

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE,
DE L'ÉNERGIE



Dynamique des systèmes littoraux et des milieux marins côtiers

Etude du littoral à l'échelle de la Métropole

Octobre 2012

SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION	7
2.	PRINCIPES DE LA METHODE	9
2.1.	POURQUOI UNE ETUDE A L'ECHELLE METROPOLITAINE ?	9
2.2.	COMMENT EVALUER LA VULNERABILITE COTIERE A L'ECHELLE NATIONALE.....	10
2.3.	APPORTS DE LA METHODE AHP (ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS)	12
2.4.	TRANSPOSITION A L'ETUDE DE LA VULNERABILITE COTIERE A L'ECHELLE NATIONALE.....	13
2.5.	INTEGRATION DE L'EVALUATION PAR DIRE D'EXPERT	14
2.6.	LES ENTITES DE RESTITUTION A L'ECHELLE NATIONALE (ERENS).....	16
2.6.1.	CONCEPTION DES ERENS	16
2.6.2.	PRESENTATION DES ERENS	16
2.6.3.	PERTINENCE DES ERENS.....	28
3.	APPLICATION DE LA METHODE A L'OBJET D'ETUDE	29
3.1.	DEMARCHE	29
3.2.	ARBRE HIERARCHIQUE ET DEFINITION DES DIFFERENTS FACTEURS ET CRITERES RETENUS.....	30
3.3.	MISE EN ŒUVRE DE L'AHP	31
3.4.	LA BASE DE DONNEES	32
3.5.	CONSTRUCTION ET UTILISATION DES INDICATEURS	33
3.6.	APPORTS DU GROUPE DE TRAVAIL.....	34
4.	RESULTATS	36
4.1.	PONDERATIONS DES FACTEURS ET DES CRITERES DANS LES SCENARIOS TENDENTIEL ET AVEC ELEVATION DU NIVEAU DE LA MER	36
4.2.	CLASSEMENT DES ENTITES POUR LES FACTEURS MARINS	38
4.2.1.	CRITERE « MAREE »	38

4.2.2.	CRITERE « DYNAMIQUE MOYENNE »	39
4.2.3.	CRITERE « EVENEMENTS EXTREMES »	41
4.2.4.	CRITERE « ELEVATION DU NIVEAU DE LA MER »	42
4.2.5.	RESULTATS INTERMEDIAIRES DE L’AHP POUR LES FACTEURS MARINS	43
4.3.	CLASSEMENT DES ENTITES POUR LES FACTEURS D’ETAT	46
4.3.1.	CRITERE « TOPOGRAPHIE»	46
4.3.2.	CRITERE « LITHOLOGIE»	47
4.3.3.	CRITERE « GEOMORPHOLOGIE»	48
4.3.4.	RESULTATS INTERMEDIAIRES DE L’AHP POUR LES FACTEURS D’ETAT	50
4.4.	CLASSEMENT DES ENTITES POUR LES FACTEURS DE CONTEXTE	51
4.4.1.	CRITERE « ANTHROPISATION»	52
4.4.2.	CRITERE « EROSION HISTORIQUE»	53
4.4.3.	RESULTATS INTERMEDIAIRES DE L’AHP POUR LES FACTEURS DE CONTEXTE.....	54
4.5.	RESULTAT FINAL DE L’AHP ET DISCUSSION	56
4.5.1.	SCENARIO TENDANCIEL	56
4.5.1.	SCENARIO AVEC ELEVATION DU NIVEAU DE LA MER	57
5.	DISCUSSION.....	60
5.1.	ANALYSE DES RESULTATS.....	60
5.2.	ANALYSE DE SENSIBILITE	60
5.3.	AVANTAGES ET LIMITES DE L’APPROCHE.....	60
6.	IMPLICATIONS POUR LES RISQUES COTIERS	62
6.1.	CONSTITUTION D’UNE ZONE COTIERE METROPOLITAINE	62
6.1.	OCCUPATION DU SOL DANS LA RICE-2070	63
6.2.	EXPOSITION DE LA POPULATION	66
6.2.1.	EVALUATION DE LA POPULATION ACTUELLEMENT PRESENTE DANS LA RICE-2070.	66
6.2.2.	EVALUATION DE LA POPULATION PRESENTE DANS LA RICE-2070 EN 2070.....	70
6.3.	EXEMPLE D’EVALUATION DES RISQUES A L’ECHELLE REGIONALE A PARTIR DES RESULTATS DU LOT 6.....	73
7.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	77
BIBLIOGRAPHIE.....		80

ANNEXE 1	82
ANNEXE 2	86
ANNEXE 3	87
ANNEXE 4	90

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 BRGM concernant l'échelle nationale. Il présente également des résultats concernant les implications de ces résultats pour les risques côtiers. Ces résultats ont été fournis au Lot 2.

La mise en œuvre de l'AHP a permis de classer, par grandes entités géographiques, les ERENs les plus vulnérables à l'érosion et à la submersion marine, dans une perspective de long terme, pour deux scénarios (Figure 5) : un scénario tendanciel et un scénario avec changement climatique. Cinq entités ressortent principalement pour les deux scénarios : « Pertuis », « Languedoc et Delta du Rhône », « Aquitaine », « Bretagne sud » et « Bretagne nord ». Ces résultats font ressortir la forte vulnérabilité des secteurs comprenant des zones basses très étendues ainsi que les côtes sableuses importantes.

Cependant, le classement à l'échelle nationale est directement lié à la segmentation des entités opérée sur des critères géomorphologiques. Les entités qui ressortent de manière prioritaire sont celles qui présentent la plus grande vulnérabilité du fait de leur surface, géologie, géomorphologie et topographie. Or les facteurs d'état (topographie, géomorphologie) sont précisément ceux qui, sur le long terme, déterminent la plus grande partie de la vulnérabilité des entités à l'élévation du niveau marin : en d'autres termes, quels que soient les effets du changement climatique sur les variations du niveau marin, une zone basse telle que les marais vendéens sera toujours plus vulnérable à la submersion marine qu'une côte à falaise telle que la côte d'Albâtre. Aussi, on observe peu de différences dans les classements avec et sans

élévation du niveau marin.

Les données fournies par le lot 6 peuvent être utilisées pour une évaluation des risques côtiers dans le contexte du changement climatique. Ceci peut se faire par simple croisement des données produites par le lot 6 avec les enjeux existants : personnes, biens, occupation du sol. Le lot 6 a produit ces données, notamment à l'échelle nationale. Afin de répondre aux besoins du Lot 2, le Lot 6 a effectué ces traitements. Ils sont présentés dans ce rapport. Bien que ces approches présentent des incertitudes importantes, ces données peuvent permettre de fournir quelques informations utiles en vue de l'adaptation. Sans qu'il soit possible à ce stade de proposer des approches coûts bénéfices robustes, ce travail ouvre la perspective d'une quantification des parts relatives de l'accroissement de la pression anthropique d'une part, du changement climatique d'autre part, dans l'augmentation attendue des risques côtiers d'ici à 2070.

1. INTRODUCTION

Ce rapport présente l'application de la méthode proposée par le BRGM pour évaluer l'exposition des côtes françaises métropolitaines aux aléas côtiers à l'horizon 2050-2070 en prenant en compte le changement climatique. La méthode proposée est une méthode de cartographie multicritères, structurée par une méthode d'aide à la décision, l'Analytical Hierarchy Process (AHP).

Le premier objectif des travaux du lot littoral (lot 6 du projet Explore 2070) est d'identifier les entités territoriales les plus vulnérables et d'identifier, pour chacune de ces entités, les contributions relatives des facteurs de vulnérabilité. Ici, le terme « vulnérabilité » est utilisé selon la définition qui est donnée par le GIEC :

« La vulnérabilité est le degré par lequel un système risque de subir ou d'être affecté négativement par les effets néfastes des changements climatiques, y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes. »

La vulnérabilité dépend du caractère, de l'ampleur, et du rythme des changements climatiques auxquels un système est exposé, ainsi que de sa *sensibilité*, et de sa *capacité d'adaptation*.

L'évaluation de la composante physique de la vulnérabilité telle qu'elle est faite ici permet :

- d'être en mesure de mettre en évidence sur quelles entités territoriales les efforts devront porter en priorité pour réduire la composante physique de la vulnérabilité aux aléas côtiers dans le contexte du changement climatique ;
- d'identifier sur quels facteurs les efforts devront porter en priorité afin de réduire la vulnérabilité.
- enfin, par simple croisement avec les données concernant les enjeux (population, occupation du sol), de faire une première évaluation des risques et de leur évolutions

Cette première évaluation de la vulnérabilité des zones côtières aux aléas côtiers nous semble être un pré-requis nécessaire à l'élaboration de mesures et stratégies d'adaptation.

Un objectif similaire (basée sur le *Coastal Vulnerability Index*, présenté dans le rapport bibliographique du Lot littoral) a été atteint par l'USGS (Service Géologique américain) dans les années 1990, sur l'ensemble du littoral des Etats-Unis.

Le rapport est structuré de la manière suivante :

- Dans un premier temps, nous présentons la méthode de l'*Analytical Hierarchy Process* (AHP) et comment elle permet de structurer une analyse multicritères spatialisée, intégrant le dire d'expert.
- Puis, nous présentons comment est déclinée l'AHP à l'échelle métropolitaine
- Les résultats sont présentés en partie 4 pour deux scénarios : le scénario tendanciel suit l'hypothèse que les tendances actuelles se poursuivent à l'identique et que les systèmes côtiers sont soumis aux mêmes conditions de forçage qu'actuellement. Le scénario avec changement climatique ne prend en compte que l'élévation du niveau de la mer.
- Ces résultats sont discutés en partie 5, notamment sous l'angle de leur intérêt et de leurs limites
- Enfin, dans une dernière partie, une première évaluation des risques est présentée. Ce travail a été fourni au Lot 2. Bien que comportant un certain nombre de limites en raison des incertitudes concernant l'aménagement de la zone littorale à cette échéance lointaine (2070), cette approche permet de donner quelques informations potentiellement utiles à l'adaptation.

A l'issue de ces travaux, le BRGM a identifié, à l'échelle nationale, les entités territoriales (administratives ou homogènes sur le plan de leur évolution morphodynamique) les plus vulnérables et, pour les différentes zones vulnérables, les facteurs les plus importants de la vulnérabilité. Il a également effectué une première évaluation des risques et de leurs évolutions.

2. PRINCIPES DE LA METHODE

2.1. POURQUOI UNE ETUDE A L'ECHELLE METROPOLITAINE ?

Pourquoi une étude à l'échelle nationale ? Cette question mérite d'être posée dans la mesure où le dispositif mis en place par la loi « Grenelle II » concernant l'atténuation et l'adaptation au changement climatique (Figure 9) privilégie l'action à l'échelle régionale et locale.

Le lot 6 du projet Explore 2070 ambitionne de répondre à une demande d'informations spatialisées sur les effets du changement climatique sur l'érosion et la submersion marine dans les zones côtières, à une échelle nationale et régionale. Il donne des éléments de réponse complémentaire à des études menées plus localement (par exemple dans le cadre de plans de prévention des risques littoraux) en permettant leur intercomparaison et leur normalisation.

L'étude menée à l'échelle métropolitaine vise un aspect bien précis de la mise en œuvre de plans d'adaptation. Il s'agit de donner un outil pour évaluer si les différents efforts mis en œuvre à l'échelle régionale en faveur de l'adaptation correspondent bien à la menace effective. Dans le dispositif pour l'adaptation au changement climatique mis en place par la loi « Grenelle II », il s'agit donc d'intervenir au niveau de la mise en cohérence des estimations de la vulnérabilité du territoire recommandées pour les Schémas Régionaux Climat Air Energie (SRCAE) (Figure 9).

En résumé, la mise en œuvre de l'AHP à l'échelle nationale vise à répondre à la question suivante : « Les utilisateurs cherchent à **répartir une ressource** entre les différents territoires (EREN), pour l'adaptation aux aléas côtiers (érosion et submersion marine), dans une perspective de long terme (pluri-décennale). « Quelles sont les entités prioritaires (1) pour le scénario tendanciel et (2) pour le scénario avec prise en compte du changement climatique ? ».

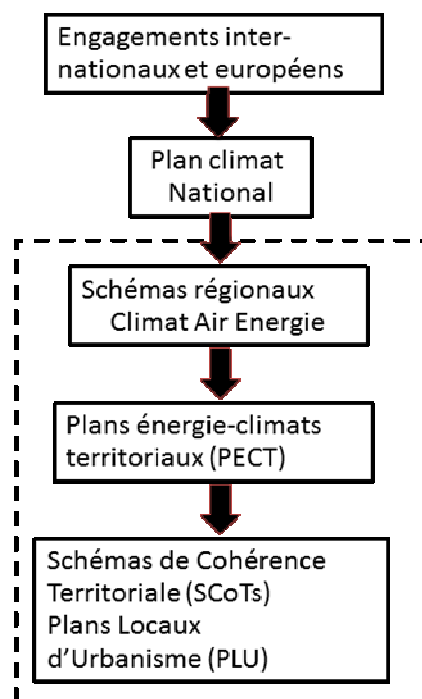


Figure 9 : Dispositif mis en place par la loi « Grenelle II » concernant l'atténuation et l'adaptation au changement climatique ; Le lot 6 du projet Explore 2070 ambitionne de fournir une information au niveau des Schémas Régionaux Climat Air Energie (SRCAE)

2.2. COMMENT EVALUER LA VULNERABILITE COTIERE A L'ECHELLE NATIONALE

L'étude d'un aléa composite comprenant l'érosion et la submersion marine est la démarche utilisée dans les études visant à hiérarchiser la vulnérabilité d'entités côtières. L'étude la plus complète est celle de Gornitz et al. (1994 et 1997) qui ont développé un indicateur de sensibilité du milieu physique côtier aux effets du changement climatique. Cet indicateur, le CVI (Coastal Vulnerability Index), donne une sensibilité « globale » à la submersion et l'érosion. L'USGS (le service géologique américain) a perfectionné cet indicateur puis l'a utilisé pour produire un atlas national de la vulnérabilité des côtes au changement climatique (Thieler et Hammar-Klose 1999, 2000a, 2000b).

La sélection des critères est basée sur plusieurs études qui ont construit des indicateurs de vulnérabilité de la côte aux aléas côtiers et au changement climatique. Parmi celles-ci, on peut citer Gornitz et al. (1994 et 1997), ainsi que les adaptations qui en ont été faites notamment par Coelho et al. (2006), et d'autre part le projet Eurosion (2004). On fait ici référence à ces deux approches qui ont été appliquées sur de grandes emprises (échelle d'une façade

océanique ; quelques milliers de km de linéaire côtier). Le rapport bibliographique du Lot 6 du projet Explore 2070 fait référence à ces études.

L'indicateur de vulnérabilité physique CVI est l'agrégation de 6 paramètres disponibles le long des côtes des Etats-Unis, à l'échelle du 1/100 000 :

- Géomorphologie;
- Historique d'érosion ou d'accrétion;
- Pente de la côte;
- Prédications et mesures locales d'élévation annuelle du niveau de la mer ;
- Moyenne des hauteurs de vague;
- Marnage moyen (différence entre niveau d'eau à marée haute et marée basse).

Pour le projet Explore 2070, l'indicateur est construit de manière différente. On doit en particulier noter que la donnée de base permettant de calculer la pente de la plage n'existe pas à l'heure actuelle en France.

D'une manière générale, les différents indicateurs sont construits à partir de trois composantes (Eurosion 2004) :

- Facteurs de forçage : il s'agit de :
 - o l'hydrodynamique de temps calme : par exemple, Gornitz et al. (1994) utilisent la moyenne des hauteurs de vagues
 - o de l'hydrodynamique de tempêtes : par exemple, Eurosion (2004) a recours aux plus hauts niveaux marins alors que l'application dans le Golfe du Mexique de la méthode de Gornitz et al. (1994) fait appel à des paramètres de l'hydrodynamique cyclonique.
 - o de mesures locales d'élévation annuelle du niveau de la mer (Gornitz et al., 1994)
 - o marnage : Gornitz et al., 1994 considèrent qu'un marnage important correspond à une vulnérabilité plus importante, mais ce critère n'est pas retenu dans Eurosion (2004).
- Facteurs d'état : ceci correspond à la lithologie, la géologie de la base de données Eurosion, la géomorphologie et la topographie. La topographie et la géomorphologie sont partiellement pris en compte par Gornitz et al. (1994) et dans Eurosion (2004), mais dans les deux cas, la description est incomplète : Gornitz et al. se limitent à la géomorphologie et Eurosion (2004) y ajoutent une composante « Géologie » qui regroupe une combinaison de géomorphologie, de géologie et de lithologie. Vinchon

et al. (2009) en proposent une application plus complète avec une sub-division en « Coastal Behaviour Systems » (système côtier à comportement similaire).

- Facteurs de contexte : Il s'agit de la disponibilité sédimentaire évaluée par deux indicateurs : l'érosion constatée et l'occupation des sols. L'érosion constatée est prise en compte dans les indicateurs de Gornitz et al. (1994) et dans EuroSION (2004). L'occupation des sols en tant qu'indicateur de la possibilité pour les sédiments de migrer « librement » est pris en compte dans l'indicateur d'EuroSION (2004).

On peut noter qu'en procédant à une classification de la côte par « Coastal Behaviour Systems », i.e. des entités géomorphologiques à comportement consistant, Vinchon et al. (2009) ont implicitement recours à des critères similaires.

Les limites des approches citées ici sont rappelées dans le rapport bibliographique du Lot 6. Le lot 6 du projet Explore propose une amélioration de ces approches en intégrant le dire d'expert dans la mise en œuvre de la méthode (de la manière dont cela a été réalisé par Vinchon et al. (2009), mais aussi en structurant le dire d'expert dans la construction de l'indicateur.

Les différents scénarios du projet Explore 2070 seront évalués en ajustant la pondération des différents critères sus-cités. Par exemple, le scénario avec changement climatique se différenciera du scénario tendanciel/stabilité par une importance plus grande donnée à la géomorphologie, ainsi que cela a été réalisé par Vinchon et al. (2009). Pour les deux autres scénarios (avec prise en compte du changement anthropique et/ou de l'adaptation), la pondération adéquate ne peut s'appuyer sur une bibliographie existante car cela n'a jamais été réalisé auparavant à notre connaissance.

2.3. APPORTS DE LA METHODE AHP (ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS)

La méthode mise en œuvre par le lot 6 est une méthode de cartographie multicritère.

L'AHP a été développé à l'origine pour structurer une prise de décision, lorsque celle-ci ne peut s'appuyer que sur une base de connaissances hétérogènes et complexes, dont certaines sont qualitatives et d'autres quantitatives, et dans un contexte où les moyens qui peuvent être alloués à la prévention des risques sont nécessairement finis. Elle a donc pour objectif d'établir des priorités argumentées, pré-requis nécessaires pour maximiser l'efficacité de l'investissement, et finalement réduire au mieux la vulnérabilité ou les risques.

Elle a démontré sa pertinence pour appréhender des problèmes spatiaux complexes qui nécessitent la prise en compte de nombreuses données très hétérogènes et de qualité et de formats variés. Elle permet de procéder à une analyse sur la base de multiples critères géoréférencés, quantitatifs ou qualitatifs, tout en intégrant une expertise pour affecter une importance relative entre critères (ou entités) pris deux à deux.

Cette méthode a été appliquée pour la cartographie du risque volcanique au Mérapi (Indonésie) par le service géologique et l'observatoire volcanique (CVGHM / BPPTK) dans un contexte opérationnel. Cette application a révélé sa pertinence du point de vue de l'aide à la décision et de la prévention des risques.

Cette méthode fournit un **classement relatif des entités** territoriales **étudiées**, de la plus vulnérable à la moins vulnérable. Elle permet également de mettre en lumière les facteurs les plus importants de cette vulnérabilité

Comme cela a été rappelé dans le rapport bibliographique, l'avancée importante par rapport à d'autres méthodes se situe au niveau de la « traçabilité » du jugement d'expert.

2.4. TRANSPOSITION A L'ETUDE DE LA VULNERABILITE COTIERE A L'ECHELLE NATIONALE

Dans notre étude, les entités élémentaires sur lesquelles seront appliquées l'AHP seront des unités géomorphologiques (i.e. relativement homogènes d'un point de vue géomorphologique) à l'échelle des « zooms » territoriaux, issues d'un zonage spécifique.

L'exposition du littoral aux aléas côtiers (érosion, submersion marine) résulte de la combinaison de **trois grandes composantes** qui caractérisent les agents exogènes d'évolution (moteur) et l'état du milieu (hérité et actuel) :

- les forçages hydrométéorologiques,
- les caractéristiques géologiques et géomorphologiques,
- les éléments de contexte dans lesquels se situent les entités.

Chaque composante peut être décrite par plusieurs critères.

Par exemple, pour les forçages marins on citera les critères suivants : le « niveau de la mer » relatif à la côte, les « événements extrêmes », « la dynamique ordinaire liées aux vagues modérées », etc. De même, les caractéristiques géologiques et géomorphologiques peuvent être décrites en utilisant des critères de « lithologie », « topographie », « géologie » et « géomorphologie ». Le contexte de l'entité est donnée par « anthropisation » (constructions,

modifications apportées par l'homme), la « disponibilité de sédiments » et son évolution actuelle « érosion/accrétion constaté ».

Il s'agit de créer un modèle conceptuel qui schématise les différentes composantes contribuant à la vulnérabilité de chaque entité à l'érosion et la submersion marine, dans le contexte du changement climatique et à l'échelle de temps considérée.

C'est à travers ce modèle, appliqué sur chacune des entités, que doivent être évalués les différents critères cités ci-dessus, par leur contribution relative sur la vulnérabilité. Sur chaque entité il est alors possible de leur attribuer une « note » d'exposition. Cette évaluation est pilotée en référence aux dires d'expert.

2.5. INTEGRATION DE L'EVALUATION PAR DIRE D'EXPERT

Dans un premier temps, l'évaluation par dire d'expert consiste à déterminer l'importance relative des différents critères les uns par rapport aux autres en leur affectant une pondération ou priorité. Chaque expert, se fonde sur son expérience et sa base de connaissances (relations empiriques ou déterministes qui existent dans les chaînes de type causes/effets). Ceci revient à définir une vulnérabilité sur une moyenne pondérée des différents critères.

Dans un second temps, pour chaque critère, l'évaluation repose sur une comparaison deux à deux de chaque entité. Le panel d'experts attribue, pour chacun des critères, une valeur par entité pour caractériser la vulnérabilité relative des entités par rapport à un même critère.

Enfin, une note de vulnérabilité par entité est calculée. Les experts évaluent enfin la pertinence de la hiérarchisation de la vulnérabilité obtenue. Pour cela, ils s'appuient sur une base de données géoréférencées et une cartographie qui caractérisent au mieux chaque entité.

Les experts déterminent l'importance relative des critères contribuant aux aléas côtiers en les comparant deux à deux et en leur attribuant des notes à l'aide d'un tableau de référence (cf. Figure 1). Ils se basent sur leur connaissance du milieu littoral ainsi que sur la base de données qui fournit des informations sur chaque entité. Un intérêt majeur de la méthode à ce stade est sa capacité à associer une valeur numérique à un jugement d'expert qualitatif.

La traçabilité de la méthode AHP permet de fait de modifier a posteriori la pondération pour tel ou tel critère ou entité si celle-ci apparaît en inadéquation avec le jugement d'expert. En l'absence de consensus entre les experts, l'incertitude doit être reconnue comme assez

importante.

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

Figure 1. Tableau définissant la note attribuée à un critère par rapport à un autre (Saaty, 2008)

Une formule mathématique, décrite dans Saaty (2008), permet de calculer l'importance relative de chaque critère (Voir Annexe).

2.6. LES ENTITES DE RESTITUTION A L'ECHELLE NATIONALE (ERENS)

2.6.1. CONCEPTION DES ERENS

Le MEEDTL a demandé à ce que les entités de restitution à l'échelle nationale soient dessinées sur la base de critères géomorphologiques¹.

Nous présentons ici le découpage effectué à l'échelle nationale et prenant en compte des critères géomorphologiques. Les entités ainsi dessinées sont appelées par la suite : Entités de Restitution à l'Echelle Nationale (EREN).

Les ERENS sont définis en prenant en compte en premier lieu la géomorphologie (littoral et arrière-pays) et la géologie. **Il s'agit en effet de critères importants pour évaluer la susceptibilité à l'érosion et à la submersion.** Lorsque des critères supplémentaires sont nécessaires pour différencier des zones, l'occupation du sol et parfois la dynamique sédimentaire peuvent être utilisés. Ainsi, au Languedoc, la connaissance de la dynamique sédimentaire a été utilisée pour différencier deux zones de géomorphologies similaires.

D'autre part, le zonage a été contraint par la nécessité de limiter le nombre d'entités.

La limite des estuaires est fixée :

- côté mer à la transition entre les rivages limono-vaseux holocènes et les autres formations
- côté terre à la limite entre l'estuaire marin et le domaine fluvial tel que défini dans EuroSION².

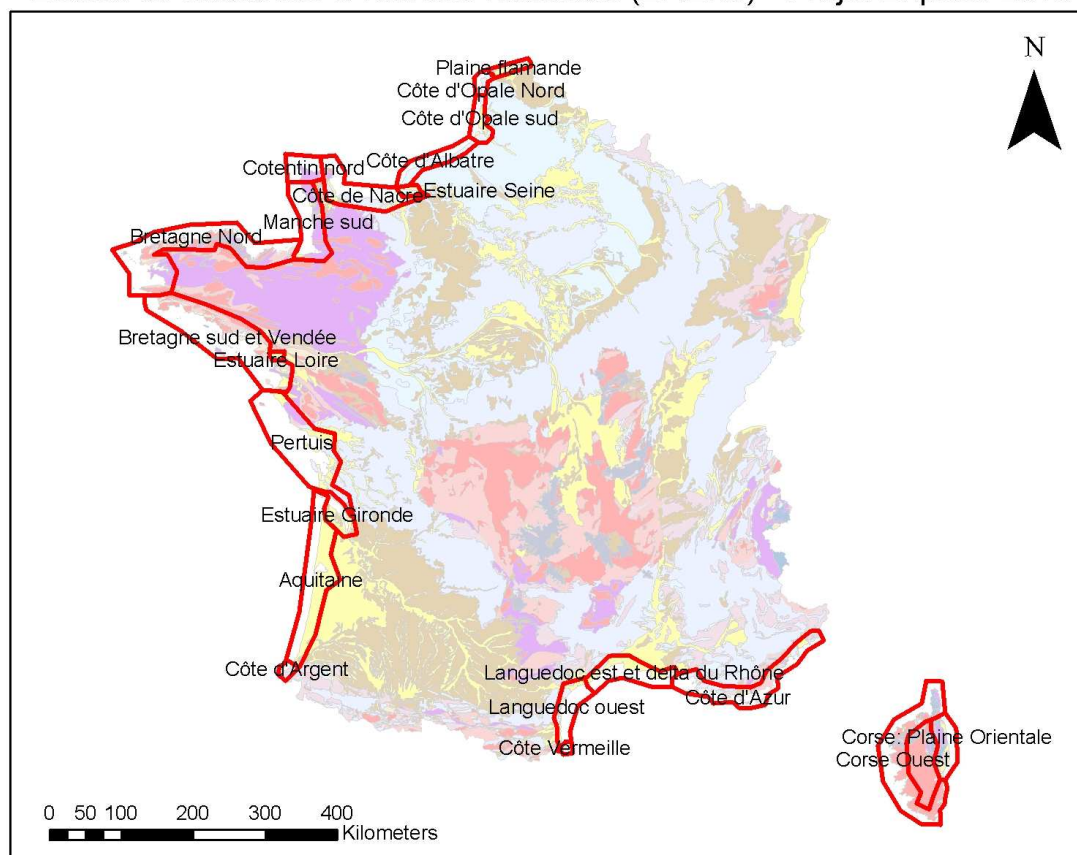
2.6.2. PRESENTATION DES ERENS

Les ERENS sont au nombre de vingt. Ils sont présentés à l'échelle nationale dans la Figure 2, puis en détail dans les tableaux et figures ci-dessous.

¹ La proposition initiale du BRGM était d'appliquer aux départements côtiers l'approche à l'échelle nationale: en effet, ceci semble permettre une connexion avec le Lot 7 pour lesquels la restitution est faite à l'échelle des régions administratives. D'autre part, une restitution portant sur des entités à l'échelle desquelles des décisions peuvent être prises nous semble pertinente.

² C'est-à-dire lorsque les deux rives de l'estuaire sont situées à 1km l'une de l'autre.

