

# Étude des aléas littoraux dans le cadre d'une analyse coûts-bénéfices (ACB)





Guide : ouvrage de référence à vocation méthodologique

## **Études des aléas littoraux dans le cadre d'une analyse coûts-bénéfices (ACB)**

Collection | **Références**

**Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement**

**Direction technique eau, mer et fleuves – 134, rue de Beauvais – CS 60039 – 60280 Margny-Lès-Compiègne Tél : +33(0)3 44 92 60 00**

**Siège social : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30**



## Préambule

L'élaboration de stratégies locales sur le littoral, que leur objectif soit la prévention des risques littoraux, en particulier du fait des inondations par submersion marine, ou la gestion intégrée du trait de côte, nécessite des réflexions approfondies des porteurs de projet.

Les analyses coûts-bénéfices (ACB) constituent des outils d'aide à la décision pour définir les stratégies d'aménagement les plus adaptés au territoire concerné et aux objectifs d'un projet d'aménagement. Elles ont pour objectif d'apprécier la pertinence économique des projets d'aménagement et de ses variantes. Dans le cas de mesures de protection face aux aléas naturels littoraux, elles évaluent notamment, avec un niveau de précision suffisant, les dommages potentiellement évités grâce à un projet, en estimant les dommages pour la situation de référence (état initial) et les dommages en situations aménagées.

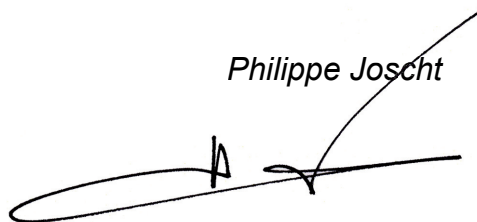
Les ACB ont été rendues partiellement obligatoires dans le cadre de deux démarches parallèles : les Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) et les projets du Plan Submersions Rapides (PSR). Par ailleurs, dans le cadre de l'élaboration de projets ou d'opérations relatifs à la gestion intégrée du trait de côte, les ACB peuvent être également mobilisées.

Dans ce cadre, la réalisation d'ACB repose sur les recommandations méthodologiques du Ministère de l'Écologie, définies dans le cahier des charges PAPI et dans les *Annexes techniques* (MEDDM, 2010). Ces documents présentent le cadre méthodologique général des ACB quels que soient les aléas concernés.

Le présent document se focalise sur l'étude d'aléas réalisée préalablement à l'ACB. Les recommandations existantes visaient plus spécifiquement l'évaluation du débordement de cours d'eau. Le cas des aléas littoraux a nécessité des réflexions spécifiques qui font l'objet de ce document.

Ces recommandations peuvent également être utilisées dans le cadre de l'élaboration d'une analyse multicritères (AMC) telle que définie dans le Guide méthodologique de l'analyse multicritères (CGDD, 2014). Analyse coûts-bénéfices « étendue », dans la mesure où elle intègre des impacts monétarisés et non monétarisés, l'AMC repose en effet également sur une étape de caractérisation des aléas préalable à l'évaluation d'un projet.

Philippe Joscht



Le Directeur  
de la Direction technique Eau, mer et fleuves



## Affaire suivie par

Céline PERHERIN – Cerema/DTecEMF/DI/IE/IAR
Tél. : 02 98 05 76 53 / fax : 02 98 05 67 21
Courriel : <a href="mailto:Celine.Perherin@cerema.fr">Celine.Perherin@cerema.fr</a>

## Rédacteur

Céline PERHERIN - Cerema/DTecEMF/DI/IE/IAR

## Relecteurs

Alexis BERNARD - Cerema/DTerOuest/DLRB/Risques Naturel  
Natacha CHRISTIN - CGDD/SEEI/ERNR2  
Yann DENIAUD - Cerema/DtecEMF/DI/IE/IAR  
Daniel DONNART - DREAL Bretagne/SPPR/RNHSS/NAT  
Arnaud GUEGUEN - GIP Littoral Aquitain  
Mireille GUIGNARD - DGALN/DEB/LM2  
Luc HAMM - ARTELIA  
Marc IGIGABEL - Cerema/DTecEMF/DI/IE/IAR  
Véronique LE COZ - DREAL Centre/SLBLB/DDB  
Doris NICKLAUS - CGDD/SEEI/ERNR2  
Jean-Philippe PENE - DGPR/SRNH/BRM  
Olivier PIET - Cerema/DtecEMF/D

## Contributeurs

Maëlle ALLAIN - DGALN/DEB/LM2  
Marie-Christine BARBEAU - DREAL Poitou-Char./SRTN/DRN  
Alexis BERNARD - Cerema/DTerOuest/DLRB/Risques Naturel  
Ludovic BOCQUIER - DREAL Pays Loire/SRNT/DRNHSS  
Annelies BOLLE - IMDC  
Natacha CHRISTIN - CGDD/SEEI/ERNR2  
Camille DAUBORD - SHOM  
Yann DENIAUD - Cerema/DtechEMF/DI/IE/IAR  
Daniel DONNART - DREAL Bretagne/SPPR/RNHSS/NAT  
Claire-Marie DULUC - IRSN/PRP-DGE/SCAN/BEHRIG  
Arnaud GUEGUEN - GIP Littoral Aquitain  
Bénédicte GUERINEL - DREAL Lang.Rous./SR/DRNL  
Mireille GUIGNARD - DGALN/DEB/LM2  
Serge HALIOUA - DDTM 17/SL  
Luc HAMM - ARTELIA  
Alexandre KAVAJ - DGPR/SRNH/BRM  
Xavier KERGADALLAN - Cerema/DTechEMF/DI/IE/IHS  
Véronique LE COZ - DREAL Centre/SLBLB/DDB  
Rachel NADAU - GIP Littoral Aquitain  
André PAQUIER - ISTE/Unité de Recherches Hydrologie - Hydraulique  
Jean-Philippe PENE - DGPR/SRNH/BRM  
Jacques PIALLAT - EGIS/Direction Port et Littoral  
Ronan PRONOST - SHOM  
Gaëlle SCHAUNER - Syndicat Mixte de la Baie de Somme  
Céline TRMAL - Cerema/DTerMed/DREC/SRILH  
Jacques VIGUIER - ARTELIA

# SOMMAIRE

<b>PRÉAMBULE.....</b>	<b>1</b>
<b>1 - CONTEXTE.....</b>	<b>6</b>
<b>2 - PRINCIPES D'UNE ACB.....</b>	<b>8</b>
2.1 - Objectifs.....	8
2.2 - Contexte méthodologique des projets subventionnés par l'État.....	9
<b>3 - CONNAISSANCE DES ALÉAS LITTORAUX ET DES IMPACTS DES PROJETS SUR LES ALÉAS.....</b>	<b>11</b>
3.1 - Généralités.....	11
3.2 - Études utiles à la réalisation d'une étude d'aléas littoraux dans le cadre d'une ACB.....	11
3.3 - Phase 1 : Analyse générale du fonctionnement du littoral.....	12
3.4 - Phase 2 : Cartographie des aléas littoraux.....	13
<b>4 - PRINCIPES DE L'ANALYSE DES ALÉAS LITTORAUX.....</b>	<b>14</b>
4.1 - Échelle d'analyse.....	14
4.2 - Horizon temporel de l'analyse.....	14
4.3 - Choix des situations étudiées.....	14
4.3.1 - Situation de référence.....	15
4.3.2 - Situations de projets.....	15
4.3.3 - Situation « sans ouvrage ».....	15
4.4 - Un niveau d'analyse lié à l'avancement du projet.....	15
4.5 - Estimation des coûts associés au projet.....	16
4.5.1 - Les coûts d'entretien et de gestion.....	17
4.5.2 - Les coûts de réparation et de reconstruction.....	17
<b>5 - ANALYSE DU REcul DU TRAIT DE CÔTE ET/OU DE L'ÉROSION.....</b>	<b>18</b>
5.1 - Informations nécessaires à l'analyse du recul du trait de côte et/ou de l'érosion...	18
5.2 - Cartographie de l'aléa recul du trait de côte.....	18
5.2.1 - Estimation d'un recul linéaire dans le temps.....	19
5.2.2 - Estimation d'un recul du trait de côte non linéaire dans le temps.....	22
5.3 - Changement climatique.....	22
5.4 - Étude de sensibilité.....	22
5.4.1 - Horizon temporel.....	22
5.4.2 - Zone soumise au recul.....	22
5.4.3 - Distribution du recul du trait de côte dans le temps.....	23

<b>6 - ANALYSE DE L'ALÉA SUBMERSION MARINE.....</b>	<b>24</b>
6.1 - Principes de réalisation d'une étude d'aléa submersion marine préalable à l'élaboration d'une ACB.....	24
6.1.1 -Plusieurs niveaux d'analyse.....	24
6.1.2 -Informations nécessaires à l'élaboration de la cartographie de l'aléa submersion marine.....	25
6.1.3 -Choix des événements hydrauliques/scénarios étudiés.....	25
6.1.4 -Aléa non constant et changement climatique.....	27
6.1.5 -Cartographie de l'aléa submersion marine.....	28
6.1.5.a - Méthode de cartographie.....	28
6.1.5.b - Paramètres à cartographier.....	30
6.2 - Analyse simplifiée de l'aléa submersion marine.....	30
6.2.1 -Informations nécessaires sur le projet.....	30
6.2.2 -Scénarios étudiés.....	30
6.2.2.a - Choix des scénarios étudiés.....	30
6.2.2.b - Description des événements hydrauliques.....	32
6.2.3 -Cartographie de l'aléa submersion marine.....	32
6.2.4 -Estimation des dommages évités.....	33
6.2.5 -Études de sensibilité.....	34
6.2.5.a - Fréquence des événements hydrauliques (niveaux marins).....	34
6.2.5.b - Horizon temporel.....	35
6.2.5.c - Changement climatique.....	35
6.3 - Analyse affinée de l'aléa submersion marine.....	36
6.3.1 -Informations nécessaires sur le projet.....	36
6.3.2 -Scénarios étudiés.....	37
6.3.2.a - Choix des scénarios étudiés.....	37
6.3.2.b - Description des événements hydrauliques.....	45
6.3.3 -Cartographie de l'aléa submersion marine.....	46
6.3.4 -Estimation des dommages.....	46
6.3.5 -Études de sensibilité.....	47
6.3.5.a - Fréquence des événements hydrauliques.....	47
6.3.5.b - Horizon temporel.....	47
6.3.5.c - Changement climatique.....	47
6.3.5.d - Comportement hydraulique et structurel de l'ouvrage.....	47
<b>7 - LIMITES DE LA MÉTHODE.....</b>	<b>49</b>
<b>8 - GLOSSAIRE.....</b>	<b>50</b>
<b>9 - BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>52</b>

# 1 - Contexte

Les analyses coûts-bénéfices (ACB) sont des outils d'aide à la décision permettant d'étudier l'opportunité de stratégies de prévention des risques. Elles ont été rendues partiellement obligatoires dans le cadre de deux démarches parallèles : les Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) et les Plans Submersions Rapides (PSR). La labellisation d'un PAPI, qui permet au porteur du projet de bénéficier de fonds publics, exige l'élaboration d'une analyse coûts-bénéfices des mesures de protection les plus importantes (mesures structurelles dont la somme des montants est supérieure à 2 millions d'euros ou représente 25 % du montant total du PAPI). Dans le cadre de la labellisation PSR, l'ACB est obligatoire pour les ouvrages dont le niveau de protection est augmenté. Les projets littoraux se placent également dans un contexte lié à la mise en place de la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte. Même si les ACB ne sont à ce jour pas obligatoires dans le cadre de stratégies locales de gestion du trait de côte, elles permettent d'apprécier la pertinence économique des projets d'aménagement et de ses variantes et sont ainsi de précieux outils d'aide à la décision.

En tant que méthode apportant une aide à la sélection des alternatives d'aménagement possibles, l'ACB peut s'insérer à différents stades d'avancement d'un projet.

Les principes de la méthode ACB, telle qu'exigée par le Ministère, sont définis dans le cahier des charges PAPI. Des outils d'aide à la réalisation des ACB sont par ailleurs développés dans un guide méthodologique, les *Annexes techniques* (MEDDM, 2010), afin d'aider les porteurs de projet à y répondre. *L'ACB (analyse coût/bénéfice) : une aide à la décision au service de la gestion des inondations* (CEPRI, 2011) clarifie également le cadre dans lequel les ACB des projets de prévention des inondations doivent être conduites.

Les projets d'aménagement littoraux faisant l'objet d'ACB sont principalement des ouvrages de protection contre les deux aléas côtiers, que sont le recul du trait de côte et la submersion marine.

Les ACB littorales sont confrontées à des difficultés méthodologiques spécifiques, concernant d'une part la détermination de l'aléa et d'autre part l'évaluation des dommages potentiels ; les spécificités du milieu maritime n'étant pas abordés dans les annexes techniques MEDDM (2010).

Les projets relatifs aux aléas littoraux présentent ainsi des particularités sur les points suivants :

- 1) Phénomènes initiateurs des aléas littoraux : L'espace littoral est mobile d'un point de vue hydro-sédimentaire. Les phénomènes météo-marins sont à l'origine à la fois des aléas de submersion marine et de recul du trait de côte, qui peuvent fortement interagir. Ces deux aléas doivent ainsi être étudiés conjointement si nécessaire. L'impact du changement climatique sur les aléas littoraux est important, du fait notamment de l'élévation du niveau marin moyen de la mer.
- 2) Sollicitations sur les aménagements, modes de fonctionnement hydraulique et de rupture associés : Les modes de fonctionnement hydraulique et les modes de rupture des ouvrages de protection contre les aléas sont liés à des sollicitations hydrauliques spécifiques au milieu littoral associées notamment à la prédominance des effets des vagues.
- 3) Spécificités des enjeux et des dommages : L'aléa littoral peut aussi impliquer la survenue de dommages différents de ceux rencontrés pour des inondations fluviales. L'augmentation de la teneur en sel des sols, de la corrosion de certaines structures métalliques, objets ou matériels, le choc mécanique produit par les vagues sont autant de paramètres qui peuvent moduler le coût d'un événement calculé sur la base des courbes de dommages de la littérature. Par ailleurs, les enjeux d'un territoire littoral présentent aussi des particularités du fait d'une activité tournée vers la mer et d'une économie généralement basée sur le tourisme.

La prise en compte de ces spécificités nécessite la mise au point de recommandations méthodologiques adaptées. Le présent document a pour objectif de présenter les propositions du groupe de travail concernant l'étude des aléas littoraux préalable à l'élaboration d'une ACB. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du développement et de l'amélioration des méthodes d'évaluation économique des projets de prévention des inondations pilotés par le CGDD pour le compte du Ministère en charge du développement durable.

*Avertissement :*

*Les travaux ont porté sur l'amélioration de l'étape de caractérisation des aléas nécessaires à la mise en œuvre de la méthode ACB. Les recommandations présentées dans ce document peuvent néanmoins être utilisées dans le cadre de l'élaboration d'une analyse multicritères (AMC) telle que définie dans le Guide méthodologique de l'analyse multicritères (CGDD, 2014). À l'instar de l'ACB, l'AMC repose en effet sur une étape de caractérisation des aléas préalable à l'évaluation des bénéfices potentiels d'un projet.*

## 2 - Principes d'une ACB

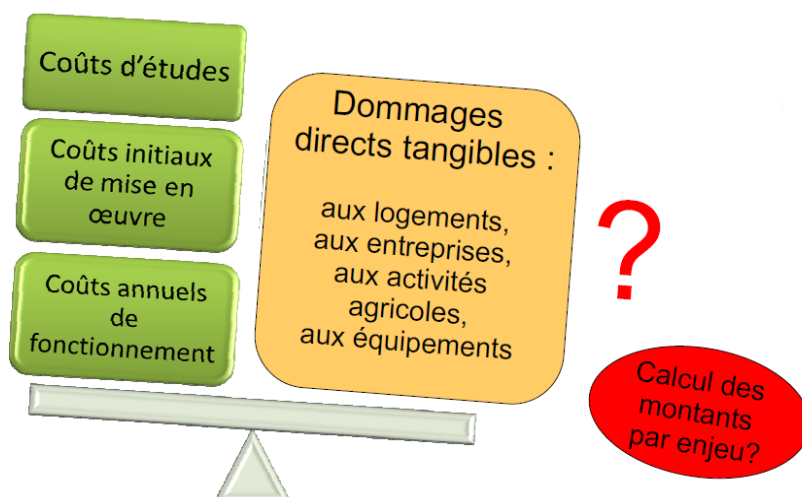
### 2.1 - Objectifs

Face à un territoire exposé à des aléas naturels, les pouvoirs publics développent des stratégies de gestion du risque. L'une de ces stratégies consiste à protéger le territoire contre des événements, grâce à la mise en œuvre de mesures structurelles (digues, perrés, murs...). Ces mesures structurelles sont généralement à l'origine de bénéfices pour le territoire sous la forme de dommages évités aux logements, aux activités, aux équipements publics et aux réseaux. Inversement, ces mesures représentent aussi des coûts correspondant aux études préalables, aux travaux, à leur maintenance et à leur exploitation.

