuvent être représentées aux échelles comprises entre 1 :250 000 et 1 :100 000.

L'élévation du niveau marin supposée pour 2070 est de 1m. Si le choix se portait pour une élévation intermédiaire (par exemple 0.5m), il suffirait d'imaginer une carte intermédiaire entre les deux scénarios présentés ici.

Ces résultats permettent de souligner une nouvelle fois l'importance de mettre en place des stratégies de réduction des risques côtiers dans les zones basses, sur les lidos et à proximité des embouchures des fleuves. Ceci peut être effectué soit en limitant l'extension des aires urbaines, péri-urbaines et touristiques existantes, soit en prenant des mesures vis-à-vis de l'existant.

Du point de vue de la prise de décision, l'intérêt de cette approche est de mettre en évidence les territoires prioritaires pour maximiser l'efficacité de l'adaptation aux changements des aléas côtiers, dans des scénarios contradictoires auxquels peuvent adhérer les différentes parties prenantes concernées.

Ces résultats peuvent être utilisés comme aide en préalable à l'élaboration de mesures d'adaptation. Ils peuvent être utilisés dans des exercices de type « robust decision making » (Hallegatte, 2009), visant à prendre des décisions convenant au maximum de scénarios. Il est aujourd'hui largement reconnu que ce type d'approche est tout particulièrement utile dans un contexte incertain, ce qui est toujours le cas lorsque l'on traite de l'adaptation au changement climatique (Roe and Baker, 2007).

BIBLIOGRAPHIE

Alcamo, J., M. Florke, and M. Marker, 2007: Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climate changes. *Hydrological Sciences Journal*, 52, 2, 247-275.

Bélair, C., 2007 : « Conséquences de l'élévation du niveau marin sur le patrimoine naturel en Languedoc-Roussillon. » Master I thèse, 42 p. Université de Montpellier II, Montpellier, France.

Chakar S. (2006) – Cartographie décisionnelle multicritères : formalisation et implémentation informatique. Thèse de doctorat de l'Université Paris Dauphine.

Coelho C., Silva R., Gomes F.V., Pinto F.T. (2006) – A vulnerability analysis approach for the Portuguese west coast. Risk analysis – Fifth international conference on computer simulation in risk analysis and hazard mitigation, Malta, p. 251-262.

Cooper J. A. G., Pilkey O. H. (2004) - Sea-level rise and shoreline retreat; time to abandon the Bruun rule. *Global Planet. Change*, 43, p. 157-171.

Déqué, M., 2003 : Impacts des changements anthropiques sur la fréquence des phénomènes extrêmes de vent de température et de précipitations (IMFREX). Rapport technique, 3 p., Météo-France/Centre National de Recherches Météorologiques.

Durand, P. and H. Heurtefeux, 2006 : Impact de l'élévation du niveau marin sur l'évolution future d'un cordon littoral lagunaire : une méthode d'évaluation : Exemple des étangs de Vic et de Pierre Blanche (littoral méditerranéen, France). *Zeitschrift Fur Geomorphologie*, 221-244.

Ericson, J.P., C.J. Vörösmarty, S.L. Dingman, L.G. Ward, and M. Meybeck, 2006 : Effective sea-level rise and deltas : Causes of change and human dimension implications. *Glob. and Planetary Change*, 50, 63-82.

EUROSION, 2004 : Living with coastal erosion in Europe : Sediment and Space for Sustainability. Part III – Methodology for assessing regional indicators, 42p.

Gornitz V.M., Beaty T.W., Daniels R.C. (1997) - A coastal hazards database for the US West coast. ORNL/CDIAC 81 NDP-043 C. Oak Ridge National Laboratory.

Hallegatte, S., 2009 : Strategies to adapt to an uncertain climate change, *Global Environmental Change* 19, 240-247

IMFREX, 2002 : Impact des changements anthropiques sur la fréquence des phénomènes extrêmes de vent de température et de précipitations ; Rapport final, 44 p.

IMPLIT, 2007 : Impact des événements extrêmes (tempêtes et surcotes) sur les hydro-systèmes du littoral méditerranéen dans le cadre du changement climatique ; Rapport final, 173 p.

Le Cozannet, G., N. Lenôtre, P. Nacass, S. Colas, C. Perherin, C. Vanroye, C. Peinturier, C. Hajji, B. Poupat, C. Azzam, J. Chemitte, and F. Pons, 2009 : Impacts du Changement Climatique, Adaptation et coûts associés en France pour les Risques Côtiers ; Rapport du Groupe de Travail « Risques Naturels, Assurances et Adaptation au Changement Climatique », BRGM RP 57141, Avril 2009.

Lespinas, F., 2008 : Impact du changement climatique sur l'hydrologie des fleuves côtiers en région Languedoc-Roussillon. Thèse du Doctorat, Université de Perpignan, Perpignan, France, 339 p.

Lionello, P., F. Dalan, and E. Elvini, 2002 : Cyclones in the Mediterranean region : the present and the doubles CO₂ climate scenarios. *Clim. Res*, 22, 147-159.