Entités de restitution à l'échelle nationale (ERENs) - Projet Explore 2070



Légende

 	Entités de Restitution à l'Echelle Nationale (ERENs)
 	Craie
 	Sables
 	Argiles
 	Basaltes et rhyolites
 	Calcaires, marnes et gypse
 	Micaschistes
 	Gneiss
 	Granites
 	Grès
 	Ophiolites
 	Schistes et grès

Figure 2: Carte des ERENs à l'échelle nationale sur fond lithologique BRGM

Tableau 1: ERENs et justification de leurs limites (De la plaine flamande à l'estuaire de la Seine)

EREN	Géomorphologie littorale dominante	Arrière-Pays dominant	Commentaire
Plaine flamande	Plages développées et littoraux artificiels	Zones basses ; Sables et vases holocènes	
Côte d'Opale nord	Falaises érodables avec quelques plages développées et littoraux artificiels	Zones vallonnées ; Roches sédimentaires (Calcaire, craie...) jurassique et crétacé	
Côte d'Opale sud	Plages développées (principalement sableuses) et rivages limono-vaseux	Dunes sableuses et zones basses holocènes	Limite sud correspondant à la transition holocène / crétacé
Côte d'Albâtre	Plages de galets et falaises de craie	Zones vallonnées crétacées (craie) et valleuses (alluvions récentes)	
Estuaire de la Seine	Rivages limono-vaseux, artificiels et portuaires. Plages et falaises érodables au sud-ouest (pouvant-être basculés vers la zone adjacente)	Zones basses estuariennes (dépôts holocènes)	Limite du domaine marin selon définition Eurosion ; Possibilité de restreindre la zone côté sud-ouest (au niveau de la transition holocène-jurassique)

Entités de restitution à l'échelle nationale (ERENs) - Projet Explore 2070

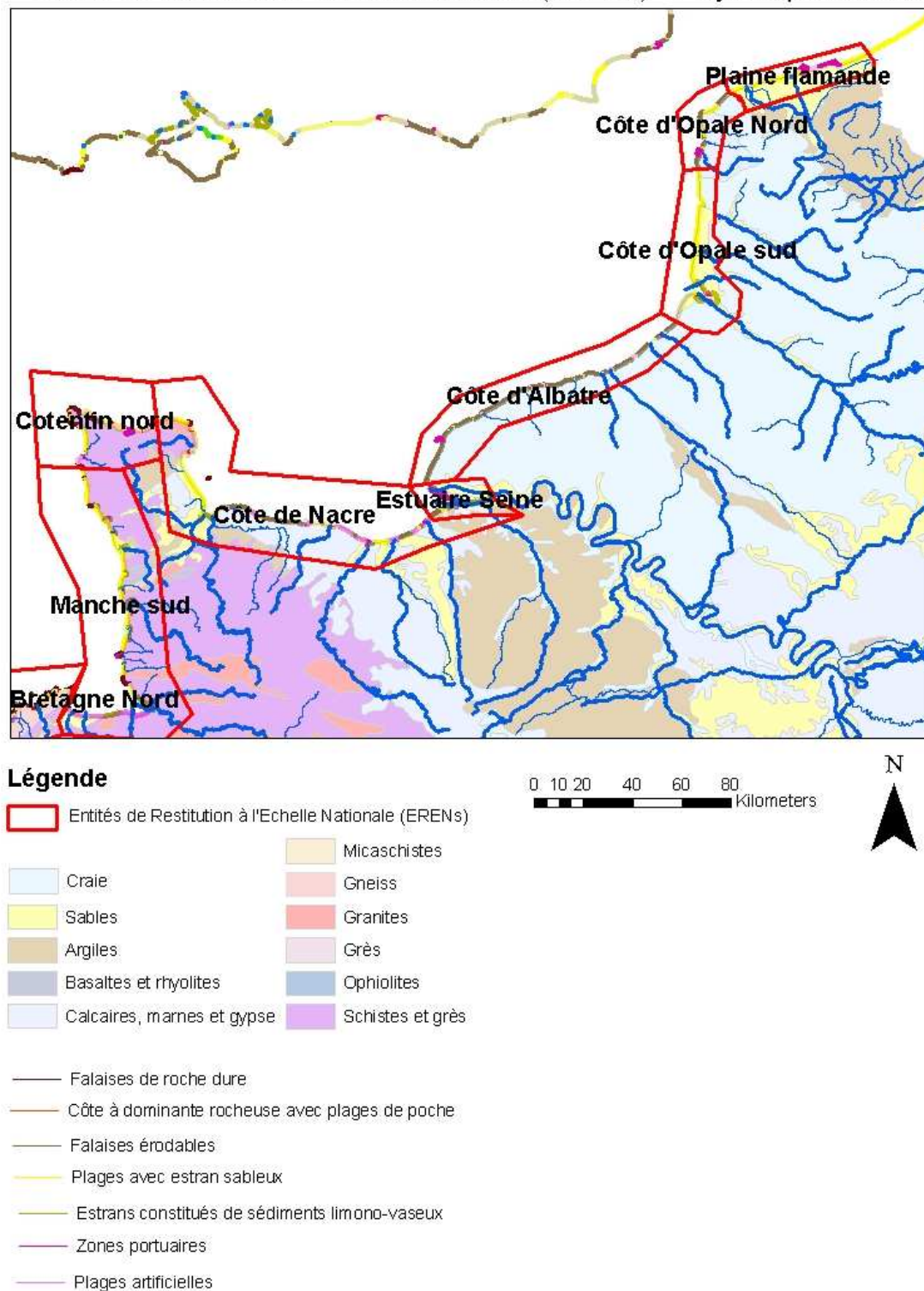


Figure 3: Limites des ERENs: de la Plaine Flamande au Cotentin (Fond cartographique: Lithologie (BRGM), BD Carthage, EuroSION)

Tableau 2: ERENs et justification de leurs limites (De l'estuaire de la Seine à l'estuaire de la Loire)

EREN	Géomorphologie littorale dominante	Arrière-Pays dominant	Commentaire
Côte de Nacre	Zone constituée de rivages artificiels, falaises érodables, plages plus ou moins développées et rivages limono-vaseux	Zones basses (dépôts holocènes) et plus escarpées (jurassique et carbonifère)	Zone hétérogène dont les limites précises pourraient être discutées (basées aujourd'hui sur des transitions concernant l'érosion constatée)
Cotentin nord	Falaises dures, estran meuble avec platier rocheux sur estran intertidal, pages	Zone hétérogène mais principalement escarpée	Limite sud correspondant au socle granitique de Flamanville.
Manche sud	Plages développées, rivages limono-vaseux et artificialisés principalement	Plaine côtière holocène	
Bretagne nord	Zone hétérogène, constituée de plages et rivages de rochers souvent peu érodable	Zone principalement escarpée ; géologie et lithologie complexe : gneiss, granite, micashistes, shistes, grès	Limite sud placée à une transition importante à cette échelle pour la géomorphologie côtière falaises érodables /plages
Bretagne sud	Zone hétérogène constituée de plages, rivages limono-vaseux, littoraux rocheux (généralement peu érodables)	Généralement escarpée avec quelques zones basses (plus nombreuses que pour la zone Bretagne Nord)	Cette zone est constituée de davantage de plages développées et de zones limono-vaseuses que la zone Bretagne Nord ; Les littoraux rocheux sont généralement peu érodables

Entités de restitution à l'échelle nationale (ERENs) - Projet Explore 2070

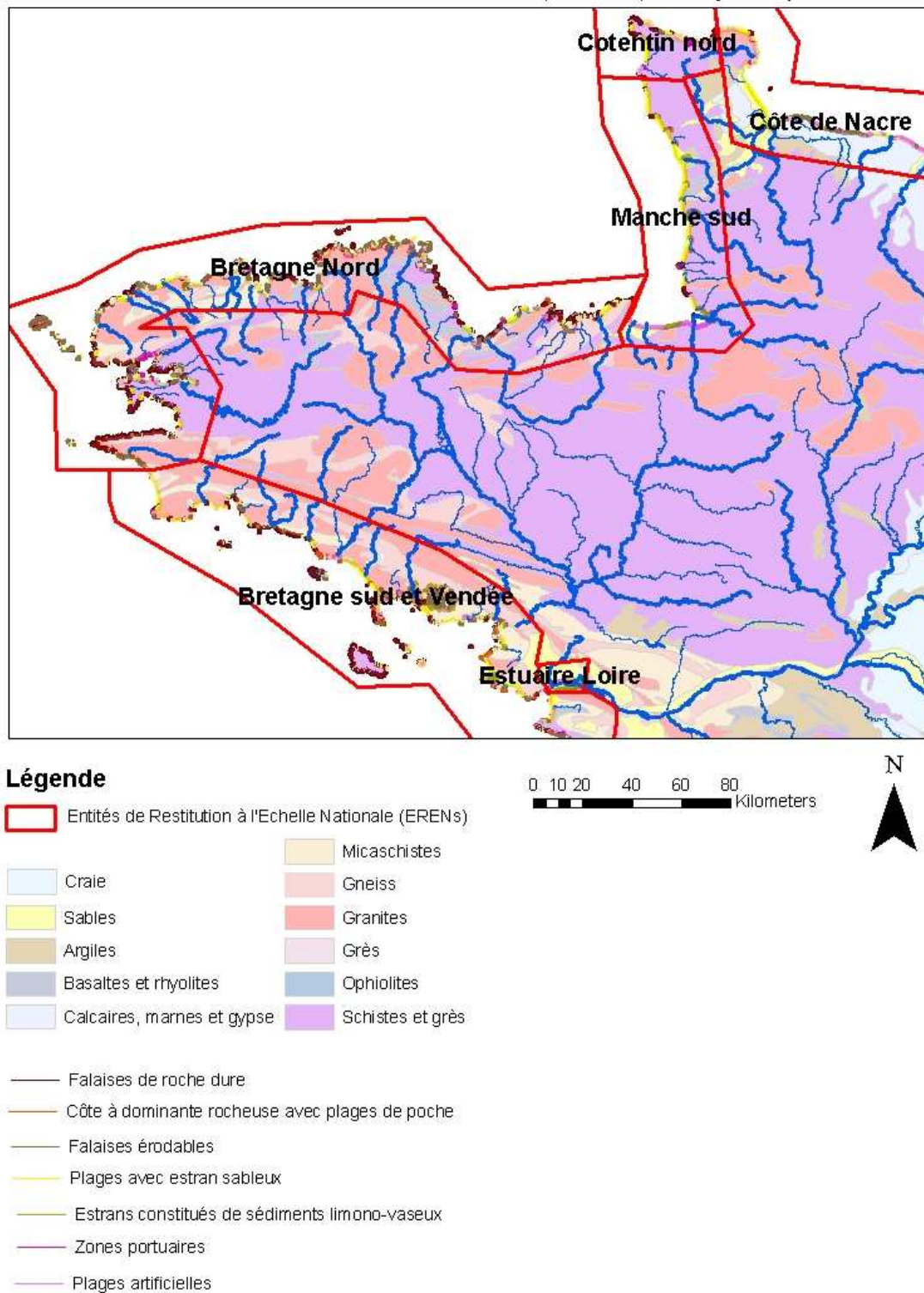


Figure 4: Limites des ERENs: de la Plaine Flamande au Cotentin (Fond cartographique: Lithologie (BRGM), BD Carthage, EuroSION)

Tableau 3: ERENs et justification de leurs limites (De l'estuaire de la Loire à la côte d'Argent)

EREN	Géomorphologie littorale dominante	Arrière-Pays dominant	Commentaire
Estuaire de la Loire	Rivages limono-vaseux, artificiels et portuaires.	Zones basses estuariennes (dépôts holocènes et pleistocène)	
Pertuis	Zone hétérogène constituée de plages généralement développées, de rivages artificiels et limono-vaseux et de quelques falaises	Zone comprenant de vastes zones basses holocènes.	Limite pouvant être déplacée à la transition paléozoïque / quaternaire à Pornic
Estuaire de la Gironde	Rivages limono-vaseux et artificiels	Vastes zones basses comprenant sables et vases holocène et pleistocène	
Aquitaine	Plages développées et rivages limono-vaseux du bassin d'Arcachon	Dunes de sables majoritairement artificielles constituées sur des massifs dunaires holocène	
Côte d'Argent	Principalement falaises érodables ; quelques plages	Relief escarpé ; grès crétacé	

Entités de restitution à l'échelle nationale (ERENs) - Projet Explore 2070

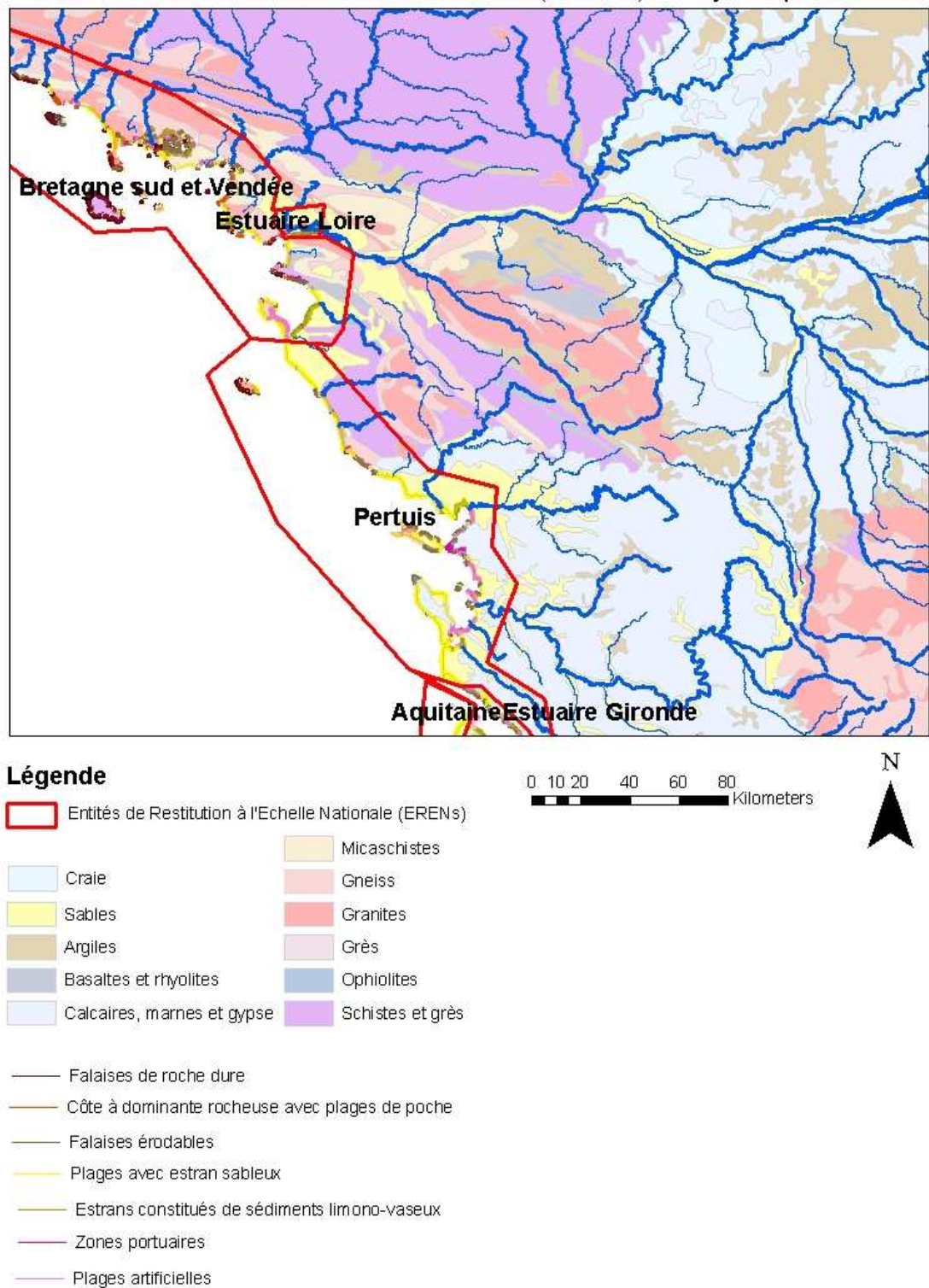


Figure 5: Limites des ERENs: de l'estuaire de la Loire à l'estuaire de la Gironde (Fond cartographique: Lithologie (BRGM), BD Carthage, Eurosion)

Entités de restitution à l'échelle nationale (ERENs) - Projet Explore 2070

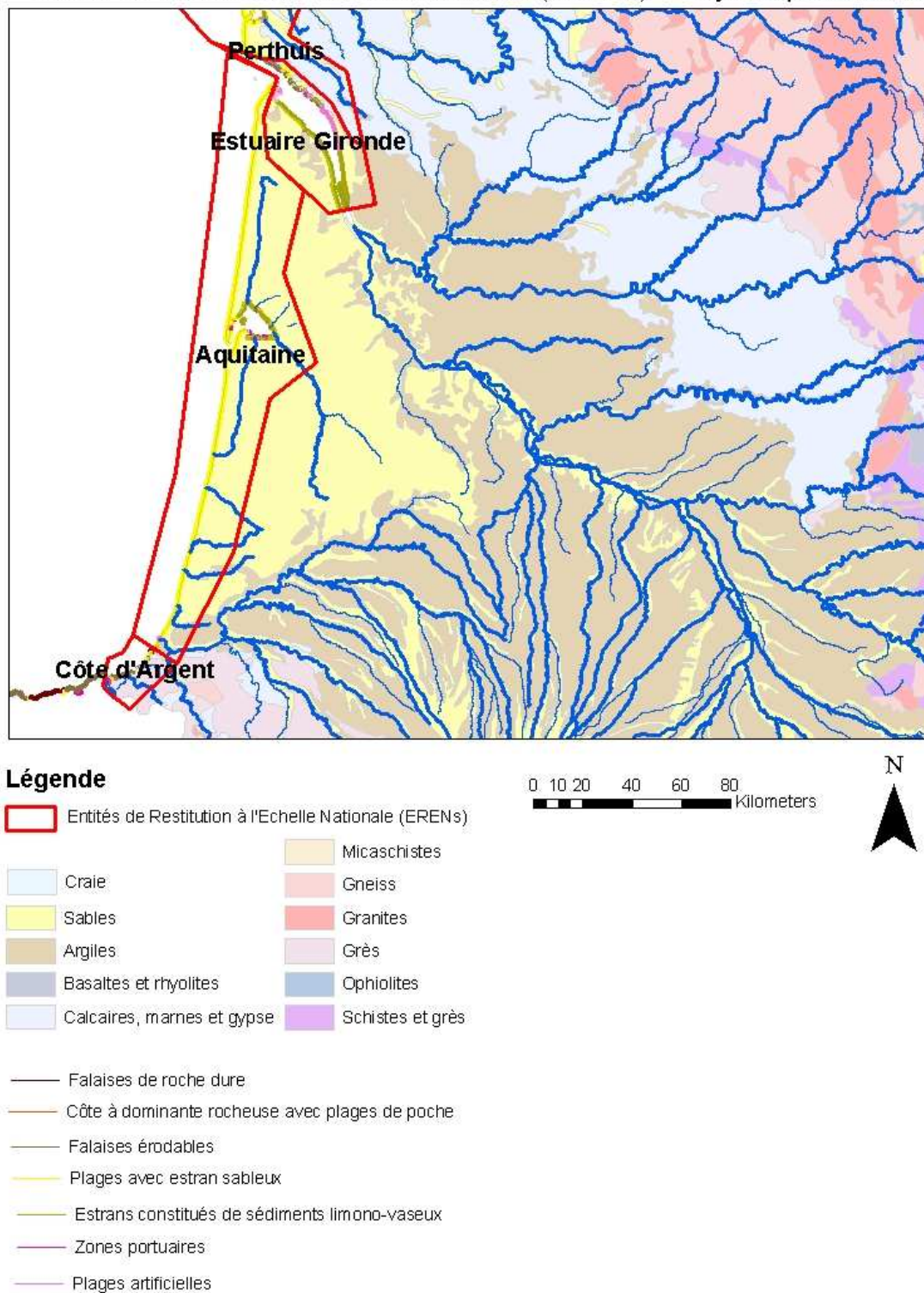


Figure 6: Limites des ERENs: l'estuaire de la Gironde à la côte d'Argent (Fond cartographique: Lithologie (BRGM), BD Carthage, EuroSION)

Tableau 4: ERENs et justification de leurs limites (Méditerranée)

EREN	Géomorphologie littorale dominante	Arrière-Pays dominant	Commentaire
Côte Vermeille	Côte rocheuse avec plages de poche	Zone escarpée (Schistes et quartzites avec calcaires intercalés)	
Languedoc ouest	Côte essentiellement sableuse (présence de quelques socles rocheux)	Vastes zones basses holocènes ; Présence de lidos et lagunes	
Languedoc est et delta du Rhône	Côte essentiellement sableuse (présence de quelques socles rocheux)	Vastes zones basses holocènes ; Présence de lidos et lagunes	Dynamique sédimentaire différente de la zone Languedoc-Ouest
Côte d'Azur	Côte rocheuse avec plages plus ou moins développées	Relief escarpé ; quelques dépôts holocène mais généralement roches sédimentaires paléozoïques et mésozoïques	
Corse ouest	Côte essentiellement rocheuse avec plages de poche	Relief escarpés : granite, ophiolites, roches magmatiques	
Corse plaine orientale	Plages développées essentiellement	Zones basses pléistocène, holocène. Quelques étangs.	

Entités de restitution à l'échelle nationale (ERENs) - Projet Explore 2070

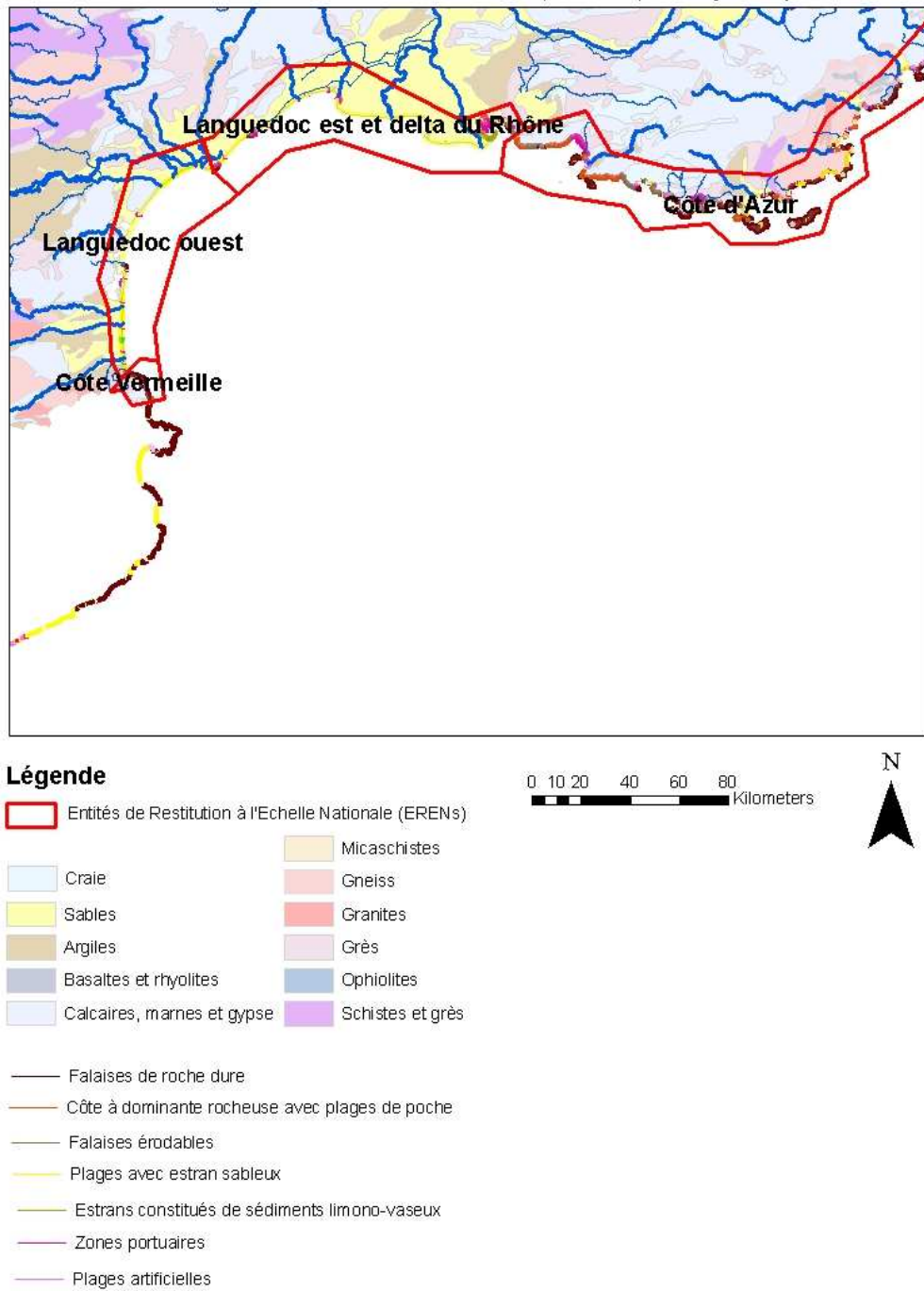


Figure 7: Limites des ERENs: Languedoc-Roussillon (Fond cartographique: Lithologie (BRGM), BD Carthage, EuroSION)

Entités de restitution à l'échelle nationale (ERENs) - Projet Explore 2070

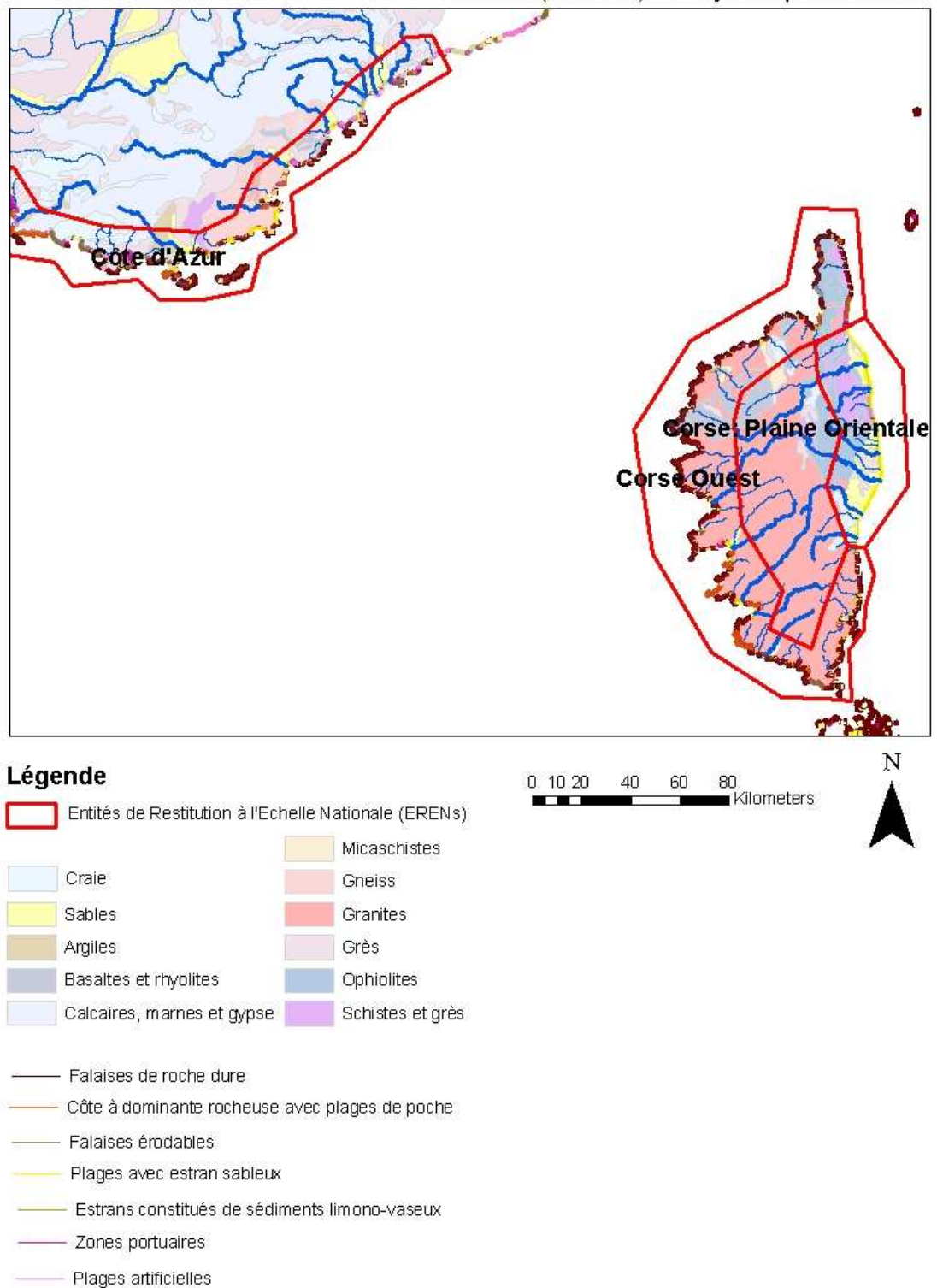


Figure 8: Limites des ERENs: PACA et Corse (Fond cartographique: Lithologie (BRGM), BD Carthage, EuroSION)

2.6.3. PERTINENCE DES ERENS

Les entités de restitution à l'échelle nationale présentées dans ce rapport ont un degré d'homogénéité assez satisfaisant pour certaines, alors que dans d'autres cas la complexité de la géologie et de la géomorphologie fait qu'il est particulièrement difficile de définir des entités relativement homogènes à cette échelle de travail.