L'objectif de l'analyse coût bénéfice (ACB) est d'identifier les mesures rentables d'un point de vue économique. Pour cela, elle compare, dans un cadre précis :

- les coûts de mise en œuvre d'une mesure,
- les bénéfices escomptés par cette mesure (dommages évités).

Si ces bénéfices sont supérieurs aux coûts, la mesure est dite rentable et le projet est pertinent économiquement.



*Illustration 1 : Coûts à prendre en compte dans une ACB (Source : CGDD)*

L'ACB nécessite d'évaluer, avec un niveau de précision suffisant, les dommages potentiellement évités grâce à un projet, en estimant les dommages pour la situation de référence (état initial) et les dommages en situation aménagée.

L'une des difficultés consiste à évaluer monétairement l'impact d'un aléa sur un territoire. À défaut de considérer la totalité des dommages potentiels, ce qui reste difficile d'un point de vue méthodologique, ce sont essentiellement les dommages directs tangibles qui sont comptabilisés avec l'aide de courbes de dommages de référence.

## 2.2 - Contexte méthodologique des projets subventionnés par l'État

L'ACB analyse et compare plusieurs projets entre eux et/ou à une situation de référence (avant travaux). Dans le cadre méthodologique défini par l'État pour l'analyse de stratégies de prévention des risques et d'aménagement, elle est réalisée dans un cadre précis :

- Elle est réalisée sur un horizon temporel donné, limité à 50 ans,
- Les enjeux sont considérés comme constants,
- Le taux d'actualisation utilisé doit être celui du Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective.

Quatre catégories d'enjeux sont étudiées : le logement, l'activité économique (hors activité agricole), l'activité agricole et l'équipement public (MEDDM, 2010).

L'ACB repose, quelle que soit la méthode, sur sept étapes :

- la définition du périmètre d'étude ;
- la caractérisation de l'aléa ;
- le recensement des enjeux ;
- l'évaluation des dommages évités par chaque projet considéré ;
- l'évaluation des coûts de mise en œuvre de chaque projet ;
- l'analyse des résultats ;
- l'évaluation de l'incertitude et de la sensibilité de l'analyse produite.

Le présent document aborde principalement l'étape de caractérisation de l'aléa, mais également celles de la définition du périmètre d'étude et de l'analyse de sensibilité qui sont étroitement liées à la caractérisation de l'aléa.

Dans le cas des inondations, où l'aléa est lié à un événement, défini par une intensité et une fréquence données, une annualisation des dommages est nécessaire (cf. Figure 2) et la réalisation de courbes dommages-fréquences est nécessaire. Le calcul des bénéfices doit en effet se faire pour l'ensemble des événements qui peuvent potentiellement survenir sur le territoire (de différentes intensité et occurrence). Pour cela, un Dommage Moyen Annuel (DMA) est calculé : ce DMA prend en compte les dommages engendrés par tous les événements (rares à fréquents) en pondérant ces dommages par leur probabilité d'occurrence. Sur le même principe, un Dommage Évité Moyen Annuel (DEMA) est calculé par soustraction du DMA en situation « avec projet » au DMA en situation actuelle (cf. Illustration 2).



### 3 - Connaissance des aléas littoraux et des impacts des projets sur les aléas

#### 3.1 - Généralités

Une démarche complète d'étude des aléas littoraux (évolution du trait de côte et submersion marine) dans le contexte spécifique de l'élaboration d'ACB littorales est présentée dans ce document. Afin d'aboutir à la cartographie des aléas naturels littoraux sur le territoire d'étude, l'étude des aléas littoraux préalable à l'élaboration de l'étude ACB doit être menée en deux phases :

- une analyse du fonctionnement du littoral,
- une caractérisation des aléas débouchant sur la cartographie des aléas.

Cette démarche est similaire à celle qui peut être mise en œuvre lors de toute étude d'aléas littoraux et notamment d'une étude d'aléa préalable à l'élaboration d'un PPRL (MEDDE, 2013). Même si la démarche et le type de résultats attendus sont identiques, le niveau de détail de cette étude et les principes de réalisation des cartographies des aléas sont cependant adaptés à l'objectif final de l'ACB.

La première phase de l'étude d'aléa a pour objectif d'analyser le fonctionnement du littoral, des systèmes de protection existants et de décrire les phénomènes qui l'affectent. Elle permet une bonne compréhension du fonctionnement du site qui permettra de définir les aléas à étudier, d'identifier le secteur d'étude et de choisir les hypothèses et méthodes les mieux adaptées lors de la cartographie des aléas.

La deuxième phase de l'étude d'aléa, la caractérisation et la cartographie des aléas, a pour objectif d'identifier les secteurs concernés par les différents aléas et de déterminer leurs caractéristiques, pour les situations de projet d'aménagement à prendre en compte dans le cadre de l'ACB. Cette analyse est distincte pour chaque aléa identifié en phase 1. C'est sur la base des cartographies établies lors de cette phase qu'est réalisée l'analyse des dommages de l'ACB.

#### 3.2 - Études utiles à la réalisation d'une étude d'aléas littoraux dans le cadre d'une ACB

Plusieurs études peuvent être utiles ou nécessaires à la réalisation des études d'aléas littoraux préalables aux ACB, lors de la phase 1 ou 2 de l'étude d'aléas.

##### **Détermination du système de protection contre les inondations**

Lors d'une étude ACB réalisée dans le cadre d'une analyse des risques d'inondation, il est indispensable, au préalable de la cartographie de l'aléa, de disposer d'une connaissance du système de protection et de son fonctionnement. L'analyse du système de protection est un élément indispensable de la phase 1 de l'étude d'aléa préalable à l'ACB car elle est nécessaire à la phase 2. Si aucune étude préalable ne permet de disposer de ces éléments de connaissance, une étude spécifique devra donc être réalisée et incluse dans la phase 1 de l'étude d'aléa.

##### **Avant-projets d'un aménagement côtier**

L'ACB compare au moins deux situations d'aménagement. Ces deux situations doivent être décrites a minima par des études d'avant-projets afin de pouvoir réaliser l'ACB. Plus les projets sont décrits et détaillés, plus l'ACB peut être précise.

Une étude d'avant-projet sommaire d'un projet de protection contre les inondations permet la réalisation d'une méthode d'ACB « simplifiée » dès que l'objectif de protection de l'ouvrage est fixé (cf. 6.2). Au stade d'avant-projet détaillé, une étude « affinée » telle que décrite au 6.3 peut être menée dès que les niveaux de protection et de sûreté sont fixés.

### **Analyse d'impact hydro-sédimentaire d'un aménagement côtier**

Une analyse d'impact hydro-sédimentaire d'un aménagement côtier existant ou projeté peut permettre d'estimer les impacts en termes de recul du trait de côte (cf. 5.2).

### **Étude de danger des ouvrages hydrauliques de protection contre les inondations**

Les situations d'aménagement à étudier par l'ACB, qu'il s'agisse d'un aménagement existant ou projeté, peuvent avoir fait l'objet au préalable d'une étude de danger (EDD). Cette EDD permet de nettement améliorer la mise en œuvre de l'ACB « affinée » telle que décrite au 6.3.

## **3.3 - Phase 1 : Analyse générale du fonctionnement du littoral**

La première phase de l'étude d'aléa a pour objectif d'analyser le fonctionnement du littoral, des systèmes de protection existants et de décrire les phénomènes qui l'affectent. Elle permet une bonne compréhension du fonctionnement du site dans sa globalité, les phénomènes naturels hydro-sédimentaires à l'origine des différents aléas littoraux (submersion marine, recul du trait de côte et migration dunaire) étant identiques et les interactions fortes entre ces aléas. Elle n'a donc pas pour objectif de traiter chaque aléa mais de comprendre le fonctionnement du site étudié, les phénomènes naturels et leurs interactions entre eux, ainsi que l'origine des aléas. La zone d'étude peut être plus étendue que le site d'intérêt et doit faire l'objet d'une réflexion approfondie. Cette phase 1 permet ainsi de choisir les hypothèses et méthodes les mieux adaptées lors de la cartographie des aléas.

L'analyse du fonctionnement du littoral se décompose en deux parties principales :

- une analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du site : elle a pour objectif d'analyser les transports sédimentaires et les évolutions du littoral qui en résultent, les évolutions de la position du trait de côte et de la morphologie de la frange littorale et de synthétiser le fonctionnement hydro-sédimentaire.

Elle s'appuie sur :

- l'analyse du cadre géomorphologique : types de côtes, caractéristiques géologiques et morpho-sédimentaires,
- les conditions climatiques, météorologiques et hydrodynamiques associées (niveaux marins, houles, etc.),
- le fonctionnement hydro-sédimentaire : analyse des transits sédimentaires et des cycles saisonniers et pluri-annuels,
- les ouvrages de protection et les systèmes de protection contre les inondations,
- l'analyse du fonctionnement hydraulique de la partie terrestre du site,
- une analyse historique : plusieurs points sont analysés lors de cette phase : l'évolution de la position du trait de côte et de la morphologie de la frange littorale, les événements historiques de submersions marines, l'évolution de l'occupation humaine et de l'implantation des ouvrages de protection. Une analyse chronologique de ces différents points permet d'apporter des éléments de compréhension de l'évolution côtière complémentaire à l'analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire.

Cette compréhension du fonctionnement permet à la fin de cette première phase d'étude :

- de définir correctement l'échelle de la zone d'étude adaptée, liée aux phénomènes hydro-sédimentaires ; ainsi, l'échelle de la zone d'étude doit être cohérente avec les limites des cellules sédimentaires, de la cellule de submersion (zone inondable côtière indépendante des autres cellules) et des systèmes de protection identifiés.
- et de synthétiser pour chaque aléa à étudier, identifié lors de cette première phase, les principales informations qui permettront de retenir les bonnes hypothèses et de choisir les bonnes méthodes d'analyse conduisant à la caractérisation des aléas.

On pourra se référer au guide *La gestion du trait de côte* (MEEDDM, 2010) pour une meilleure compréhension du fonctionnement d'un littoral.

Le niveau de détail attendu dépend du contexte dans lequel est réalisé l'ACB. En effet, les réflexions sur les stratégies d'aménagement d'un territoire (PAPI ou stratégies locales de gestion du trait de côte) nécessitent de manière générale une connaissance moins approfondie du fonctionnement que lors de la phase de dimensionnement d'un aménagement (PSR) ou la réalisation d'un PPRL. Cependant, la réflexion sur les différentes situations d'aménagement envisagées (cf. 4.4) nécessite une compréhension minimale du fonctionnement du littoral. L'analyse menée peut s'appuyer sur le Guide méthodologique Plans de Prévention des Risques Littoraux (MEDDE, 2013), qui détaille le contenu attendu.

Cette phase 1 s'appuie principalement sur la bibliographie existante ainsi que sur des observations de terrain mais peut demander des analyses spécifiques (instrumentation, modélisation, dires d'experts, etc.). Elle doit reposer sur les meilleures données de base disponibles (niveaux marins, taux de recul du trait de côte...) comme toute autre étude d'aléas réalisées sur un même secteur quels que soient ses objectifs (réalisation d'ACB, d'étude de danger, de PSR, élaboration de stratégies de gestion du trait de côte, de PPRL, de PAPI, dimensionnement d'un aménagement...). Cette première phase d'analyse peut être commune à plusieurs études d'aléa.

### **3.4 - Phase 2 : Cartographie des aléas littoraux**

La deuxième phase de l'étude d'aléa, la cartographie des aléas, a pour objectif d'identifier les secteurs concernés par les différents aléas et de déterminer leurs caractéristiques. Cette analyse est distincte pour chaque aléa identifié en phase 1 et se déroule toujours en 2 étapes. C'est sur la base des cartographies établies lors de cette phase qu'est réalisée l'analyse des dommages de l'ACB.

La nature des phénomènes de recul du trait de côte et de submersion marine, leur signification cartographique et leurs conséquences sont très différentes : le recul du trait de côte est, le plus souvent, irréversible, et engendre une perte définitive d'enjeux, alors que la submersion marine est temporaire et occasionne des dommages aux enjeux. L'estimation des dommages dans le cadre de l'ACB s'appuie sur des méthodologies différentes. Pour le recul du trait de côte, l'évolution du trait de côte est estimée sur un horizon temporel généralement à partir d'un taux de recul moyen, permettant de donner directement les dommages associés, alors que pour la submersion marine, les dommages sont estimés pour des événements de différentes intensités auxquels sont ensuite associés une probabilité annuelle d'occurrence.

Pour le recul du trait de côte, l'étape 1 consiste à la détermination d'un taux de recul moyen annuel sur une période à évolution homogène représentative et l'étape 2 consiste à cartographier la zone soumise au recul du trait de côte. Une démarche similaire peut être mise en œuvre pour les projets d'aménagement soumis à l'aléa de migration dunaire. La migration dunaire n'est donc pas abordée spécifiquement dans ce document.

La cartographie de la submersion marine est réalisée en 2 étapes :

- L'étape 1 consiste au choix des événements hydrauliques à étudier spécifiquement dans le cadre de l'ACB ;
- L'étape 2 est la caractérisation des aléas pour les situations d'aménagement à prendre en compte dans l'ACB. Cette étape vise à définir l'extension géographique et les caractéristiques de la submersion (hauteur, vitesse d'écoulement, vitesse de montée des eaux, durée de submersion) à partir des hypothèses définies préalablement et au choix de la méthode appropriée.

Lorsque les deux aléas sont étudiés, l'étude de l'aléa recul du trait de côte doit être réalisée en amont de l'analyse de la submersion marine du fait des interactions entre les deux aléas et de ses répercussions sur cette dernière (cordons naturels jouant un rôle de protection contre la submersion marine notamment).

## 4 - Principes de l'analyse des aléas littoraux

Des cartographies sont réalisées pour chacun des aléas recul du trait de côte et submersion marine. Certains principes de réalisation des cartes sont communs aux deux aléas.

### 4.1 - Échelle d'analyse

Les échelles d'analyse des aléas sont définies à partir de la phase 1 de l'étude des aléas littoraux (Analyse générale du fonctionnement du littoral).

L'étude d'aléa recul du trait de côte doit se faire à une échelle adaptée à l'aléa qui comprend l'ensemble de la cellule sédimentaire. Elle doit étudier l'impact des projets en termes de recul du trait de côte au droit des aménagements mais également leurs impacts en d'autres points de la cellule sédimentaire (aggravation de l'érosion en d'autres points notamment). L'ACB portera ainsi sur tous les secteurs impactés en termes de recul du trait de côte par le projet.

L'étude de l'aléa submersion marine est réalisée a minima à l'échelle de l'ensemble des zones inondables qui sont affectées par le système de protection étudié. L'ACB a généralement pour objectif d'étudier les aménagements apportant des améliorations au niveau du système de protection, souvent au niveau des points de faiblesse identifiés. Elle doit donc être réalisée sur l'ensemble des zones où l'aléa est modifié du fait de l'aménagement.

Dans les cas où les deux aléas sont étudiés, l'échelle d'étude doit être cohérente et permettre de couvrir l'ensemble des secteurs impactés par les aménagements étudiés.

### 4.2 - Horizon temporel de l'analyse

L'ACB est à réaliser sur un horizon temporel. L'horizon temporel dépend de chaque stratégie ou projet d'aménagement étudié, dans la limite de 50 ans. On considère que les aménagements jouent leur rôle sur la durée de la stratégie tant qu'ils ne sont pas déconstruits, ce qui impose d'intégrer les coûts d'entretien, de réparations et d'éventuelles reconstructions sur cette durée.

Il est nécessaire de comparer deux projets d'aménagements sur le même horizon temporel, afin de ne pas biaiser les coûts et bénéfices comptabilisés pour chaque projet. Si l'horizon n'est pas le même pour les deux projets, il est nécessaire de mener l'ACB sur l'horizon temporel le plus grand.