Lionello, P., S. Cogo, M.B. Galati, and A. Sanna, 2008b : The Mediterranean surface wave climate inferred from future scenario simulations. *Global and Planetary Change*, 63, 152-162.

Lionello, P., S. Platon, and X. Rodo, 2008a : Preface : Trends and climate change in the Mediterranean region (Editorial). *Global and Planetary Change*, 63, 87-89.

Maillet, G.M., F. Sabatier, D. Rousseau, M. Provansal et T.J. Fleury, 2006 : Connexions entre le Rhône et son delta (partie 1) : évolution du trait de côte du delta du Rhône depuis le milieu du XIX^e siècle. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2/2006, [En ligne], mis en ligne le 01 juillet 2008. URL : <http://geomorphologie.revues.org/index558.html>. Consulté le 17 juin 2010.

Malczewski J. (2006) – GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol.20, N°7, August 2006, 703-726.

MEDCIE, 2008 : Etude des Effets du Changement Climatique sur le Frand Sud-est, Etape 1 : Rapport Languedoc-Roussillon, Partie 1 : Contexte et résumé de l'étude, 34p.

MICORE, 2009 : « Review of Climate Change Impacts on Storm Occurrence. » Eds. Ferreira, O., M. Voudoukas, and P. Ciavola. Technical Report, 125 p.

Morton, R.A., 2002: Factors Controlling Storm Impacts on Coastal Barriers and Beaches – A Preliminary Basis for Near Real-Time Forecasting. *J. Coast. Res.*, 18(3), 486-501.

Nicholls, R.J., Wong P.P., Burkett V.R., Codignotto J.O., Hay J.E., Mclean R.F., Ragoonaden S. And Woodroffe C.D. (2007) - Coastal systems and low-lying areas. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hansen, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 315-356.

Paskoff R., 2001, L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers, Ed. Institut océanographique, Coll. Propos, ISBN 2-903581-27-4, 190 p.

Penland, S., R. Boyd, and J.R. Sutter, 1988 : Transgressive depositional systems of the Mississippi delta plain : a model for barrier shoreline and shelf sand development. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58 (6): 932-949.

Provansal M. and F. Sabatier, 2000 : Impacts de la montée du niveau de la mer sur la côte du delta du Rhône. Pages 78-81 dans: *Le changement climatique et les espaces côtiers. L'élévation du niveau de la mer: risques et réponses*. Textes réunis par Roland Paskoff. Actes du colloque d'Arles. 12 et 13 octobre 2000, 103 p

Pujol, N., L.U.C. Neppel, and R. Sabatier, 2007 : Regional tests for trend detection in maximum precipitation series in the French Mediterranean region / Tests régionaux de détection de tendances dans des séries de maxima pluviométriques sur le pourtour Méditerranéen Français', *Hydrological Sciences Journal*, 52,5, 956-973.

Roe, G.H. and M. B. Baker, 2007: Why is climate sensitivity so unpredictable? *Science*, 318, 629-632.
Saaty, T.L. (2008) – Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*,

Vol.1, N°1, 2008.

Sabatier, F., 2008 : Modélisation de l'impact du changement climatique sur l'érosion des dunes. Application à la Camargue. *Risques Littoraux Majeurs*, N° 01-2008, doi : 10.1051/lhb:2008004.

Sallenger, A.H., Jr, Penland, S., Williams, S.J., and Suter, J.R., 1987 : Louisiana barrier island erosion study: *Coastal Sediments '87*, American Society of Civil Engineers, 1503-1516.

Savard, J.P. (2011). Le rôle des scientifiques dans la construction des plans d'adaptation – l'exemple des zones côtières du Québec ; Colloque international de la Société Météorologique de France : Changement climatique, impacts et adaptation ; 4 octobre 2011.

Taylor, M. and G.W. Stone, 1996 : Beaches ridges : a review. *Journal of Coastal Research*, 12 (3): 612-621.

Thieler, E.R., and Hammar-Klose, E.S., (1999). *National Assessment of Coastal Vulnerability to Future Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Atlantic Coast*. U.S. Geological Survey, Open-File Report 99-593, 1 sheet
Available online at: <http://pubs.usgs.gov/of/of99-593/>

Tsimplis, M.N., M. Marcos, and S. Somot, 2008 : 21st century Mediterranean sea level rise : Steric and atmospheric pressure contributions from a regional model. *Global and Planetary Change*, 63, 105-111

Ullman, A. and V. Moron, 2010 : Surcotes Marines dans le Golfe du Lion et Forçages Atmosphériques: Variabilité Contemporaine et Future (1950-2100). *Bulletin de l'Association française de géographie*, version 1-14 janvier 2010, 1-5.

Ullmann, A., 2008 : Surcotes dans le Golfe du Lion et conditions atmosphériques : variabilité contemporaine et future (1905-2100). Thèse du Doctorat, 333 p., Université Aix-Marseille I, Marseille, France.