Ainsi, pour les zones allant de la plaine Flamande à l'estuaire de la Seine, de l'estuaire de la Gironde à la frontière espagnole et en Méditerranée, on peut considérer que les zones présentées ici ont un degré d'homogénéité intrinsèque satisfaisant selon les critères retenus. En revanche, pour les zones allant de l'estuaire de la Seine à l'estuaire de la Gironde, l'échelle nationale n'est pas la plus pertinente pour effectuer un zonage. Les limites et le nombre des zones ainsi définies peuvent être discutés. En réalité, l'amélioration des ERENS dans cette zone viendrait du choix d'une échelle de travail plus grande (emprise plus petite), c'est-à-dire de l'étude à l'échelle des zooms du projet Explore 2070.

3. APPLICATION DE LA METHODE A L'OBJET D'ETUDE

La méthode proposée par le Lot littoral (³) est donc 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). Ce chapitre présente comment cette méthode a été en pratique appliquée à l'échelle nationale.

3.1. DEMARCHE

A l'échelle nationale, l'AHP est donc appliqué sur 21 entités (ERENs ou Entités de Restitution à l'Echelle Nationale) qui ont été découpées selon des critères géomorphologiques explicités dans le chapitre précédent.

Les ERENs sont définis en prenant en compte en premier lieu la géomorphologie (littoral et arrière-pays) et la géologie. Lorsque des critères supplémentaires sont nécessaires pour différencier des zones, l'occupation du sol et parfois la dynamique sédimentaire peuvent être utilisés. Par exemple, au Languedoc, la connaissance de la dynamique sédimentaire a été utilisée pour différencier deux zones de géomorphologies similaires. D'autre part, le zonage a été contraint par la nécessité de limiter le nombre d'entités.

Le scénario tendanciel suit l'hypothèse que les tendances actuelles se poursuivent à l'identique et que les systèmes côtiers sont soumis aux mêmes conditions de forçage qu'actuellement. Le scénario avec changement climatique ne prend en compte que l'élévation du niveau de la mer⁴.

Pour répondre à la question posée, on cherche à classer les entités (ERENs) selon leur vulnérabilité aux aléas côtiers (érosion du littoral et submersion marine). Ainsi, la taille des entités a été prise en compte dans l'analyse des critères. Par exemple, pour un critère tel que la géomorphologie, on ne regarde pas le pourcentage de plages présentes dans l'entité mais leur linéaire effectif. L'objectif de cette approche est de faire ressortir prioritairement les entités dont les zones vulnérables sont étendues et qui nécessiteront les efforts d'adaptation les plus

³ Nos travaux portent sur l'étude de la « dynamique des systèmes littoraux et des milieux marins côtiers ».

⁴ En effet, les conséquences du changement climatique sur les autres facteurs de forçage (exemple : évolution de la dynamique des vagues ou des régimes des tempêtes) ne portent pas à consensus actuellement. Le choix des scénarios est discuté dans le rapport bibliographique du lot littoral.

importants, du fait du cumul de facteurs de vulnérabilités physique sur de nombreux endroits. En effet, ce sont bien les entités qui ont le plus de zones vulnérables à gérer qui doivent recevoir le plus de ressources et non celles dont les zones vulnérables sont plus restreintes.

3.2. ARBRE HIERARCHIQUE ET DEFINITION DES DIFFERENTS FACTEURS ET CRITERES RETENUS

Pour l'échelle nationale, l'arbre hiérarchique est constitué des trois principales composantes (cf. chapitre précédent): facteurs de forçage (marins), facteurs d'état et facteurs de contexte. Chaque facteur est décliné en un certain nombre de critères qui caractérisent la vulnérabilité des entités aux aléas côtiers (érosion et submersion marine). Le choix d'un tel arbre hiérarchique est basé sur plusieurs études qui ont développé des indicateurs de vulnérabilité de la côte aux aléas côtiers et au changement climatique. Parmi celles-ci, on peut citer Gornitz et al. (1994 et 1997), qui a conduit à l'élaboration du CVI ou Coastal Vulnerability Index (Thieler and Hammar-Klose, 1999), ainsi que les adaptations qui en ont été faites, notamment par Coelho et al. (2006), et le projet EuroSION (2004).

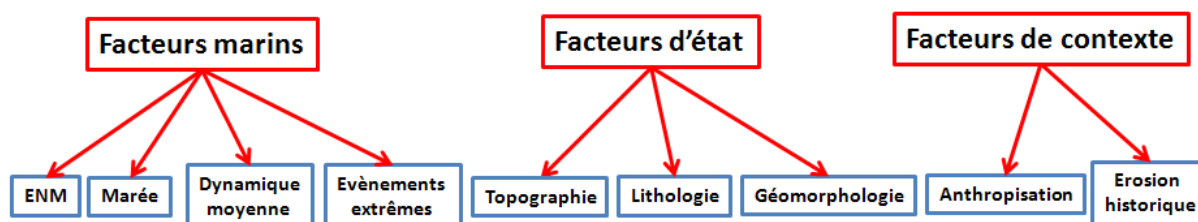


Figure 9. Arbre hiérarchique pour l'échelle nationale : facteurs (rouge) et critères (bleu)

Les **facteurs marins** sont des facteurs de forçage. Nous retenons ici l'influence de la marée, l'influence de l'hydrodynamique de temps calme, l'influence des évènements extrêmes et l'influence de l'élévation du niveau de la mer ou ENM (pour le scénario avec changement climatique uniquement). Ces critères sont couramment utilisés dans les études citées précédemment. Pour la dynamique moyenne, Gornitz et al. (1994) utilisent la moyenne de la hauteur significative des vagues. En effet, la dynamique ordinaire des vagues induit notamment un transport de sédiments long-shore toute l'année. Les évènements extrêmes (tempêtes) jouent également un rôle important dans l'évolution long-terme des côtes car ils induisent, en plus d'une submersion temporaire, des pics d'érosion qui peuvent se traduire par des taux de recul de plusieurs mètres. Ils sont pris en compte dans EUROSION (2004) à travers un critère sur les niveaux d'eau extrêmes comprenant à la fois la surcote liée au vent et aux vagues. Dans cette étude, les évènements extrêmes sont représentés par les vagues

extrêmes d'une part et de surcotes extrêmes d'autre part. Les critères sur le marnage et l'élévation du niveau de la mer sont repris ici en suivant l'approche adoptée par Thieler and Hammar-Klose (1999) dans l'élaboration du CVI.

Les facteurs d'état fournissent une description des différentes entités. Trois critères ont été retenus en suivant l'approche des « Coastal Behaviour Systems » adoptée dans Vinchon et al. (2009). La topographie indique si les entités comprennent de nombreuses zones basses, la lithologie donne des informations sur la nature du « sol » en arrière du trait de côte (sable, argiles, etc.) et la géomorphologie indique le type de littoral (plage, falaise, artificiel, etc.). Les critères sur la géomorphologie et la lithologie donnent des indications sur la vulnérabilité du système à l'érosion alors que la topographie caractérise plutôt sa vulnérabilité à la submersion.

Les facteurs de contexte permettent de différencier des zones bénéficiant d'un bilan sédimentaire favorable (du fait par exemple de la proximité d'une embouchure d'un fleuve charriant une quantité importante de sédiments) de celles subissant un déficit sédimentaire chronique. Ils sont évalués ici à l'aide de deux critères qui sont utilisés dans EUROSION (2004) et Coelho (2006) : l'anthropisation et l'érosion historique. L'anthropisation est considérée ici comme un critère contribuant à la vulnérabilité physique des entités aux aléas côtiers. Elle caractérise la possibilité ou non pour les sédiments de migrer librement. Plus les entités sont urbanisées et cultivées, plus le système côtier est perturbé et sa capacité d'adaptation diminuée. L'érosion historique caractérise les évolutions observées et permet de prendre en compte le contexte dans lequel se situe le littoral considéré. Par exemple, elle peut permettre de dissocier les côtes sableuses qui ont une tendance à l'accrétion de celles qui ont plutôt une tendance à l'érosion dû à des facteurs environnementaux qui ne sont pas pris en compte dans les autres critères: apports sédimentaires marins et continentaux (par les rivières), courants littoraux, interventions humaines (fixation du trait de côte, présence d'épis, etc.). Ainsi, ce critère est complémentaire par rapport aux facteurs marins et aux facteurs d'état qui ne sont pas toujours suffisants pour expliquer le fonctionnement d'un système côtier.

3.3. MISE EN ŒUVRE DE L'AHP

Le premier travail dans la mise en œuvre de l'AHP est le remplissage des matrices de comparaison. Deux types de matrices sont renseignés : (1) les matrices de comparaison des critères et des facteurs qui permettent d'établir les pondérations dans l'arbre hiérarchique et (2) les matrices de comparaison des entités qui permettent de les comparer deux à deux au

regard de chaque critère. Afin de remplir ces matrices, plusieurs supports ont été utilisés : une base de données qui fournit des informations quantitatives et objectives sur chaque critère, et un groupe d'experts qui apporte son expérience. Les experts peuvent ainsi pallier le manque de données disponibles pour certains critères et relativiser les informations tirées de la base de données dans certains cas. Le tableau de Saaty qui explique le principe du remplissage des matrices de comparaison est rappelé sur la Figure 11.

Deux étapes se sont succédé dans l'analyse :

- Une première pondération de l'arbre hiérarchique a d'abord été déterminée en remplissant les matrices de comparaison des composantes et des facteurs. Le remplissage peut être fait à la main car le nombre de critères à comparer est restreint. Pour les matrices de comparaison des entités, l'exercice est plus délicat car le nombre d'entités à comparer est élevé. Les matrices ont donc été d'abord pré-remplies de manière automatique en s'appuyant sur des indicateurs construits à partir de la base de données.
- Puis, le groupe d'expert a analysé les résultats afin d'affiner les pondérations et de revenir sur les comparaisons entre les entités faites à partir des indicateurs. Ces deux étapes sont décrites plus en détail dans ce chapitre et les résultats finaux sont présentés au chapitre 4.

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

Figure 10. Tableau de Saaty pour déterminer l'importance relative des entités au regard des différents critères.

3.4. LA BASE DE DONNEES

Pour chaque critère de l'arbre, une source de données a été identifiée afin de construire un indicateur. Il s'agit de couches SIG décrivant les conditions hydrodynamiques, géologiques et l'occupation du sol. Une seule source de données a été exploitée pour chaque critère. En effet,

l'objectif étant de comparer deux à deux les entités, la condition principale était l'homogénéité des jeux de données choisis. Les différentes sources de données sont décrites ci-dessous et les variables utilisées sont détaillées dans la description des indicateurs.

Données pour les critères des facteurs marins :

- Les données hydrodynamiques d'EUROSION sur les vagues et la vitesse d'élévation du niveau de la mer. Des bases de données plus récentes existent mais le critère le plus important dans le choix de celle d'EUROSION est l'homogénéité de la base qui permet de comparer les entités. La qualité des données EUROSION est considérée comme suffisante pour le travail à l'échelle nationale. Les différents points de la base EUROSION sont tous des points hauturiers.
- Les résultats de l'étude sur « les niveaux marins extrêmes le long des côtes de France et leur évolution » réalisée par le CETMEF et le SHOM en 2008.
- Les références altimétriques maritimes du SHOM (RAM) qui donnent des valeurs de niveaux de marée pour de nombreux ports de la façade Atlantique et en Manche.

Données pour les critères des facteurs d'état :

- Base de données de topographie : BD ALTI nationale (résolution 50m) ;
- La description de la géomorphologie côtière (EUROSION) ;
- La couche lithologique au 1 : 1 000 000 (BRGM).

Données pour les critères des facteurs de contexte :

- Base de données d'occupation du sol : Corine Land Cover (ou CLC) de 2006 (1 :100 000) ;
- Les tendances d'évolution historiques du trait de côte (EUROSION).

3.5. CONSTRUCTION ET UTILISATION DES INDICATEURS

Les indicateurs sont des variables utilisées afin de pré-remplir les matrices de comparaison des entités de manière automatique. Leur analyse permet de faire des groupements d'entités dont la vulnérabilité est similaire par rapport à un certain critère. Les entités ainsi classées en

différents groupes sont plus facilement comparables. A chaque groupe (ou classe) d'entités, on attribue une note en fonction de son degré de vulnérabilité par rapport au critère. Cette note est ensuite utilisée pour remplir automatiquement la matrice de comparaison des entités. Dans la matrice, l'importance relative entre les différents groupes est calculée en faisant la différence des notes attribuées à chaque groupe afin de retrouver les niveaux de comparaison du tableau de Saaty (cf. Figure 11).

Exemple : On considère ici le critère « élévation du niveau de la mer » ou « ENM ». La comparaison des entités est basée sur l'indicateur « vitesse actuelle de l'ENM ». En effet, cet indicateur caractérise la variabilité régionale de l'amplitude du phénomène et permet de comparer les entités entre elles. A la vue de cet indicateur, les entités peuvent être réparties en 3 groupes caractérisés par trois gammes de vitesse : $\sim 1\text{mm/an}$ (G1), $\sim 1,5\text{mm/an}$ (G2), et $\sim 2\text{mm/an}$ (G3). Comme la différence de vitesse entre chaque groupe est faible, on veut traduire une différence d'importance du critère modérée entre chaque groupe successif. Ainsi, les notes attribuées aux groupes G1, G2 et G3 sont respectivement $N1=1$, $N2=3$ et $N3=5$. Dans la matrice de comparaison, l'importance de G3 par rapport à G1 sera égale à $N3-N1+1=5$ (beaucoup d'importance) et l'importance de G3 par rapport à G2 sera égale à $N3-N2+1=3$ (un peu d'importance).

Les indicateurs utilisés pour le remplissage des matrices de comparaison sont détaillés dans le chapitre suivant pour les facteurs marins, d'état et de contexte. Toutes les matrices de comparaison des entités correspondantes sont en Annexe 3.

3.6. APPORTS DU GROUPE DE TRAVAIL

Le groupe de travail est constitué de cinq agents du BRGM : trois agents du centre technique d'Orléans ainsi que deux agents des centres régionaux PACA et Aquitaine. Le rapport de la réunion des experts est en Annexe 3.

Les membres du groupe de travail sont intervenus à deux niveaux : (1) dans le remplissage direct des matrices de comparaison utilisées pour définir les pondérations et (2) dans la répartition des entités dans les différents groupes notés pour le remplissage automatique des matrices de comparaison des entités au regard des différents critères. Les échanges ont eu lieu lors de discussions individuelles relatives à la spécialité de chacun et dans une réunion qui a réuni tous les experts afin d'analyser et de critiquer les premiers résultats obtenus. Les résultats présentés dans les chapitres suivants intègrent les corrections demandées par les experts. Les discussions engagées pour chaque critère sont également rapportées au fil du

texte.

4. RESULTATS

Ce chapitre présente les résultats de l'analyse menée à l'échelle métropolitaine. Les résultats concernant chacun des critères sont présentés.

4.1. PONDERATIONS DES FACTEURS ET DES CRITERES DANS LES SCENARIOS TENDENTIEL ET AVEC ELEVATION DU NIVEAU DE LA MER

Les pondérations attribuées à chaque facteur et chaque critère sont décrites sur la Figure 12. Elles ont été calculées en remplissant les matrices de comparaison de Saaty en concertation avec le groupe d'experts. Ces matrices sont reportées en Annexe 3 pour l'ensemble des facteurs et des critères.

Scénario tendanciel

FACTEURS MARINS				FACTEURS D'ETAT			FACTEURS DE CONTEXTE	
0.28				0.58			0.13	
MARNAGE	ENM	DYNAMIQUE MOYENNE	EVENEMENTS EXTREMES	TOPOGRAPHIE	LITHOLOGIE	GEOMORPHOLOGIE	EROSION HISTORIQUE	ANTHROPISATION
0.19	0.00	0.41	0.41	0.50	0.25	0.25	0.50	0.50

Scénario avec élévation du niveau de la mer

FACTEURS MARINS				FACTEURS D'ETAT			FACTEURS DE CONTEXTE	
0.20				0.70			0.10	
MARNAGE	ENM	DYNAMIQUE MOYENNE	EVENEMENTS EXTREMES	TOPOGRAPHIE	LITHOLOGIE	GEOMORPHOLOGIE	EROSION HISTORIQUE	ANTHROPISATION
0.13	0.13	0.38	0.38	0.50	0.25	0.25	0.50	0.50

Figure 11. Pondérations entre les différents facteurs et leurs critères suivant la méthode de l'AHP.

Pour la comparaison des **facteurs**, un exemple de matrice est présenté sur la Figure 12. Pour le scénario tendanciel, on considère que les facteurs d'état ont (dans l'échelle de Saaty) "un peu plus d'importance" sur la vulnérabilité physique des systèmes côtiers que les deux autres facteurs, et que les facteurs marins ont "un peu plus d'importance" que les facteurs de contexte. Ainsi, les pondérations calculées par la matrice sont de 0.28 pour les facteurs marins, 0.58 pour les facteurs d'état et 0.13 pour les facteurs de contexte. Pour le scénario avec changement climatique, les facteurs d'état sont "beaucoup plus importants" que les deux autres sur cette même échelle.

La justification de ces choix est la suivante : on considère que sur les échelles de temps considérées, l'élévation du niveau marin aura un impact plus fort sur les zones dont les facteurs d'état indiquent une vulnérabilité physique plus importante. Cette approche suit la

méthode issue du projet RESPONSE (Vinchon et al., 2009). Les nouvelles pondérations sont de 0.2 pour les facteurs marins, 0.7 pour les facteurs d'état et 0.1 pour les facteurs de contexte.

Scénario tendanciel	Facteurs marins	Facteurs d'état	Elements de contexte	PRIORITE
Facteurs marins	1,00	3,00	0,33	0,28
Facteurs d'état	0,33	1,00	0,33	0,58
Facteurs de contexte	3,00	3,00	1,00	0,13

Scénario avec ENM	Facteurs marins	Facteurs d'état	Elements de contexte	PRIORITE
Facteurs marins	1,00	5,00	0,33	0,20
Facteurs d'état	0,20	1,00	0,20	0,70
Elements de contexte	3,00	5,00	1,00	0,10

Figure 12. Matrice de comparaison pour l'attribution des pondérations aux trois facteurs de l'arbre hiérarchique pour les scénarios tendanciel et avec changement climatique.

Pour les critères des **facteurs marins**, le marnage a été considéré comme “un peu moins important” que la dynamique moyenne et les événements extrêmes. Le groupe d'experts a rappelé que son influence sur les aléas côtiers ne portait pas à consensus. Par exemple, pour la construction du CVI, Thieler and Hammar-Klose (1999) considèrent que le marnage est un facteur favorable d'adaptation de la côte aux forçages marins car celle-ci est déjà adaptée à de fortes variations du niveau d'eau. D'autres écoles (par exemple Coelho, 2006) considèrent que plus le marnage est important, plus la côte est vulnérable car le va-et-vient des masses d'eau induit de forts courants qui créent un transport sédimentaire. Les experts ont décidé d'adopter la même approche que celle du CVI, mais de diminuer le poids du marnage, afin de prendre en compte ce manque de consensus. Pour le scénario avec changement climatique, le critère élévation du niveau de la mer a également “un peu moins d'importance” que la dynamique moyenne et les événements extrêmes. Ce choix a été motivé par les fortes incertitudes qui persistent concernant la variabilité régionale de l'élévation du niveau de la mer sur les côtes françaises au cours du 21^{ème} siècle.

Pour les critères des **facteurs d'état**, les matrices ont été renseignées de manière à garder un équilibre entre les deux types d'aléa considérés. Ainsi la topographie (qui influence la vulnérabilité à la submersion) et la somme des critères lithologie et géomorphologie (qui influencent la vulnérabilité à l'érosion) ont un même poids de 0.5. Les pondérations pour les deux scénarios restent les mêmes car les aléas érosion et submersion sont toujours considérés de manière égale.

Pour les critères des **facteurs de contexte**, un même poids a été attribué à l'anthropisation et l'érosion historique car leur importance a été considérée comme équivalente par les experts.

De même que pour les facteurs d'état, les pondérations restent inchangées pour les deux scénarios car on ne prend pas en compte l'évolution anthropique dans le scénario avec changement climatique seul.

4.2. CLASSEMENT DES ENTITES POUR LES FACTEURS MARINS

4.2.1. CRITERE « MAREE »

L'indicateur utilisé pour le critère sur l'influence de la marée est le marnage entre les pleines mers moyennes de vives eaux (PMVE) et les basses mers moyennes de vives eaux (BMVE). Les stations renseignées dans les références altimétriques maritimes (RAM) diffusées par le SHOM ont été réparties dans les différentes entités. Puis, pour chaque entité, la moyenne des différences entre les PMVE et BMVE a été calculée (cf. Figure 14). Pour les entités Méditerranéennes, les valeurs de PMVE et BMVE sont indiquées comme « non représentatives » dans les RAM mais le marnage maximum que l'on peut y constater est dans tous les cas inférieur ou de l'ordre de 0,5m.

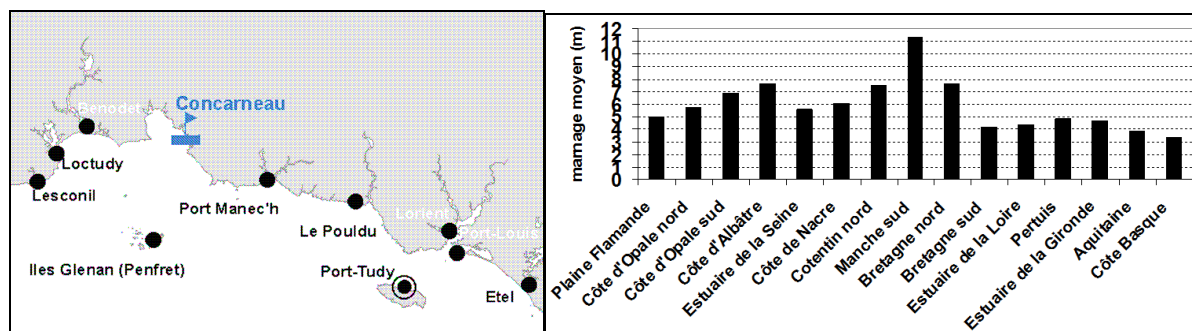


Figure 13. Gauche : Exemple de stations en Bretagne sud renseignées dans les RAM du SHOM (points noirs sur la carte). Droite: Moyenne des PMVE-BMVE calculée pour chaque EREN sur la façade Atlantique et en Manche à partir des RAM.

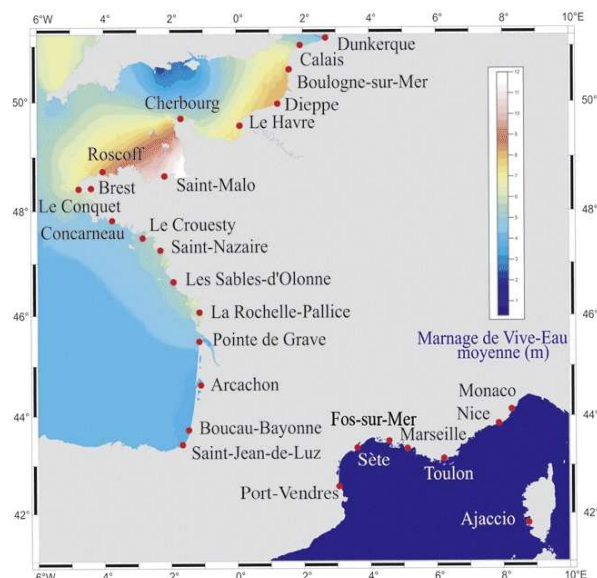


Figure 14. Carte du réseau RONIM (Réseau d'Observation du Niveau de la mer). (SHOM)

Les entités ont été réparties en groupes à l'aide de l'indicateur calculé et de la carte du marnage de vive-eau moyenne du réseau RONIM (cf. Figure 15). La gamme des marnages sur les côtes françaises est très grande. Aussi, dans l'échelle de Saaty, les notes attribuées aux deux groupes extrêmes montrent une différence d'importance « absolue » (9) entre ceux-ci. Pour les groupes intermédiaires, les notes traduisent une différence d'importance plus faible :

- « Manche » (note : **1**) ;
- « Côte d'Opale sud », « Côte d'Albâtre », « Cotentin nord », « Bretagne nord » (note : **3**) ;
- « Côte d'Opale nord », « Estuaire de la Seine », « Côte de Nacre » (note : **4**) ;
- « Pertuis », « Estuaire de la Gironde » (note : **5**) ;
- « Bretagne sud », « Estuaire de la Loire », « Plaine Flamande » (note : **6**) ;
- « Aquitaine », « Côte Basque » (note : **7**) ;
- Toutes les entités méditerranéennes (note : **9**).

Les résultats sont présentés pour chacun des ERENs en figure 13.

4.2.2. CRITERE « DYNAMIQUE MOYENNE »

L'indicateur utilisé pour le critère dynamique moyenne est la hauteur significative moyenne des vagues (ou Hs moyen). Les stations proches des côtes françaises ont été extraites de la base de données EUROSION. Ces données ont été intégralement générées durant le projet EUROSION. Les différentes variables sur les vagues ont été calculées à partir de la base waveclimate.com distribuée par la compagnie ARGOSS qui contenait alors 17 années (1985-2001) de données. Les observations utilisées sur les vagues proviennent des données ERS-1, ERS-2, Topex/Poseidon et Geosat (EUROSION, 2004)

Le Hs moyen est renseigné dans la variable HDWAHSAV. Une valeur fixe n'a pas été attribuée à chaque entité car plusieurs points peuvent être utilisés pour une même entité. Sur la figure 15, aucune valeur n'est indiquée pour les points 1 à 6 car ceux-ci ne comportaient pas de valeurs sur les vagues. Une consultation des experts a permis de pallier ce manque de données.

L'utilisation de cette base de données a été discutée pendant la réunion des experts car sa résolution spatiale est faible et elle mériterait d'être actualisée. Etant donné que les indicateurs ne sont construits que pour comparer les entités entre elles, le critère le plus important reste l'homogénéité du jeu de données utilisé et la base EUROSION a été jugée comme suffisante pour l'application à l'échelle nationale.

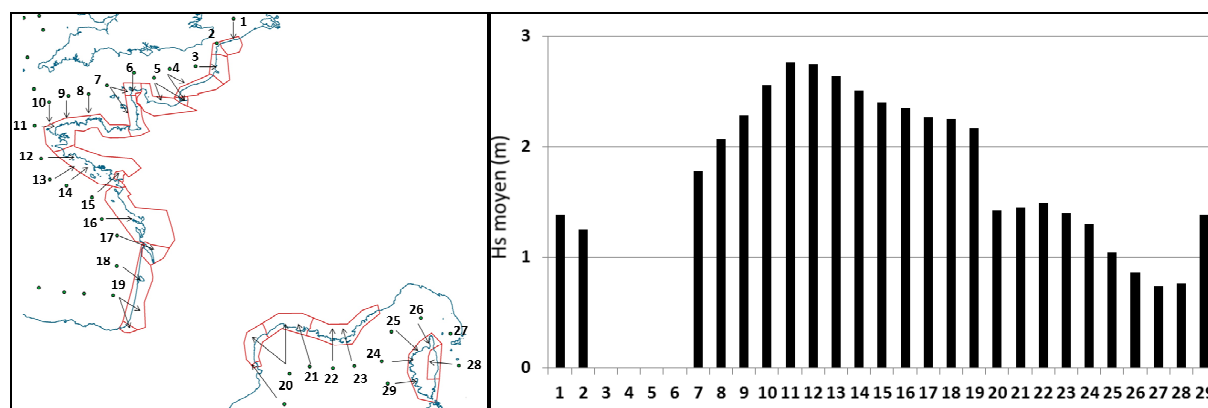


Figure 15. Gauche : Localisation des stations de la base EUROSION et correspondance avec chaque entité. Droite : Hs moyen pour chaque station de la carte. Pour les points 3, 4, 5 et 6, aucune donnée n'est disponible dans la base.