L'ACB peut également permettre de déterminer l'échéance à partir de laquelle le projet devient rentable ( $VAN > 0$ ). Pour certains projets (notamment de relocalisation), il peut ainsi être plus intéressant de déterminer par l'ACB, l'échéance à partir de laquelle le projet devient rentable ( $VAN > 0$ ) et de juger si celle-ci est acceptable, plutôt que de fixer l'horizon temporel de l'analyse et de contrôler la positivité de la VAN.

### 4.3 - Choix des situations étudiées

L'ACB permet de comparer plusieurs situations. Au démarrage de la démarche de définition de la stratégie d'aménagement, plusieurs projets sont généralement étudiés. Ces projets doivent être comparés à une situation de référence. La situation de référence permet d'estimer l'intérêt de chaque projet.

On considère que les aménagements, ouvrages de protection notamment, jouent leur rôle sur la durée de la stratégie tant qu'ils ne sont pas déconstruits. Cette hypothèse implique d'intégrer les coûts d'entretien, de réparations et d'éventuelles reconstructions sur cette durée, en situation aménagée (coûts de l'ouvrage projeté) et en situation de référence (coûts associés aux éventuels aménagements existants).

#### **4.3.1 - Situation de référence**

Il s'agit du maintien de la situation actuelle en continuité des actions présentes.

Pour les ouvrages situés sur le Domaine Public Maritime (DPM), cette situation est liée à la situation administrative du ou des ouvrage(s) (exemple : concession). La stratégie adoptée par le passé sur le territoire d'étude est directement liée à la durée de concession de l'ouvrage, pendant laquelle le rôle de l'ouvrage doit être assuré (entretien et éventuellement réparation et reconstruction).

Pour les autres ouvrages, il est considéré que le rôle de l'ouvrage est assuré sur l'horizon temporel de la situation de projet étudiée et donc que l'entretien, les réparations et éventuelles reconstructions sont assurés.

Cette situation doit systématiquement être étudiée.

#### **4.3.2 - Situations de projets**

Plusieurs situations de projets peuvent être étudiées. Pour chaque projet défini est associé un horizon temporel (dans la limite de 50 ans).

Une situation peut être définie par une stratégie en deux phases dans le temps avec un changement de stratégie prévue au cours de l'horizon étudié (exemple : protection assurée à l'identique pendant une durée limitée permettant de préparer une modification/suppression d'un ouvrage).

#### **4.3.3 - Situation « sans ouvrage »**

Cette situation correspond à l'absence d'ouvrage de protection sur le secteur étudié. Dans le cas où la situation de référence n'est pas aménagée, cette situation est donc confondue avec la situation de référence. Dans le cas où un ouvrage est présent sur le secteur, cette situation est purement théorique, considérant qu'un ouvrage doit assurer son rôle. Cette situation permet cependant de représenter un scénario extrême et doit systématiquement être étudié. Elle est intégrée à l'analyse comme situation de comparaison.

Des scénarios intermédiaires entre cette situation « sans ouvrage » et une situation où l'ouvrage remplit son rôle sur l'ensemble de l'horizon temporel pourraient exister, l'ouvrage jouant son rôle pendant une partie de l'horizon temporel. Pour les ouvrages situés sur le DPM, ces situations ne peuvent cependant théoriquement pas exister, la situation administrative de l'ouvrage imposant un maintien de la fonctionnalité de l'ouvrage pendant la concession.

D'autre part, l'estimation des aléas causés par une situation d'abandon d'un ouvrage au cours de l'horizon temporel est techniquement complexe (vitesse de dégradation, survenue d'événement de tempête...).

L'étude d'une situation en l'absence d'ouvrage de protection peut cependant être considérée comme une approche par excès de la situation d'abandon des aménagements existants.

### **4.4 - Un niveau d'analyse lié à l'avancement du projet**

L'ACB permet d'évaluer la pertinence économique d'un projet et de comparer deux ou plusieurs projets, entre eux, et à une situation initiale. Il est possible de réaliser l'ACB à plusieurs stades d'avancement du projet, avant le choix de la stratégie d'aménagement et après, pour affiner le dimensionnement du projet.

La première phase de réflexion sur le projet porte sur la stratégie (étude de faisabilité). Elle permet de comparer plusieurs stratégies d'aménagement, parmi l'ensemble des alternatives retenues, à la situation initiale. L'objectif de l'ACB est alors de comparer les différentes stratégies d'aménagement et d'orienter le choix. C'est le cas notamment au niveau des stratégies locales de gestion du trait de côte ou des stratégies locales de gestion des inondations. Dans ce cas, l'approche de l'ACB doit être relativement « robuste » et reposer sur un comportement global de

l'ouvrage, combiné à une analyse relativement simple des secteurs potentiellement soumis à évolution. A ce stade en effet, le dimensionnement des ouvrages n'est pas établi et ce sont des esquisses du projet dont il convient d'estimer les bénéfices attendus.

Les situations envisagées se déclinent entre une absence de gestion du trait de côte, qui est étudiée via la situation « sans ouvrage » (cf. 4.3.3) et le maintien de protection « dures » sur le trait de côte, les réflexions devant s'appuyer sur les enjeux soumis aux aléas (localisation, nombre, type...). « N'envisager les opérations de protection artificialisant fortement le trait de côte que dans des secteurs à très forte densité ou d'intérêt stratégique national et les concevoir de façon à permettre à plus long terme un déplacement des activités et des biens » (MEDDTL, 2012). Suivant les cas, les situations suivantes, pouvant être couplées entre elles et/ou avec un suivi du trait de côte, peuvent être étudiées :

- absence d'ouvrage de protection,
- suppression/dépose d'ouvrage,
- absence d'intervention ou « laisser faire »,
- intervention limitée en accompagnant les processus (techniques dites « souples »),
- fixation du trait de côte : conservation, modification ou construction d'ouvrages de défense ou de rechargements de sable,
- création d'une nouvelle ligne de défense en arrière du trait de côte,
- relocalisation des enjeux.

Une seconde analyse, plus détaillée, s'appuie sur les dimensionnements de l'ouvrage envisagé (études d'avant-projet et projet) et est utile pour affiner le choix entre deux projets proches (choix de la structure et des matériaux de l'ouvrage, mise en place d'un parapet...) et confirmer la pertinence du projet par rapport à la situation existante. L'analyse est de plus en plus affinée et précise au fur et à mesure de l'avancement de la démarche de définition des aménagements du fait de l'intégration des résultats d'autres études préalables (étude de dimensionnement, étude d'impact). A ce stade, le dimensionnement de l'ouvrage est généralement fixé.

L'amélioration des connaissances sur le projet (dimensionnement, étude de danger...) et les coûts associés au projet (entretien, réparation...) doivent ainsi permettre d'accroître la précision de l'ACB et la robustesse des résultats.

## 4.5 - Estimation des coûts associés au projet

Les coûts associés au projet, à confronter aux dommages évités, intègrent :

- les coûts d'études,
- les dommages supplémentaires générés par le projet éventuellement (augmentation du recul du trait de côte ou des conséquences des inondations en-dehors de la zone protégée),
- les coûts d'investissements,
- les coûts d'entretien (qui modifie l'état de l'ouvrage et conduit à maintenir sa fonctionnalité) et de gestion qui peuvent évoluer dans le temps,
- les coûts de réparation en cas de défaillance (déterminés à partir des analyses pour les différents scénarios à l'origine de la courbe dommages-fréquences),
- les coûts de reconstruction, en cas de survenue d'un événement supérieur au niveau de sûreté.

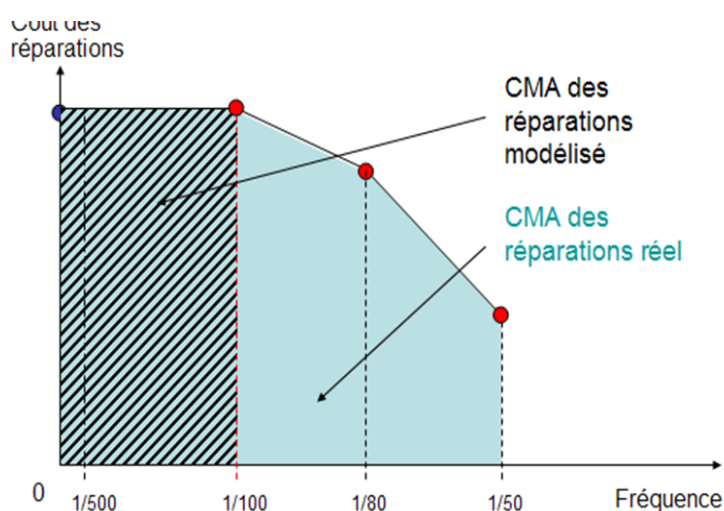
Ils sont à mettre en lien avec les dommages évités pour les enjeux de la zone protégée et en dehors de la zone immédiatement protégée (déterminés à partir des courbes dommages-fréquences pour la submersion et à partir des enjeux directement identifiés pour le recul du trait de côte).

#### 4.5.1 - Les coûts d'entretien et de gestion

Les coûts d'entretien (maintenance des ouvrages, rechargements annuels...) et de gestion (suivi et contrôle) ainsi que leur pérennité (possibilité technique et financière) dans le temps doivent être connus pour mener l'ACB. Dans le cas d'entretiens nécessitant de fortes disponibilités en matériaux, les coûts d'approvisionnements sont susceptibles de variations importantes. Les actions d'entretien peuvent être nombreuses et ne doivent pas être sous-estimées.

#### 4.5.2 - Les coûts de réparation et de reconstruction

Des coûts de réparation sont à prendre en compte dans l'ACB. Une approche déterministe permet d'identifier un endommagement à partir d'une fréquence d'événement donnée. Les coûts de réparation/de remise en état associés, pondérés par la probabilité d'occurrence de l'événement sont alors pris en compte. Pour un événement situé au-delà de la fréquence du niveau de sûreté de l'ouvrage (ruine), les coûts sont ceux de reconstruction. Les coûts de réparation et de reconstruction sont annualisés.



*Illustration 3 : Représentation schématique des coûts moyens annuels des opérations de remise en état d'un ouvrage*

Les opérations de remise en état, afin que l'ouvrage assure à nouveau son rôle, peuvent être nombreuses, notamment lorsque le secteur considéré est en situation d'érosion. Cela peut alors nécessiter : rechargement(s) de plage, redimensionnement des fondations en cas d'abaissement du profil, prolongement d'épis...

L'endommagement peut être plus complexe à estimer dans le cas de méthodes douces de gestion du littoral du fait de la résilience plus élevée.

Les coûts des réparations et reconstructions peuvent être estimés par une approche théorique ou une approche historique (retour d'expérience).

## 5 - Analyse du recul du trait de côte et/ou de l'érosion

Le recul du trait de côte correspond à une disparition de terrains sous l'effet d'un recul durable de la limite terre-mer du fait d'une érosion ou de l'élévation du niveau moyen de la mer.

Une étude de l'aléa recul du trait de côte ou de l'érosion uniquement (notamment quand le trait de côte n'évolue pas) peut être nécessaire dans plusieurs cas :

- pour qualifier la situation de référence et la comparer au projet, lorsque les ouvrages projetés ont un objectif d'agir sur l'érosion et de limiter l'évolution du trait de côte (épi(s), perré, rechargement...),
- pour qualifier les éventuelles conséquences en termes de recul du trait de côte consécutif à l'érosion (impact hydro-sédimentaire) des ouvrages projetés et les dommages associés, lorsque les aménagements projetés n'ont pas un objectif premier de lutte contre le recul du trait de côte mais peuvent avoir un impact sur celui-ci,
- pour identifier les impacts de l'érosion sur les structures de protection contre la submersion marine quand cet aléa est identifié dans la première phase de l'étude d'aléas littoraux.

Une cartographie de l'aléa recul du trait de côte est alors à réaliser pour chaque situation à étudier. Pour les situations où le trait de côte est fixé et n'évolue pas entre la situation de référence et la situation de projet (c'est le cas notamment lorsque plusieurs solutions de maintien du trait de côte sont envisagées), les dommages évités seront nuls et seuls les coûts associés au projet (cf. 4.5) seront étudiés. Pour étudier ces différentes situations, il pourrait être fait référence aux méthodes proposées par le guide méthodologique Plans de Prévention des Risques Littoraux (MEDDE, 2013).

### 5.1 - Informations nécessaires à l'analyse du recul du trait de côte et/ou de l'érosion

L'analyse du recul du trait de côte et de l'érosion repose sur :

- la connaissance du site issue de l'analyse du fonctionnement du littoral. Cette étape est utile pour la caractérisation de l'aléa recul du trait de côte notamment pour connaître :
  - l'espace de mobilité naturelle du trait de côte,
  - l'historique de l'implantation des ouvrages, des rechargements effectués, etc.,
  - les taux moyens d'évolution sur différents secteurs, aménagés ou non, et leur évolution dans le temps,
  - éventuellement les causes de l'érosion,
- les caractéristiques des mesures de protection actuelles et projetées (rôle, caractéristiques de l'ouvrage, dimensionnement, impact hydro-sédimentaire...) et leurs effets (au droit de la zone protégée et sur le reste de la cellule sédimentaire).

### 5.2 - Cartographie de l'aléa recul du trait de côte

Pour chaque situation, une estimation du recul du trait de côte sur l'horizon temporel doit être réalisée. Le recul du trait de côte est très souvent lié aux événements tempétueux susceptibles d'affecter la morphologie du littoral et aux caractéristiques de cette dernière. Il n'est donc généralement pas linéaire dans le temps à court et moyen terme mais peut être considéré comme linéaire à long terme si les conditions sont invariantes. En première approche, et en dehors des secteurs impactés par certains ouvrages de protection, le recul du trait de côte peut être estimé comme une fonction linéaire du temps. Un taux moyen annuel de recul sur l'horizon temporel peut alors être déterminé (cf. 5.2.1). Il est également possible, de manière plus complexe, d'estimer le recul dans le temps par des méthodes probabilistes à partir de la survenue d'événements tempétueux (cf. 5.2.2).

### 5.2.1 - Estimation d'un recul linéaire dans le temps

Dans ce cas, la cartographie repose sur l'estimation du taux moyen annuel de recul et sur l'horizon temporel retenu pour la situation étudiée. La zone soumise au recul est définie par :

$$L_r = H \times T_x$$

avec  $L_r$  la zone soumise au recul du trait de côte

$H$  l'horizon temporel

$T_x$  le taux moyen d'évolution annuel

La détermination du taux moyen de recul annuel repose :

- sur une analyse des tendances passées (analyse des traits de côtes successifs passés), lorsque ces tendances passées sont cohérentes avec les évolutions probables,
- sur les caractéristiques des ouvrages actuels et projetés.

Le taux moyen de recul est estimé à partir des tendances de recul passé sur plusieurs décennies passées. Idéalement, des données sur les 50-60 dernières années peuvent être exploitées (photographies aériennes notamment). Lorsque les zones sont aménagées, le recul en absence de protection peut être assimilé à celui des zones naturelles adjacentes à la zone protégée (en dehors des secteurs non protégés impactés par l'ouvrage) ou estimé à partir des tendances passées avant l'implantation de l'ouvrage ou à partir des connaissances des volumes rechargés. Il faut bien veiller dans tous les cas à ce que les tendances passées exploitées pour estimer les tendances futures soient représentatives et ne soient pas impactées par un fait marquant (implantation d'ouvrage notamment). La détermination du taux moyen de recul est soumise à de nombreuses incertitudes qu'il convient d'estimer (cf. 5.4.2). Pour la détermination du taux moyen de recul, il peut être fait référence aux méthodes de détermination du taux moyen de recul annuel présentées dans le *Guide méthodologique Plans de Prévention des Risques Littoraux (MEDDE/DGPR, 2013)*.

On considère que la situation est stable sur l'ensemble de l'horizon temporel et donc que si un aménagement est présent, il remplit son rôle sur l'ensemble de cette période. Cela implique que sur l'ensemble de l'horizon temporel l'entretien est correctement assuré, les réparations des dommages aux ouvrages sont effectuées, l'adaptation des ouvrages ou la reconstruction des ouvrages du fait du recul du trait de côte ou des événements tempétueux (ruine, contournement des ouvrages...) sont réalisés. Le taux moyen de recul est ainsi stable sur l'horizon temporel étudié. Pour les ouvrages fixant le trait de côte, un taux de recul nul est ainsi acceptable sur l'horizon étudié, mais la détermination des coûts d'entretien et de réparation doit être particulièrement soignée pour faire face à un éventuel déchaussement des ouvrages par abaissement de l'estran. Pour les projets ne fixant pas le trait de côte (épis, méthodes souples...), une évolution résiduelle du trait de côte peut intervenir.