Vinchon C., Aubier S., Balouin Y. et al. (2006). Anticipate response of climate change on coastal risks at regional scale in Aquitaine and Languedoc Roussillon (France). *Ocean & Coastal Management* 52 (2009) 47–56.

Vinchon C., C. Meur-Ferec, Y. Balouin, N. Baron-Yelles, E. Berthelie, M. Garcin, C.

Hérivaux, S. Lecacheux, G. Le Cozannet, L. Maton, R. Pedreros, H. Rey-Valette, 2009 : Mise en place d'une approche transdisciplinaire pour l'évaluation de la vulnérabilité de la zone côtière à l'aléa submersion Projet ANR07-VMC-007/MISEEVA. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-57246-FR. 143 p., 26 fig., 2 tabl., 4 ann.

Yates Michelin M., G. Le Cozannet, 2010. Etat des connaissances sur les effets du changement climatique sur les aléas côtiers en région Languedoc-Roussillon. Septembre 2010 ; 1010p. ; 26 fig. ; 1 annexe.

Yates, M.L., Le Cozannet, G., and Lenôtre, N., 2011. Quantifying errors in coastal erosion and inundation hazard assessments. Journal of Coastal Research, SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium), 260-264. Szczecin, Poland, ISSN 0749-0208

ANNEXE 1

NOTE IMPORTANTE : les recommandations formulées lors de cette réunion ont été pris en compte pour le produit livré.

Orléans, le 09/09/11

COMPTE RENDU DE RÉUNION	
Rédacteur : Gonéri Le Cozannet, Sophie Lecacheux Entité : RIS/RIC	
Pour une diffusion externe : MEEDDTL Visa et nom du responsable : Le Cozannet	
Projet : EXPLORE-2070	Numéro : PSP10RNS78
Objet : Compte rendu de la réunion des experts pour le zoom Languedoc-Roussillon	
Date : 08/11/10	Lieu : Orléans
Participants : Y. De La Torre, C. Oliveros, R. Pedreros, A. Stepanian, Y. Balouin, G. Le Cozannet, D. Idier, S. Lecacheux	
Absents :	
Diffusion : Y. De La Torre, C. Oliveros, R. Pedreros, A. Stepanian, Y. Balouin, G. Le Cozannet, D. Idier, S. Lecacheux ; MEEDTL	

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

La réunion a commencé par une présentation générale du projet EXPLORE et une explication de la méthodologie AHP appliquée dans le lot littoral.

Retour des experts sur les cartes réalisées :

- Carte 1 : il y a une zone très vulnérable au nord-est de la carte au milieu de zones peu vulnérables. Ces zones sont effectivement des marais asséchés. L'indice de vulnérabilité plus élevé provient donc probablement de la géologie et cette zone doit effectivement apparaître comme peu vulnérable.

- Certaines zones littorales deviennent moins prioritaires que des zones en arrière des étangs avec la prise en compte de l'ENM (notamment la partie ouest de la Grande-Motte). Ceci s'explique par le fait que les deux cartes représentent un classement des zones, de la plus prioritaire en termes de vulnérabilité à la moins prioritaire en termes de vulnérabilité. Plutôt que de comparer les cartes, l'utilisateur sera plutôt amené à en choisir une selon le scénario d'élévation du niveau marin qu'il aura choisi.

- A niveau de l'étang de Valras : un découpage des zones basses de l'Aude a été fait car le projet vise à une cartographie des zones menacées par les aléas côtiers dans le contexte du changement climatique et n'a pas pour objet les mécanismes fluviaux.

- Pistes de l'aéroport de Montpellier : un problème à vérifier (les pistes côté étang sont considérées moins vulnérables)

- Frontignan apparaît comme peu vulnérable alors que les zones tout autour le sont. C'est pourtant une zone connue pour avoir eu un fort recul historique selon le SGR LRO. Ceci devra être vérifié en considérant les taux de recul effectivement constatés. La prise en compte de l'érosion historique tend à diminuer la vulnérabilité des zones qui ont été fixées artificiellement.

- Certaines bordures d'Etang sont affectées et d'autre pas. Il faudra vérifier pourquoi.

- Entre Leucate et Port-Barcarès, le lido a disparu (carte 3). Ceci est dû à une carte des lagunes issue de la BD Carthage qui a été mal « nettoyée ». Il faudra donc la reprendre.

Propositions du groupe d'experts :

- Les experts se demandent si certaines zones sensibles (notamment les secteurs urbains) devraient apparaître plus bas dans la hiérarchie avec la prise en compte de l'ENM.
-
- La question de la communication et la représentation des résultats est posée. Trois propositions sont faites : (1) mettre en avant que le résultat est un classement relatif en introduisant un terme du type « priorité », « hiérarchie », « ordre » dans la légende et (2) ne montrer que les zones dont la priorité a augmenté dans le scénario avec ENM ou alors ne pas présenter les 2 scénarios côte à côte (3) donner les quantiles correspondant au classement plutôt que la note de vulnérabilité. La cartographie réalisée a pour but de présenter le classement des différentes entités géographiques sur une échelle de vulnérabilité. La carte permet d'identifier sur quelles zones les efforts

doivent être portés en priorité.