A l'aide de cet indicateur, les entités ont été réparties en 5 groupes dont les notes s'échelonnent régulièrement de 1 à 5 afin de marquer une différence d'importance forte entre les deux extrêmes :

- L'entité « Corse plaine orientale » (note : 1) ;
- Les entités méditerranéennes (sauf « Corse plaine orientale ») ainsi que les entités « Plaine Flamande » et « Côte d'Opale nord » (note : 2) ;
- Les entités de « Côte d'Opale sud » à « Cotentin nord » (note : 3) ;
- Les entités de « Manche sud » à « Côte Basque » (sauf « Bretagne sud ») (note : 4) ;
- L'entité « Bretagne sud » (note : 5).

Les résultats sont présentés en figure 15.

4.2.3. CRITERE « EVENEMENTS EXTREMES »

Deux indicateurs ont été utilisés pour classer les entités au regard des événements extrêmes.

Le premier indicateur est la surcote centennale de pleine mer calculée dans l'étude sur les niveaux marins extrêmes sur plusieurs stations marégraphiques de la côte Atlantique et en Manche. Ici, on prend en compte la surcote centennale plutôt que le niveau d'eau centennal (comprenant également la marée astronomique) : en effet, le niveau d'eau centennal prend en compte la marée et la surcote. Or, les enjeux sont situés à l'abri des plus hautes mers astronomiques. Au contraire, les enjeux ne sont pas à l'abri d'une surcote qui peut être plus ou moins forte selon, par exemple, la configuration de la côte. Le critère « événements extrêmes » retenu est donc la surcote. Il permet d'identifier les ERENs pour lesquels la surcote centennale est la plus forte.

Les données de surcote ne sont pas disponibles pour la côte Méditerranéenne et ne permettent de comparer que les entités de la façade Atlantique et en Manche. En accord avec les experts, nous avons retenu que les surcotes étaient globalement moins importantes en Méditerranée que sur les autres façades.

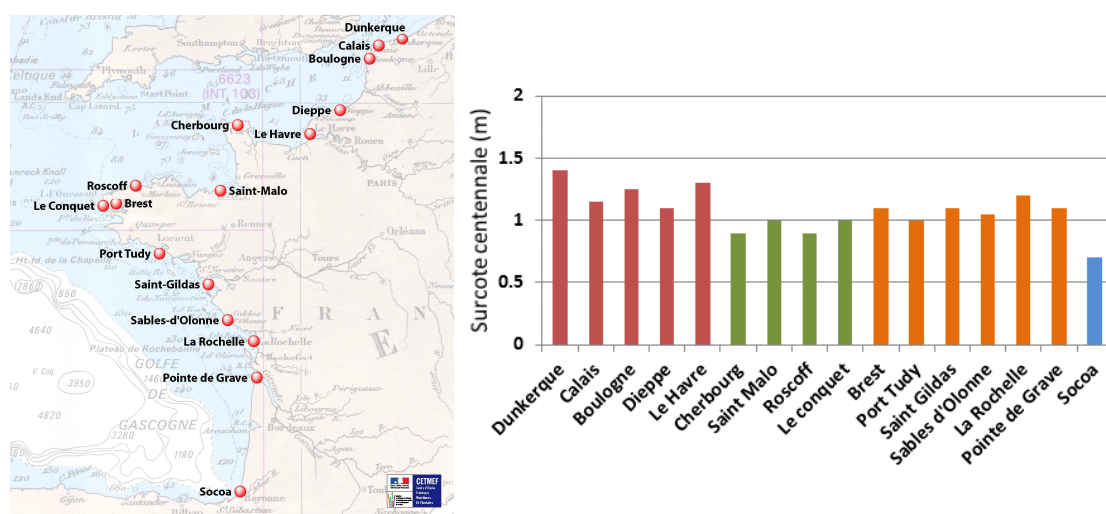


Figure 16. Gauche : Position des marégraphes. Droite: surcotes centennales de pleine mer (valeurs indicatives tirées des résultats graphiques de l'étude sur les niveaux marins extrêmes de 2008). Pour les points 3, 4, 5 et 6, aucune donnée n'est disponible dans la base.

Cinq groupes ont été déterminés. La différence de surcote entre toutes les stations reste assez faible. Aussi, les notes attribuées traduisent une différence d'importance très faible entre chaque groupe:

- Toutes les entités Méditerranéennes (note: 1) ;
- L'entité « Côte Basque » (note: 2) ;
- Les entités « Cotentin nord », « Manche sud », « Bretagne nord » et « Aquitaine » (note: 3) ;
- Les entités de « Bretagne sud » à « Estuaire de la Gironde » (note: 4) ;
- Les entités de « Plaine Flamande » à « Côte de Nacre » (note: 5).

Le deuxième indicateur est la hauteur des vagues extrêmes donnée par la variable HDWAHSTN (hauteur moyenne du 10^{ème} des vagues les plus hautes) dans la base EUROSION (cf. Figure 17). Le graphe ci-dessous traduit le même type de variabilité entre les entités pour Hs_{10%} que pour les vagues moyennes. Il a été conseillé par les experts de faire un test avec Hs_{1%} (la hauteur moyenne du 100^{ème} des vagues les plus hautes) mais il s'est avéré que cela n'apportait pas de modification dans la comparaison des entités. Les groupes formés et les notes attribuées pour cet indicateur sont donc les mêmes que pour l'indicateur sur le Hs moyen.

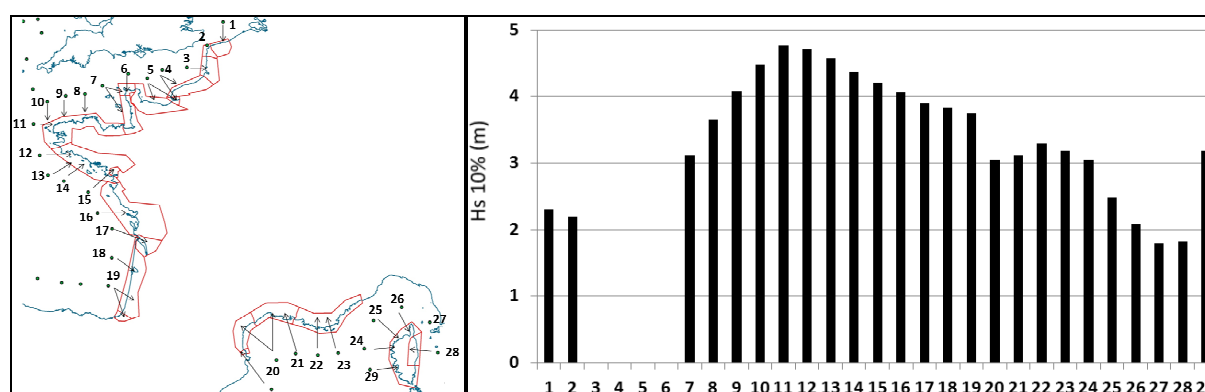


Figure 17. Gauche : Localisation des données EUROSION et attribution des stations virtuelles à chaque entité. Droite : Hs_{10%} pour chaque station de la carte.

4.2.4. CRITERE « ELEVATION DU NIVEAU DE LA MER »

A l'échelle nationale, on ne considère pas une valeur fixe d'élévation du niveau de la mer à une échéance donnée. En effet, les zones potentiellement affectées par cette élévation en arrière du trait de côte ne sont pas spatialisées en effectuant un croisement avec la topographie comme pour les zooms. Le critère sur la topographie est pris en compte séparément dans les facteurs d'état. Ici, **l'indicateur utilisé est la vitesse de l'ENM observée** qui caractérise les différences d'amplitude du phénomène selon les régions et permet de comparer les entités. **Notons que l'observation des vitesses d'élévation du niveau marin actuelles ne présage pas de ce qu'elles seront au futur.** La base de données EUROSION fournit une valeur par

point de donnée hydrodynamique avec la variable HDSELV. Lors du projet EUROSION, ces valeurs ont été obtenues par extrapolation à partir de la digitalisation de 2 cartes : Douglas et al., 2001 et Lambeck et al., 1997 (cf. EUROSION, 2004). Ces données mériteraient d'être actualisées avec les résultats récents de reconstruction des variations du niveau marin (composantes climatiques et de subsidence ou de surrection de diverses échelles spatiales).

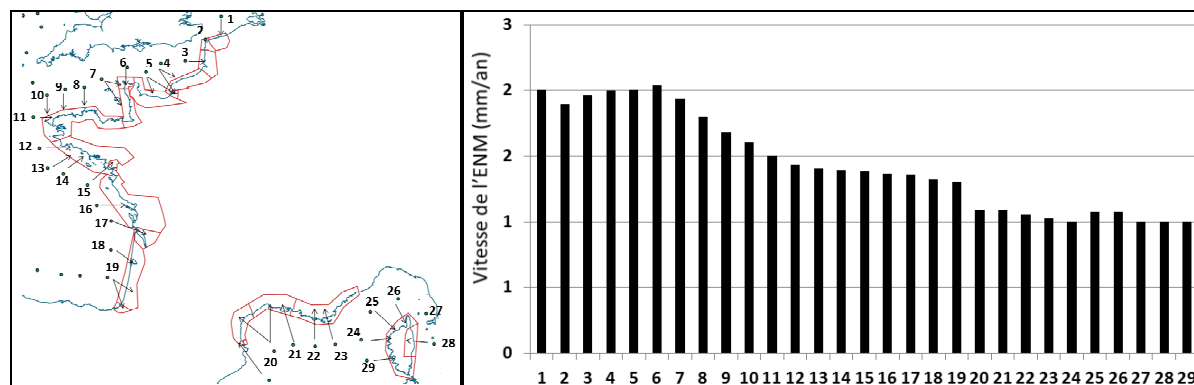


Figure 18. Gauche : Localisation des données EUROSION et attribution des stations virtuelles à chaque entité. Droite : Vitesse d'élévation du niveau de la mer pour chaque station.

Sur la Figure 19, on distingue trois principaux groupes. La différence de l'ENM entre ces groupes reste modérée (au maximum 1mm/an). Aussi, les notes attribuées traduisent une différence d'importance faible entre chaque groupe :

- Les entités Méditerranéennes (note: 1) ;
- Les entités de « Bretagne sud » à « Côte Basque » (note: 3) ;
- Les entités de « Plaine Flamande » à « Bretagne nord » (note: 5) ;

Dans notre cas, la variable niveau marin n'induit pas de différence significative entre les différentes entités. En revanche, si cette méthode était appliquée à des pays pour lesquels on constate des surrections liées au rebond isostatique, il serait essentiel d'en tenir compte. En résumé, ce critère a pour but d'identifier les zones pour lesquelles les variations du niveau marin futures seront aggravées par une subsidence ou modérés par une surrection. Cependant, avec les données actuelles, leur résolution, et le contexte géodynamique en France métropolitaine, il ne n'induit pas de différence importante entre les entités.

4.2.5. RESULTATS INTERMEDIAIRES DE L'AHP POUR LES FACTEURS MARINS

La partie « facteurs marins » de l'AHP est calculée en appliquant les pondérations déterminées pour chaque critère. Pour les facteurs marins, la classification est différente pour le scénario tendanciel et le scénario avec changement climatique (qui prend en compte

l'élévation du niveau de la mer).

De manière générale (cf. Figure 20), les entités de la côte Atlantique (de la « Bretagne sud » à la « Côte Basque ») apparaissent comme les plus exposées au regard des facteurs marins, car les conditions hydrodynamiques y sont les plus énergétiques. L'entité « Bretagne sud » ressort particulièrement à cause des fortes vagues auxquelles elle est soumise. De la « Côte d'Opale sud » à la « Bretagne nord », l'exposition est également importante, notamment à cause des surcotes extrêmes pour les entités les plus au nord. Néanmoins, le « Cotentin nord » est relativement moins exposé par rapport à ses voisins dû à sa configuration particulière qui rend les facteurs de forçage hydrodynamiques globalement moins agressifs. Enfin, les expositions des entités situées en Méditerranée et à l'extrême est de la Manche (« Plaine Flamande » et « Côte d'Opale nord ») sont similaires, mais les facteurs explicatifs diffèrent. Alors que les premières sont fortement soumises aux événements extrêmes, l'exposition des entités Méditerranéennes est augmentée par leur faible capacité d'adaptation aux variations du niveau d'eau due à leur faible marnage (d'après l'école de Gornitz et al, 1997).

Pour le scénario avec changement climatique (cf. Figure 20), la prise en compte du critère ENM, caractérisé par la vitesse d'élévation du niveau de la mer, rend les entités situées dans la partie est de la Manche plus vulnérables que les entités Méditerranéennes. Ces entités sont alors très proches des entités de la façade Atlantique dans le classement.

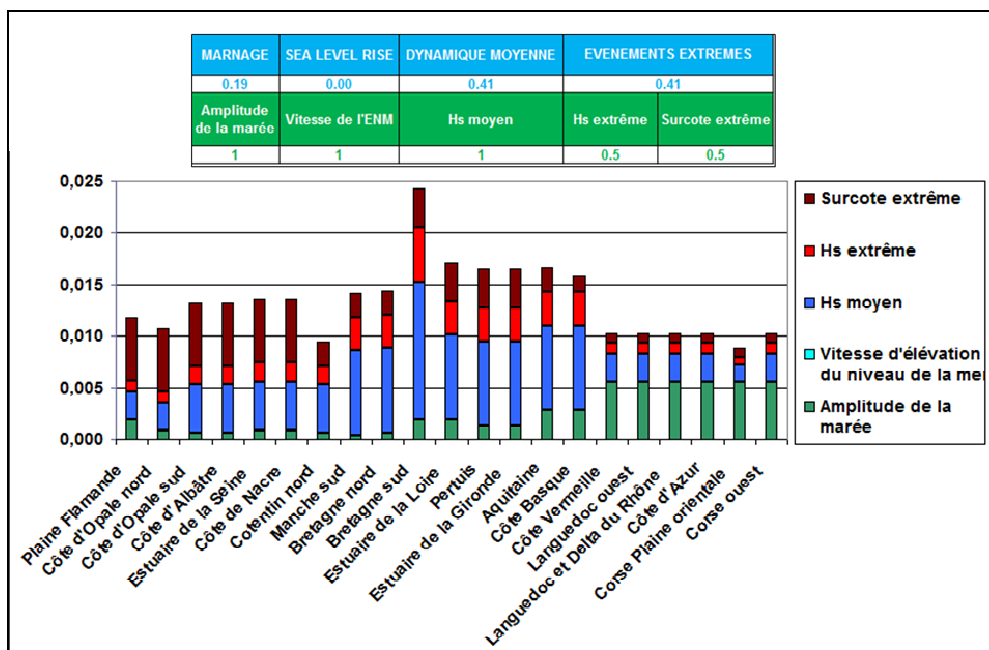


Figure 19. Résultat de l'AHP pour les facteurs marins pour le scénario tendanciel. La contribution de chaque composante à la note finale est indiquée par les couleurs. La pondération globale des facteurs marins dans l'arbre hiérarchique pour ce scénario est de 0.28.

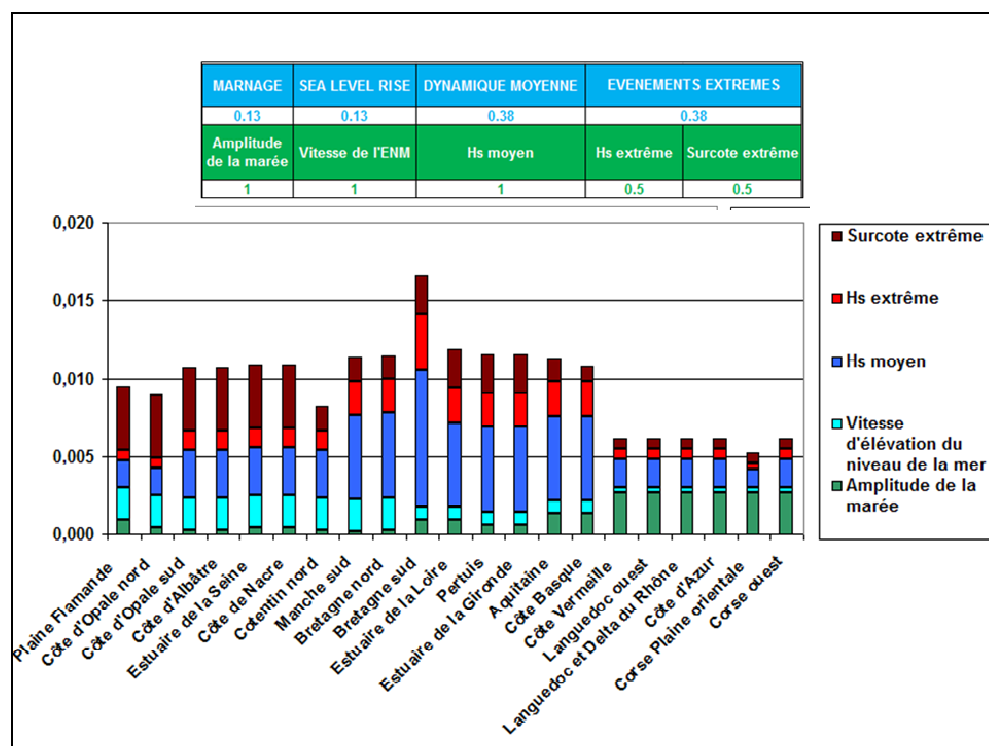


Figure 20. Résultat de l'AHP pour les facteurs marins pour le scénario avec changement climatique. La contribution de chaque composante à la note finale est indiquée par les couleurs. La pondération globale des facteurs marins dans l'arbre hiérarchique pour ce scénario est de 0.20.

4.3. CLASSEMENT DES ENTITES POUR LES FACTEURS D'ETAT

Afin de prendre en compte la taille des entités, les indicateurs pour les facteurs d'état (qui décrivent le littoral et l'arrière côte des différentes entités) n'ont pas été construits sur des pourcentages (ex : « le pourcentage de côte en érosion ») mais sur des valeurs effectives (ex : « nombre de kilomètres de côte en érosion de l'entité »). En effet, l'objectif est de faire ressortir les entités pour lesquelles les zones très vulnérables sont étendues, dans un souci de répartition des ressources à attribuer pour la gestion des zones côtières. Par exemple, les entités comme les estuaires sont fortement soumises aux aléas côtiers, car ce sont notamment des zones basses, mais leur problématique reste très localisée géographiquement. Au contraire, une entité comme les Pertuis comprend des zones basses très étendues qui vont nécessiter l'attribution de ressources importantes pour leur gestion.

4.3.1. CRITERE « TOPOGRAPHIE »

L'indicateur retenu pour le critère topographie est la valeur des surfaces de chaque entité situées sous une altitude de 5m dans la couche BD ALTI nationale en cohérence avec le type d'indicateur utilisé dans EUROSION (2004). La couche BD ALTI a d'abord été intersectée avec le zonage des EREN puis le calcul des surfaces a été effectué avec ARCGIS (cf. Figure 22).

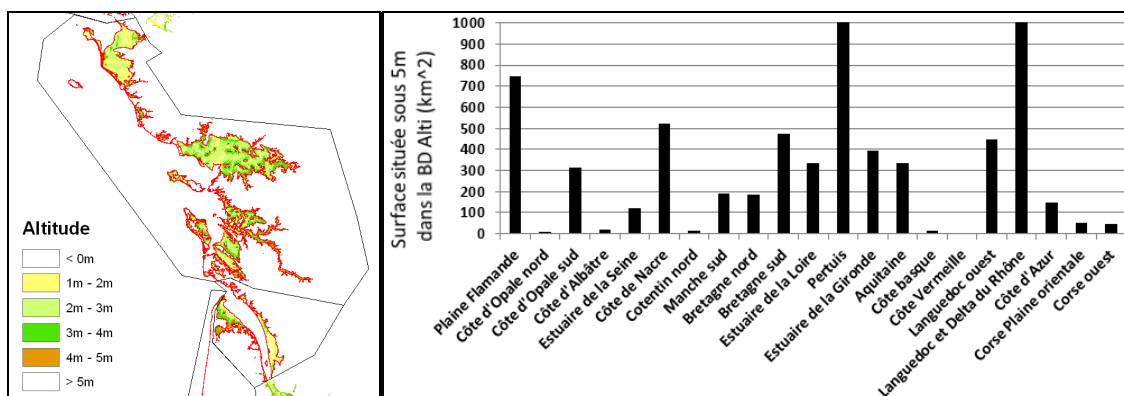


Figure 21. Gauche : zonage des secteurs situés sous 5m d'altitude pour les entités « Pertuis » et « Estuaire de la Gironde ». Droite : Valeurs des surfaces situées sous 5m d'altitude dans chaque entité. L'axe des ordonnées a été coupé à 1000 pour plus de lisibilité mais les valeurs montent jusqu'à 2000 (pour l'entité « Languedoc et Delta du Rhône ») et 2500 (pour l'entité « Pertuis »).

Les valeurs des surfaces situées sous 5m d'altitude (S) varient beaucoup en fonction des entités et s'échelonnent sur une large gamme (de moins de 100 à plus de 1000 km²). Les entités ont donc été classées en beaucoup de groupes déterminés par des intervalles tous les

100 km². Les notes attribuées traduisent une différence d'importance très faible entre chaque groupe mais s'échelonnent de 1 à 10 pour marquer une différence d'importance absolue entre les deux extrêmes :

- Les entités telles que $S \leq 100 \text{ km}^2$ (note : **1**) ;
- Les entités telles que $100 \text{ km}^2 \leq S < 200 \text{ km}^2$ (note : **2**) ;
- Les entités telles que $200 \text{ km}^2 \leq S < 300 \text{ km}^2$ (note : **3**) ;
- Les entités telles que $300 \text{ km}^2 \leq S < 500 \text{ km}^2$ (note : **4**) ;
- L'entité « Plaine flamande » (note : **5**) ;
- L'entité « Languedoc et Delta du Rhône » (note : **8**) ;
- L'entité « Pertuis » (note : **10**).

4.3.2. CRITERE « LITHOLOGIE »

Le critère lithologie a pour but de caractériser la géologie de l'arrière-pays. Deux indicateurs ont été calculés pour chaque entité à partir de la couche lithologie au 1 : 1 000 000 (BRGM). Pour chacun, la couche lithologique a été considérée dans un tampon de 200m le long du trait de côte afin de ne prendre en compte que la frange littorale directement concernée par les aléas érosion et submersion marine. La largeur de cette zone tampon a été déterminée afin de correspondre à une distance de recul du trait de côte plausible à l'échelle de temps considérée (étude RNACC : Yates et al., 2011).

L'indicateur le plus déterminant est la valeur de la surface composée de sables et d'argiles (qui sont des matériaux très fortement érodables) dans chaque entité et le second est la valeur de la surface composée de marne, de gypse ou de craie pour chaque entité (cf. Figures 23 et 24).

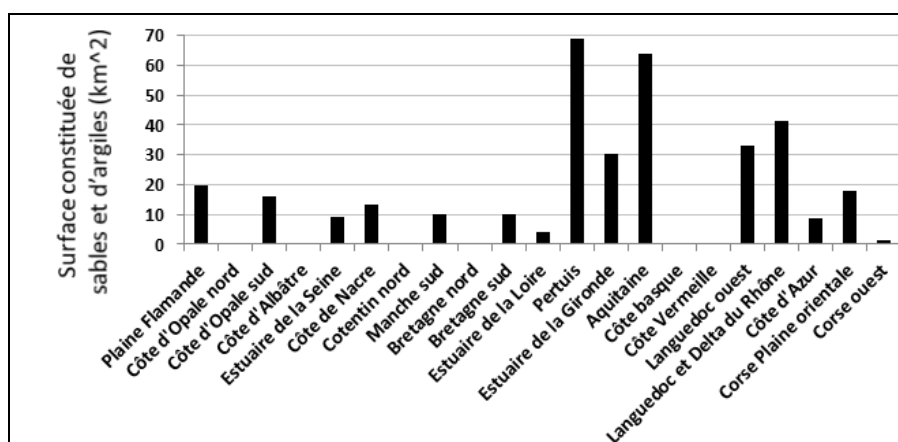


Figure 22. : Valeurs des surfaces composées de sables et d'argiles pour chaque entité

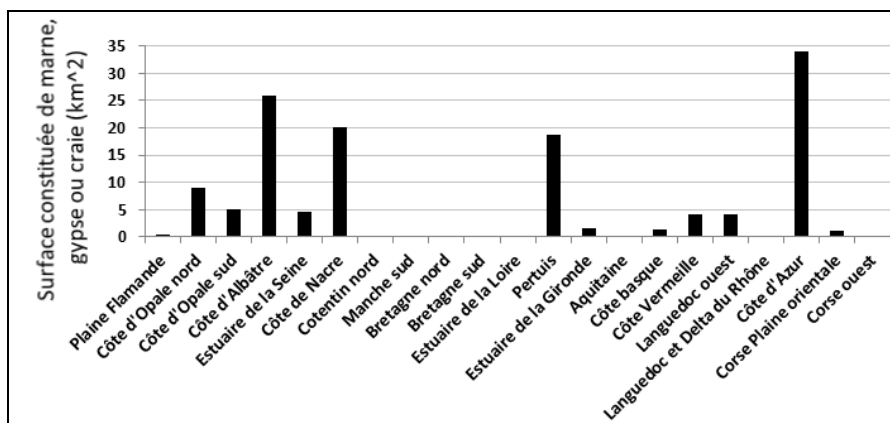


Figure 23. Valeurs des surfaces composées de marne, gypse ou craie pour chaque entité

Pour l'indicateur sur les surfaces composées de sable et d'argile (S1), 4 groupes ont été déterminés. Les notes attribuées à chaque groupe marquent une différence d'importance plus faible pour les 3 premiers groupes que pour le dernier groupe, qui se détache plus nettement des autres:

- Les entités telles que $S1 \leq 10 \text{ km}^2$: Par exemple : « Plaine Flamande », « Côte d'Opale nord », « Côte d'Opale sud », « Côte d'Albâtre » (note : 1) ;
- Les entités telles que $10 \text{ km}^2 \leq S1 < 20 \text{ km}^2$: Par exemple, la « Côte de Nacre » ou la « Corse Plaine orientale » (note : 3) ;
- Les entités telles que $30 \text{ km}^2 \leq S1 < 40 \text{ km}^2$: « Estuaire de la Gironde », « Languedoc ouest », « Languedoc et Delta du Rhône » (note : 5) ;
- Les entités « Pertuis » et « Aquitaine » (note : 9).

Pour l'indicateur sur la valeur des surfaces composées de marne, gypse et craie (S2), la même logique est appliquée mais seuls 3 groupes sont définis. La gamme des valeurs obtenues est plus faible que pour l'indicateur précédent. Aussi, les notes attribuées s'arrêtent à 5 :

- Les entités telles que $S2 \leq 10 \text{ km}^2$: Par exemple, les entités entre le « Cotentin nord » et l' « Estuaire de la Loire » (note : 1) ;
- Les entités telles que $15 \text{ km}^2 \leq S2 < 25 \text{ km}^2$: « Côte d'Albâtre », « Côte de Nacre » et « Pertuis ». (note : 3) ;
- La « Côte d'Azur » (note : 5).

4.3.3. CRITERE « GEOMORPHOLOGIE »

Le critère géomorphologie a pour but de caractériser les types de côte présents dans les entités. Deux indicateurs ont été construits à l'aide de la couche géomorphologie de

EUROSION.

L'indicateur le plus déterminant est le linéaire constitué de plages et d'estrans (codes D, E, F, G, N, P, R, S, X, Z sur la Figure 25) car ces types de côte sont les plus vulnérables en termes d'érosion et de submersion marine. Le second est le linéaire constitué de roches tendres et de petites plages enclavées (codes AC, B, C sur la Figure 25) qui sont des configurations moins vulnérables que les premières mais qui peuvent être impactées par les phénomènes d'érosion. Les résultats sont reportés respectivement sur la Figure 26 et la Figure 27.