#### **Exemple : Estimation des aléas pour deux stratégies de gestion du trait de côte : le rechargement de plage et la réalisation d'un ouvrage longitudinal en haut de plage.**

Le rechargement de plage et la réalisation d'un ouvrage longitudinal en haut de plage sont deux projets d'aménagement ayant un objectif identique : fixer le trait de côte.

Pour ces deux projets, le taux moyen annuel de recul sur la période peut être considéré comme nul sur l'horizon étudié. On considère donc que les dommages du fait du recul du trait de côte sur la période considérée sont nuls en situation aménagée.

Les coûts spécifiques associés au projet de rechargement sont :

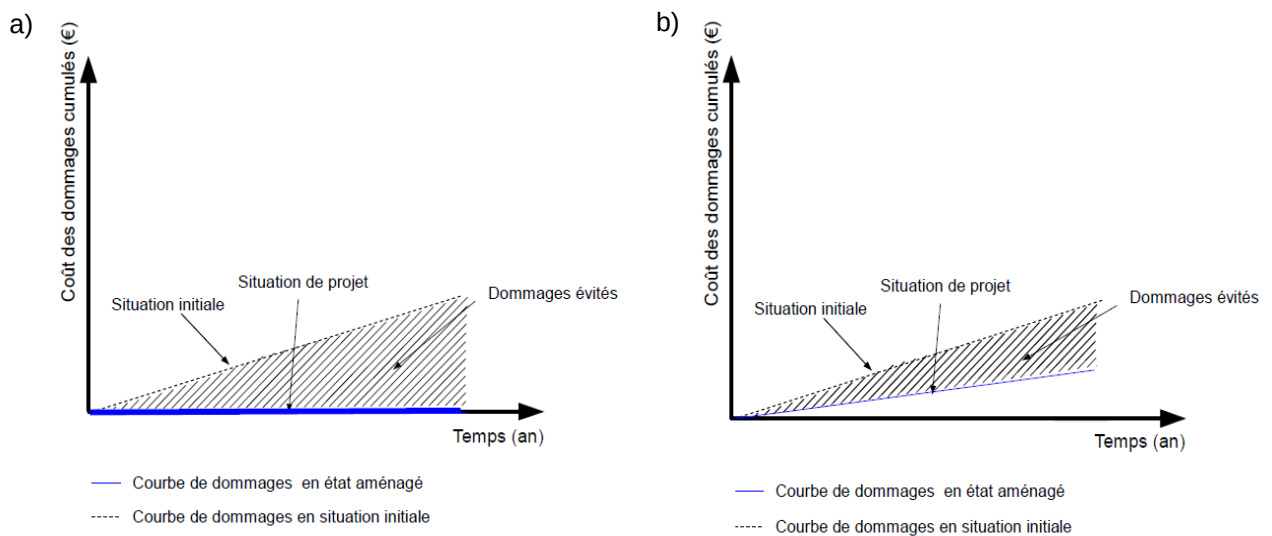
- le rechargement initial de la plage,
- les rechargements réguliers de la plage,
- l'entretien de la plage après un événement tempétueux (reprofilage, rechargement ponctuel éventuel...).

Les coûts spécifiques associés au projet de réalisation d'un ouvrage longitudinal de haut de plage sont :

- la construction de l'ouvrage,
- l'entretien de l'ouvrage,
- les réparations et la reconstruction éventuelle de l'ouvrage,
- le rechargement régulier éventuel de la plage devant l'ouvrage.

Dans le cas de rechargements, les coûts peuvent fortement évoluer dans le temps du fait de la disponibilité des sédiments (éloignement de la source de sédiments, mode de transport...).

L'ACB permet de comparer les différentes situations en s'appuyant sur les coûts des projets et sur les dommages évités (cf. Illustration 4).



*Illustration 4 : Dommages évités par une mesure, cumulés sur un horizon temporel (a) dans le cas d'un ouvrage fixant le trait de côte et (b) ne fixant pas le trait de côte. Pour faciliter la représentation, on fait l'hypothèse que le recul du trait de côte est linéaire et que le recul du trait de côte et les coûts des dommages sont directement corrélés.*

Il faut cependant veiller à estimer les dommages pour chaque situation dans et en dehors de la zone protégée, notamment pour rendre compte des impacts négatifs de l'aménagement en d'autres secteurs de la cellule sédimentaire.

#### **Exemple : Estimation de l'impact d'un projet en dehors de la zone protégée : l'exemple de Lacanau-Océan (33)**

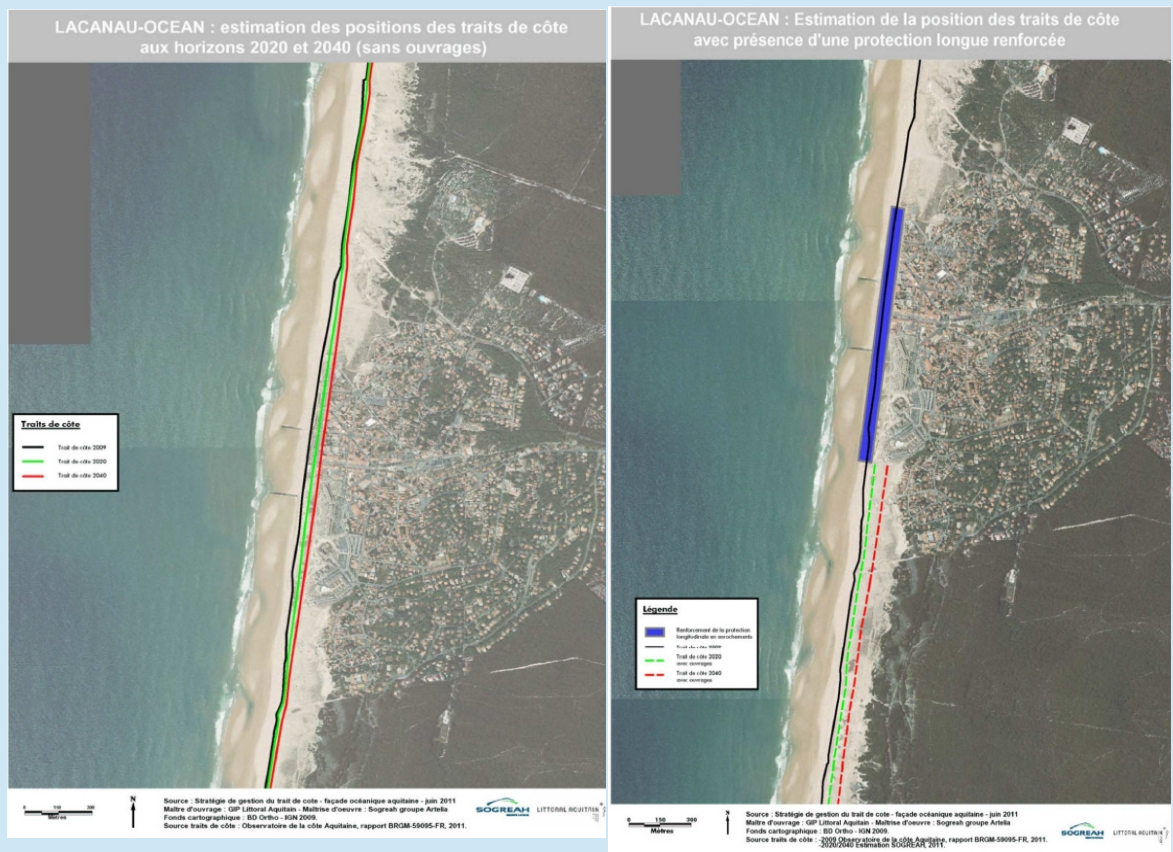
Le recul du trait de côte doit être étudié sur et en-dehors de la zone protégée du fait des conséquences négatives possibles des ouvrages.

Le front littoral urbain de Lacanau-Océan est protégé par un perré en enrochements. Comme sur la quasi-totalité du littoral aquitain, les transits sédimentaires se font dans une direction nord-sud. Sur un secteur de plusieurs kilomètres autour de Lacanau-Océan, non influencé par les ouvrages de protection côtière, un recul proche de 1 m/an est observé depuis les années 60 (BRGM, 2011). A partir des analyses des évolutions historiques des positions passées du trait de côte, des projections des positions futures du trait de côte ont pu être réalisées.

En absence d'ouvrage de protection, le trait de côte se réalignerait et le recul du trait de côte se poursuivrait de manière quasiment identique avec des reculs moyens de l'ordre de 1,0 m/an jusqu'à 2040 (BRGM, 2011) (cf. Illustration 5-a).

Avec l'hypothèse de maintien, de pérennité et d'efficacité continue des ouvrages de protection côtière et notamment la protection longitudinale en enrochements, seraient attendus (Sogreah, 2011) (cf. Illustration 5-b) :

- au nord des protections, un maintien dans un premier temps des taux de recul estimés précédemment de l'ordre de -1,0 m/an, avant une diminution du taux de recul du fait de l'effet « épi » protecteur de la protection longitudinale ;
- au droit de la protection longitudinale en enrochements, un trait de côte fixé ;
- à l'aval transit de la protection longitudinale, un taux moyen de recul plus prononcé du fait de l'effet bloquant de la protection au nord et une augmentation du taux au cours du temps (taux proche de -2,0 m/an en moyenne à horizon 2040 avec des pics pouvant atteindre de l'ordre de -3,0 m/an à l'aval immédiat des protections) ;
- plus au sud, un maintien des taux de recul estimés précédemment de l'ordre de -1,0 m/an.



**Illustration 5 : Projections du trait de côte sur Lacanau-Océan aux horizons 2020 et 2040.**  
a) A gauche : hypothèse de transparence des ouvrages de protection (SOGREAH, 2011 ; source BRGM, 2011) b) A droite Hypothèse de maintien des ouvrages de protection (SOGREAH 2011)

Le choix de la méthode de cartographie et de chaque paramètre doit dans tous les cas être argumenté. La ré-exploitation de cartographies existantes peut être réalisée après une justification étayée de l'adéquation de la méthode avec le présent objectif (prise en compte des effets des ouvrages de protection, définition du taux moyen de recul annuel...).

### 5.2.2 - Estimation d'un recul du trait de côte non linéaire dans le temps

Le recul du trait de côte n'est pas linéaire dans le temps. Cette variabilité peut dépendre des événements tempétueux qui accélèrent le recul mais aussi de la présence de gradients de transit générés par des ouvrages de protection (épis, brise-lames). Le recul du trait de côte peut ainsi parfois être estimé à partir de modélisations hydro-sédimentaires de l'impact des événements de différentes intensités et d'analyses probabilistes sur la fréquence de survenue de ces événements. Cependant, ces méthodes d'estimation de l'évolution du trait de côte (solutions analytiques ou modélisations numériques) peuvent être lourdes à mettre en œuvre (données de base, calage...) et ne permettent le plus souvent que de donner des tendances compte-tenu des fortes incertitudes associées à la mise en œuvre de ces modèles.

## 5.3 - Changement climatique

L'aléa recul du trait de côte et l'érosion s'étudient sur un horizon temporel sur lequel le changement climatique peut impacter les phénomènes naturels à leurs origines. L'aléa recul du trait de côte et l'érosion ne sont en général pas stationnaires sur l'horizon temporel étudié. L'impact du changement climatique, parmi les autres impacts (implantation d'ouvrage, déficit sédimentaire...), entre dans les causes de l'érosion, et donc du recul du trait de côte. Il reste cependant difficile d'estimer l'importance de ce facteur dans l'accélération de l'érosion.

Le changement climatique a, par le biais de l'élévation du niveau moyen de la mer, un impact direct sur les aléas littoraux et sur les projets d'aménagement côtiers. Cependant, il est actuellement délicat d'estimer son impact sur l'évolution du trait de côte et son estimation ne revêt donc pas un caractère obligatoire. Une estimation quantifiée de cet impact pourra être réalisée à partir du moment où l'état de l'art le permettra. Cette estimation sera d'autant plus nécessaire que le changement climatique a un rôle prépondérant dans l'évolution du trait de côte (création de zones basses soumises à submersion permanente notamment).

## 5.4 - Étude de sensibilité

Les études de sensibilité permettent d'étudier l'impact de chacun des paramètres sur les résultats de l'ACB.

### 5.4.1 - Horizon temporel

Une analyse de plusieurs horizons temporels peut être réalisée. Les horizons de chaque situation de projet retenue peuvent être étudiés.

### 5.4.2 - Zone soumise au recul

Dans le cas où le taux de recul est considéré comme constant temporellement, la zone totale soumise au recul à l'horizon considéré, et donc les dommages, dépendent directement du taux moyen de recul annuel défini (cf. formule du 5.2.1). Une analyse de sensibilité doit être menée sur la définition de ce paramètre et donc sur la surface de la zone soumise au recul. La définition du taux moyen de recul est soumise à de fortes incertitudes (dues aux données sources notamment ou à l'extrapolation sur l'horizon temporel). Deux autres taux de recul peuvent être testés (à définir en fonction des sources d'incertitudes liées aux données sources utilisées et à l'extrapolation) afin d'encadrer le taux retenu et ainsi encadrer les dommages obtenus sur la zone soumise au recul du trait de côte.

Dans le cas où le taux de recul n'est pas considéré comme constant temporellement, une analyse de sensibilité est réalisée à l'échelle de la surface de la zone totale soumise à l'aléa.

Cette analyse de sensibilité permet dans certains cas de rendre compte de l'impact du changement climatique sur le recul du trait de côte.

### **5.4.3 - Distribution du recul du trait de côte dans le temps**

La méthode d'ACB donne par définition plus d'importance aux actions intervenant à un horizon court du fait de l'actualisation des flux économiques (bénéfices et coûts). La distribution dans le temps du recul et des opérations de réparations/reconstructions impacte donc fortement les résultats de l'ACB et doit faire l'objet d'une étude de sensibilité. Une étude de sensibilité étudiera les possibilités que des événements de fortes intensité générant un recul et/ou des opérations de réparations/reconstructions interviennent ponctuellement au tout début ou à la toute fin de l'horizon temporel, encadrant ainsi l'hypothèse retenue. Dans le premier cas, on peut considérer que la totalité des dommages et/ou coûts de réparations/reconstructions sur l'horizon temporel intervient entre  $t=0$  et  $t=X_1$  ans et dans le second cas, on peut considérer qu'elle intervient entre  $t=X_2$  ans et  $t=X_n$  (fin de l'horizon temporel étudié), ces deux périodes n'excédant généralement pas 1/5 de l'horizon temporel étudié.

Pour déterminer les reculs qui peuvent être occasionnés par ce type d'événements ponctuels, une analyse des reculs ponctuels passés, lorsque des données historiques sont disponibles, ou la mise en œuvre d'un modèle numérique permettant d'estimer le recul lié à une tempête spécifique peuvent être exploités.

Cette analyse est d'autant plus importante pour les côtes à falaises soumises à des éboulements massifs. On veillera dans ce cas à ce que le recul engendré par ce type d'événements ponctuels soit bien compris dans le recul estimé sur la totalité de l'horizon temporel.

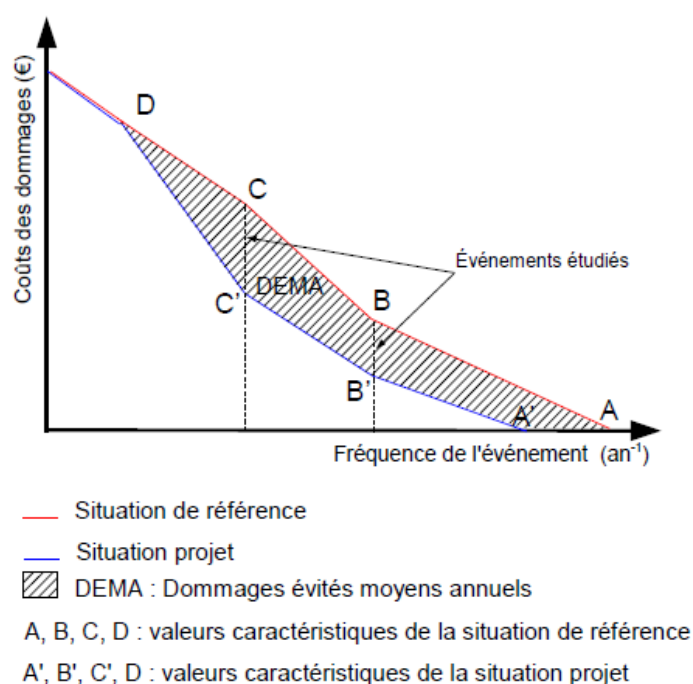
## 6 - Analyse de l'aléa submersion marine

L'aléa submersion marine doit être étudié si les projets analysés par l'ACB concernent la réduction de l'impact de l'aléa submersion marine ou s'il est potentiellement modifié du fait des aménagements envisagés. Plusieurs cartographies de l'aléa submersion marine sont alors à réaliser pour chaque situation à étudier.