- la prise en compte des ouvrages a été discutée mais il a été décidé de ne pas les considérer car ceux-ci varient beaucoup sur une échelle de 70 ans.
- Pour plus de visibilité il est proposé que la première classe ne soit pas représentée. Ceci permettrait d'avoir un découpage moins arbitraire des frontières des zones exposées.
- Il est proposé de mettre plus de classes pour la représentation cartographique

Action	Responsable	Délai	Soldé
Implémenter les résultats des experts	G. Le Cozannet	A définir	Oui

ANNEXE 2

Cette annexe présente comment l'information géologique a été traduite en information sur la topographie et l'érodabilité.

Dans beaucoup de cas, cette information peut être traduite sans ambiguïtés. C'est le cas pour – par exemple – les dépôts sédimentaires des étangs et des rivières. Dans d'autres cas, les zones recouvrent des situations différentes. C'est le cas par exemple pour certains remblais anthropiques. C'est la raison pour laquelle nous ne recommandons pas d'utiliser les cartes produites dans ce projet en deçà du 1 :100 000.

Ici, la qualité du résultat final dépend de la qualité de la cartographie des couches quaternaires qui est très satisfaisante. Dans d'autres cas, des difficultés d'interprétation pourront survenir.

Remarque : la table présentée ici peut être adaptée pour des projets visant les échelles de temps et spatiales considérées ici (échelles du 1 :250 000 au 1 :100 000 ; horizon 50 à 70 ans). Pour l'échelle de temps événementielle à horizon proche (cas par exemple des PPR) d'autres approches, basées sur la modélisation et l'utilisation de modèles numériques de terrain précis et justes existent et devraient être privilégiées.

Géologie	Notation	Topographie typique	Susceptibilité à l'érosion typique
Dépôts meubles, colluvions, Colluvions de versant	A	Zones très basses	Valeur intermédiaire entre "Erodable et "Très érodable"
Alluvions récentes et actuelles, fonds de vallées et méandres	a2b	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Bauxite (crétacé)	Al	Zones vallonées	Très peu érodable
Bourrelet sableux des berges du Tech	B	Zones très basses	Très érodable
Colluvions: blocs ou détritiques avec matrice abondante à dominante limoneuse (Quaternaire)	C	Zones légèrement vallonées	Erodable
Colluvions	C	Zones basses	Erodable
Colluvions récentes indifférenciées (argileuses, marneuses, sablo-limoneuses, sablo-argileuses, parfois sables grossiers ou cailloutis) (Quaternaire récent)	C	Zones basses	Erodable
Eocène-Oligocène (?). Conglomérats et brèches à galets d'Aptien-Albien	C(Br)	Zones vallonées	Très peu érodable
Colluvions récentes de bordure d'étangs (Holocène)	C/LMz	Zones très basses	Valeur intermédiaire

Géologie	Notation	Topographie typique	Susceptibilité à l'érosion typique
			entre "Erodable et "Très érodable"
Grès, conglomérats et bancs pisolithiques de Mireval (Maastrichtien)	c6g	Zones vallonnées	Très peu érodable
Calcaire, marbres calcaires ou dolomitiques	Ca	Zones vallonnées	Très peu érodable
Colluvions sur produits basaltiques	Câ	Zones basses	Erodable
Colluvions et alluvions non différenciées (Quaternaire)	CF	Zones basses	Valeur intermédiaire entre "Erodable et "Très érodable"
Colluvions et alluvions associés	C-F	Zones très basses	Valeur intermédiaire entre "Erodable et "Très érodable"
Sols bruns calciques peu évolués, accumulation de calcaire localement (Würm)	Cy	Valeur intermédiaire entre zones basses et très basses	Erodable
Colmatage saumâtre des étangs littoraux	Cz	Zones très basses	Erodable
Limons et graviers remaniés (Holocène)	Cz	Zones très basses	Erodable
Sables éoliens des dunes du cordon littoral actuel	D1	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Sables éoliens de dunes de cordon sableux ancien (Quaternaire)	D3	Zones très basses	Très érodable
Dune sableuse décarbonatée, horizon d'accumulation calcaire en profondeur - La Vistoule (Riss)	Dx	Zones très basses	Erodable
Dunes sableuses éoliennes décarbonatées du plateau de Vendres (Würm)	Dy	Zones basses	Très érodable
Sables de bourrelet de plage - l'Espiguette (Holocène récent)	Dz1	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Sables de bourrelet de plage à galets, graviers et tests coquilliers (Holocène récent)	Dz1G	Zones submergées de manière récurrente	Erodable
Sables légèrement envasés de l'arrière	Dz2	Zones très basses	Très érodable