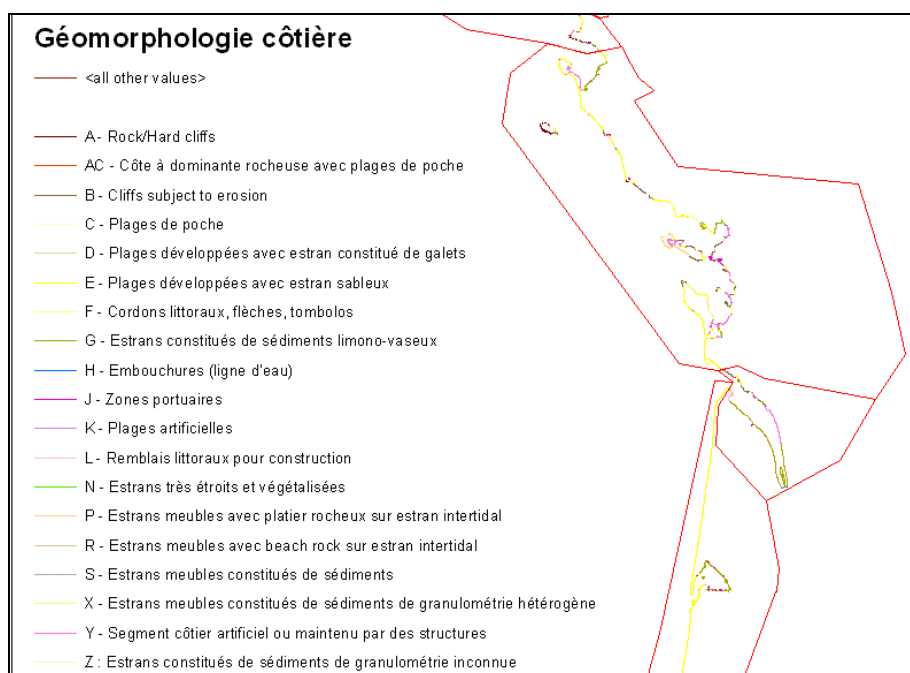


Figure 24. Couche géomorphologie côtière de EUROSION au niveau des entités de la côte atlantique.

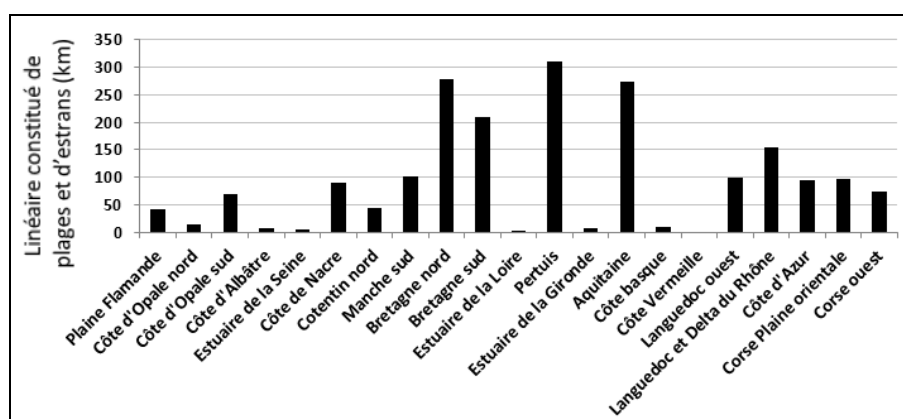


Figure 25. Linéaire constitué de plages et d'estrans dans chaque entité

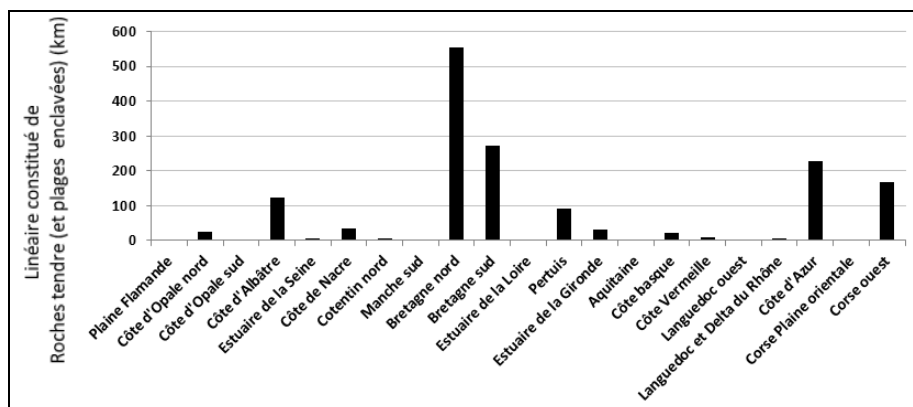


Figure 26. Linéaire constitué de côte rocheuse tendre ou de plages enclavées dans chaque entité

Pour l'indicateur sur le linéaire constitué de plages et d'estrans (L1), les entités ont été réparties en 4 groupes dont les notes reflètent une différence d'importance modérée entre chaque groupe:

- Les entités telles que $L1 \leq 50$ km. (note: **1**) ;
- Les entités telles que $50 \text{ km} \leq L1 \leq 200$ km. (note : **3**) ;
- Les entités telles $200 \text{ km} \leq L1 \leq 300$ km (note: **5**).

Pour l'indicateur sur le linéaire constitué de côte rocheuse tendre et de plages enclavées (L2), les entités ont été réparties en 5 groupes dont les notes reflètent une différence d'importance modérée entre chaque groupe. La gamme des valeurs obtenues est cependant plus large que pour le critère précédent:

- Les entités telles que $L2 \leq 50$ km. (note: **1**) ;
- Les entités telles que $50 \text{ km} \leq L2 \leq 200$ km. (note : **3**) ;
- Les entités telles $200 \text{ km} \leq L2 \leq 300$ km (note: **5**) ;
- La « Bretagne nord » (note: **9**).

4.3.4. RESULTATS INTERMEDIAIRES DE L'AHP POUR LES FACTEURS D'ETAT

La partie « facteurs d'état » de l'AHP est calculée en appliquant les pondérations déterminées au paragraphe 4.1 à chaque critère. Pour les critères lithologie et géomorphologie, deux indicateurs ont été calculés. Leur poids a été déterminé de manière à donner une importance très nette aux indicateurs considérés comme les plus déterminants (0,9 contre 0,1). Le résultat de l'AHP pour les facteurs d'état est le même pour les deux scénarios (pas de modification de pondération entre les critères) mais le poids global qui leur est attribué dans l'arbre diffère

(0.58 pour le scénario tendanciel et 0.7 pour le scénario avec changement climatique).

Globalement, le classement des entités est plus hétérogène que pour les facteurs marins. Les entités « Pertuis » et « Languedoc et Delta du Rhône » apparaissent comme les plus vulnérables, principalement à cause de l'étendue de leurs zones basses, même si les indicateurs montrent également une forte vulnérabilité liée à leur lithologie et leur géomorphologie. L'entité « Aquitaine » est également haute dans le classement mais sa vulnérabilité est plutôt attribuée à son important linéaire sableux. Pour le reste des entités, quelques-unes se détachent (« Plaine Flamande », « Côte de Nacre », « Bretagne nord », « Bretagne sud », « Estuaire de la Gironde ») mais les autres montrent des vulnérabilités relativement proches.

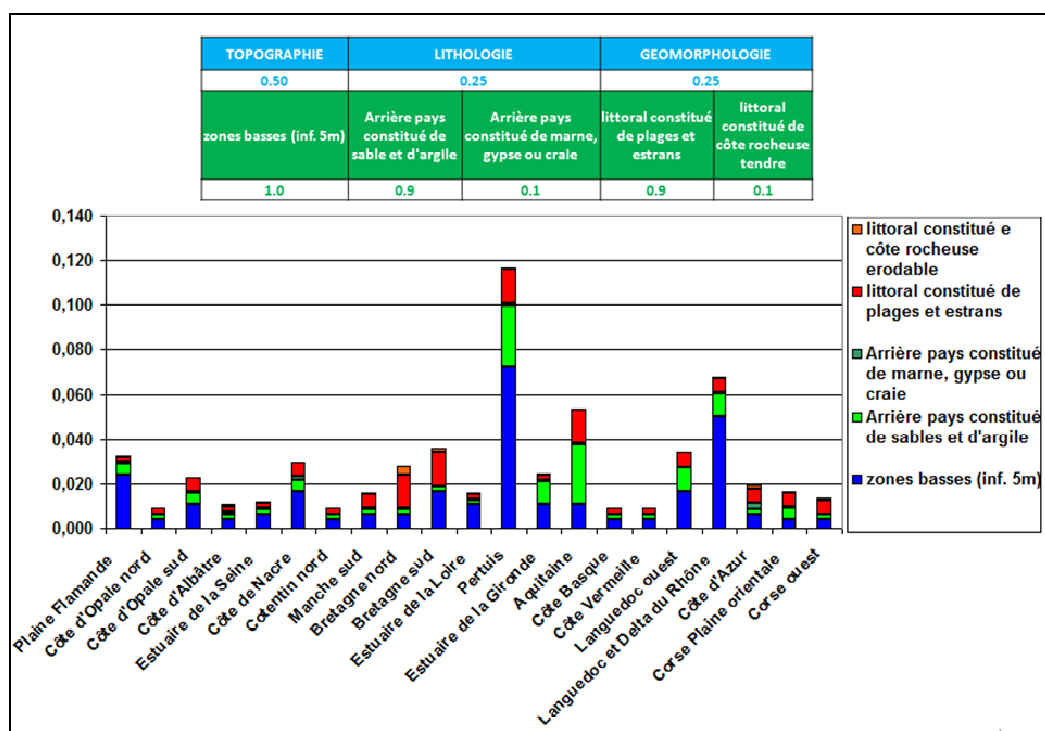


Figure 27. Résultat de l'AHP pour les facteurs d'état pour le scénario tendanciel. La pondération globale des facteurs d'état dans l'arbre hiérarchique pour ce scénario est de 0.58.

4.4. CLASSEMENT DES ENTITES POUR LES FACTEURS DE CONTEXTE

Lors de la réunion, les experts se sont interrogés sur l'intérêt de prendre en compte les modes de gestion du trait de côte dans les critères de cette composante. En Aquitaine par exemple, il y a une bonne corrélation entre les modes de gestion et les problèmes effectivement constatés

sur le terrain, mais ce n'est pas le cas partout. Cet aspect n'est pas pris en compte dans les critères des facteurs de contexte mais on peut considérer que le critère sur l'érosion historique donne une bonne information sur l'impact des interventions humaines sur l'évolution du trait de côte. L'arbre hiérarchique n'a donc pas été modifié.

4.4.1. CRITERE « ANTHROPISATION »

Pour le critère anthropisation, deux indicateurs ont été calculés pour chaque entité avec la couche Corinne Land Cover (2006). De même que pour les critères des facteurs d'état, la couche CLC a été considérée dans un tampon de 200m le long du trait de côte afin de ne prendre en compte que la frange littorale. L'indicateur classiquement utilisé pour ce critère est l'urbanisation (par exemple dans EUROSION, 2004), mais il a été décidé de rajouter un deuxième indicateur en prenant en compte la culture des sols qui peut également perturber le transit sédimentaire naturel (Paskoff, 2001). A cette échelle de travail les aménagements comme les ouvrages de protection (brises lame, épis, etc.) qui peuvent générer des zones d'érosion ou d'accrétion ne peuvent pas être pris en compte. Le premier indicateur utilisé est donc la valeur de la surface des zones urbanisées (cf. Figure 29) et le second la valeur de la surface des zones composées de terres agricoles (cf. Figure 30).

Pour l'indicateur sur la valeur des surfaces urbanisées (S1), 4 groupes ont été déterminés. La gamme des valeurs est très grande mais les entités ne sont pas équitablement réparties à l'intérieur. Les notes attribuées à chaque groupe marquent une différence d'importance plus faible pour les 3 premiers groupes que pour l'entité « Côte d'Azur » qui se détache très clairement des autres:

- Les entités telles que $S1 \leq 10 \text{ km}^2$: Par exemple, la « Côte d'Opale sud », ou encore les entités entre l'« Estuaire de la Loire » et la « Côte Basque ». (note: **1**) ;
- Les entités telles que $10 \text{ km}^2 \leq S1 \leq 20 \text{ km}^2$: « Estuaire de la Seine », « Bretagne nord », « Languedoc et Delta du Rhône » (note: **3**) ;
- Les entités telles que $20 \text{ km}^2 \leq S1 \leq 30 \text{ km}^2$: « Bretagne sud » et « Corse ouest » (note: **5**) ;
- L'entité « Côte d'Azur » (note: **9**).

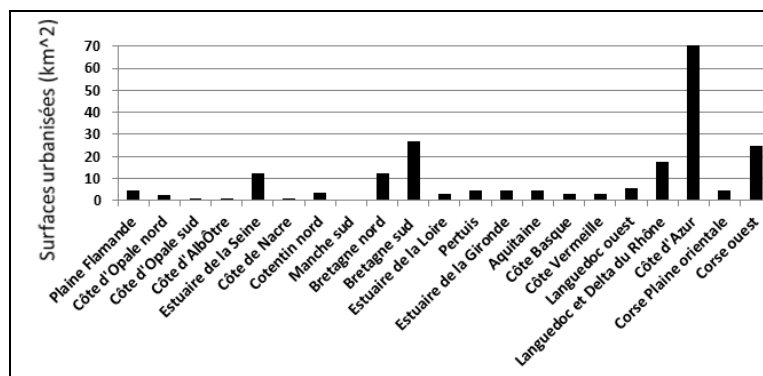


Figure 28. Valeur de la surface des zones urbanisées dans chaque entité

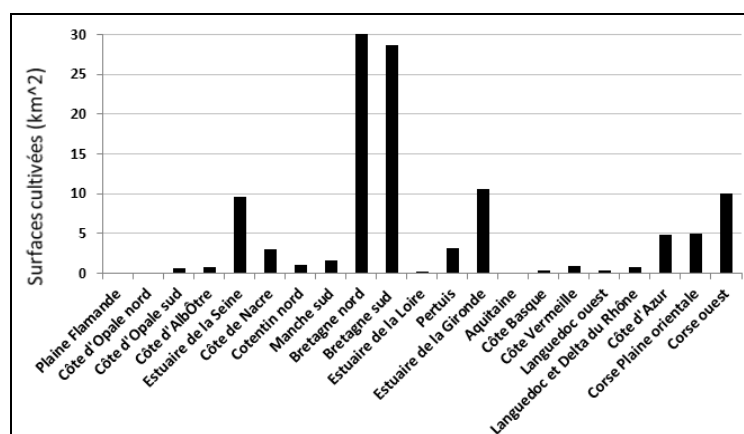


Figure 29. Valeur de la surface des zones cultivées dans chaque entité

Pour l'indicateur sur la valeur des surfaces cultivées (S2), la même logique est conservée mais seuls 3 groupes sont distingués :

- Les entités telles que $S2 \leq 10 \text{ km}^2$: Par exemple, la « Plaine Flamande » ou l'« Aquitaine ». (note: 1) ; Les entités telles que $10 \text{ km}^2 \leq S2 \leq 20 \text{ km}^2$: « Estuaires de la Seine », « Estuaire de la Gironde » et « Corse ouest » (note: 3) ;
- Les entités « Bretagne nord » et « Bretagne sud » (note: 5).

4.4.2. CRITERE « EROSION HISTORIQUE »

L'indicateur utilisé est le linéaire de côte constaté en érosion totale ou ponctuelle (L) selon les données EUROSION. On ne regarde pas une vitesse de recul mais le linéaire de côte qui est globalement en recul.

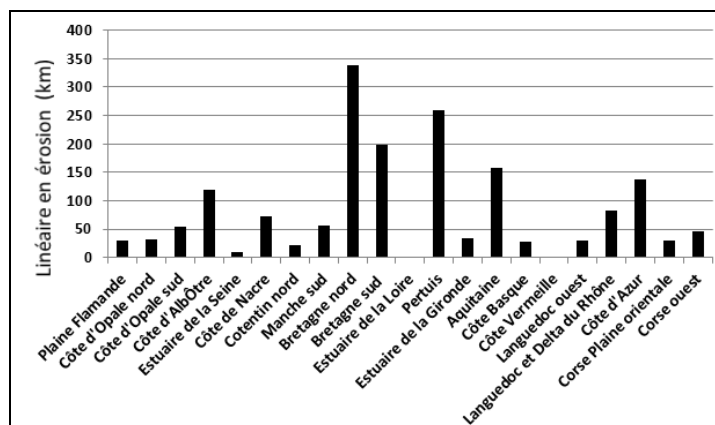


Figure 30. Linéaire en érosion dans chaque entité

Les entités ont été réparties en 4 groupes dont les notes reflètent une différence d'importance modérée entre chaque groupe:

- Les entités telles que $L \leq 50$ km. Par exemple, le « Cotentin nord » ou la « Côte Basque » (note: 1) ;
- Les entités telles que $50 \text{ km} \leq L \leq 150$ km. Par exemple, la « Côte d'Albâtre » ou la « Côte d'Azur ». (note : 3) ;
- Les entités telles $150 \text{ km} \leq L \leq 250$ km. Par exemple la « Bretagne sud » (note: 5) ;
- La « Bretagne nord » (note: 7).

4.4.3. RESULTATS INTERMEDIAIRES DE L'AHP POUR LES FACTEURS DE CONTEXTE

La partie « facteurs de contexte » de l'AHP est calculée en appliquant les pondérations déterminées précédemment à chaque critère. Pour l'influence anthropique, deux indicateurs ont été calculés. Comme la culture des sols est considérée comme moins pénalisante, en termes de blocage de sédiments, que l'urbanisation de la côte, le poids de cet indicateur est moindre par rapport à l'autre. Pour les facteurs de contexte, le résultat de l'AHP est le même pour les deux scénarios mais la pondération globale qui leur est attribuée diffère (0.13 pour le scénario tendanciel et 0.1 pour le scénario avec changement climatique) (cf. Figure 32).

Au regard de ce facteur, les entités les plus exposées sont « Bretagne nord », « Bretagne sud » et « Côte d'Azur », suivies par « Pertuis », « Aquitaine », « Languedoc et Delta du Rhône » et « Corse ouest ». Globalement, le critère « érosion historique » est déterminant dans le classement des entités. La vulnérabilité des entités « Côte d'Azur » et « Corse ouest » est

pourtant principalement due à leur forte urbanisation. Le critère sur l'anthropisation augmente également la note des entités bretonnes, qui sont très grandes, et qui contiennent au cumul beaucoup de zones urbaines et agricoles à proximité du littoral. Pour le reste des entités, aucune ne se distingue véritablement au regard des facteurs de contexte.

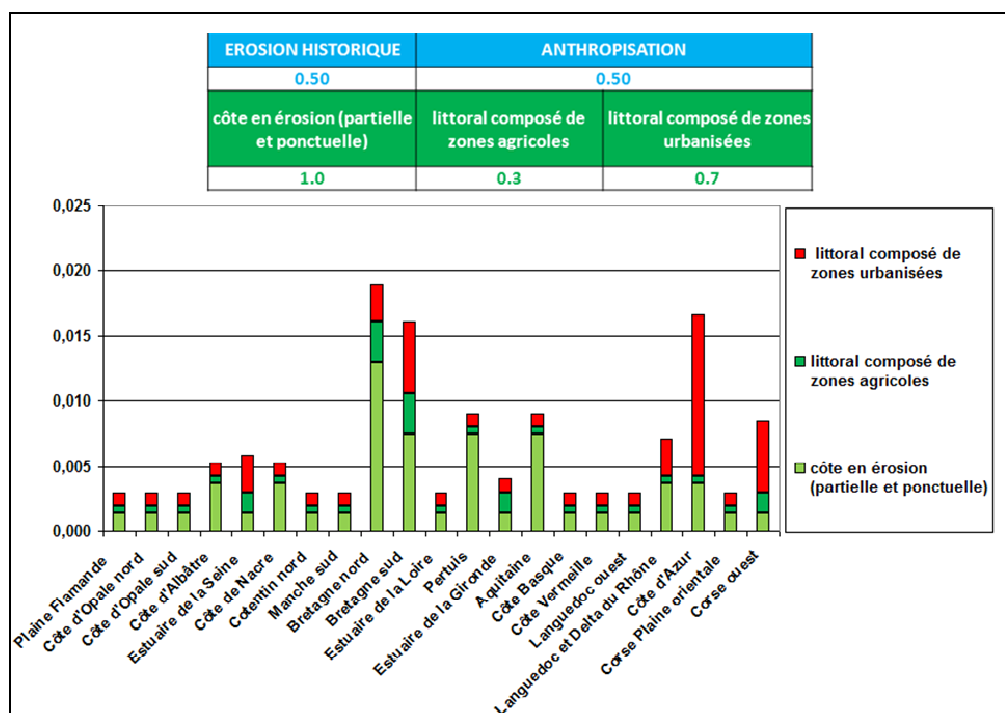


Figure 31. Résultat de l'AHP pour les facteurs de contexte pour le scénario tendanciel. La pondération globale des facteurs de contexte dans l'arbre hiérarchique pour ce scénario est de 0.13.

4.5. RESULTAT FINAL DE L’AHP ET DISCUSSION

4.5.1. SCENARIO TENDANCIEL

Les résultats globaux de l’AHP à l’échelle nationale sont présentés dans la Figure 33 (pour le scénario tendanciel) et la Figure 34 (pour le scénario avec changement climatique). L’analyse des résultats est d’abord présentée pour le scénario tendanciel puis pour le scénario avec changement climatique.

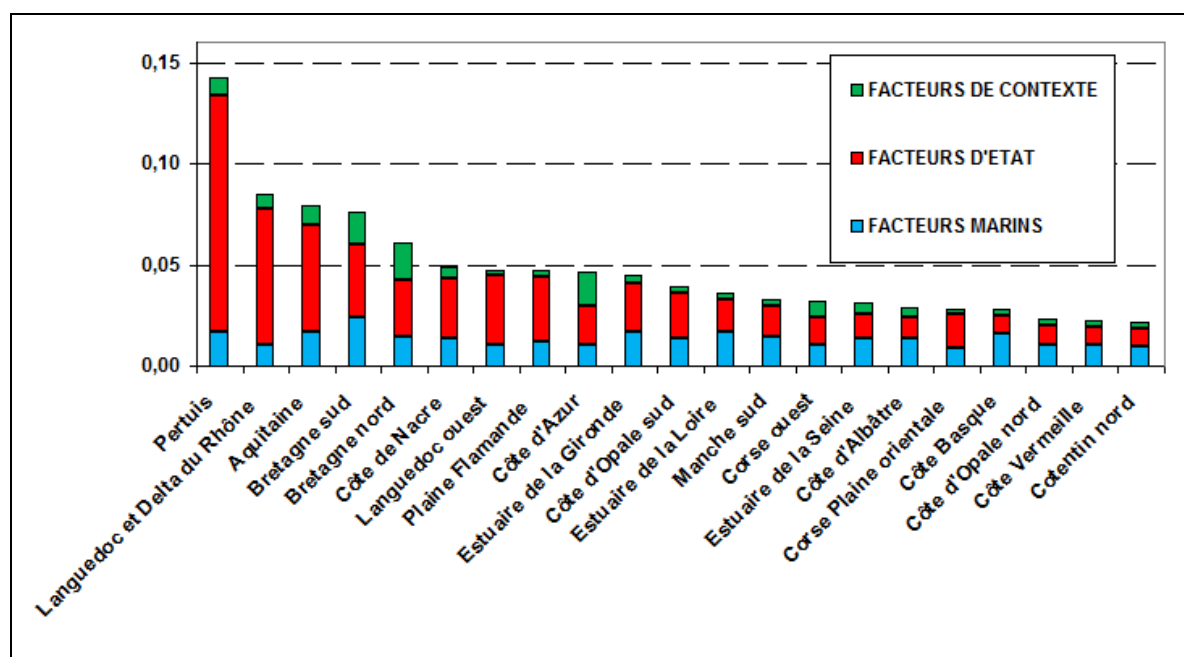


Figure 32. Résultat final de l’AHP pour le scénario tendanciel

La hiérarchie de la vulnérabilité des entités est principalement contrôlée par les facteurs d’état. En effet, ils ont une pondération importante (0.58) et certaines entités ressortent très nettement dans le classement relatif à ce facteur. Ceci est directement lié au découpage des entités qui a été effectué à partir de critères sur la géomorphologie. Même si les facteurs de contexte font également ressortir quelques entités, leur pondération (0.13) limite leur influence dans le résultat final. Quant aux facteurs marins, le classement obtenu est moins contrasté et a un impact moins déterminant.

Ainsi, les facteurs d’état font clairement ressortir la première entité, les « Pertuis », ainsi que les deux entités suivantes : « Languedoc et Delta du Rhône » et « Aquitaine ». Le linéaire de côte concerné par les problématiques d’érosion et de submersion est en effet conséquent pour ces entités dont la taille est importante mais ce classement s’explique également par leur

constitution (zones basses dans les entités « Pertuis » et « Languedoc et Delta du Rhône », long linéaire sableux pour l' « Aquitaine »). Les entités les plus vulnérables ne sont pas concentrées sur une même façade.

Les entités « Bretagne sud » et « Bretagne nord » ressortent également du classement mais leur vulnérabilité est mieux répartie entre les trois composantes « facteurs marins », « facteurs d'état » et « facteurs de contexte ». En effet, ces entités comprennent un long linéaire de côte, avec beaucoup de secteurs répertoriés « en érosion » dans la base EUROSION. De plus, les conditions hydrodynamiques y sont très énergétiques.

La vulnérabilité de la « Côte d'Azur » est principalement due à son linéaire de côte urbanisée. Ce critère seul augmente fortement sa vulnérabilité qui se situe à peu près en milieu de classement, avec une note similaire aux entités « Côte de Nacre », « Languedoc-ouest » et « Plaine Flamande » (qui sont rendues vulnérables à cause de leurs facteurs d'état). Parmi les autres entités méditerranéennes, celles situées sur les côtes du Languedoc et de PACA sont globalement plus vulnérables que celles situées en Corse.

Même si les estuaires sont des zones fortement exposées aux aléas côtiers, ils ne ressortent pas dans le classement. En effet, en termes de surfaces et de linéaires, ils pèsent peu au regard d'autres entités de plus grande emprise. Leur position dans le classement n'est pourtant pas négligeable, particulièrement pour l' « Estuaire de la Gironde », qui comporte beaucoup de zones à lithologie sensible (sables, dépôts fins, etc.) à l'arrière du trait de côte. Cette entité (classée 10^{ième} dans le scénario tendanciel) ressort avec une note de vulnérabilité équivalente à celles des entités « Plaine Flamande », « Languedoc-ouest », la « Côte de Nacre » et la « Côte d'Azur ».

4.5.1. SCENARIO AVEC ELEVATION DU NIVEAU DE LA MER

Le classement global des entités varie peu pour le scénario avec changement climatique. Pour rappel, les différences entre les deux scénarios résident essentiellement dans (1) la prise en compte de la vitesse d'élévation du niveau de la mer et (2) un renforcement du poids des facteurs d'état (selon l'hypothèse que l'élévation du niveau marin aura un impact plus fort sur les zones dont les facteurs d'état indiquent déjà une forte vulnérabilité physique).

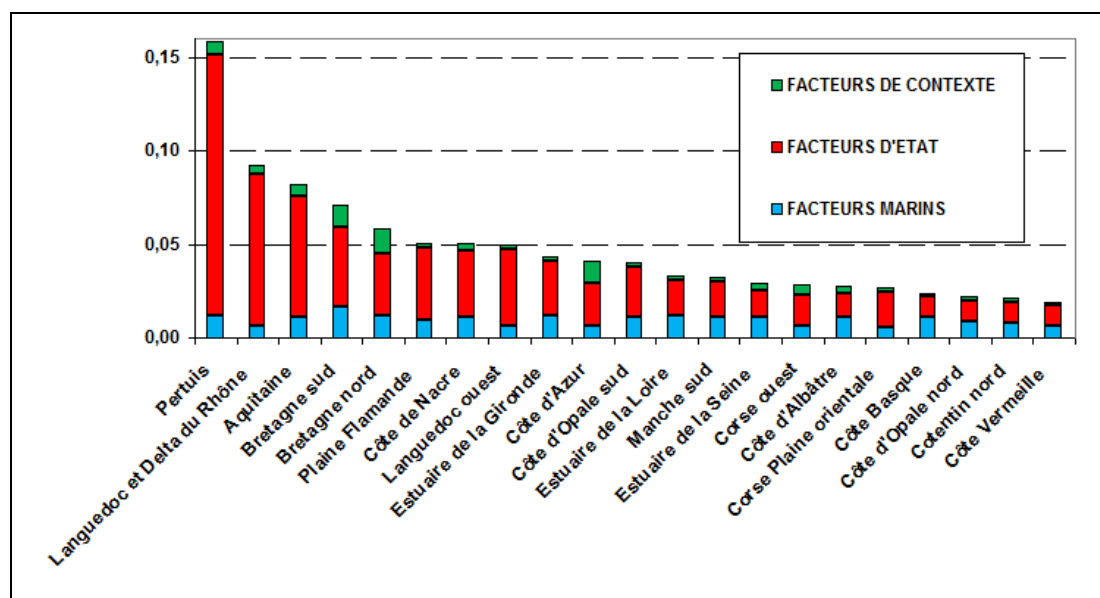


Figure 33. Résultat final de l'AHP pour le scénario avec changement climatique

Les quelques modifications dans le classement des entités entre les deux scénarios relèvent plus de l'inversion entre deux entités dont la note de vulnérabilité est très proche. Par exemple, le classement des entités « Estuaire de la Gironde » et « Côte d'Azur » a été inversé (entre les positions 9 et 10). Ainsi, les grandes entités géographiques les plus vulnérables aux aléas côtiers, dans une perspective de long terme, restent les mêmes pour les deux scénarios. Il s'agit des entités : « Pertuis », « Languedoc et Delta du Rhône », « Aquitaine », « Bretagne sud » et « Bretagne nord ».