### 6.1 - Principes de réalisation d'une étude d'aléa submersion marine préalable à l'élaboration d'une ACB

#### 6.1.1 - Plusieurs niveaux d'analyse

L'ACB de mesures de prévention des inondations repose sur la définition de plusieurs courbes dommages-fréquences, une pour chaque situation d'aménagement étudiée. Une courbe dommages-fréquences est construite en étudiant plusieurs scénarios d'aléa, appelés aussi scénarios d'événement, correspondant chacun à un événement hydraulique de fréquence donnée et à une règle de prise en compte du comportement de l'ouvrage. Pour chaque scénario d'aléa, l'aléa doit être cartographié. L'analyse de la cartographie réalisée permet de déterminer les dommages associés à chaque situation d'aménagement. Ainsi, chaque scénario d'aléa étudié permet de définir un point de la courbe dommages-fréquences. Plus le nombre de scénarios d'aléa étudiés est élevé, plus la courbe est précise et reflète de façon fidèle la vulnérabilité du territoire aux submersions.



*Illustration 6 : Représentation des dommages pour chaque situation d'aménagement et définition des Dommages Évités Moyens Annuels (DEMA)<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Toutes les courbes proposées en illustration sont théoriques et ne sont pas issues de cas réels. L'existence d'un dommage pour les fréquences étudiées n'est pas toujours acquise et la forme des courbes peut être différente.

Le nombre de scénarios d'aléa étudiés dépend de l'objectif de l'étude ACB et des données disponibles. Les études d'aménagement se déroulent suivant un processus de complexité et de détail croissant partant d'un parti pris d'amélioration d'une situation initiale à la définition d'une solution d'aménagement pour aboutir au dimensionnement d'un ouvrage. Plus la démarche est avancée plus les données disponibles sont nombreuses et donc plus l'ACB peut être précise. Il existe ainsi de multiples possibilités de préciser la courbe dommages-fréquences. Parmi celles-ci, le cas le plus simple (étude de 2 scénarios) a été identifié et est défini ci-après comme une « analyse simplifiée ».

Cette « analyse simplifiée » (cf. 6.2) peut être mise en œuvre lors des premières réflexions sur les stratégies d'aménagement (études de faisabilité de type PAPI ou stratégie locale d'inondation). Les ACB postérieures dans la démarche de définition de l'aménagement peuvent reposer sur une analyse dite « affinée » (cf. 6.3) dont le niveau de détail est adaptée aux données disponibles (étude d'avant projet ou projet de type PSR).

Le niveau d'analyse pour l'estimation des dommages et des coûts est à mettre en cohérence avec le niveau d'analyse de l'aléa.

### **6.1.2 - Informations nécessaires à l'élaboration de la cartographie de l'aléa submersion marine**

La cartographie de la submersion marine repose sur :

- la connaissance du site issue de l'analyse du fonctionnement du littoral ;
- des données topographiques précises : une précision de l'ordre de 20 cm en altimétrie est nécessaire, des données plus précises pouvant être nécessaires en certains points particuliers (ouvrages de protection...) ;
- les caractéristiques des mesures de protection actuelles et projetées (type de protection, dimensions, niveau de protection assuré par l'ouvrage existant, niveau de protection de l'ouvrage projeté, éventuellement niveau de sûreté pour les analyses affinées) ;
- les caractéristiques (type, dimensions, niveau de protection...) de l'ensemble des structures composant le système de protection contre les inondations (digues, cordons naturels...) Sur les sites soumis aux aléas submersion marine et recul du trait de côte, l'étude de l'aléa recul du trait de côte doit être préalable à celle sur la submersion marine. En effet, les caractéristiques des cordons naturels jouant un rôle de protection contre la submersion marine sont susceptibles d'être fortement modifiées.

### **6.1.3 - Choix des événements hydrauliques/scénarios étudiés**

Une courbe dommages-fréquences est associée à chaque situation, c'est-à-dire à chaque alternative d'aménagement ainsi qu'à la situation de référence. Pour construire la courbe dommages-fréquences, plusieurs « scénarios » d'aléa (correspondant à un événement hydraulique et à une hypothèse de comportement d'ouvrage) sont à étudier. Les scénarios à étudier de façon privilégiée sont ceux marquant un seuil, ou point d'inflexion, dans la courbe dommages-fréquences. Pour chacun d'eux, les dommages sont estimés.

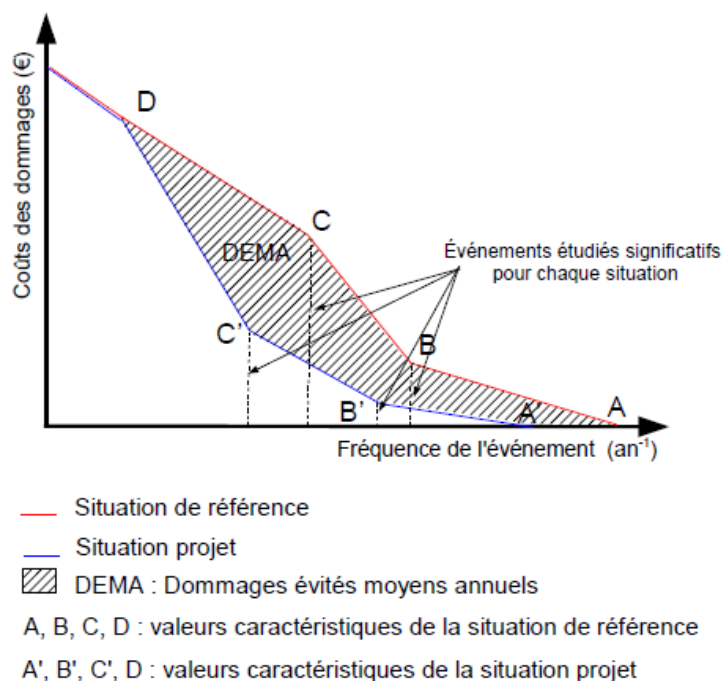
On considère que la courbe dommages-fréquences entre les estimations effectuées pour chaque scénario est linéaire.

Le choix des scénarios d'aléa étudiés doit être finement réfléchi afin que la courbe dommages-fréquences soit la plus représentative possible du fonctionnement du site. Pour chaque courbe, les ruptures de tendances correspondent à des seuils qui peuvent correspondre à deux aspects :

- 1) le comportement hydraulique de l'ouvrage de protection (ou du système de protection)
- 2) le comportement hydraulique de la zone protégée (fonction de la topographie et la morphologie) et la présence d'enjeux dans celle-ci.

Ainsi, le choix des événements à étudier est souvent valable uniquement pour une situation d'aménagement particulière (et donc pour une seule courbe dommages-fréquences).

Les événements étudiés pour chaque aménagement prévu et pour l'aménagement existant sont donc généralement différents, les événements à étudier étant notamment en lien avec les seuils et les changements majeurs de comportement hydraulique du système de protection (cf. Illustration 7).



*Illustration 7 : Courbe dommages-fréquences des situations non aménagée et aménagée et visualisation des DEMA*

Ainsi, les événements à retenir sont plutôt des événements théoriques connus et non des événements historiques. Il est possible d'étudier des événements historiques mais leur étude n'est pas suffisante (pas de correspondance avec les points d'inflexion de la courbe). Leur étude est cependant souvent nécessaire au calage des outils utilisés et utile pour la pédagogie et l'amélioration générale de la courbe dommages-fréquences.

Plusieurs types de scénarios sont à étudier :

- un scénario reposant sur un événement fréquent : généralement l'événement générant les premiers dommages (point A),
- un scénario pour chaque seuil de la courbe liée au fonctionnement hydraulique du site (points B, B', C et C'),
- un scénario reposant sur un événement rare (de période de retour > 1000 ans) pour lequel l'effet des aménagements est nul sur l'inondation (> point D).

Les événements d'intensités les plus fortes génèrent des détériorations des ouvrages pouvant aller jusqu'à la rupture (brèche) puis une ruine généralisée (entraînant une transparence hydraulique). Dans le cadre d'une ACB, seul les comportements théoriques des ouvrages sont étudiés. Ainsi la défaillance des ouvrages, dans le sens où la défaillance est une incapacité à satisfaire un objectif prévu, n'est pas abordée dans le document.

Pour les événements d'intensité les plus forts entraînant une rupture de l'ouvrage ou une surverse, un sur-aléa du fait des fortes vitesses d'écoulement est généré. Celui-ci ne sera généralement pas étudié du fait de la complexité des études nécessaires et de la difficulté à modéliser le surdommage causé par la vague consécutive à la rupture ou la surverse.

Concernant les événements extrêmes, il est important de noter qu'au-delà d'un certain seuil, quel que soit l'événement extrême considéré sur le plan des phénomènes naturels initiateurs, l'effet des aménagements est très limité et le coût des dommages est similaire quel que soit l'aménagement considéré (> point D). Un événement rare de période de retour supérieur à 1000 ans sera quand même étudié afin d'avoir une vision complète des dommages selon les fréquences d'aléa et de relativiser les dommages évités par rapport à l'ensemble des dommages possibles.

A l'inverse des événements rares, les événements fréquents ont un impact prépondérant dans les résultats de l'ACB et leur choix doit être réalisé avec d'autant plus d'attention (point A).

L'élaboration d'une courbe dommages-fréquences nécessite d'estimer finement la périodicité des sollicitations hydrauliques de l'ouvrage (notamment le niveau marin). En outre-mer, dans un contexte de climat cyclonique, les périodes de retour des cyclones ne sont cependant généralement pas évaluées finement du fait de leur faible fréquence, contrairement aux tempêtes. Une méthode simplifiée peut cependant être mise en œuvre en veillant à relativiser les résultats au regard de l'analyse de sensibilité faite sur la fréquence des événements.

#### **6.1.4 - Aléa non constant et changement climatique**

Habituellement, les ACB des ouvrages de protection contre les inondations sont réalisées à aléa constant : ainsi, sur l'horizon temporel de l'analyse, les dommages sont évalués sur la base de scénarios d'inondation fixés à la date de réalisation de l'étude : les dommages prévus à chaque pas de temps de l'horizon temporel sont calculés avec des événements dont la probabilité d'occurrence est celle considérée à  $t_0$ . Une unique courbe dommages-fréquences est donc réalisée à  $t_0$  et le dommage évité moyen annuel qu'elle permet de calculer est appliqué pour chaque année de l'horizon temporel.

Si ce choix méthodologique est justifié dans le cas d'inondations fluviales, il est moins pertinent dans le cas de submersions marines. En effet, le changement climatique, du fait de l'élévation du niveau moyen de la mer, a un impact important sur les phénomènes hydro-sédimentaires littoraux et donc sur les aléas littoraux. Il est donc indispensable de prendre en compte la variable élévation du niveau de la mer dans le calcul et par conséquent de travailler avec un aléa submersion marine variable. La caractérisation de l'aléa peut être réalisée à différentes dates, appelées ici échéances temporelles. Chaque courbe dommages-fréquences est réalisée pour une seule et même échéance. L'échéance maximale est de 50 ans, en cohérence avec l'horizon de l'analyse économique.

L'élévation du niveau moyen de la mer doit systématiquement être retenue lors d'analyse à des échéances futures. D'autres phénomènes impactés par le changement climatique peuvent éventuellement être retenus. Les hypothèses d'impact du changement climatique doivent reposer sur le scénario pessimiste de l'ONERC en cohérence avec les hypothèses retenues pour l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Littoraux. Il est actuellement recommandé de prendre en compte une élévation du niveau moyen de la mer de 14 cm à l'horizon 2030 et de 25 cm à l'horizon 2050 notamment (ONERC, 2010). Ces recommandations sont susceptibles d'évoluer.

Les scénarios d'aléa composant une même courbe dommages-fréquences sont définis pour une même échéance et une même hypothèse de prise en compte du changement climatique.

Deux méthodes peuvent être retenues :

1) Une méthode consiste à travailler dans un premier temps sur tout l'horizon temporel à aléa constant. L'échéance temporelle est fixée à  $t=0$  ( $t_0$ ). Le changement climatique est traité dans l'analyse de sensibilité des résultats : une nouvelle étude d'aléa est réalisée à l'échéance correspondant à la fin de l'horizon temporel de l'ACB et permet de calculer un dommage moyen annuel maximal intégrant le changement climatique dès  $t=0$ . Le fait d'étudier l'impact du changement climatique implique ici la réalisation de 2 courbes dommages-fréquences pour chaque situation.

2) Une autre méthode consiste à travailler par tranches d'aléas constants sur l'horizon temporel de l'analyse : sur les 10 premières années de l'horizon temporel, construire une courbe dommages-

fréquences sur la base d'une échéance temporelle fixée à  $t=0$ . Le dommage moyen annuel est donc calculé sans prise en compte du changement climatique : il est constant sur ces 10 années. Pour les 10 années suivantes, de nouvelles études d'aléa sont menées intégrant l'élévation du niveau de la mer à l'échéance  $t=10$ . Une nouvelle courbe dommages-fréquences est construite sur la base de ces nouveaux scénarios et appliquée pour les dommages entre  $t=10$  et  $t=20$  ans. Et ainsi de suite (cf. Illustration 8).

Ce travail permet de se rapprocher au mieux de la réalité (modification continue des aléas du fait de l'élévation du niveau de la mer) ; en revanche, il multiplie les scénarios étudiés et les cartographies d'aléas à réaliser, et est donc réservé aux cas où les cartes d'aléas et la modélisation des dommages peuvent être simplement obtenues ou à certaines études affinées.

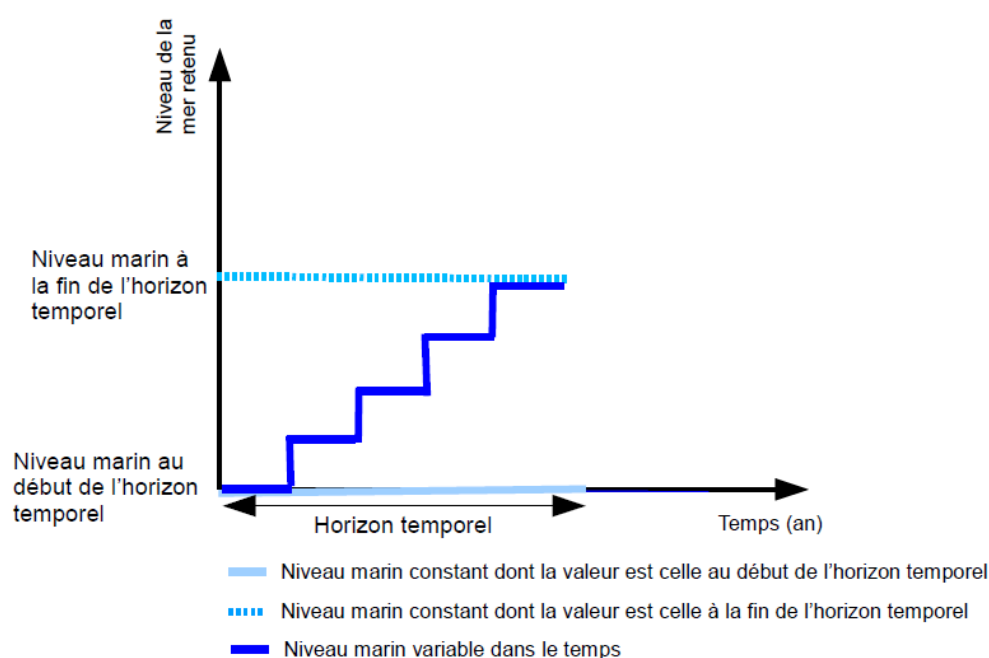


Illustration 8 : Méthodes de prise en compte de la variation du niveau moyen de la mer

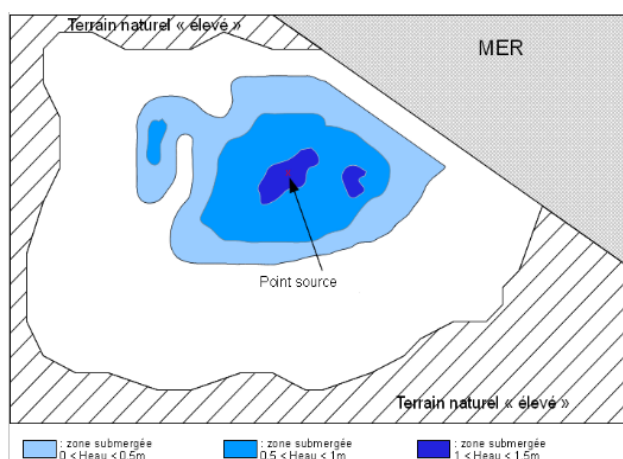
## 6.1.5 - Cartographie de l'aléa submersion marine

### 6.1.5.a - Méthode de cartographie

La méthode de cartographie doit être adaptée au site étudié et la plus simple possible (cf. *Guide méthodologique Plans de Prévention des Risques Littoraux*). Elle doit être choisie, dans une démarche de complexité croissante, parmi les 3 grands types de méthodes suivantes :

- en premier lieu, la possibilité d'utiliser une superposition niveau marin/topographie doit être étudiée. Elle peut être réalisée avec des outils SIG simples (dont certains permettent d'identifier les connexions hydrauliques avec la source de l'inondation et entre les zones basses et donc les obstacles topographiques s'opposant à l'écoulement, cf. Illustration 9) ;
- en second lieu, une simple répartition par un outil SIG (capable de réaliser des calculs de volume) des volumes d'eau entrant, préalablement estimés, est étudiée. La surface de la zone inondée sera alors considérée comme horizontale, les zones les plus basses étant les premières remplies ;
- si ces méthodes ne conviennent pas, une modélisation numérique peut être envisagée. Différents types d'outils sont à disposition (modèles à casiers, modèles bidimensionnels,

modèles vagues à vagues) et les plus adaptés au site (complexité de la topographie, données disponibles...) sont à retenir. Leur mise en œuvre doit respecter l'état de l'art et des pratiques (définition des hypothèses, calage, validation...).