Géologie	Notation	Topographie typique	Susceptibilité à l'érosion typique
plage - L'Espiguette (Holocène récent)			
Sables localement riches en galets et coquilles des anciens cordons littoraux - Aigues-Mortes (Holocène ancien)	Dz3	Zones très basses	Très érodable
Brèches polygéniques de démantèlement des appareils volcaniques - formations volcaniques de l'Escandorgue et d'Agde (Plio-Quaternaire)	Eâ	Zones légèrement vallonnées	Valeur intermédiaire entre "peu érodable" et "érodable"
Limons palustres et marnes plastiques des étangs asséchés (Würm à Holocène)	FLy-z	Zones basses	Erodable
Argiles et limons des marécages holocènes comblés (Holocène)	FLz	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Alluvions anciennes (Pléistocène inf.)	Fu	Zones basses	Peu érodable
Alluvions des hautes terrasses	Fw	Zones basses	Erodable
Mindel : alluvions des terrasses	Fw	Zones basses	Erodable
Alluvions à galets siliceux et à sols fersialitiques (Très hautes terrasses glaciaires Günz ou Mindel)	Fw	Zones basses	Erodable
Riss : alluvions anciennes	Fx	Zones basses	Erodable
Alluvions des moyennes terrasses	Fx	Valeur intermédiaire entre zones basses et très basses	Erodable
Sables et galets consolidés en conglomérats (Hautes terrasses glaciaires Riss)	Fx	Valeur intermédiaire entre zones basses et très basses	Erodable
Dépôts détritiques grossiers de la vallée de l'Hérault (Riss)	Fx2	Zones basses	Valeur intermédiaire entre "peu érodable" et "érodable"
Sables, galets et graviers de nature variée, remaniment des terrasses Fy et Fx (Riss à Würm)	Fx-y	Zones basses	Valeur intermédiaire entre "peu érodable" et "érodable"
Blocs, galets et graviers de calcaires siliceux, de grès, de quartz, de lydiennes, de porphyrites et de débris basaltiques (Terrasses glaciaires Würm)	Fy	Zones basses	Valeur intermédiaire entre "peu érodable" et "érodable"

Géologie	Notation	Topographie typique	Susceptibilité à l'érosion typique
Würm récent : cônes de déjection	Fy(11)	Valeur intermédiaire entre zones basses et très basses	Valeur intermédiaire entre "Erodable et "Très érodable"
Würm : alluvions anciennes des moyennes terrasses et de la Crau de Rivesaltes	Fy(6)	Zones basses	Erodable
Graviers et galets grossiers et limons (Würm)	Fya	Valeur intermédiaire entre zones basses et très basses	Valeur intermédiaire entre "Erodable et "Très érodable"
Alluvions actuelles et récentes	Fz	Zones très basses	Erodable
Alluvions argilo-sableuses à graviers et galets, limons des terrasses holocènes	Fz	Zones très basses	Erodable
Alluvions récentes à actuelles de basses à très basses terrasses et de la plaine d'inondation des rivières actuelles dans le delta du Rhône, alluvions fines mêlés de sédiments palustres (faciès mixte*	Fz	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Limons, silts et sables des levées sur sables des anciens cordons (Holocène)	Fz/LMz	Zones très basses	Valeur intermédiaire entre "Erodable et "Très érodable"
Alluvions récentes, bases terrasse	Fza	Zones très basses	Erodable
Alluvions récentes à actuelles de basses à très basses terrasses et de la plaine d'inondation des rivières actuelles dans le delta du Rhône, alluvions fines mêlés de sédiments palustres (faciès mixte*	FzFzR	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Limons de colmatage (Rhône, Vistre et Vidourle) (Holocène)	FzR	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Couverture de sédiments meubles des étangs côtiers, coquilles (proportion supérieure à 30%)	G(cq)	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Oligocène supérieur. Calcaires lacustres	g2b	Zones vallonnées	Valeur intermédiaire entre "très peu érodable" et "peu érodable"
Oligocène supérieur. Marnes supérieures	g2c	Zones vallonnées	Valeur intermédiaire entre "très peu

Géologie	Notation	Topographie typique	Susceptibilité à l'érosion typique
			érodable" et "peu érodable"
Oligocène supérieur-Aquitainien. Marnes brunes à passées sablo-gréseuses ou conglomératiques	g2-m1(1)	Zones vallonnées	Valeur intermédiaire entre "très peu érodable" et "peu érodable"
Tardiglaciaire : cônes de déjection	Gz(2)	Zones très basses	Valeur intermédiaire entre "Erodable et "Très érodable"
Tournaisien-Viséen. Lydiennes noires à nodules phosphatés, calcaires gris noduleux	h1-2	Zones vallonnées	Très peu érodable
Argiles bariolées des glacis alluvionnaires (Holocène)	Hx	Zones basses	Valeur intermédiaire entre "peu érodable" et "érodable"
Hydrographie	hydro	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Lacs, étangs, cours d'eau	hydro	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Réseau hydrologique	hydro	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
HydrographieLacs, étangs, cours d'eau	hydrohydro	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Hettangien-Sinemurien. Lias calcaire indifférencié	i1-2	Zones vallonnées	Très peu érodable
Domérien-Aalénien. Marnes noires et grises, marno-calcaires à brachiopodes	i3b-j1	Zones très basses	Peu érodable
Intrusions basaltiques (dykes, necks) - formations volcaniques de l'Escandorgue et d'Agde (Plio-Quaternaire)	iâ	Zones légèrement vallonnées	Valeur intermédiaire entre "peu érodable" et "érodable"
Bajocien-Bathonien. Calcaires graveleux brun-roux, calcaires argileux gris, dolomies	j2-3	Zones basses	Très peu érodable
Calcaires micritiques en gros bancs à passées marneuses de la Madeleine (Oxfordien supérieur)	j5Gc	Zones vallonnées	Très peu érodable
Kimméridgien-Tithonien-(?)Berriasien. Calcaires fins ou graveleux, dolomies	j6-7	Zones vallonnées	Très peu érodable