Classement	Entités pour le scénario tendanciel	Entités pour le scénario avec élévation du niveau de la mer
1	Pertuis	Pertuis
2	Languedoc et Delta du Rhône	Languedoc et Delta du Rhône
3	Aquitaine	Aquitaine
4	Bretagne sud	Bretagne sud
5	Bretagne nord	Bretagne nord
6	Côte de Nacre	Plaine Flamande
7	Languedoc ouest	Côte de Nacre
8	Plaine Flamande	Languedoc ouest
9	Côte d'Azur	Estuaire de la Gironde
10	Estuaire de la Gironde	Côte d'Azur
11	Côte d'Opale sud	Côte d'Opale sud
12	Estuaire de la Loire	Estuaire de la Loire
13	Manche sud	Manche sud
14	Corse ouest	Estuaire de la Seine
15	Estuaire de la Seine	Corse ouest
16	Côte d'Albâtre	Côte d'Albâtre
17	Corse Plaine orientale	Corse Plaine orientale
18	Côte Basque	Côte Basque
19	Côte d'Opale nord	Côte d'Opale nord
20	Côte Vermeille	Cotentin nord
21	Cotentin nord	Côte Vermeille

Figure 34. Classement des entités pour les scénario tendanciel et le scénario avec ENM

5. DISCUSSION

5.1. ANALYSE DES RESULTATS

Les entités les plus vulnérables restent les mêmes pour le scénario tendanciel et le scénario avec changement climatique. En effet, dans la construction de l'arbre hiérarchique pour le second scénario, il a été considéré que les entités les plus sensibles à l'élévation du niveau de la mer étaient celles dont les facteurs d'état montraient une vulnérabilité physique importante (zones basses, roches meubles, etc.). Or, ce sont les facteurs d'état qui contrôlent déjà le classement dans le scénario tendanciel. Ceci est dû :

- A la définition des entités. Celles-ci ont été découpées sur des critères géologiques et géomorphologiques, ce qui les rend très contrastées au regard des facteurs d'état. Ainsi, les notes de vulnérabilité relatives à cette composante montrent une plus forte variabilité que pour les facteurs marins et les facteurs de contexte.
- Au poids plus important des facteurs d'état par rapport aux autres composantes dans l'arbre hiérarchique (pour les deux scénarios).

5.2. ANALYSE DE SENSIBILITE

La prise en compte du critère sur la vitesse de l'élévation du niveau de la mer dans le second scénario a un impact mineur pour les raisons évoquées ci-dessus et car il s'agit d'un seul critère parmi les facteurs marins. Des tests de sensibilité ont été effectués en modifiant la pondération de ce critère : soit en le supprimant, soit en lui donnant une importance beaucoup plus forte que les autres au sein des facteurs marins. Dans les deux cas, le classement final des entités est pratiquement inchangé. Les entités les plus vulnérables restent les mêmes et les modifications dans le classement sont dues à l'inversion d'entités dont les notes sont très proches (Plaine Flamande, Côte de Nacre, Languedoc ouest ou Corse ouest et Estuaire de la Seine).

5.3. AVANTAGES ET LIMITES DE L'APPROCHE

La mise en œuvre de l'AHP permet de mettre en évidence les entités territoriales sur lesquelles devront porter en priorité les efforts pour réduire la vulnérabilité aux aléas côtiers tout en identifiant sur quels facteurs les efforts devront être portés pour réduire cette vulnérabilité. Les principaux avantages de la méthode sont les suivants :

- Comme rappelé dans la partie B sur le zoom Languedoc-Roussillon, l'AHP permet

d'avoir un cadre robuste pour agréger des informations de nature et de qualité diverses en fournissant un support pour déterminer les poids de chaque composante de manière moins arbitraire que dans d'autres méthodes basées sur des indicateurs.

- Un des avantages de l'AHP à l'échelle nationale est de pouvoir utiliser à la fois des informations quantitatives et qualitatives. Ceci est particulièrement utile à des échelles étendues où les données quantitatives et homogènes font souvent défaut pour de nombreux critères. L'apport de l'expertise dans le processus de l'AHP permet également de pallier le manque de données dans certains cas et de relativiser les informations qu'elles fournissent. L'AHP offre un cadre robuste qui donne un caractère plus objectif à l'expertise qui peut être retracée dans les matrices de comparaison.

Cette méthode présente cependant des limites. Pour l'échelle nationale, elles sont principalement dues :

- Au choix des entités. En effet, lors d'analyses à une échelle nationale ou régionale, l'AHP devrait être mise en œuvre sur des entités sur lesquelles une action (visant par exemple à réduire certains facteurs de vulnérabilité) peut être menée. Alternativement, des entités basées sur des critères géomorphologiques peuvent être dessinées comme ici. Cependant, se pose alors la question de l'homogénéité de ces zones. En effet, certaines entités de restitution ont une homogénéité assez satisfaisante, alors que pour d'autres la complexité de la géologie et de la géomorphologie rend particulièrement difficile la définition des limites d'entités relativement homogènes à cette échelle de travail (par exemple, pour les entités allant de l'estuaire de la Seine à l'estuaire de la Gironde). De même, certaines entités ont des façades littorales exposées différemment (comme « Bretagne nord » ou « Corse ouest ») ce qui rend difficile la caractérisation de certains critères, comme l'exposition aux vagues.
- La mise en œuvre de l'AHP à l'échelle nationale nécessite d'avoir accès à des bases de données homogènes et disponibles sur tout le territoire national. Or, les jeux de données existants qui respectent ces conditions ne sont pas les plus récents. Ainsi par exemple, les jeux de données de vagues disponibles sont issues du jeu de données EuroSION (2004), alors que des données plus récentes et de meilleure qualité existent. Cependant, le jeu de données issu d'EuroSION est le seul utilisable ici car c'est le seul qui soit homogène sur les façades Atlantique, Manche, Mer du Nord et Méditerranée.

6. IMPLICATIONS POUR LES RISQUES COTIERS

Les données demandées pour le lot 2 résultent du croisement des enjeux à une zone côtière à l'intérieur de laquelle l'essentiel des risques côtiers resteront cantonnés d'ici à 2070. Nous exposons dans cette partie comment la zone côtière a été constituée, les résultats issus du croisement des données de la composante physique de la vulnérabilité aux enjeux. Finalement, des éléments concernant les incertitudes et l'utilisation potentielle de ces données sont présentés.

Outre ce rapport, des données SIG et Excel ont été fournies pour le projet et le lot 2, en tant que livrable.

6.1. CONSTITUTION D'UNE ZONE COTIERE METROPOLITAINE

Dans un premier temps, une zone côtière maximale, à l'intérieur de laquelle les aléas côtiers resteront cantonnés a été constituée d'ici à 2070. Cependant, pour le projet EXPLORE, les critères ont été affinés :

- Pour la submersion, l'altitude uniforme de 5m est remplacée par les niveaux d'eau extrêmes. Pour cela, la couche des zones basses élaborée par le CETMEF a été exploitée (CETMEF-CETE, 2009). Ces zones ont été construites en croisant les niveaux extrêmes centennaux déterminés par le SHOM sur la façade atlantique (pour la Méditerranée, une altitude uniforme de 1.5m a été utilisée) avec la BD Topo Pays. Afin de prendre en compte l'incertitude des données topographiques utilisées et la possible élévation du niveau marin avec le changement climatique, plusieurs zones ont été construites. Les zones situées sous le niveau centennal, celles situées sous le niveau centennal +1m et celles situées sous le niveau centennal -1m. Pour notre zonage, nous avons extrait les zones situées sous la limite supérieure (sous le niveau centennal +1m).

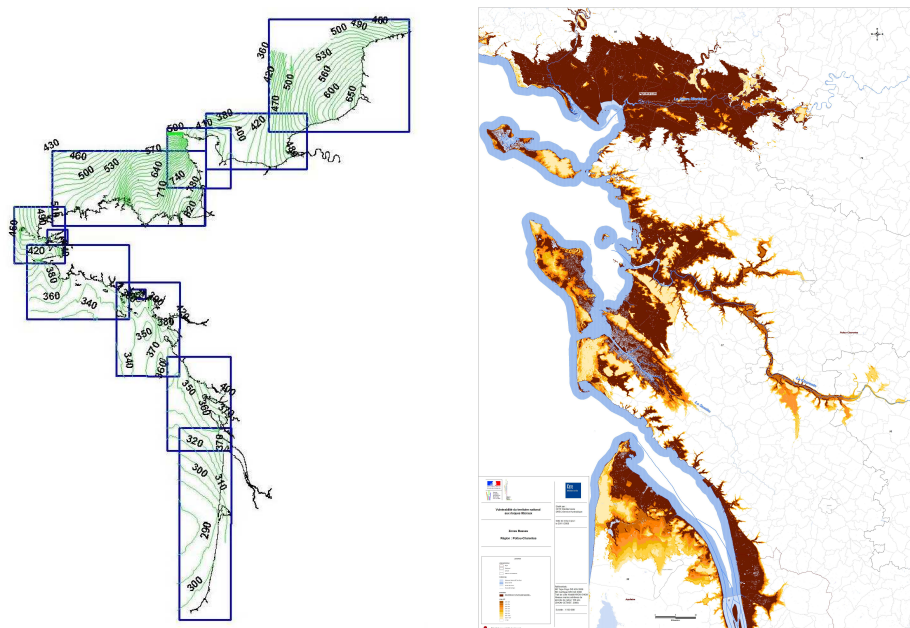


Figure 35. Gauche : Carte des niv. cent. déterminés par le SHOM. Droite : carte des zones basses en Poitou-Charentes déterminées par le CETMEF (les zones en marron foncé sont situées sous le niv. cent.)

- Pour l'érosion, les zones prises en compte sont celles situées dans un tampon dont l'épaisseur est variable en fonction du type de côte. Sa largeur est de 500m pour les côtes de type plage ou estran et de 200m pour les côtes rocheuses érodables ou comportant des plages de poche. Les côtes rocheuses dures et les zones artificielles ne sont pas représentées dans le tampon. Pour cela, l'attribut CEMVO2 de la couche géomorphologie de EUROSION a été utilisé.

L'union de ces deux zones forme une zone côtière à l'intérieur de laquelle l'essentiel des risques côtiers resteront cantonnés d'ici à 2070, sous réserve d'une élévation du niveau marin inférieure à 1m. Il est important de noter que cette zone ne doit pas être comprise comme une évaluation de l'extension future des submersions et de l'érosion. Elle demeure une estimation maximisante pour l'essentiel.

Par la suite et pour alléger le texte, la zone ainsi définie sera appelée RICE-2070.

6.1. OCCUPATION DU SOL DANS LA RICE-2070

Les enjeux suivants présents dans la RICE-2070 ont été quantifiés en utilisant la base de données Corine Land Cover. Il convient de noter que seules les entités plus grandes que 25 ha sont cartographiées dans Corine Land Cover. Les surfaces correspondent à celles de la version 2006 de Corine Land Cover.

Tableau 5: Surfaces en km² de différents type d'occupation du sol de la RICE-2070 de chaque ERENs ; données Corinne Land Cover, EuroSION, IGN, Cetmef, BRGM ; Réalisation : BRGM

Zones EREN	EREN Initiale	Tissu urbain continu	Tissu urbain discontinu	Zones industrielles et commerciales	Zones portuaires	Territoires agricoles	Forêts et milieux semi-naturels	Zones humides	Surfaces en eau	Restant
Aquitaine	478	1	46	4	2	73	182	78	86	470
Bretagne nord	509	0	66	3	4	143	71	168	46	501
Bretagne sud	627	1	83	4	3	249	66	146	65	617
Corse Plaine orientale	107	0	4	0	0	22	19	5	51	102
Corse Plaine ouest	147	0	16	1	0	14	49	2	60	142
Cote basque	24	2	6	0	1	4	2	4	3	22
Cote d'Albatre	67	1	6	3	1	21	4	26	5	66
Cote d'Azur	211	6	46	4	9	14	22	6	93	200
Cote de Nacre	551	3	22	7	1	414	19	68	11	545
Cote d'Opale nord	32	1	4	1	2	8	3	12	1	32
Cote d'Opale sud	380	3	29	0	0	197	45	97	5	376
Cote Vermeille	3	0	0	0	0	0	1	0	2	3
Cotentin nord	48	0	6	2	2	9	7	11	11	48
Estuaire de la Gironde	443	0	12	5	1	312	37	39	36	442
Estuaire de la Loire	265	0	22	11	3	164	9	48	3	259
Estuaire de la Seine	128	2	3	26	2	60	7	13	13	127
Languedoc et Delta du Rhone	999	1	30	12	7	431	85	300	122	989
Languedoc ouest	219	0	24	1	2	65	21	39	53	204
Manche sud	394	0	27	1	0	244	38	77	3	389
Pertuis	2482	2	125	8	2	1834	150	300	41	2462
Plaine Flamande	801	7	77	21	11	616	21	30	3	788

Total général	8916	28	656	114	54	4895	859	1469	712	8787
----------------------	-------------	-----------	------------	------------	-----------	-------------	------------	-------------	------------	-------------

Les surfaces présentées dans le tableau 5 et la figure 36 mettent en évidence que, par exemple, que les aléas côtiers ne pourront pas concerner plus que 83 km² de tissus urbain discontinu en 2070 avec 1 m d'élévation du niveau marin.

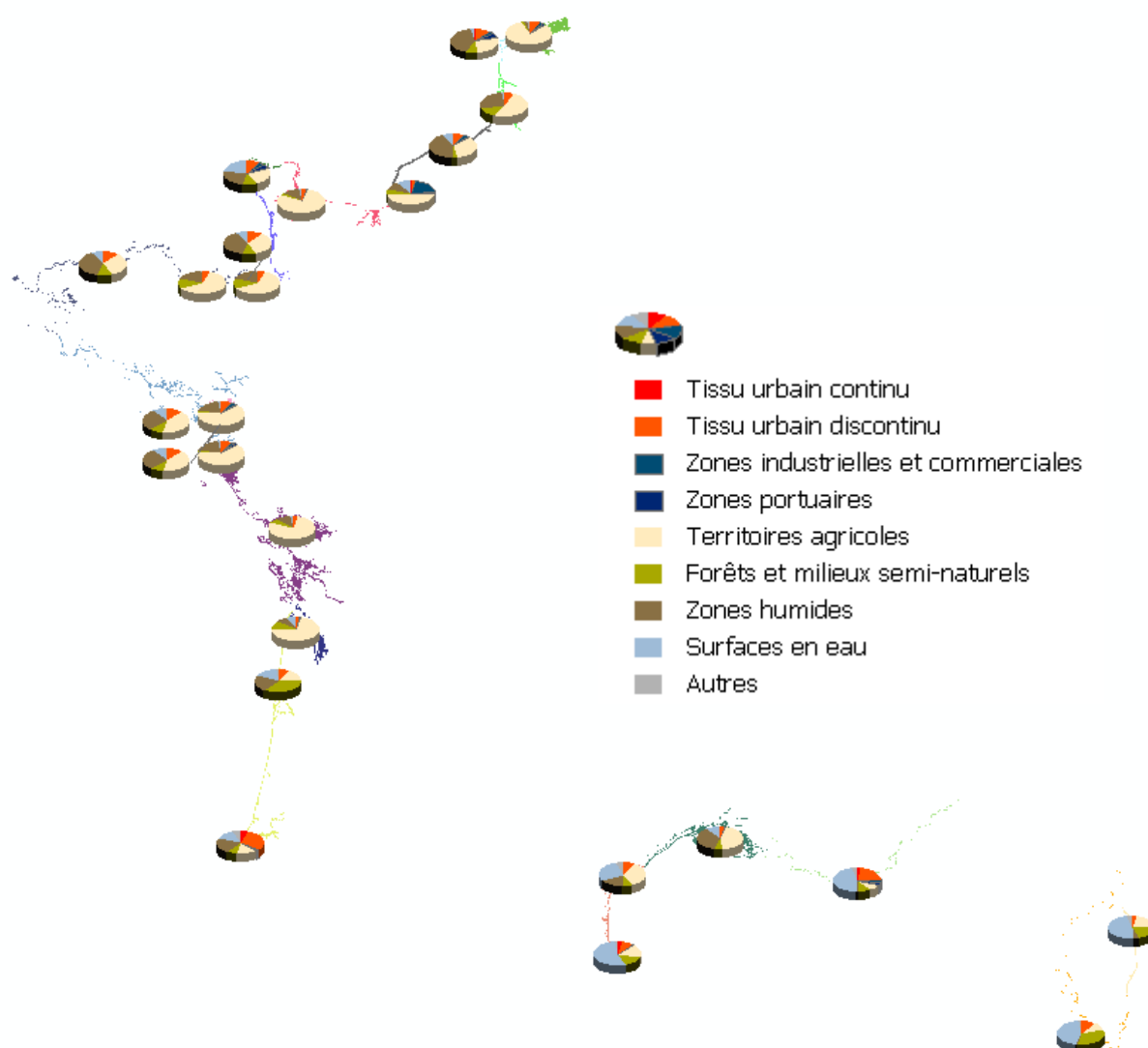


Figure 36: Répartition géographique de l'occupation des sols dans la RICE-2070 par EREN ; données Corinne Land Cover, EuroSION, IGN, Cetmef, BRGM ; Réalisation : BRGM

La figure 36 permet d'ébaucher des profils de vulnérabilité des différentes régions. Par exemple, l'EREN côte d'Azur voit sa zone RICE-2070 nettement plus urbanisée que le zoom côte d'Albâtre.

6.2. EXPOSITION DE LA POPULATION

6.2.1. EVALUATION DE LA POPULATION ACTUELLEMENT PRESENTE DANS LA RICE-2070.

La population actuellement présente dans la RICE-2070 a été évaluée de deux manières:

- En supposant une répartition uniforme pour chaque commune. Ces données sont basées sur le recensement INSEE de 2006.
- En utilisant des données plus fines, produites par l'INSEE, représentant des nombre d'habitants par surface 4 ha (carroyage 200 x200 m). Ces données sont basées sur le recensement INSEE de 2006.

La méthode la plus précise est naturellement la seconde. Cependant l'utilisation de la première méthode permet de faire une évaluation des incertitudes liées au décompte des populations.

Par ailleurs, il convient de rappeler que la donnée carroyée doit être interprétée avec précautions : elle représente un dénombrement de personnes, résultant d'une exploitation des fichiers fiscaux et fournissent donc une vision partielle de la population (Source : INSEE). Un aspect important dans les zones côtières est la forte variabilité saisonnière de la population, qui ne peut être prise en compte ici. En effet, les évaluations de l'INSEE sont basées sur les résidences principales. Cet aspect a été traité en détail par l'observatoire du littoral (MEEDTL/CGDD/SOeS) dans sa synthèse « environnement littoral et marin »⁵.

Les figures 37, 38, 39 et 40 montrent que la méthode par zonage uniforme surévalue l'exposition des personnes dans la moitié des ERENs. Ce résultat est inattendu : nous nous attendions en effet à ce que la population soit concentrée le long du trait de côte et dans les zones basses pour davantage d'ERENs. En tout état de cause, les incertitudes à l'échelle des ERENs sont relativement limitées : le pire des cas est observé dans l'EREN Pertuis où la répartition uniforme conduit à une surestimation de l'ordre de 70%. Les autres erreurs sont plus modestes ou concernent un petit nombre de personnes (Cas par exemple de la côte Vermeille). Dans la moitié des cas, les écarts sont inférieurs à 10%. Ils ne sont supérieurs à 40% que pour 10 ERENs. Ces résultats montrent des écarts plus fins qu'attendus. Ceci est dû

⁵ <http://www.littoral.ifen.fr/Synthese-Environnement-littoral-et-marin.256.0.html>

à l'échelle de représentation : de grandes entités favorisent la compensation d'erreurs entre elles.

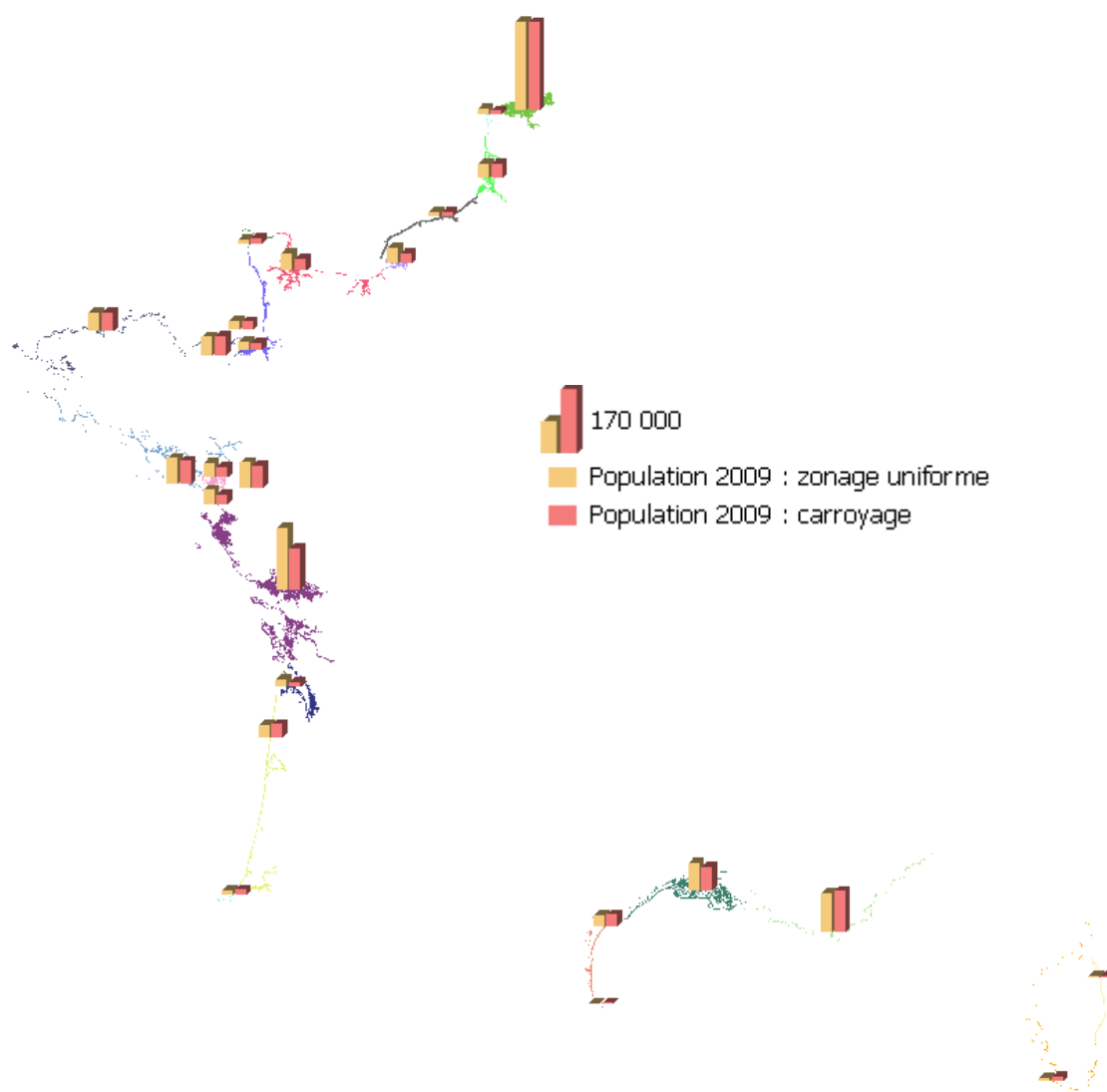


Figure 37: Nombre d'habitant dans chaque EREN selon deux méthodes : en supposant une répartition uniforme et en utilisant un carroyage

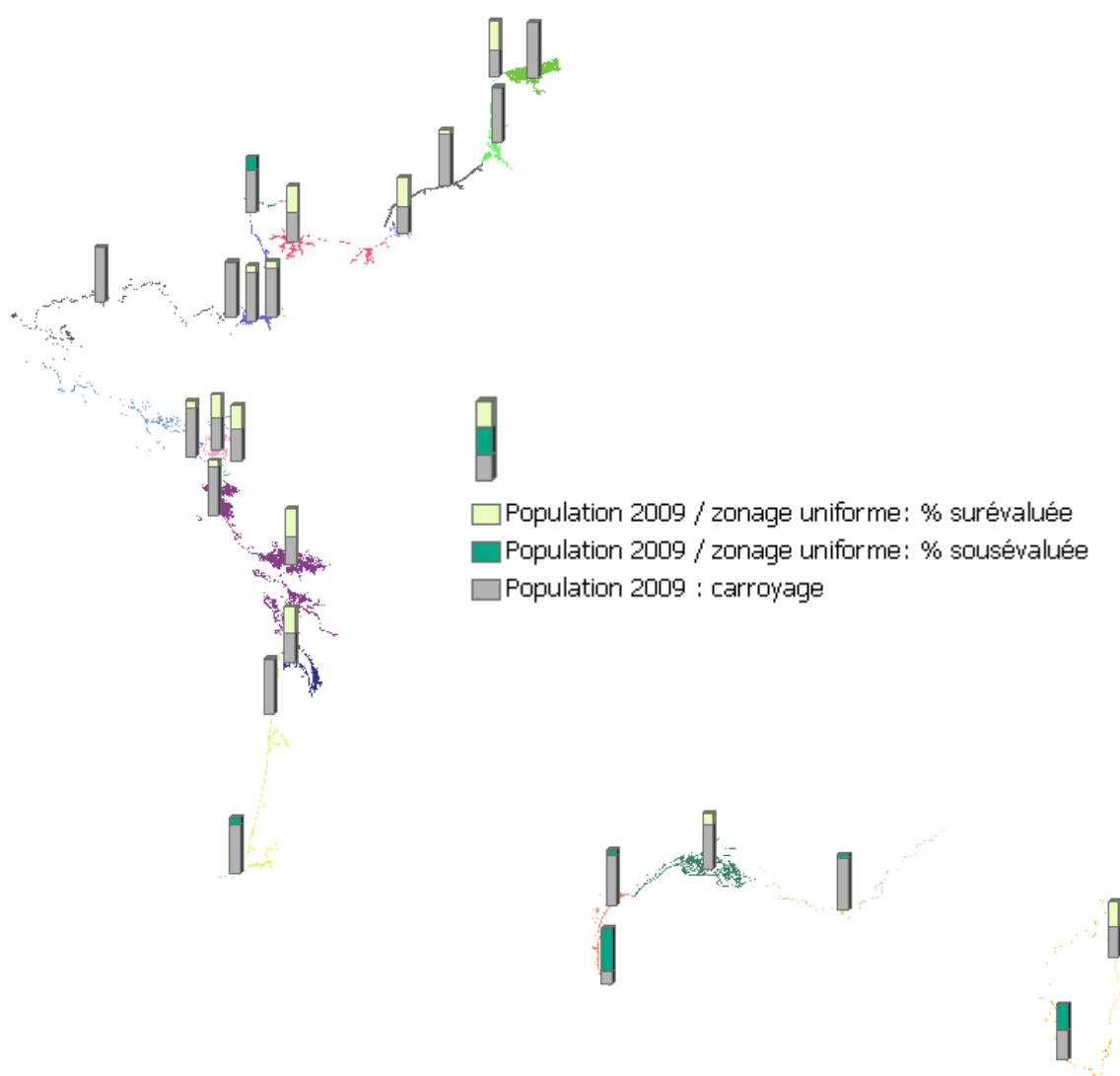


Figure 38: Pourcentage de sous ou de sur-évaluation de la population selon la méthode d'évaluation utilisée.