*Illustration 9 : Méthode de superposition d'un niveau marin à la topographie avec identification d'un point source. (Exemple avec un niveau marin de 3,5 m et un point source identifié, un pixel sera représenté comme submergé si son altitude est inférieure au niveau marin et si au moins un des pixels du voisinage est submergé)*

Les événements doivent être décrits dans la durée pour les méthodes 2 et 3 sur au moins 2 pleines mers (marégramme théorique). Le couple de paramètres d'un événement décrit le moment le plus défavorable de l'événement, c'est à dire la première pleine mer.

Dans la méthode « simplifiée », la cartographie de l'aléa peut également être réalisée de manière approchée et les deux premières méthodes sont à privilégier.

Des cartographies d'études anciennes peuvent éventuellement être ré-exploitées. Pour cela, les hypothèses suivantes doivent être vérifiées, pour chaque scénario d'aléa :

- le comportement de l'aménagement étudié,
- le comportement des autres structures du système de protection,
- le niveau d'eau et la hauteur de vagues de l'événement hydraulique,
- la méthode de cartographie.

La ré-exploitation de cartographie existante pour un scénario ne peut être réalisée qu'après une justification étayée des 4 points ci-dessus.

La justification de la méthode de cartographie retenue doit dans tous les cas être réalisée au regard des caractéristiques du site et du projet d'aménagement.

La cartographie peut également faire apparaître les zones soumises aux chocs de vagues et aux projections solides. Ces aléas sont distincts de l'aléa submersion marine qui est une inondation<sup>2</sup>. Il peut être fait référence aux méthodes de cartographie de ces phénomènes proposées dans le *Guide méthodologique Plans de Prévention des Risques Littoraux*.

<sup>2</sup> Cette zone soumise aux chocs des vagues et aux projections solides peut être identifiée. Elle ne pourrait cependant pas obligatoirement être exploitées dans l'ACB dans la mesure où, à la date de parution de ce document, aucune courbe de dommages ou d'endommagement ne permet actuellement d'évaluer les dommages associés.

### **6.1.5.b - Paramètres à cartographier**

Lors de l'étape de cartographie, l'objectif est de définir l'extension géographique et les caractéristiques de la submersion (hauteur d'eau, vitesse d'écoulement, vitesse de montée des eaux, durée de submersion) à partir des hypothèses définies préalablement et du choix de la méthode appropriée.

Dans l'objectif de réaliser une ACB, le paramètre prioritaire à cartographier est la hauteur d'eau, en plus de l'extension de la submersion. Toutes les méthodes de cartographie permettent d'obtenir ce paramètre. La durée de submersion peut aussi jouer sur le coût des dommages. Ce paramètre n'est pas obtenu directement par les méthodes citées ci-dessus et doit généralement faire l'objet d'une analyse à dire d'expert. Enfin, les vitesses d'écoulement et vitesse de montée des eaux peuvent éventuellement être déterminées. Dans les 2 premières méthodes, elles seront définies à dire d'expert, le troisième type de méthode permettant généralement de l'estimer.

## **6.2 - Analyse simplifiée de l'aléa submersion marine**

L'objectif d'une ACB peut être de comparer différentes stratégies d'aménagement et d'orienter le choix. C'est le cas notamment au niveau des PAPI. L'approche de l'ACB doit être relativement « robuste » et reposer sur des données facilement accessibles décrivant un comportement global de l'ouvrage lié à sa présence ou à sa défaillance, combiné à une analyse relativement simple des secteurs submergés. A ce stade en effet, le dimensionnement des ouvrages n'est pas toujours établi et ce sont des esquisses d'aménagement dont il convient d'estimer les bénéfices attendus.

Il est proposé dans le cadre de cette analyse « simplifiée » des préconisations fortes sur le choix des hypothèses pour la réalisation de la cartographie de l'aléa submersion marine. Ces fortes préconisations ont pour objectifs d'aider au cadrage des ACB réalisées, de faciliter la comparaison des alternatives d'aménagement et d'assurer une homogénéité des dossiers à l'échelle nationale.

### **6.2.1 - Informations nécessaires sur le projet**

Un ouvrage composant un système de protection est défini par ses caractéristiques qui définissent le niveau de protection apporté. Ce niveau de protection garanti par l'ouvrage est également appelé niveau de service.

Les informations nécessaires pour la réalisation d'une ACB pour une analyse simplifiée sont :

- le niveau de protection (ou de service) de l'ouvrage ou du système de protection. Il est défini par le gestionnaire.

### **6.2.2 - Scénarios étudiés**

#### **6.2.2.a - Choix des scénarios étudiés**

##### **Généralités**

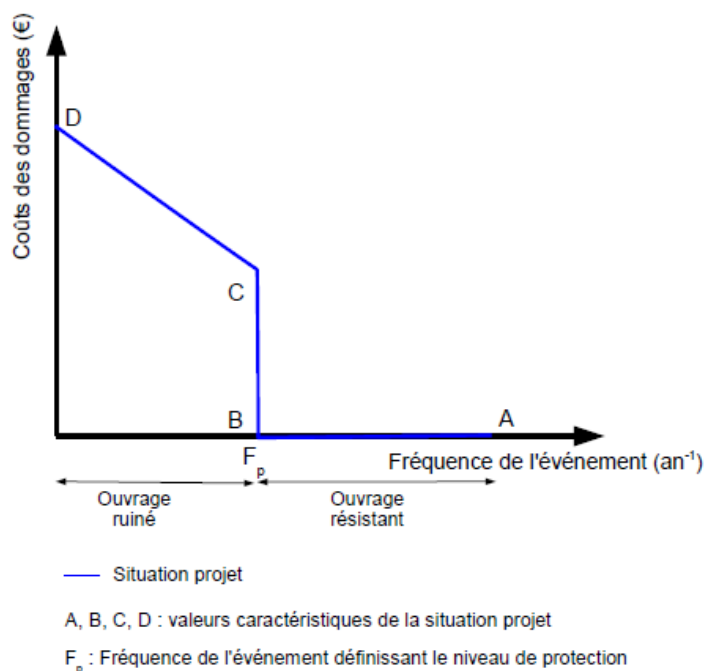
La méthode « simplifiée » repose sur la prise en compte simplifiée du seul comportement des ouvrages, par rapport au niveau de protection/niveau de service garanti par l'ouvrage. On considère dans ce schéma simplifié que le niveau de protection est identique au niveau de sûreté et que toute sollicitation au-delà de ce niveau génère une rupture immédiate et généralisée de l'ouvrage.

Une probabilité de rupture nulle est considérée en dessous du niveau de protection. En cas de dépassement du seuil, la probabilité de rupture croît rapidement mais apparaît inaccessible à la mesure. La ruine est donc ici considérée comme immédiate au-delà de ce seuil. Le comportement des ouvrages est donc représenté selon un mode binaire (cf. Figure 10) tel que :

- pour des événements de fréquence  $F$  supérieure à la fréquence du seuil  $F_p$  (soit  $F < F_p$ ), l'ouvrage est réputé résistant et les dommages sont considérés comme nuls ;

- pour des événements de fréquence  $F$  inférieure à la fréquence du seuil  $F_p$  (soit  $F > F_p$ ), l'ouvrage est réputé ruiné et la situation est considérée comme équivalente à celle sans ouvrage (transparence).

On considère dans cette méthode que les entrées d'eau (surverse et franchissements) qui peuvent intervenir avant la ruine de l'ouvrage génèrent des dommages négligeables.



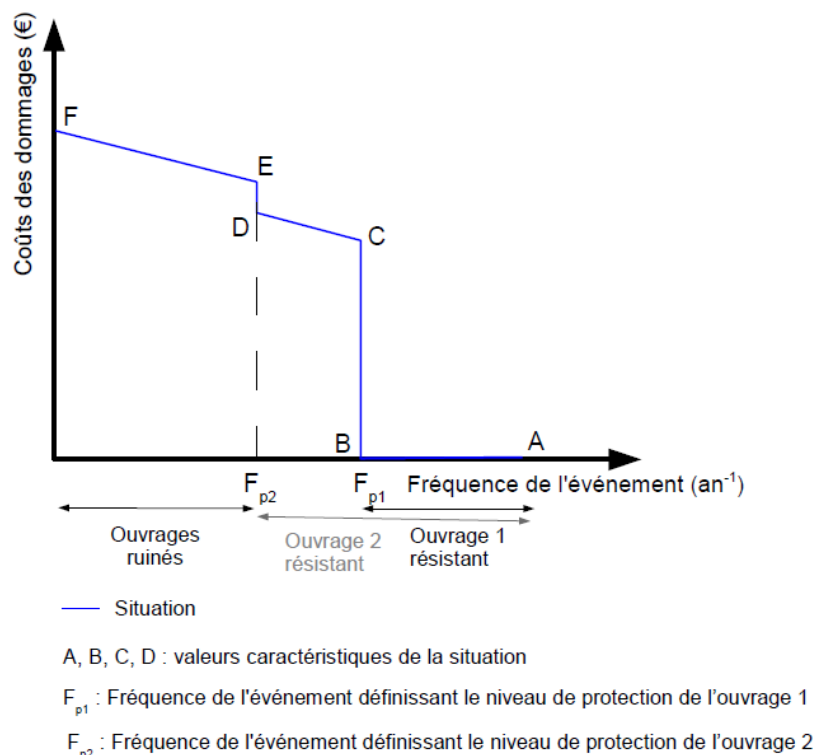
*Illustration 10 : Courbe dommages-fréquences obtenue par une analyse simplifiée pour une situation projet comprenant un ouvrage de protection*

Suivant ces hypothèses, considérant que les dommages sont nuls pour les événements fréquents en dessous de la fréquence définissant le niveau de protection, deux scénarios au minimum sont ainsi à étudier :

- la ruine structurelle de l'ouvrage (point C de la courbe), correspondant à l'événement de dimensionnement de l'ouvrage,
- un événement de fréquence inférieure à celle de la ruine de l'ouvrage (point D).

### **Cas d'un système de protection composé de plusieurs structures de protection**

Un système de protection est dimensionné en fonction d'un niveau de protection. Au sein d'un même système de protection, les différentes structures peuvent ne pas avoir un niveau de protection identique. Dans ce cas, la forme des courbes dommages-fréquences peut être fortement impactée.



*Illustration 11 : Courbe dommages-fréquences obtenue par une analyse simplifiée pour un système de protection comprenant deux ouvrages n'ayant pas un même niveau de protection*

Cette courbe théorique dépend cependant également de la topographie de la zone protégée et de la distribution des enjeux sur le territoire et peut donc en conséquence revêtir d'autres formes.

#### 6.2.2.b - Description des événements hydrauliques

L'événement naturel hydraulique maritime peut être décrit par un seul paramètre : le niveau marin, associé à une période de retour et une fréquence.

La description de l'événement ne fait donc pas appel systématiquement dans cette approche « simplifiée » à la hauteur de vagues. Seul le niveau marin, intégrant la surcote liée aux vagues si celle-ci est une composante majeure du niveau, décrit l'événement hydraulique. L'ouvrage est réputé totalement ruiné dès le dépassement du niveau de protection garanti. L'effet des franchissements par paquets de mer sur la submersion peut ici être considéré comme minime au regard de la rupture de l'ouvrage et peut être ainsi négligé.

### 6.2.3 - Cartographie de l'aléa submersion marine

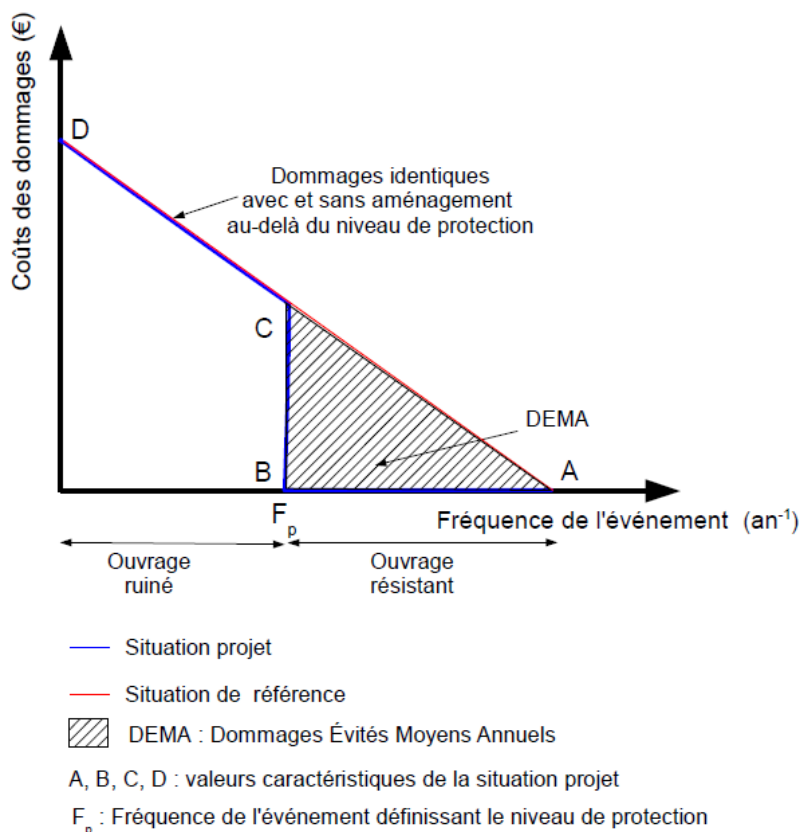
L'étude de l'aléa submersion marine doit permettre de déterminer pour chaque scénario étudié :

- l'extension de l'inondation,
- les hauteurs d'eau par tranches de 50 cm. A défaut, il est possible de se contenter d'une précision moindre au-delà de 1 m d'eau et de s'ajuster aux recommandations de la Directive Inondations, à savoir : des hauteurs d'eau par tranches de 50 cm jusqu'à 1 m puis par tranches de 1 m entre 1 m et 2, 3 ou 4 m. Cette précision est suffisante pour avoir une première estimation des dommages et au regard des approximations et des fortes hypothèses prises sur le comportement des ouvrages.