Géologie	Notation	Topographie typique	Susceptibilité à l'érosion typique
Calcaires micritiques en petits bancs à joints argileux de Poussan (Kimméridgien inférieur)	j6G	Zones basses	Très peu érodable
Calcaires sublithographiques dolomitisés - Montagne de la Moure (Kimméridgien supérieur)	j6Gd	Zones légèrement vallonées	Très peu érodable
Calcaires sublithographiques en gros bancs de la Montagne de la Moure (Kimméridgien supérieur)	j6M	Zones vallonées	Très peu érodable
Calcaire récifal et calcaire argileux (Thitonien inférieur à moyen)	j7	Zones basses	Très peu érodable
Calcaire bioclastique dolomitisé (Tithonien inférieur et moyen)	j7D	Zones vallonées	Très peu érodable
Jurassique terminal-Crétacé basal. Brèche-limite à Favreina	j7-n1(Br)	Zones vallonées	Très peu érodable
Limons palustres avec influence fluviatile (Holocène)	LFz	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Limons palustres des dépressions interfluves et des étangs éventuellement avec influence fluviatile (Quaternaire récent : Holocène)	LFz	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Limons palustres des dépressions interfluves et des étangs éventuellement avec influence fluviatile (Quaternaire récent : Holocène)Lacs, étangs, cours d'eau	LFzhydro	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Limons palustres des dépressions interfluves et des étangs éventuellement avec influence fluviatile (Quaternaire récent : Holocène)Limons argilo-sableux des étangs salés (Holocène)	LFzLMz	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Vases des étangs (Holocène)	LM	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Vases des étangs salés (domaine lagunaire) (Quaternaire récent)	LM	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Vases remaniées des marais salants	LMS	Valeur intermédiaire	Très érodable

Géologie	Notation	Topographie typique	Susceptibilité à l'érosion typique
(Actuel)		entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	
Dépôts lagunaires, vases	LMz	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Valeur intermédiaire entre "Erodable et "Très érodable"
Limons argilo-sableux des étangs salés (Holocène)	LMz	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Valeur intermédiaire entre "Erodable et "Très érodable"
Limons lagunaires sur sables limoneux (Holocène)	LMz/Dz4	Zones très basses	Très érodable
Miocène. Série argilo-conglomératique	m(P)	Zones vallonées	Valeur intermédiaire entre "très peu érodable" et "peu érodable"
Aquitaniens-Burdigaliens. Sables marins	m1-2(s)	Zones basses	Erodable
Aquitaniens. Calcaires et marnes marins et lacustres blanchâtres	m1a	Zones vallonées	Valeur intermédiaire entre "très peu érodable" et "peu érodable"
Burdigalien. Sables marins, calcaires molassiques	m2b	Zones basses	Valeur intermédiaire entre "très peu érodable" et "peu érodable"
Miocène moyen. Sables et argiles brun-rouge, continentaux	m3-4	Zones vallonées	Valeur intermédiaire entre "très peu érodable" et "peu érodable"
Miocène moyen. Calcaires détritiques ou lumachelle à Crassostrea gryphoides	m3-4b2	Zones vallonées	Valeur intermédiaire entre "très peu érodable" et "peu érodable"
Miocène moyen. Conglomérats (Ile Ste Lucie)	m3-4b2(1)	Zones vallonées	Valeur intermédiaire entre "très peu

Géologie	Notation	Topographie typique	Susceptibilité à l'érosion typique
			érodable" et "peu érodable"
Molasse sableuse marine, marnes bleues "Helvétien" - bassin Molassique - Gigean (Miocène moyen)	m3-4m	Zones vallonnées	Valeur intermédiaire entre "très peu érodable" et "peu érodable"
Formation littorale à galets et sables continentaux (Pleistocène inf.)	Mu	Zones basses	Erodable
Formation littorale à galets (Pléistocène moyen)	Mv	Zones basses	Erodable
Cordons littoraux, Tyrrhénien	Mx	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Formation littorale à galets (Pléistocène sup.)	My	Zones basses	Erodable
Cordons littoraux, Néotyrrhénien	My	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Cordon littoral actuel	Mz1	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Cordons littoraux, Flandrien	Mz1	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Cordons littoraux anciens	Mz2	Zones très basses	Valeur intermédiaire entre "Erodable et "Très érodable"
Cordons littoraux récents : sables et sables limoneux (Quaternaire récent)	Mz2-3	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Cordons littoraux récents : sables et sables limoneux (Quaternaire	Mz2-3hydro	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable