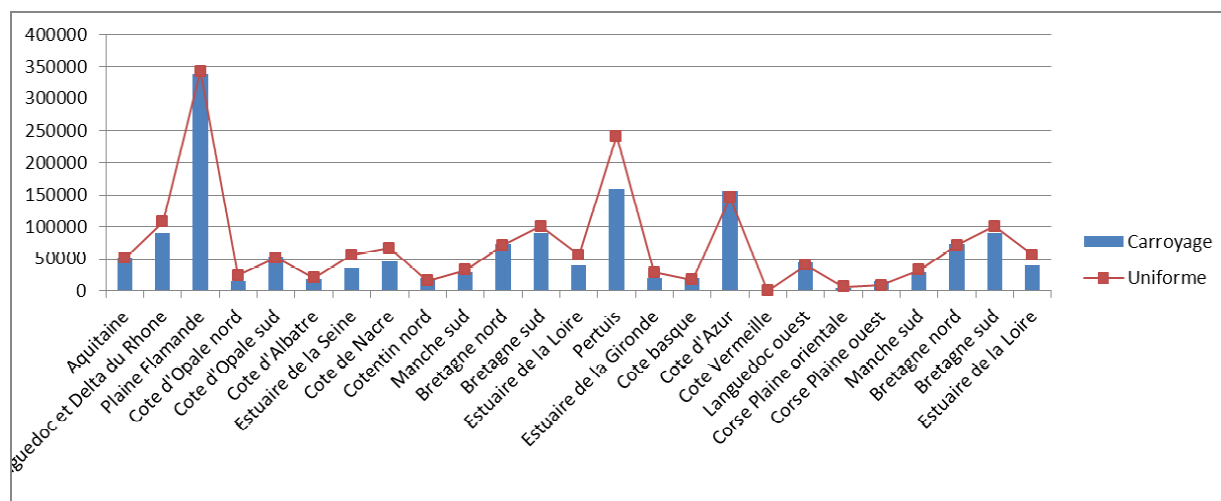


Figure 39: Dénombrement de la population de chacun des ERENs selon la méthode d'évaluation utilisée.

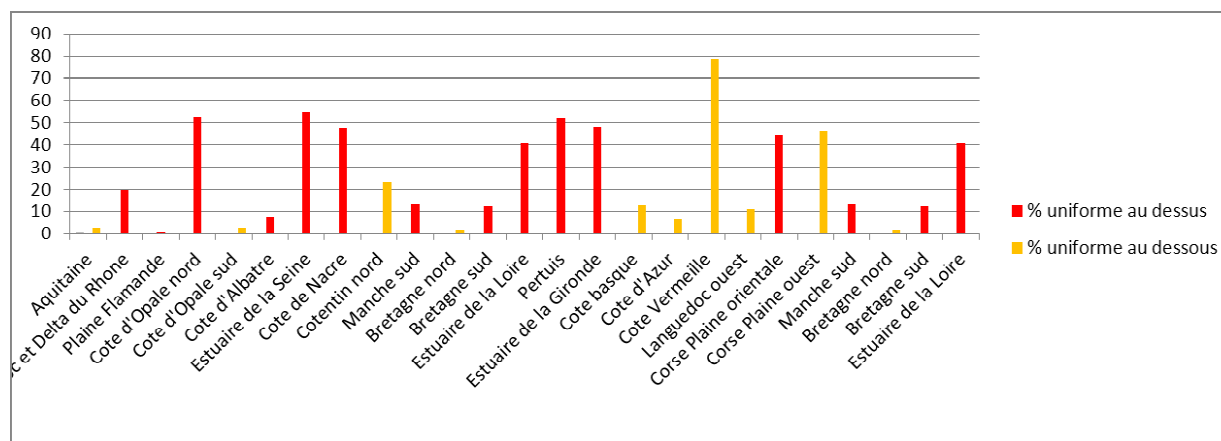


Figure 40: Représentation sous forme de pourcentage des écarts de mesure de la population dans la zone RICE pour chaque EREN pour les deux méthodes retenues.

En conclusion, il est difficile d'apprécier l'ordre de grandeur des incertitudes liées aux données disponibles pour cette étude. L'exemple de la densité de population 2009 obtenue par deux méthodes différentes permet d'appréhender comment des résultats obtenus peuvent varier en fonction de la précision des données. Les résultats obtenus sont présentés ci-dessus sous forme de courbe et représentation cartographique.

On observe que globalement, lorsque la population présente dans la zone RICE-2070 est la plus importante, les résultats obtenus par répartition uniforme ont tendance à surévaluer le nombre d'habitants estimés présents dans la zone côtière par rapport aux données obtenues par répartition « carroyage ». En revanche, les EREN ayant une frange littorale très peuplée de la côte méditerranéenne (Côte d'Azur, Côte Vermeille, Corse Plaine Ouest) voient les

résultats obtenus par répartition uniforme sous-évalués. Dans le cas de la zone Languedoc et Delta du Rhône, ceci ne se vérifie pas car les communes de la Camargue et Marseille sont très étendu au-delà de la zone RICE-2070.

6.2.2. EVALUATION DE LA POPULATION PRESENTE DANS LA RICE-2070 EN 2070

Pour l'échéance 2070, plusieurs scénarios ont été conçus. Ces scénarios s'appuient sur les scénarios démographiques produits par le BIPE (Lot7) :

- Hypothèse de mise en place de stratégies de prévention : en supposant que les nouvelles populations ne s'installent pas dans la RICE-2070 (pas de croissance de la population dans la RICE-2070)
- Hypothèse de croissance modérée : en supposant que la croissance de la population à l'intérieur de la RICE-2070 est identique à celle modélisée par le BIPE sur la Région
- Hypothèse d'attractivité persistante du littoral : en supposant que la croissance de population y reste deux fois plus importante que pour les autres communes (ou qu'elle reste identique à actuellement dans le cas d'une baisse de population)

Les résultats sont présentés dans le tableau 5 pour l'évaluation avec répartition uniforme de la population, dans la figure 41 et 42 pour l'évaluation par carroyage.

Ces données peuvent fournir quelques informations utiles en vue de l'adaptation. Ainsi, selon les scénarios démographiques retenus, l'accroissement de la population peut devenir un facteur important de l'augmentation des risques côtiers. Ceci est tout particulièrement vrai dans certaines des ERENS qui ont été classées parmi les plus vulnérables, notamment les Pertuis, la Bretagne et le Languedoc. Un levier de la réduction des risques côtiers dans ces régions semble être une maîtrise de la pression anthropique en zones exposées, en particulier dans les ERENS potentiellement les plus concernés. La question de l'acceptabilité de cette mesure « d'adaptation sans regrets » devra cependant être traitée. Sans qu'il soit possible à ce stade de proposer des approches coûts bénéfices robustes, ce travail préliminaire ouvre la perspective d'une quantification des parts relatives de l'accroissement de la pression anthropique d'une part, du changement climatique d'autre part, dans l'augmentation attendue des risques côtiers d'ici à 2070.

Tableau 6: Evaluation de la population dans la RICE-2070 en 2070 pour chaque ERENs et taux de croissance retenu ; données BIPE, INSEE, BRGM ; Réalisation : BRGM

	Population 2006	Scénario "prévention "	Taux de crois- sance	Population 2070		
				Scénario "croissance modérée"	Taux de crois- sance	Scénario "attractivité "
Zones EREN						
Aquitaine	47727	47727	1,3	64378	1,7	81030
Bretagne nord	68884	68884	1,4	93826	1,7	118768
Bretagne sud	96107	96107	1,4	130906	1,7	165705
Corse Plaine orientale	5505	5505	1,3	7012	1,5	8518
Corse Plaine ouest	7937	7937	1,3	10109	1,5	12282
Cote basque	16533	16533	1,3	22301	1,7	28069
Cote d'Albatre	19812	19812	1,1	21929	1,2	24046
Cote d'Azur	143221	143221	1,2	176030	1,5	208839
Cote de Nacre	64699	64699	1,1	72120	1,2	79541
Cote d'Opale nord	23767	23767	1,0	24879	1,1	25991
Cote d'Opale sud	49396	49396	1,0	51707	1,1	54019
Cote Vermeille	275	275	1,4	393	1,9	511
Cotentin nord	15496	15496	1,1	17273	1,2	19051
Estuaire de la Gironde	26630	26630	1,3	35921	1,7	45212
Estuaire de la Loire	52610	52610	1,4	73195	1,8	93781
Estuaire de la Seine	56587	56587	1,1	62634	1,2	68681
Languedoc et Delta du Rhone	103913	103913	1,4	148543	1,9	193173
Languedoc ouest	37098	37098	1,4	53031	1,9	68965
Manche sud	30670	30670	1,1	34188	1,2	37706
Pertuis	228358	228358	1,3	292480	1,6	356601
Plaine Flamande	321618	321618	1,0	336667	1,1	351715
Total général	1416843	1416843		1729523		2042203

Evaluation d'une borne supérieure de la population exposée aux aléas côtiers en 2070, dans trois scénarios

Population

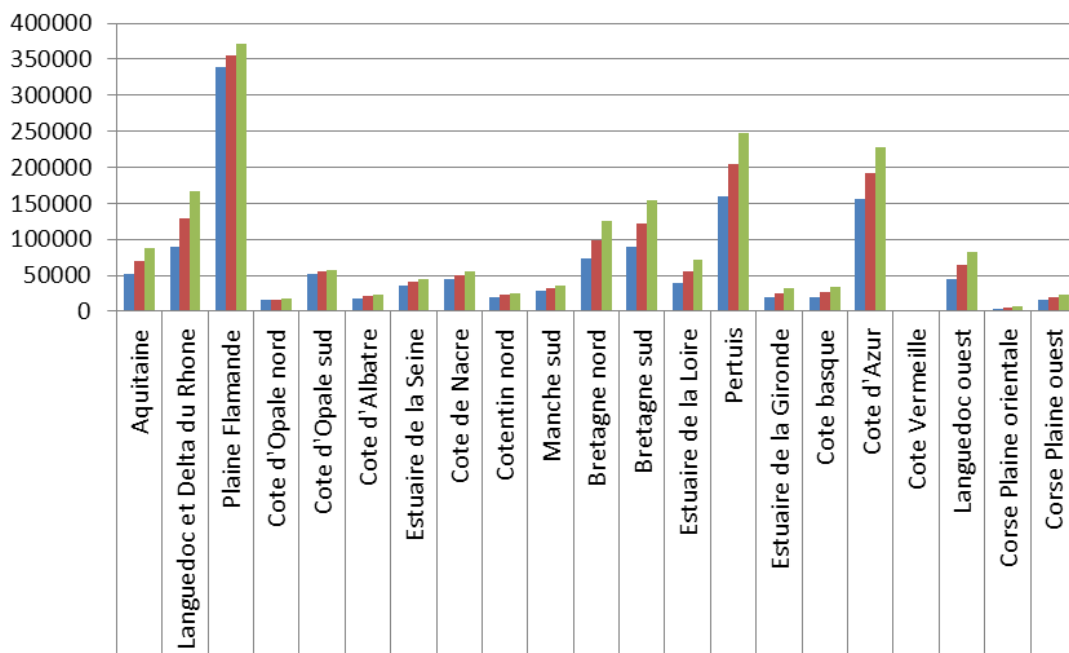


Figure 41: Evaluation d'une borne supérieure de la population en 2070 dans chaque EREN dans trois scénarios démographiques (Données BIPE, INSEE, BRGM).



Figure 42: Evolution de la population 2070 dans la zone RICE-2070 pour chaque EREN et selon les 3 scénarios démographiques proposés.

6.3. EXEMPLE D'EVALUATION DES RISQUES A L'ECHELLE REGIONALE A PARTIR DES RESULTATS DU LOT 6

Les données produites à l'échelle des zooms peuvent être utilisées pour affiner la vision de l'exposition fournie à l'échelle nationale.

Rappelons que les données produites par le Lot 6 sur le zoom Languedoc-Roussillon se présentent sous la forme d'une base de données SIG, comportant 50000 entités homogènes sur le plan de leur morphodynamique. Le rapport final du zoom LRO expose la méthode de réalisation. Les figures 43 et 44 présentent la forme que peuvent prendre ces données.

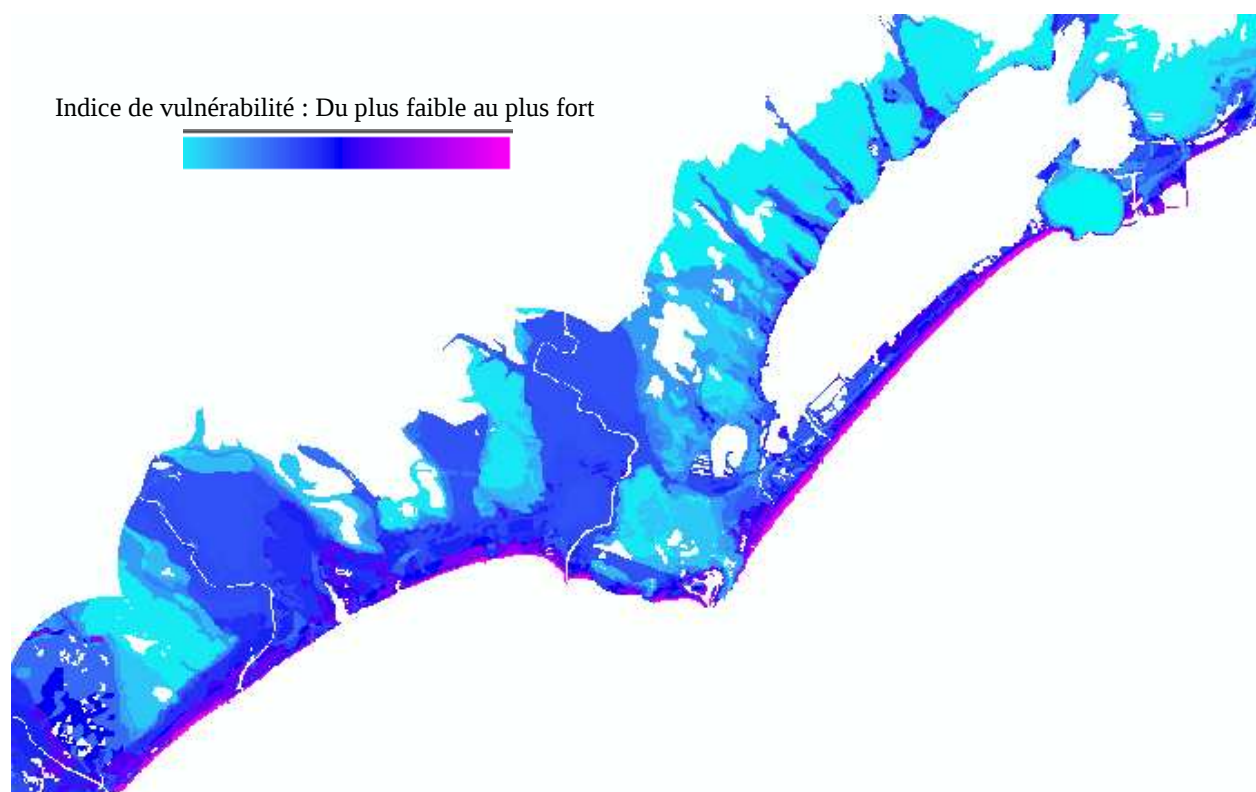


Figure 43: Indice de vulnérabilité (Languedoc-Roussillon) ; Scénario Tendantiel

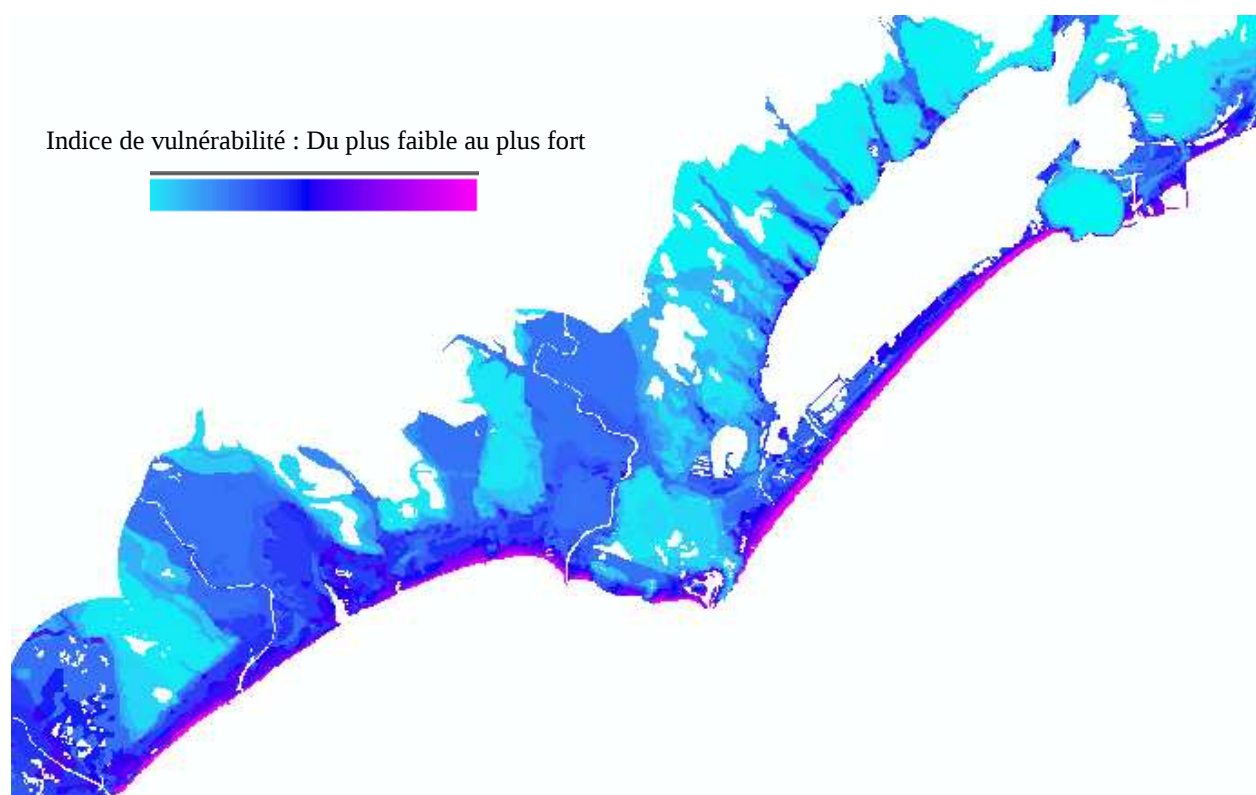


Figure 44: Indice de vulnérabilité (LRO) ; Scénario avec élévation du niveau marin

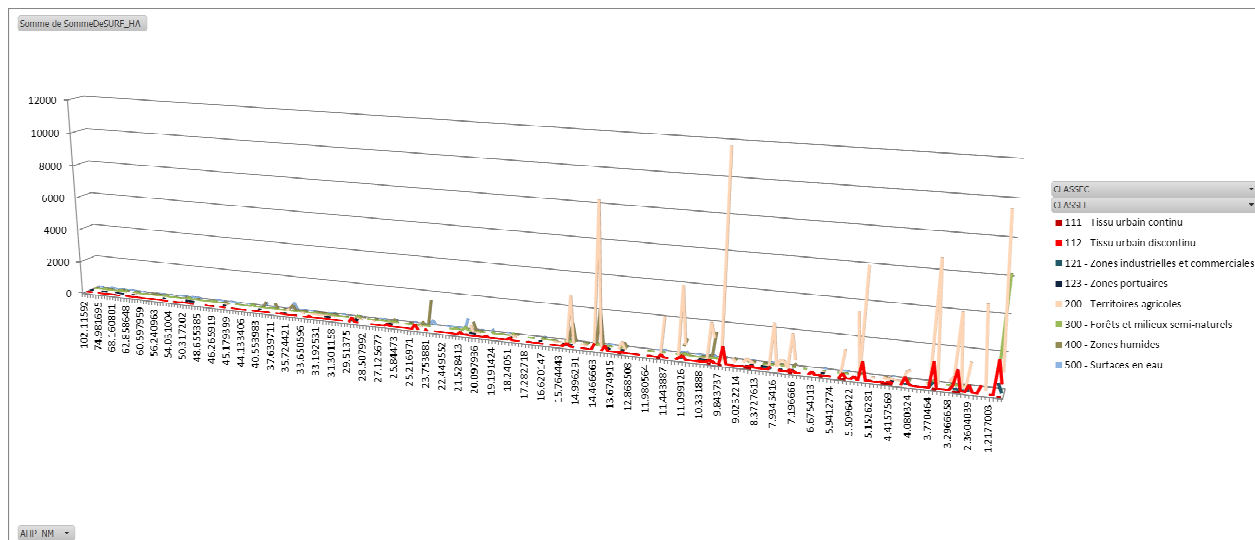


Figure 45: Occupation du sol (Surface en ha) en fonction de l'Indice de vulnérabilité des différentes entités : Scénario avec élévation du niveau marin.

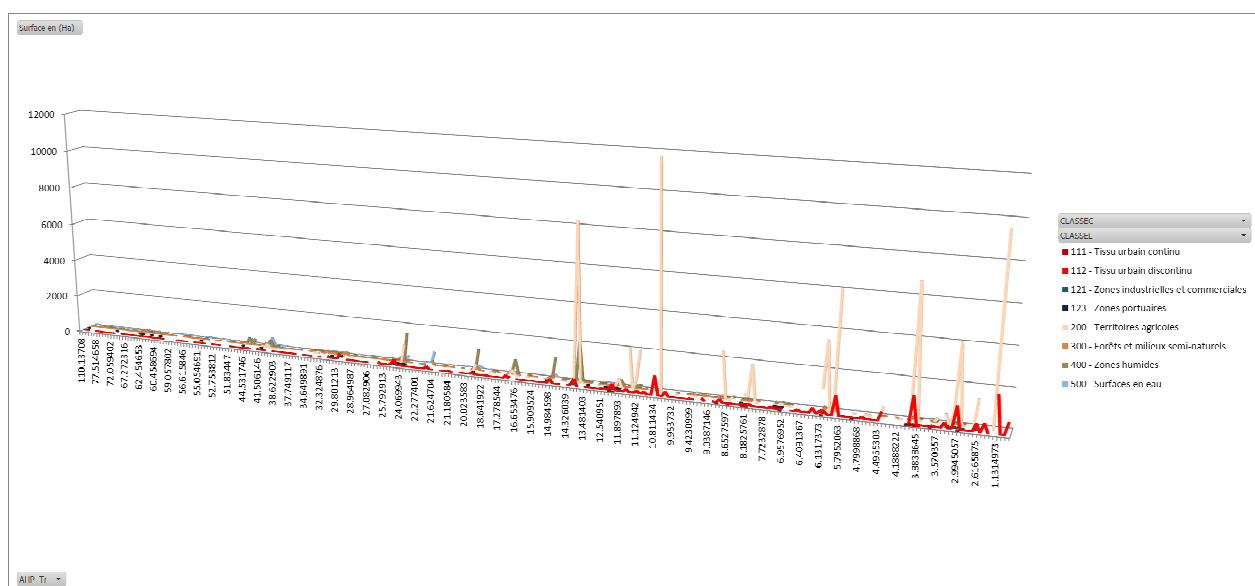


Figure 46: Occupation du sol (Surface en ha)/ en fonction de l'indice de vulnérabilité : Scénario Tendanciel

Ces figures mettent en évidence que dans le cas du scénario avec élévation du niveau marin, il y a plus d'enjeux (par exemple de tissus-urbain) pour les niveaux de vulnérabilité physique

forts que dans le scénario tendanciel. Néanmoins, on constate que les zones de plus grande vulnérabilité demeurent des surfaces humides ou en eau. Cela correspond au fait que les zones les plus basses (situées par exemple en arrière des lidos sur la rive des étangs sont en général submergées de manière récurrente (plusieurs fois par an) et sont utilisées parfois comme parking. En définitive, même si l'attractivité du littoral génère des situations où l'on aménage des zones vulnérables, les parties les plus vulnérables (notamment qui sont submergées de manière récurrente plusieurs fois par an) demeurent néanmoins non urbanisées.

Ce type d'analyse est analogue à ce qui est présenté par l'observatoire du littoral (par exemple dans ses figures représentant l'occupation du sol en fonction de la distance à la mer⁶). Elle fournit un éclairage complémentaire qui n'est possible que grâce à une base de données telle que fournie par le Lot 6 ou une base de données similaires. Elle permet d'évaluer l'occupation du sol actuelle en fonction de la vulnérabilité physique, dans les deux scénarios avec et sans élévation du niveau marin. Ce type d'approche, s'il est mis en œuvre à l'échelle des différentes études menées localement pour évaluer les effets de l'élévation du niveau marin, permettra l'intercomparaison des différents résultats, afin de fournir une vision régionale utile pour les SRCAE.

⁶ <http://www.littoral.ifen.fr/Synthese-Environnement-littoral-et-marin.256.0.html>

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La méthode mise en œuvre dans le cadre du projet a permis une première qualification de l'exposition des côtes françaises aux aléas côtiers à l'horizon 2050-2070 en prenant en compte le changement climatique.

La méthode choisie a permis de classer, par grandes entités géographiques, les régions côtières les plus vulnérables à l'érosion et à la submersion marine, dans une perspective de long terme, pour deux scénarios : un scénario tendanciel et un scénario avec changement climatique. Cinq entités ressortent principalement pour les deux scénarios : « Pertuis », « Languedoc et Delta du Rhône », « Aquitaine », « Bretagne sud » et « Bretagne nord ». Ces résultats font ressortir la forte vulnérabilité des secteurs comprenant des zones basses très étendues ainsi que les côtes sableuses importantes.

Le classement à l'échelle nationale est directement lié à la segmentation des entités opérée sur des critères géomorphologiques. Les entités qui ressortent de manière prioritaire sont celles de grande emprise et dont les facteurs d'état (caractérisés par la topographie, la lithologie et la géomorphologie) sont sensibles aux aléas côtiers. A cette échelle, la variabilité dans la gamme de chaque critère amène à des résultats assez contrastés, ce qui rend le classement final peu sensible à de faibles modifications dans les pondérations ou dans la comparaison entre les entités.

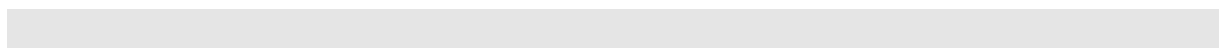
De manière générale, les limites rencontrées dans les études, à l'échelle nationale, sont très souvent liées à la disponibilité, la résolution, et la qualité des données. La méthode de l'AHP permet de pallier en partie cette difficulté en introduisant une part d'expertise dans l'analyse. Aux vues des données existantes à l'échelle nationale, il a été décidé pour le projet EXPLORE 2070 d'appliquer la méthode de l'AHP sur de grandes entités géographiques découpées sur des critères géomorphologiques et non des entités administratives. Dans des projets ultérieurs, il serait envisageable d'appliquer le même type de méthode en définissant des entités plus fines, en fonction des communes littorales par exemple. Ceci nécessiterait néanmoins un important travail préalable sur les jeux de données utilisés pour étayer l'analyse du groupe de travail. En effet, plus le nombre d'entités augmente, plus la base de données doit être conséquente pour appuyer l'analyse. Par exemple, pour les données hydrodynamiques, il faudrait construire un atlas plus précis à partir de bases de données telles que ANEMOC ou en retravaillant sur des ré-analyses long-terme. Les données topographiques haute résolution sur

l'ensemble du littoral français seraient également une condition essentielle à la mise en œuvre d'une telle approche. Ce travail se rapprocherait alors plus de celui mis en œuvre pour les zooms dans le cadre d'EXPLORE 2070.

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. Par ailleurs, la connaissance des causes de la vulnérabilité d'une zone littorale est importante pour les décideurs afin de proposer des mesures d'adaptation ciblées, constituant des réponses efficaces aux facteurs de vulnérabilité identifiés.

D'autre part, les données fournies par le lot 6 peuvent être utilisées pour une évaluation des risques côtiers dans le contexte du changement climatique. Ceci peut se faire par simple croisement des données produites par le lot 6 avec les enjeux existants : personnes, biens, occupation du sol. Le lot 6 a produit ces données, notamment à l'échelle nationale. Afin de répondre aux besoins du Lot 2, le Lot 6 a effectué ces traitements. Bien que ces approches présentent des incertitudes importantes, ces données peuvent permettre de fournir quelques informations utiles en vue de l'adaptation. Sans qu'il soit possible à ce stade de proposer des approches coûts bénéfices robustes, ce travail ouvre la perspective d'une quantification des parts relatives de l'accroissement de la pression anthropique d'une part, du changement climatique d'autre part, dans l'augmentation attendue des risques côtiers d'ici à 2070.