### 6.2.4 - Estimation des dommages évités

La comparaison d'une situation d'aménagement avec une situation de référence où la zone n'est pas protégée conduit au schéma de la figure suivante, dans lequel :

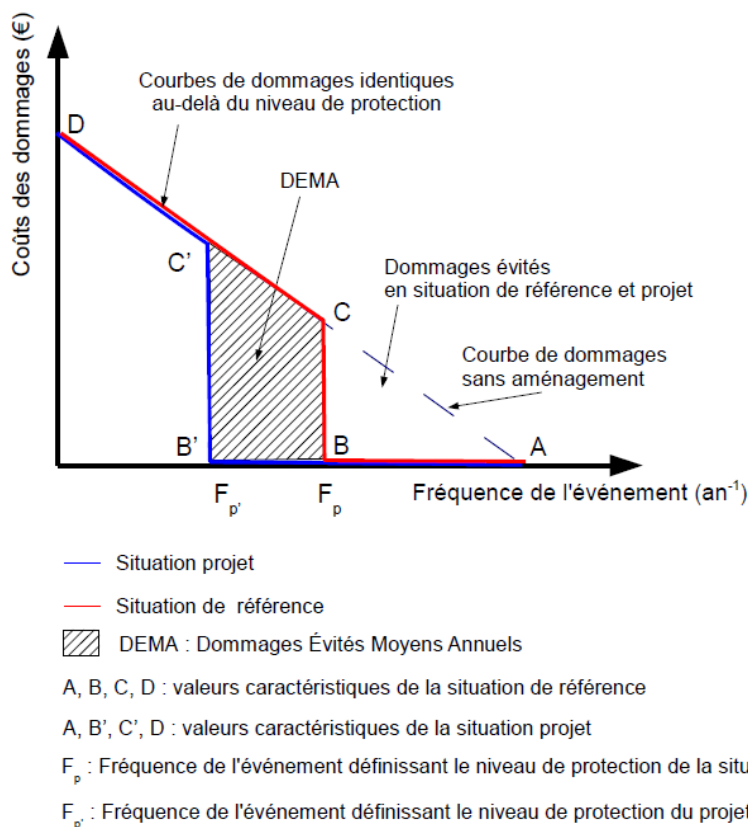
- les dommages sont équivalents, quelles que soient les situations d'aménagement comparées, au-delà du seuil de référence (niveau de protection) de l'aménagement étudié ;
- le DEMA est la surface comprise sous la courbe de dommages en état aménagé avant le niveau de référence (niveau de protection) de l'aménagement considéré.



*Illustration 12 : Identification des DEMA à partir des courbes dommages-fréquences en situation non-aménagée et aménagée*

La comparaison de deux situations d'aménagements dont les niveaux de protection sont différents conduit au schéma de la figure suivante, dans lequel :

- les dommages sont nuls quelles que soient les situations d'aménagement comparées, en dessous du seuil de référence le plus faible des aménagements étudiés ;
- les dommages sont équivalents, quelles que soient les situations d'aménagement comparées, au-delà du seuil de référence le plus élevé des aménagements étudiés ;
- le DEMA est la surface comprise sous la courbe de dommage et entre les deux niveaux de référence des aménagements considérés.



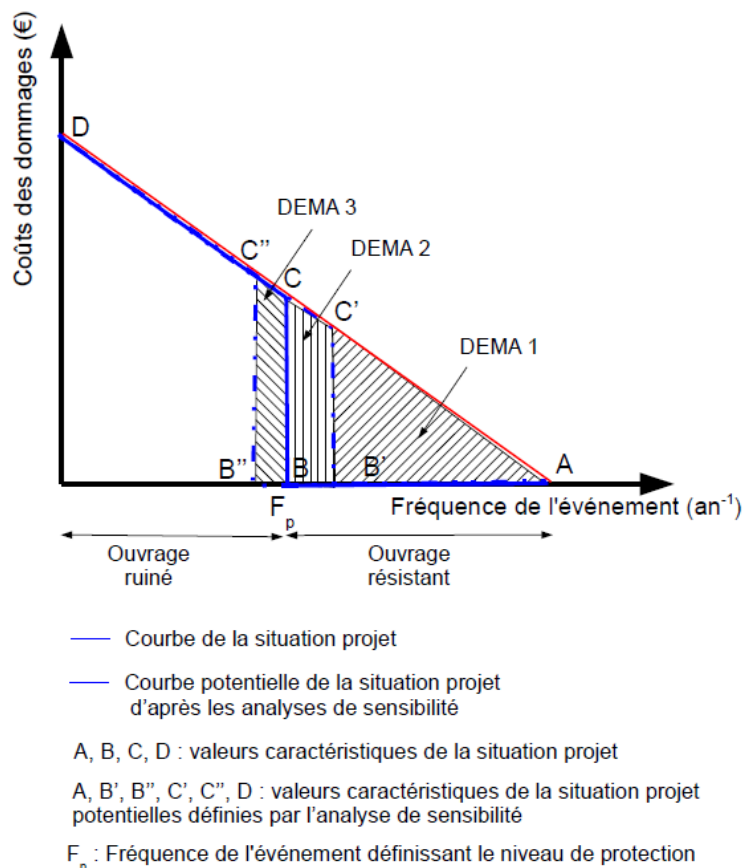
*Illustration 13 : Identification des DEMAs à partir des courbes dommages-fréquences de deux situations aménagées (situation de référence et situation de projet)*

### 6.2.5 - Études de sensibilité

Plusieurs études de sensibilité sont à mener. Pour chacune, seule la variation d'un paramètre sera analysée.

#### 6.2.5.a - Fréquence des événements hydrauliques (niveaux marins)

Une étude de sensibilité doit nécessairement porter sur la fréquence des événements retenus, ce qui revient à une étude de sensibilité des niveaux marins retenus pour chaque événement. Cette étude de sensibilité doit permettre de définir une amplitude de variation du DEMA. Compte tenu des simplifications nécessaires à la méthodologie, il est en effet important et raisonnable de travailler sur une gamme de DEMAs plutôt que sur une unique valeur absolue (cf. Illustration 14).



*Illustration 14 : Courbes dommages-fréquence définies pour la situation projet, y compris lors des analyses de sensibilité sur la fréquence des événements, et évolution des DEMAs en fonction de l'analyse de sensibilité*

Pour cela, pour chaque scénario étudié, une plage de sensibilité autour du niveau marin représentant le niveau de protection garanti par l'ouvrage doit être testée. Deux niveaux marins compris dans une plage de  $\pm 25$  cm par rapport au niveau marin retenu seront testés, cette valeur correspondant à l'ordre de grandeur général de l'incertitude sur les niveaux. Des niveaux marins en dehors de cette plage pourront être définis dans les cas où les variations des niveaux marins extrêmes est importante par rapport au linéaire côtier étudié.

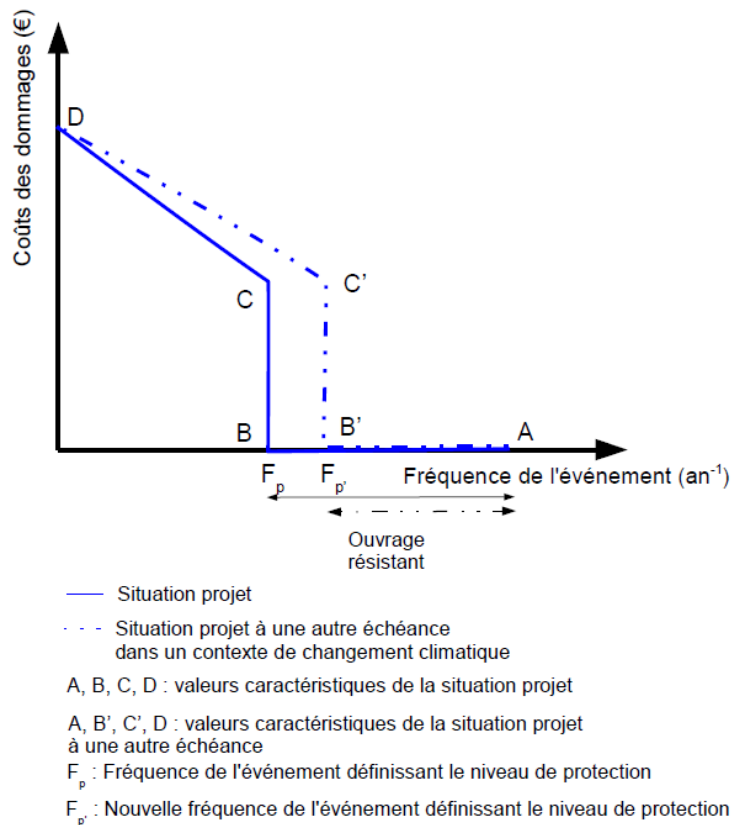
#### **6.2.5.b - Horizon temporel**

Lorsque deux projets sont étudiés, les horizons temporels de ces deux projets peuvent être testés.

#### **6.2.5.c - Changement climatique**

La courbe dommages-fréquences doit être réalisée à au moins une autre échéance (dans un horizon temporel de 50 ans maximum). Ainsi, la fréquence de l'événement hydraulique définissant le niveau de protection de l'ouvrage doit être ré-estimée.

L'étude de sensibilité est menée selon la méthode présentée en 6.1.4. Afin de ne pas trop alourdir les études et d'éviter de multiplier les cartographies à réaliser, pour l'analyse de sensibilité de l'impact du changement climatique, les niveaux marins testés précédemment peuvent être réutilisés en estimant leur nouvelle période de retour à la nouvelle échéance testée. Pour cela, il est possible de considérer une simple translation de la répartition des fréquences, de l'ordre de l'augmentation du niveau marin induit par le changement climatique. La nouvelle période de retour de l'événement extrême peut éventuellement être estimée. Cependant, il peut aussi être considéré que cette évolution est négligeable, les coûts des dommages des événements extrêmes ayant un impact beaucoup plus faible dans les résultats de l'ACB que ceux des événements fréquents (cf. Illustration 15).



*Illustration 15 : Courbe dommages-fréquence d'une situation projet et courbe dommages-fréquence de la même situation à une autre échéance intégrant l'impact du changement climatique*

## 6.3 - Analyse affinée de l'aléa submersion marine

L'objectif de l'ACB peut porter sur un aménagement particulier afin de confirmer l'intérêt de l'aménagement proposé par rapport à une deuxième situation (situation initiale ou aménagement proche). C'est le cas notamment au niveau des PSR. Dans ces cas, l'approche doit être plus fine et précise en intégrant systématiquement les résultats d'autres études réglementaires comme notamment les Études de Dangers sur les ouvrages hydrauliques (EDD).

### 6.3.1 - Informations nécessaires sur le projet

Les informations nécessaires pour la réalisation d'une ACB pour une analyse affinée sont :

- le niveau de protection/de service de l'ouvrage en deçà duquel le projet assure l'innocuité des entrées d'eau pour le système endigué. Il est défini par le gestionnaire.
- le niveau de sûreté de l'ouvrage. Il s'agit du niveau au-delà duquel la tenue de la structure de l'ouvrage n'est plus assurée et est susceptible de ruine à tout instant. Il est défini par le gestionnaire. Pour un ouvrage projeté, le niveau de sûreté fait partie du projet, pour un ouvrage existant, l'étude de danger le détermine.
- Les caractéristiques géométriques de l'ouvrage.

## 6.3.2 - Scénarios étudiés

### 6.3.2.a - Choix des scénarios étudiés

#### Méthode de choix des scénarios d'aléas étudiés

La méthode « affinée » a pour objectif de préciser au mieux chaque courbe dommages-fréquences à partir de l'ensemble des données disponibles. Chaque courbe dommages-fréquences est marquée par des points d'inflexion. Le choix des scénarios d'aléa étudiés repose sur la connaissance de ces seuils, l'objectif étant si possible d'étudier l'événement correspondant à ce seuil ou deux événements l'encadrant afin de représenter au mieux la forme de la courbe.

L'élaboration d'une courbe dommages-fréquences demande l'analyse de paramètres intermédiaires (cf. Illustration 16). Les points d'inflexion correspondent à des seuils liés à ces paramètres intermédiaires notamment un changement de fonctionnement hydraulique du système de protection ou un seuil dans la distribution des enjeux. Ces seuils doivent être recherchés en étudiant plus spécifiquement les liens entre les paramètres intermédiaires permettant ainsi d'identifier les scénarios à étudier les plus pertinents pour construire la courbe dommages-fréquences.

Bien qu'intuitivement, l'analyse d'un scénario de submersion est plutôt conduite des causes (fréquence de l'événement) vers les conséquences (dommages), l'élaboration de la courbe dommages-fréquences, peut donc s'appuyer sur la recherche de seuils dans les paramètres intermédiaires pour en déduire leurs caractéristiques en termes de fréquence d'événement et de dommage.

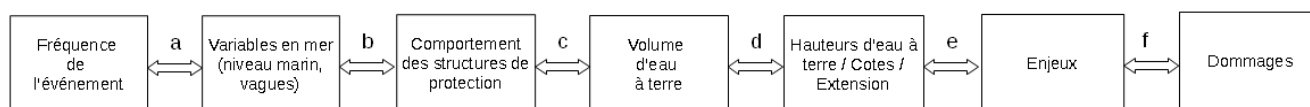


Illustration 16 : Paramètres intermédiaires aux paramètres coût des dommages et fréquence des événements

Recherche des points d'inflexion liés au comportement hydraulique du système de protection

L'application de la méthode « affinée » peut reposer sur l'analyse des sollicitations hydrauliques correspondant à des seuils de comportement de l'aménagement. Ces seuils de comportement comprennent notamment :

- le niveau de protection garanti par l'ouvrage, au-delà duquel l'ouvrage n'assure plus sa fonction hydraulique. Ce niveau est directement lié à la sollicitation de fréquence  $F_p$ ,
- le niveau de sûreté de l'ouvrage, au-delà duquel la tenue de la structure de l'ouvrage ne peut plus être garantie, l'ouvrage menaçant alors de ruine à tout instant. Ce niveau est directement lié à la sollicitation de fréquence  $F_s$ .

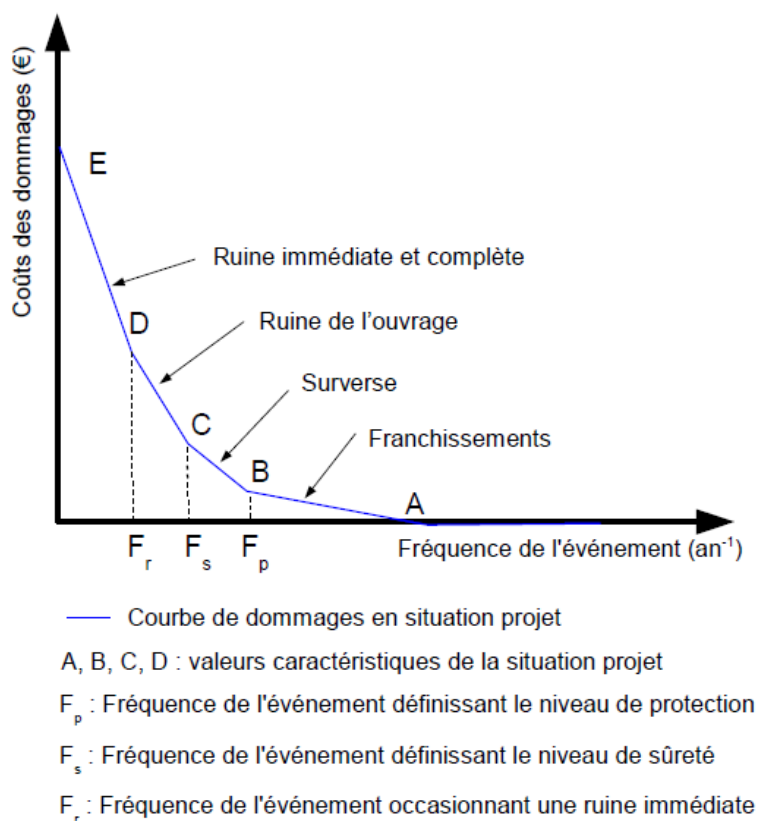
Une prise en compte plus fine du comportement de l'ouvrage suivant ces seuils est proposée dans cette analyse « affinée » :

- $F > F_p$  : situations pour lesquelles l'ouvrage joue son rôle de protection,
- $F = F_p$  : niveau de protection de l'ouvrage,
- $F > F_s$  : ouvrage résistant structurellement,
- $F = F_s$  : niveau de sûreté, début de la détérioration de l'ouvrage pouvant entraîner la rupture de l'ouvrage,
- $F < F_s$  : ouvrage soumis à rupture : l'ouvrage est soumis à une détérioration de sa structure dès que l'événement qui l'affecte dépasse son niveau de sûreté.