Géologie	Notation	Topographie typique	Susceptibilité à l'érosion typique
récent)Lacs, étangs, cours d'eau			
Cordons littoraux récents : sables et sables limoneux (Quaternaire récent)Limons argilo-sableux des étangs salés (Holocène)	Mz2-3LMz	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Cordons littoraux récents : sables et sables limoneux (Quaternaire récent)Dépôts anthropiques: sables éolisés des appareils dunaires étalés et aplanis	Mz2-3XN	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Cordons littoraux récents	Mz3	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Berriasien-Valanginien inférieur. Calcaires roux en plaquettes et marno-calcaires noires	n1-2a(C)	Zones basses	Très peu érodable
Valanginien-Bédoulien : calcaires urgoniens à rudistes et orbitolines	n2-5a	Zones basses	Très peu érodable
Valanginien-Bédoulien inférieur. Calcaires blancs à rudistes et orbitolinidés	n2-5a(C)	Zones basses	Très peu érodable
Valanginien-Bédoulien inférieur. Niveau de calcaires argileux	n2-5a(Ca)	Zones vallonées	Très peu érodable
Barrémien supérieur-Bédoulien inférieur. Calcaires à rudistes (faciès urgonien)	n4b-5a	Zones vallonées	Très peu érodable
Aptien : calcaires urgoniens, marnes à Orbitolines	n5	Zones vallonées	Très peu érodable
Bédoulien. Marnes et marno-calcaires à Deshayesites et palorbitolines	n5aMD	Zones basses	Très peu érodable
Gargasien. Calcaires à faciès urgonien	n5b(1)	Zones vallonées	Très peu érodable
Clansayésien. Marno-calcaires à orbitolinidés et calcaires noduleux à rudistes.	n5c(MC)	Zones vallonées	Très peu érodable
Albien indifférencié. Série marno-calcaro-gréseuse à glauconie	n6(CM)	Zones vallonées	Très peu érodable
Albien indifférencié. Faciès gréseux dominants	n6(G)	Zones vallonées	Très peu érodable
Albien indifférencié. Marnes noires à intercalations gréseuses, localement métamorphisées (zone de Vingrau)	n6(M)	Zones vallonées	Très peu érodable
Albien inférieur. Grès glauconieux	n6a(Gg)	Zones vallonées	Très peu érodable
Sables éoliens des dunes littorales -	NDz1	Zones très basses	Très érodable

Géologie	Notation	Topographie typique	Susceptibilité à l'érosion typique
l'Espiguette (Holocène récent)			
Sables éoliens des dunes littorales anciennes de l'étang du Ponant (Holocène ancien)	NDz3	Zones très basses	Très érodable
Sables éoliens recouvrant les vases palustres (Holocène)	NMz/LM z	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Ordovicien moyen. Série grésoschisteuse	o3-4	Zones vallonnées	Très peu érodable
Pliocène inférieur : faciès à mégablocs, apports proximaux localisés au piémont des Albères	p1(4)	Zones basses	Valeur intermédiaire entre "très peu érodable" et "peu érodable"
Sables, grès, conglomérats à stratifications entrecroisées, limons argileux rouges (Pliocène continental)	p1c	Zones basses	Valeur intermédiaire entre "très peu érodable" et "peu érodable"
Argiles sableuses, limons beiges et calcaires lacustres granuleux (Pliocène marin/continental)	p1ct	Zones basses	Valeur intermédiaire entre "très peu érodable" et "peu érodable"
Intercalations marines dans les argiles sableuses	p1ctm	Zones vallonnées	Très peu érodable
Sables marins pliocène, anciennement "sables astien" fossilifères de Montpellier (Pliocène marin)	p1ms	Zones basses	Valeur intermédiaire entre "très peu érodable" et "peu érodable"
Cailloutis siliceux à matrice argileuse rouge, surface d'abandon pliocène (Pliocène continental)	p1s1	Zones basses	Valeur intermédiaire entre "très peu érodable" et "peu érodable"
Epanchages caillouteux - glaciés de la surface d'abandon pliocène	p1s2	Zones basses	Valeur intermédiaire entre "très peu érodable" et "peu érodable"
Pliocène continental. Conglomérats de bordure	p2	Zones vallonnées	Valeur intermédiaire