Dans le cadre des travaux ultérieurs du projet Explore 2070, il serait intéressant d'évaluer si la méthode proposée vient fournir une information pertinente pour examiner la cohérence entre eux des volets « adaptation aux risques côtiers » des Shémas Régionaux Climat Air Energie.





BIBLIOGRAPHIE

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.

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

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.

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

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.

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.

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.

Roe, G.H. and M. B. Baker, 2007: Why is climate sensitivity so unpredictable? Science, 318, 629-632.

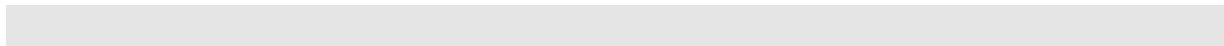
Saaty, T.L. (2008) – Decision making with the analytic hierarchy process. Int. J. Services Sciences, Vol.1, N°1, 2008.

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.

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/>

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.

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

Description détaillée de la méthode AHP

La méthode AHP permet, on l'a vu, de décomposer un problème complexe et non structuré en ses éléments constitutants, de modéliser ces éléments sous la forme d'une structure hiérarchique, de quantifier l'importance relative de chaque élément à partir de jugements subjectifs et enfin de synthétiser l'importance relative de chaque élément afin de déterminer des priorités parmi les actions potentielles.

La procédure se résume à 5 étapes :

- Décomposer le problème en une structure hiérarchique
- Effectuer les combinaisons binaires (comparaisons par paires)
- Déterminer les priorités
- Synthétiser les priorités
- Cohérence des jugements

Etape 1 : décomposer le problème en une structure hiérarchique

Au sommet de la hiérarchie, on trouve l'objectif du problème décisionnel. Le niveau inférieur contient les éléments permettant d'atteindre cet objectif, et l'on procède ainsi autant de fois que nécessaire. Le dernier niveau hiérarchique contient les actions potentielles que l'on souhaite évaluer.

Etape 2 : effectuer les combinaisons binaires

Il s'agit de procéder à des comparaisons par paire des éléments d'un niveau hiérarchique donné par rapport à l'élément père (niveau hiérarchique immédiatement supérieur) dans la hiérarchie. On forme ainsi des matrices de comparaisons, dont les valeurs sont tirées de l'échelle de Saaty (transformation des jugements en valeurs numériques, voir tableau 1), tout en respectant le principe de réciprocité.

Ces valeurs numériques entières correspondent théoriquement aux plus proches entiers des ratios w_i/w_j où w_i représente l'importance relative de l'élément i par rapport aux autres éléments du même niveau hiérarchique. L'échelle de Saaty trouve une justification « mathématique » dans la loi de Weber-Fechner. Il s'agit d'une fonction de réponse logarithmique psychophysique (Saaty 2008) : $M = a \log(S) + b$, (a non nul). M représente la réponse à un stimulus de magnitude S . De plus le ratio de deux valeurs successives de « plus petite différence discernable » (ΔS , ou jnd en anglais, pour just noticeable difference) est égal au ratio des deux valeurs successives de stimuli (S) correspondants. Autrement dit,

$\Delta S / S = r$, constante ne dépendant pas de S (Figueira et al. 2005). A partir de ce résultat et de la loi de Weber-Fechner, Saaty montre que les valeurs entières 1,2,...,n (valeurs de l'échelle fondamentale de la méthode AHP) sont intrinsèques à notre habilité à faire des comparaisons entre deux stimuli (Saaty 2008). De plus, il suggère que nous sommes capables de distinguer de manière ordinale deux éléments entre faible, moyen, fort à un premier niveau et de nouveau à un niveau inférieur entre faible, moyen, fort pour chaque valeur ordinale du premier niveau. Par conséquent, il en découle 9 catégories, la première étant le couple (faible, faible) auquel la valeur entière 1 est associée, et la dernière étant le couple (fort, fort) auquel la valeur 9 est associée.

Etape 3 : déterminer les priorités

Cette étape consiste à déterminer l'importance relative des éléments en calculant le vecteur propre associé à la valeur propre principale de chaque matrice de comparaisons. Il s'agit de

Tableau 7 : Echelle de Saaty (issue de Hammami 2003)
retrouver le vecteur $(w_1, \dots, w_n)^T$, à partir de la matrice de comparaisons $A = (a_{ij})$.

Dans le cas idéal où $a_{ij} = w_i / w_j$ (c'est-à-dire dans le cas où la matrice de comparaisons est réciproque et cohérente ($a_{ik} = a_{ij} a_{jk}$)), on peut remarquer que : $Aw = nw$. Ce système a une solution non triviale si et seulement si n est une valeur propre de A . Puisque $rg(A) = 1$, toutes les valeurs propres de A sont nulles à l'exception d'une seule. La somme des valeurs propres de A étant égale à la trace de A , elle-même égale à n , on en déduit que n est la valeur propre principale de A . w est positif et unique à une constante multiplicative près. En normalisant le vecteur w , il devient unique, et on peut remarquer qu'il s'agit en fait de n'importe quelle colonne de A normalisée (Saaty 2008).

Degré d'importance	Définition	Explication
1	Importance égale des deux éléments	Deux éléments contribuent autant à la propriété.
3	Faible importance d'un élément par rapport à un autre.	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément à un autre
5	Importance forte ou déterminante d'un élément par rapport à un autre.	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément à un autre
7	Importance attestée d'un élément par rapport à un autre.	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique.
9	Importance absolue d'un élément par rapport à un autre.	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible.
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines.	Un compromis est nécessaire entre deux appréciations.
Réciprocité	Si l'élément i se voit attribuer l'un des chiffres précédents lorsqu'elle est comparée à l'élément j , j aura donc la valeur inverse lorsqu'on la compare à i .	

Dans le cas plus commun où la matrice A n'est pas nécessairement cohérente, Saaty montre que le problème reste le même, c'est-à-dire que trouver un vecteur de poids w pour les éléments comparés passe par la résolution du problème aux valeurs propres : $Aw = \lambda_{\max} w$, avec $\lambda_{\max} \geq n$ (avec égalité ssi A est cohérente). L'existence et l'unicité de w dans le cas non-cohérent sont prouvées en utilisant le concept de dominance et les puissances limitantes de A (Saaty 2008).

Etape 4 : synthétiser les priorités

Il s'agit d'établir la performance relative générale de chacune des actions. Ceci est fait par une méthode additive des différents poids calculés précédemment.

Etape 5 : cohérence des jugements

On calcule d'abord l'indice de cohérence pour chaque matrice de comparaison :

$IC = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1)}$, où $\lambda_{\max}$ est la valeur propre principale de la matrice de comparaisons et n le nombre d'éléments comparés.

Cet indice de cohérence est une mesure du degré d'incohérence de la matrice (plus IC est grand, moins la matrice est cohérente). Saaty montre qu'il s'agit en fait de la moyenne des valeurs propres non principales de la matrice (Saaty 2008). Par conséquent, $IC = 0$ ssi la matrice est cohérente (ce qui se traduit également par $\lambda_{\max} = n$).

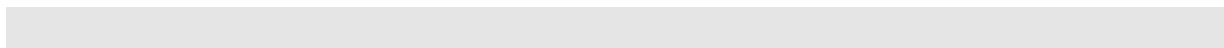
On calcule ensuite le ratio de cohérence RC défini par :

$RC = 100 \frac{IC}{AIC}$, où AIC est l'indice de cohérence moyen obtenu en générant aléatoirement des matrices de jugement de même taille. Le tableau 2 donne la correspondance entre l' AIC et n .

Dimension de la matrice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AIC	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Tableau 8 : Indice de cohérence moyen (issu de Hammami 2003)

Saaty soutient qu'un ratio RC ne devrait pas excéder 10%. Autrement les comparaisons par paires doivent être révisées pour réduire les incohérences. En outre, Saaty estime que le nombre d'éléments comparés ne devrait pas excéder 7 (au-delà nous ne sommes pas capables de faire des modifications de jugement précises sur plusieurs éléments à la fois) (Saaty 2008).



ANNEXE 2

Description détaillée de la mise en œuvre de La méthode AHP

Matrices de comparaison des composantes et des critères pour le scénario tendanciel

	Facteurs marins	Facteurs d'état	Elements de contexte	PRIORITE
Facteurs marins	1,00	3,00	0,33	0,28
Facteurs d'état	0,33	1,00	0,33	0,58
Facteurs de contexte	3,00	3,00	1,00	0,13

	Evènements extrêmes	Dynamique moyenne	Marnage	Hausse du niveau marin	PRIORITE
Evènements extrêmes	1,00	1,00	0,33	0,00	0,41
Dynamique moyenne	1,00	1,00	0,33	0,00	0,41
Marnage	3,00	3,00	1,00	0,00	0,19
ENM	1000,00	1000,00	1000,00	1,00	0,00

	Topographie	Lithologie	Géomorphologie	PRIORITE
Topographie	1,00	0,50	0,50	0,50
Lithologie	2,00	1,00	1,00	0,25
Géomorphologie	2,00	1,00	1,00	0,25

	Erosion historique	Anthropisation	PRIORITE
Erosion historique	1,00	1,00	0,50
Anthropisation	1	1,00	0,50

Matrices de comparaison des composantes et des critères pour le scénario avec ENM

	Facteurs marins	Facteurs d'état	Elements de contexte	PRIORITE
Facteurs marins	1,00	5,00	0,33	0,20
Facteurs d'état	0,20	1,00	0,20	0,70
Elements de contexte	3,00	5,00	1,00	0,10

	Evènements extrêmes	Dynamique moyenne	Marnage	Hausse du niveau marin	PRIORITE
Evènements extrêmes	1,00	1,00	0,33	0,33	0,375
Dynamique moyenne	1,00	1,00	0,33	0,33	0,375
Marnage	3,00	3,00	1,00	1,00	0,125
Hausse du niveau marin	3,00	3,00	1,00	1,00	0,125

	Topographie	Lithologie	Géomorphologie	PRIORITE
Topographie	1,00	0,50	0,50	0,50
Lithologie	2,00	1,00	1,00	0,25
Géomorphologie	2,00	1,00	1,00	0,25

	Erosion historique	Anthropisation	PRIORITE
Erosion historique	1,00	1,00	0,50
Anthropisation	1	1,00	0,50

ANNEXE 3

Compte rendu de la réunion du groupe de travail pour la revue des travaux à l'échelle nationale

COMPTE RENDU DE RÉUNION	
Rédacteur : Gonéri Le Cozannet, Sophie Lecacheux Entité : RIS/RIC	
Pour une diffusion externe : MEDDTL Visa et nom du responsable :	
Projet : EXPLORE-2070	Numéro : PSP10RNS78
Objet : Compte rendu de la réunion des experts pour l'échelle nationale	
Date : 08/11/10	Lieu : <i>Orléans</i>
Participants : C. Oliveros, R. Pedreros, A. Stepanian, G. Le Cozannet, S. Lecacheux, C. Mallet	
Absents :	
Diffusion : C. Oliveros, R. Pedreros, A. Stepanian, G. Le Cozannet, S. Lecacheux, C. Mallet, MEEDTL	
RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS	
FACTEURS MARINS : Rodrigo Pedreros : les données de vagues utilisées ne sont pas récentes et des ré-analyses sont disponibles. Réponse : Tout repose sur l'homogénéité de la base de données car on compare deux à deux les entités. Or on ne peut pas garantir l'homogénéité entre Atlantique et Méditerranée dans les ré-analyses (Exemple : vents GFS => bonne modélisation de vagues en Atlantique, mauvaise en Méditerranée). Pour l'influence du marnage, il existe 2 écoles : Coelho (plus la marée est importante, plus la vulnérabilité est élevée) et CVI (inverse). Manuel Garcin : attention à ne pas sur-interpréter des études qui portaient éventuellement uniquement	

sur des indicateurs d'érosion.

Gonéri : étude en cours avec Marissa (exploitation de données érosion dans les réseaux Bayesiens)

Conclusion des discussions : il faut donner moins d'importance au marnage, car on a des difficultés à justifier qu'il a un rôle bénéfique ou pas sur la vulnérabilité. La logique « faible marnage => forte exposition » devrait être justifiée par un raisonnement, des exemples, et les études antérieures (exemple : Thieler et Hammar-Klose)

Elévation du niveau marin : proposition de réduire le poids relatif de ce critère sachant que la variabilité du niveau marin future n'est pas connue.

Vagues extrêmes et moyennes annuelles : la répartition des entités est la même pour les vagues moyennes et extrêmes (avec $H_{s10\%}$) . De plus, les vagues en Bretagne semblent sous-estimées. Il serait utile de regarder le $H_{s1\%}$.

FACTEURS D'ETAT :

Les experts trouvent que les critères Lithologie et Géomorphologie côtière sont redondants.

Réponse : La lithologie a été prise en compte pour donner une information sur l'arrière-pays alors que la géomorphologie renseigne sur le type de trait de côte.

Conclusion : Pas de modification de l'arbre hiérarchique

Il faut vérifier la couche pour la géomorphologie sur les plages (un type de plage sûrement été oublié : rivages limono-vaseux ?)

Aquitaine et Côte Basque : la vulnérabilité de l'entité « côte Basque » devrait être majorée en raison du mauvais état des falaises (altérites).

FACTEURS DE CONTEXTE :

La question de la prise en compte des modes de gestion est posée. En effet, en Aquitaine, il y a une bonne corrélation entre les modes de gestion et les problèmes effectivement constatés sur le terrain. Cependant il n'est pas prévu de les prendre en compte pour l'échelle nationale car ce n'est pas vrai partout.

Il serait intéressant de prendre en compte le stock sédimentaire. Cependant, il n'y a pas de données à l'échelle nationale. Indirectement, on doit trouver cela dans le critère érosion historique.

REMARQUES GENERALES :

Proposition de reformuler la question : vulnérabilité physique des systèmes côtiers à une échelle de temps pluri-décennale : érosion et submersion dans le contexte de l'élévation du niveau marin.

Renommer la zone « Bretagne sud et Vendée » en zone « Bretagne sud » et la zone « Côte d'Argent » en « Côte Basque ».

Pour les pondérations des 3 composantes, les experts suggèrent l'ordre suivant : (1) facteurs d'Etat, (2) facteurs marins (3) facteurs de contexte.

La question d'une analyse quantitative ou une analyse rapportée aux pourcentages est posée. Par exemple, pour le critère urbanisation, l'indicateur doit-il être la surface totale urbanisée par entité ou le pourcentage de surface urbanisée ? Les entités choisies au départ étaient des entités sur lesquelles on pouvait effectuer une action et le raisonnement en termes de surface était justifié. Le problème ici est que les nouvelles entités choisies ne correspondent pas à une échelle de décision existante, et qu'il y a une forte disparité de surfaces entre elles. La prise en compte des pourcentages fait ressortir les estuaires alors que ceux-ci présentent des zones vulnérables très concentrées. Gonéri suggère de prendre en compte les surfaces effectives et non les pourcentages avec l'idée suivante : il y a un budget à répartir pour les mesures d'adaptation : comment répartir ce budget de la manière la plus juste possible. Rodrigo propose de faire deux classifications : une pour les estuaires et une pour les autres entités.

Il est proposé de reprendre l'analyse avec les commentaires des experts puis d'envoyer le fichier excel afin que les experts puissent faire des tests sur les pondérations et les indicateurs.

ANNEXE 4

Construction du RICE et extraction des communes à l'usage des lots 7 et 2

La sélection des communes susceptibles d'être concernées par les risques côtiers en 2070 est basée sur le concept du RICE (Radius of Influence of Coastal Erosion) introduit par le projet EUROSION. Dans EUROSION, ce rayon est déterminé en utilisant un critère pour prendre en compte l'érosion et un pour prendre en compte la submersion. Il s'agit de l'union des zones situées à moins de 500m du trait de côte (pour prendre en compte l'érosion) et à moins de 5m d'altitude (pour prendre en compte la submersion).

Pour le projet EXPLORE, les critères ont été affinés :

- Pour la submersion, l'altitude uniforme de 5m est remplacée par les niveaux d'eau extrêmes. Pour cela, la couche des zones basses élaborée par le CETMEF a été exploitée (CETMEF-CETE, 2009). Ces zones ont été construites en croisant les niveaux extrêmes centennaux déterminés par le SHOM sur la façade atlantique (pour la Méditerranée, une altitude uniforme de 1.5m a été utilisée) avec la BD Topo Pays. Afin de prendre en compte l'incertitude des données topographiques utilisées et la possible élévation du niveau marin avec le changement climatique, plusieurs zones ont été construites. Les zones situées sous le niveau centennal, celles situées sous le niveau centennal +1m et celles situées sous le niveau centennal -1m. Pour notre zonage, nous avons extrait les zones situées sous la limite supérieure (sous le niveau centennal +1m).

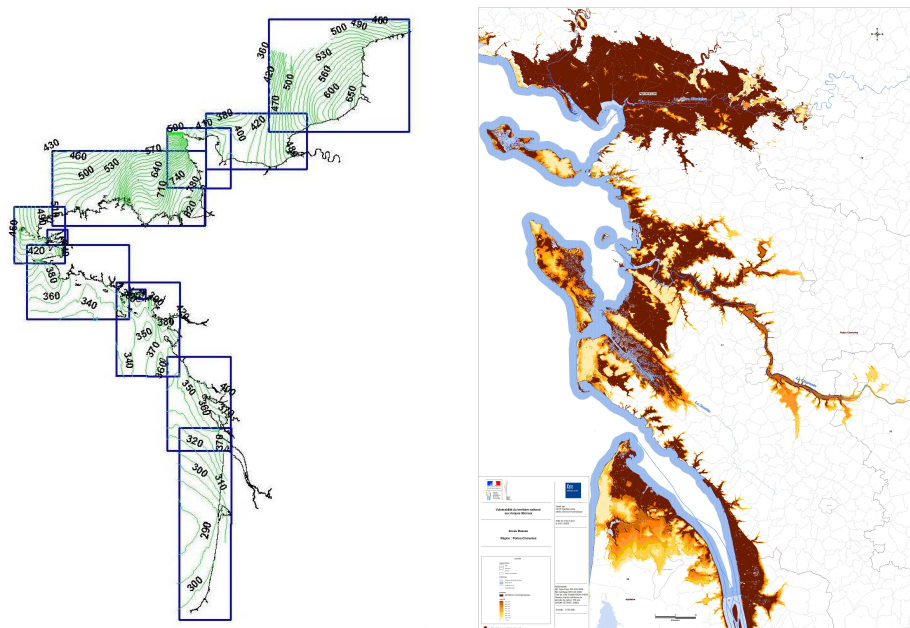


Figure 1. Gauche : Carte des niv. cent. déterminés par le SHOM. Droite : carte des zones basses en Poitou-Charentes déterminées par le CETMEF (les zones en marron foncé sont situées sous le niv. cent.)

- Pour l'érosion, les zones prises en compte sont celles situées dans un tampon dont l'épaisseur est variable en fonction du type de côte. Sa largeur est de 500m pour les côtes de type plage ou estran et de 200m pour les côtes rocheuses érodables ou comportant des plages de poche. Les côtes rocheuses dures et les zones artificielles ne sont pas représentées dans le tampon. Pour cela, l'attribut CEMVO2 de la couche géomorphologie de EUROSION a été utilisé.

Tableau 9. Largeur de la zone tampon en fonction de l'attribut CEMVO2

A. Falaises dures	0m
AC. Côte à dominante rocheuse avec plages de poche	200m
B. Falaises sujettes à l'érosion	200m
C. Plages de poche	200m
D. Plages développées avec un estran constitué de galets	200m
E. Plages développées avec un estran sableux	500m
F. Cordons littoraux, flèches, tombolos et autres structures sédimentaires de sédiments non cohésifs	500m
G. Estrans constitués de sédiments limono-vaseux	500m
H. Embouchures	0m
J. Zones portuaires	0m
K. Plages artificielles	0m
L. Remblais littoraux pour constructions avec apports de rochers	0m

N. Estrans très étroits et végétalisés	500m
P. Estrans meuble avec platier rocheux sur l'estran intertidal	500m
R. Estrans meuble avec beach rock sur l'estran intertidal	500m
S. Estran meuble constitué de sédiments issus de rejets miniers	500m
X. Estran meuble constitué de sédiments de granulométrie hétérogène	500m
Y. Segment côtier artificiel ou maintenu par des structures longitudinales de protection côtière sans présence d'estran de plage aérienne	0m
Z. Estran constitué de sédiments de granulométrie inconnue	500m

Le polygone final (RICE) est composé de l'union des deux zones précédemment décrites.

Sélection des communes potentiellement concernées

Les communes sélectionnées pour le lot prospective ont été obtenues en faisant l'intersection du polygone RICE avec la couche des communes françaises (BD Topo) et le polygone découpant les entités de restitution à l'échelle nationale (EREN). Toutes les communes qui sont en partie ou intégralement contenues dans le polygone RICE ont été listées avec leur code INSEE.

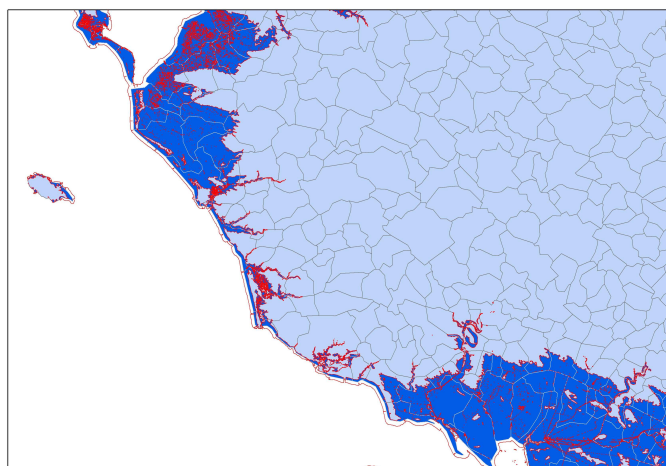


Figure 2. Exemple d'intersection entre le polygone "RICE" (rouge) et les communes françaises entre l'île de Noirmoutier et la baie de l'Aiguillon.

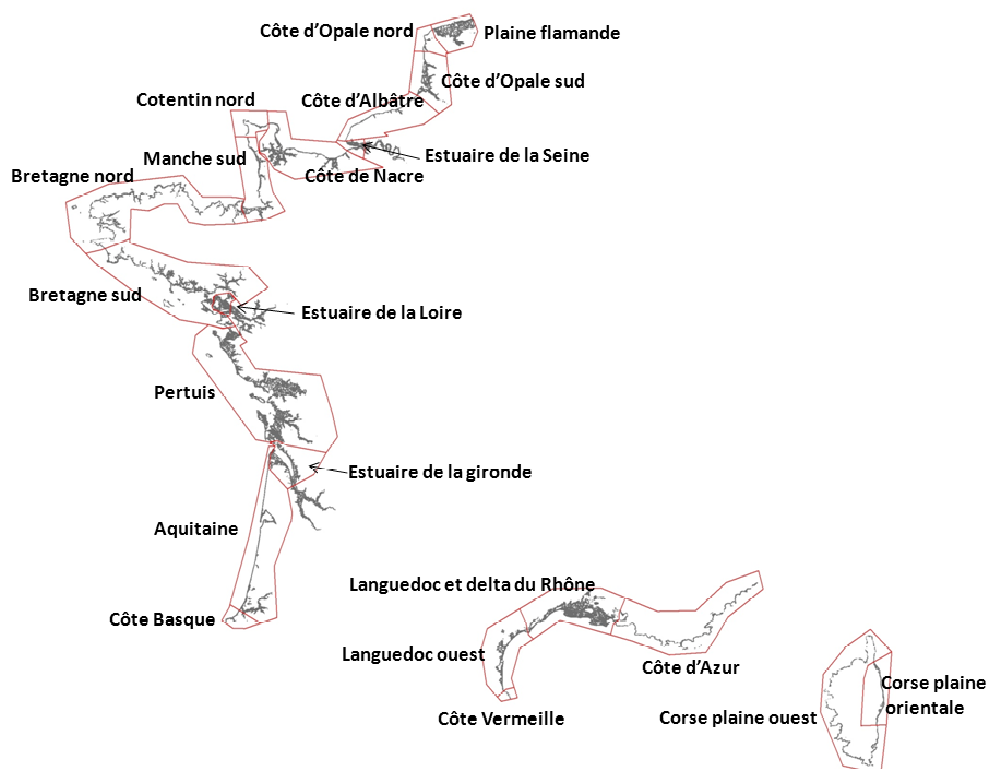


Figure 3. Entités de restitution à l'échelle nationale ou ERENs (rouge) et ensemble des communes comprises dans le RICE (gris).

Contenu du fichier :

ONGLET 1 :

Une première liste contient toutes les communes comprises à l'intérieur du RICE. Deux autres listes ont été établies en ne prenant en compte que les communes dites « littorales » ou que les communes dites « d'estuaire » d'après l'observatoire du littoral. Plus d'informations sur cette distinction peuvent être trouvées sur le site de l'observatoire du littoral :

<http://www.littoral.ifen.fr/Geographie-du-littoral.18.0.html> ou <http://www.littoral.ifen.fr/La-notion-de-littoral-terrestre.217.0.html>

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	TOUTES LES COMMUNES			COMMUNES LITTORALES			COMMUNES D'ESTUAIRES	
2	NOM communes	code INSEE		NOM COMMUNE	code INSEE		NOM COMMUNE	code INSEE
3	ABBEVILLE	80001		ABLON	14001		ANGLES	85004
4	ABLON	14001		AGDE	34003		ANGVILLE-AU-PLAIN	50010
5	AGDE	34003		AGON-COUTAINVILLE	50003		ARCES	17015
6	AGON-COUTAINVILLE	50003		AIGUES-MORTES	30003		ARZAL	56004
7	AIGNERVILLE	14004		AJACCIO	2A004		BARZAN	17034
8	AIGREFEUILLE-SUR-MAINE	44002		ALATA	2A006		BAYONNE	64102
9	AIGUES-MORTES	30003		ALBITRECCIA	2A008		BEGADAN	33038
10	AIMARGUES	30006		ALERIA	2B009		BENOUVILLE	14060

ONGLET 2 :

Certaines communes ne sont rattachées à aucune entité. Il s'agit principalement des

communes situées très en amont des estuaires de la Seine, de la Loire ou de la Gironde, qui ont été coupés au niveau du trait de côte EUROSION pour l'analyse à l'échelle nationale et la détermination des ERENs. Le deuxième onglet reprend les listes précédentes mais en ne prenant en compte que les communes situées dans les entités ERENs.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	TOUTES LES COMMUNES				COMMUNES LITTORALES				COMMUNES D'ESTUAIRE		
2	NOM COMMUNE	ID_INSEE	EREN		NOM COMMUNE	ID_INSEE	EREN		NOM COMMUNE	ID_INSEE	EREN
3	ABBEVILLE	80001	Cote d'Opale sud		ABLON	14001	Estuaire de la Seine		ANGLES	85004	Pertuis
4	ABLON	14001	Estuaire de la Seine		AGDE	34003	Languedoc et Delta du Rhone / Languedoc ouest		ANGOVILLE-AU-PLAIN	50010	Cote de Nacre
5	AGDE	34003	Languedoc et Delta du Rhone / Languedoc ouest		AGON-COUTAINVILLE	50003	Manche sud		ARCES	17015	Estuaire de la Gironde
6	AGON-COUTAINVILLE	50003	Manche sud		AIGUES-MORTES	30003	Languedoc et Delta du Rhone		ARZAL	56004	Bretagne sud
7	AIGNERVILLE	14004	Cote de Nacre		AJACCIO	2A004	Corse Plaine ouest		BARZAN	17034	Estuaire de la Gironde
8	AIGUES-MORTES	30003	Languedoc et Delta du Rhone		ALATA	2A006	Corse Plaine ouest		BAYONNE	64102	Aquitaine
9	AIMARGUES	30006	Languedoc et Delta du Rhone		ALBITRECCIA	2A008	Corse Plaine ouest		BEGADAN	33038	Cote basque
10	AIREL	50004	Cote de Nacre		ALERIA	2B009	Corse Plaine orientale		BENOUVILLE	14060	Estuaire de la Gironde
11	AIRON-NOTRE-DAME	62015	Cote d'Opale sud		ALGAIOLA	2B010	Corse Plaine ouest		BERVILLE-SUR-MER	27064	Cote de Nacre

Bibliographie

CETMEF-CETE (2009) - Vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux – France métropolitaine (Rapport provisoire, Décembre 2009). 41 p., 17 fig.