Géologie	Notation	Topographie typique	Susceptibilité à l'érosion typique
			entre "très peu érodable" et "peu érodable"
Coulées basaltique avec prismation - formations volcaniques de l'Escandorgue et d'Agde (Plio-Quaternaire)	pâ	Zones légèrement vallonnées	Valeur intermédiaire entre "peu érodable" et "érodable"
Pliocène continental : poudingues, arkoses, limons jaunes, sables et marnes concrétionnées	pC	Zones basses	Valeur intermédiaire entre "très peu érodable" et "peu érodable"
Quaternaire : alluvions anciennes remaniées et colluvions associées	q(10)	Zones basses	Valeur intermédiaire entre "Erodable" et "Très érodable"
Quaternaire : alluvions récentes des basses terrasses, épandage alluvial à faune saumâtre	q(11)	Zones très basses	Valeur intermédiaire entre "Erodable" et "Très érodable"
Quaternaire : colluvions et alluvions anciennes à sub-récentes	q(14)	Valeur intermédiaire entre zones basses et très basses	Valeur intermédiaire entre "Erodable" et "Très érodable"
Quaternaire : dunes	q(5)	Zones basses	Très érodable
Quaternaire : cordons littoraux, dépôts modernes	q(8)	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Quaternaire : dépôts lagunaires, vases, limons argilo-sableux des étangs salés	q(9)	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Flandrien : cordon littoral à galets siliceux remaniés	q4	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Erodable
Flandrien : cordons littoraux	q4(1)	Zones très basses	Très érodable
Holocène : alluvions indifférenciées, tourbières, remplissages lacustres	q4(2)	Zones très basses	Valeur intermédiaire entre "Erodable"

Géologie	Notation	Topographie typique	Susceptibilité à l'érosion typique et "Très érodable"
Sables d'anciens cordons remaniés en lagune (Quaternaire récent)	RMz3	Zones très basses	Très érodable
Résidus de nappes de sable (Quaternaire)	RN	Zones basses	Très érodable
Sables et sables vaseux	S	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Couverture de sédiments meubles des étangs côtiers, sables, moins de 5% de fraction fine (<0,040 mm) dans la fraction inférieure à 2 mm	S(2)	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Schistes et quartzites avec calcaires intercalés	S1	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Schistes de Larogne Trémadoc	S1(1)	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Sables fins du domaine marin (Holocène)	SF	Zones très basses	Très érodable
Couverture de sédiments meubles des étangs côtiers, sables moyens	Sm	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Couverture de sédiments meubles des étangs côtiers, sables vaseux, de 25 à 50% de fraction fine (<0,040 mm) dans la fraction inférieure à 2 mm	Sv	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Sables vaseux avec 25 à 50% de fraction fine	Sv	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Tourbes, limons tourbeux, alluvions tourbeuses, tourbières asséchées (Actuel à récent)	T	Zones basses	Erodable
Muschelkalk. Dolomies grises ou rousses, calcaires dolomitiques jaunâtres, marnes bariolées, conglomérats	t3-5	Zones vallonées	Très peu érodable
Keuper. Marnes bariolées à évaporites, dolomies, cargneules	t7-9	Zones vallonées	Très peu érodable
Keuper. Ophites (spilites)	t7-9(O)	Zones vallonées	Très peu

Géologie	Notation	Topographie typique	Susceptibilité à l'érosion typique
			érodable
Tufs aériens (projections stromboliennes remaniées) - formations volcaniques de l'Escandorgue et d'Agde (Plio-Quaternaire)	tfâ	Zones légèrement vallonées	Valeur intermédiaire entre "peu érodable" et "érodable"
Tufs lacustres associés au volcanisme basaltique - formations volcaniques de l'Escandorgue et d'Agde (Plio-Quaternaire)	tfL	Zones basses	Peu érodable
Couverture de sédiments meubles des étangs côtiers, vases sableuses, de 50 à 75% de fraction fine (<0,040 mm) dans la fraction inférieure à 2 mm	Vs	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Couverture de sédiments meubles des étangs côtiers, vases terrigènes, de 75 à 90% de fraction fine (<0,040 mm) dans la fraction inférieure à 2 mm	Vt(2)	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Vases terrigènes	Vt2	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Dépôts anthropiques: remblais, terrils	X	Zones très basses	Erodable
Remblais, dépôts anthropiques	X	Zones très basses	Erodable
Dépôts anthropiques, remblais	X	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Dépôts anthropiques indifférenciés (remblais, terrils, bassins de décantation)	X	Zones submergées de manière récurrente	Erodable
Dépôts anthropiques: remblais indifférenciés sur sables des anciens cordons littoraux	X/Dz3	Zones très basses	Erodable
Dépôts anthropiques: remblais indifférenciés sur cailloutis siliceux à matrice argileuse rouge du pliocène continental	X/Fv	Zones très basses	Erodable
Dépôts anthropiques: remblais indifférenciés sur vase des étangs	X/LM	Zones très basses	Valeur intermédiaire entre "Erodable" et "Très érodable"
Dépôts anthropiques: limons de drainage de bordure des étangs et lagunes	XL	Zones submergées de manière récurrente	Très érodable

Géologie	Notation	Topographie typique	Susceptibilité à l'érosion typique
Dépôts anthropiques: sables éolisés des appareils dunaires étalés et aplanis	XN	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Très érodable
Dépôts anthropiques : remblais sableux	XS	Zones très basses	Erodable
Dépôts anthropiques: remblais sableux sur limons argilo-sableux des étangs	XS/LMz	Valeur intermédiaire entre zones très basses et zones submergées de manière récurrente	Très érodable