Dans une situation théorique, les seuils de la courbe dommages-fréquences sont liés aux événements conduisant (cf. figure 17) :

- aux franchissements par paquets de mer de l'aménagement générant les premiers dommages (point A) ;
- au début de dépassement du niveau de protection de l'aménagement, il peut correspondre au début de la surverse de l'aménagement, mais pour les ouvrages anciens, il peut correspondre à un niveau inférieur (point B) ;
- au début de dépassement du niveau de sûreté de l'ouvrage, correspondant au début de la détérioration de l'ouvrage et de la modification des caractéristiques géométriques de l'ouvrage (point C) : brèches, abaissement de la cote de crête... ;
- au moment où l'effet de l'ouvrage est nul sur les conséquences de l'inondation (point D) : ruine immédiate et complète de l'ouvrage dès le début de l'événement, dont les conséquences peuvent être estimées par excès au moyen d'une transparence de l'aménagement.

Ainsi, la méthode « affinée » a pour objectif de construire une courbe du type de l'illustration 17, dont les scénarios étudiés sont, si possible, ceux énoncés ci-dessus, et dans le cas contraire, ceux que l'on peut étudier du fait des connaissances sur le comportement hydraulique et structural de l'ouvrage.



*Illustration 17 : Courbe dommages-fréquences obtenue pour une analyse affinée pour une situation d'aménagement*

Cette courbe théorique (dont la forme peut varier selon les cas) est établie en se basant sur l'hypothèse que les seuils sont uniquement liés aux seuils de l'ouvrage de protection et que la topographie de la zone protégée et la distribution des enjeux n'a pas d'impact sur les dommages.

Cette situation théorique peut être adaptée notamment lorsque :

- les franchissements sur les ouvrages peuvent conduire à une rupture de l'ouvrage par l'importance des volumes franchis. Dans certaines configurations, la ruine peut être provoquée sans que se produise la surverse sur l'ouvrage (pas de point B, cf. Illustration 18 a).
- le niveau de protection est confondu avec le niveau de sûreté et la surverse de l'ouvrage entraîne le début de la ruine de l'ouvrage (B=C, cf. Illustration 18 b).

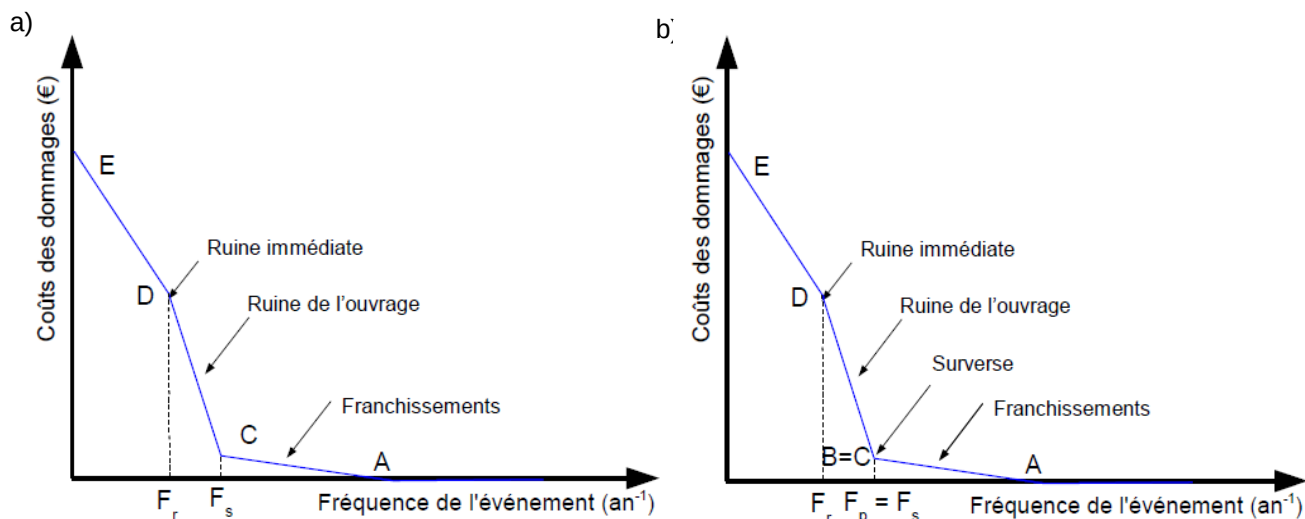


Illustration 18 : Courbes dommages-fréquences obtenues pour plusieurs cas particuliers :  
a) Défaillance structurelle avant surverse, b) Surverse entraînant défaillance structurelle,

- le phénomène prépondérant est la surverse, directement liée au niveau marin à la côte. Les phénomènes de franchissement pouvant être considérés comme négligeables devant celle-ci, la situation A ne nécessite alors pas d'être étudiée (A=B, cf. Illustration 19 a).
- la rupture de la protection intervient avant que les surverses et franchissement ne causent des dommages (cas d'une rupture suite à un affouillement généré par les vagues ou à une érosion dunaire...) (cf. Illustration 19 b).

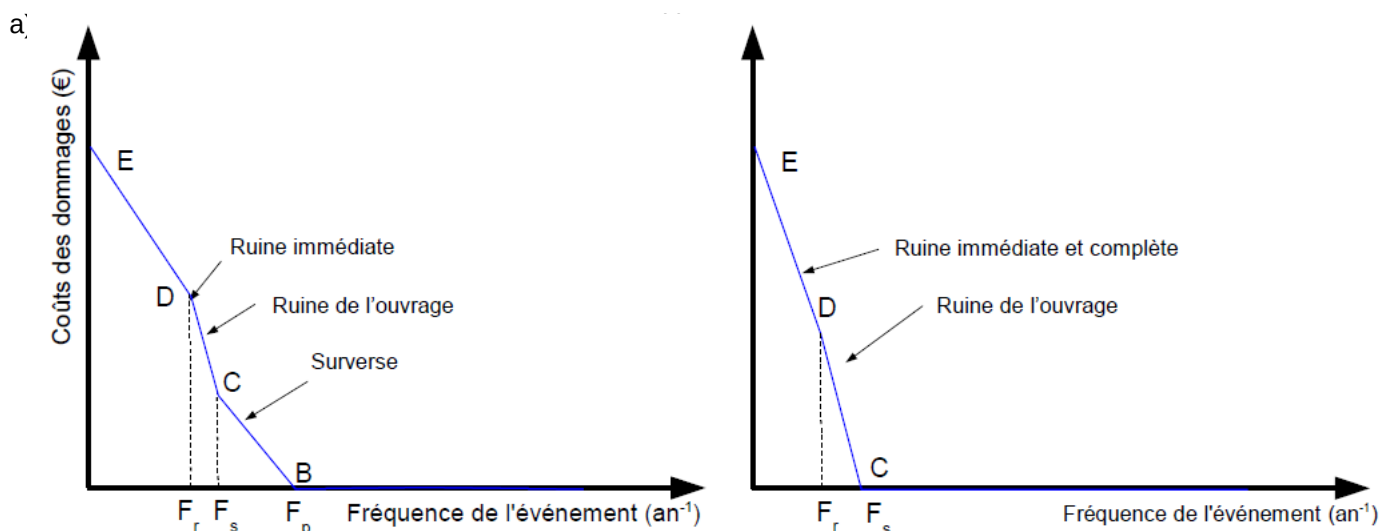


Illustration 19 : Courbes dommages-fréquences obtenues pour plusieurs cas particuliers :  
a) Franchissements négligeables, b) Ruine avant franchissement ou surverse

- la rupture de l'ouvrage (C) génère une inondation de l'ensemble de la zone protégée et le niveau d'eau dans la zone protégée est identique au niveau marin généré par cet événement (faible surface de zone protégée) (cf. Illustration 20 a).
- les informations sur l'événement générant une ruine immédiate et complète de l'ouvrage sont insuffisantes, cet événement marquant un seuil dans la courbe dommages-fréquences étant difficile à identifier de manière pratique. Dans ce cas :
  - seule une ruine généralisée immédiate est considérée au-delà du niveau de sûreté (C=D, cf. Illustration 20 b).
  - un scénario supplémentaire (« scénario de brèche » C') est étudié (cf. plus bas).

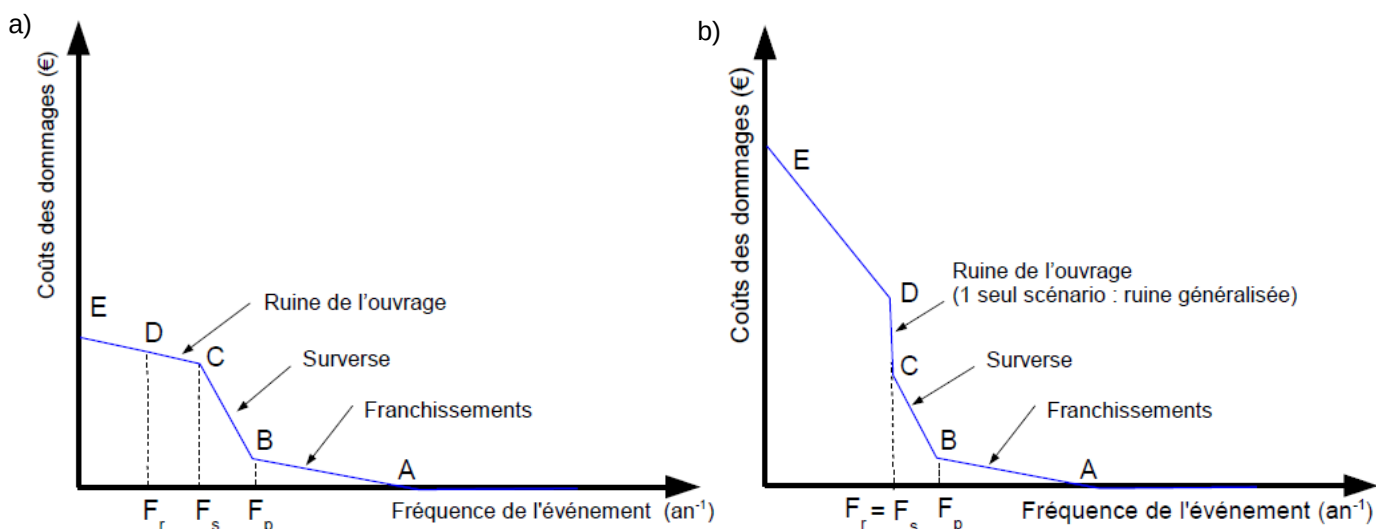


Illustration 20 : Courbes dommages-fréquences obtenues pour plusieurs cas particuliers :  
a) Défaillance structurelle entraînant la submersion de la totalité de la zone protégée, b) Défaillance structurelle complète et immédiate

On considère dans cette méthode « affinée » que :

- Les franchissements par paquets de mer doivent être pris en compte s'ils ont un impact sur le volume de la zone inondée, notamment pour les événements fréquents ;
- Les dommages suite à une rupture de l'ouvrage ne sont pas supérieurs à ceux générés pour un même événement en situation non aménagée, c'est-à-dire que les effets du sur-aléa généré par la rupture d'un ouvrage ne sont pas étudiés.

Suivant ces principes, cinq scénarios théoriques au minimum sont ainsi à étudier :

- franchissements générant les premiers dommages (scénario A),
- niveau de protection de l'ouvrage (début de la surverse/des débordements par exemple) (scénario B),
- niveau de sûreté : début de la détérioration de l'ouvrage pouvant entraîner la ruine (scénario C),
- début de l'absence d'effet des ouvrages (ruine généralisée immédiate de l'ouvrage) s'il est connu (scénario D), ou un scénario intermédiaire entre le début de la défaillance structurelle et la ruine généralisée (scénario C'),
- événement extrême supérieur (scénario E) de période de retour au moins 1000 ans.

Du fait de la difficulté d'associer un événement de fréquence donnée à chaque stade de détérioration des structures de protection (brèche, abaissement des cotes de crêtes, modification de la morphologie), il est ainsi proposé de manière générale d'encadrer l'ensemble de ces scénarios possibles de détérioration par les extrêmes que constituent :

- l'événement générant les premières détériorations sur l'ouvrage (niveau de sûreté, point C),
- l'événement à partir duquel on considère que l'effet des ouvrages est nul (point D).

Cependant, des scénarios particuliers de détérioration (brèches...) peuvent être étudiés pour affiner la courbe dommages-fréquences entre les points C et D, notamment si l'écart entre les périodes de retours de ces deux événements encadrants est grand ou si le scénario D n'est pas connu et si des informations complémentaires sont disponibles :

- étude de danger (probabilité d'apparition d'une brèche à partir d'un débit de seuil donné ou une fréquence),
- probabilités de défaillance générale et caractéristiques types d'une brèche (dimensions, durée d'ouverture...) en fonction de la typologie de l'ouvrage et de son environnement, provenant par exemple d'un retour d'expérience,
- étude spécifique des risques de la rupture de l'ouvrage (cf. encart ci-dessous).

#### **Étude spécifique de la rupture d'un ouvrage**

Jusqu'au niveau sûreté, il peut être considéré que la probabilité de rupture de l'ouvrage est nulle. Pour un seuil légèrement supérieur (qui peut être assimilé au niveau de sûreté), il peut être considéré que la probabilité de rupture de l'ouvrage est certaine. Un événement légèrement supérieur au niveau de sûreté est donc intéressant à étudier afin d'estimer l'écart important dans les dommages entre ces deux scénarios d'aléa. Il peut ainsi être étudié un scénario C' entre C et D, générant avec certitude au moins une brèche, sans que les conséquences soient équivalentes à celles générées par la ruine totale de l'ouvrage.

Des outils permettent de définir les caractéristiques des ruptures en fonction des sollicitations hydrauliques et des caractéristiques techniques (taille des sédiments, pente des talus...) de l'ouvrage (CIRIA, MEDDE, USACE, 2013). Cependant, si des outils existent pour les digues en terre simples notamment, ils ne couvrent pas la diversité des ouvrages de protection.

Si la certitude d'une brèche est acquise, les caractéristiques de la brèche (dimensions, durée de formation) ne sont pas aussi certaines pour un événement donné. Il est donc possible d'affecter

une probabilité à des classes d'hydrogramme de brèche. Pour cela, une plage de variabilité et une fonction de probabilité sont définies pour chaque paramètre (souvent limités à un ou deux) dont dépend la brèche.

La localisation de la brèche peut être déterminée notamment à partir de la connaissance des événements historiques, des points faibles du système (points bas, vanne...), du diagnostic visuel, de l'évolution historique du trait de côte, et de la connaissance des phénomènes hydrodynamiques et sédimentaires. Si un point de localisation préférentiel ne peut être déterminé, la carte d'aléa peut être réalisée avec une brèche glissante (réalisation de plusieurs simulations avec des localisations différentes et construction de la carte d'aléa par l'enveloppe de l'ensemble des simulations).

Lorsque le système de protection comporte des structures n'ayant pas le même niveau de protection, les seuils de chacune des structures, jouant sur la courbe dommages-fréquences, doivent être étudiés.

### ***Recherche des points d'inflexion liés aux enjeux et aux dommages***

La courbe dommages-fréquences peut également être affinée si des seuils (points d'inflexion) existent dans la distribution des dommages ou des enjeux. Les scénarios étudiés peuvent ainsi être sélectionnés sur la base des enjeux touchés (prenant en compte les 4 catégories d'enjeux retenues pour l'ACB, cf. 2.2) avec une hypothèse de géométrie constante de l'ouvrage. Avant le début de la détérioration de l'ouvrage (cf. Illustration 21 point C) et après la ruine immédiate de l'ouvrage (cf. Illustration 21 point D), une approche basée sur l'analyse des enjeux, peut être envisagée pour déterminer des seuils. Elle peut permettre d'identifier des scénarios complémentaires à étudier afin de préciser la courbe dommages-fréquences. Entre chaque scénario étudié, une hypothèse de linéarité dommages-fréquences est retenue.

Cette courbe théorique est établie en se basant sur l'hypothèse que les seuils sont uniquement liés aux seuils de la distribution des enjeux et des dommages.

Une méthode « inverse » permet de partir de la zone inondée et des volumes associés pour retrouver le débit associé, le couple niveau marin/hauteur de vagues, puis la fréquence de l'événement associé.

Les relations entre le volume et la cote de la zone inondée et entre la cote de la zone inondée et le coût des dommages peuvent être établies simplement (lorsqu'on peut considérer que la topographie de la zone inondée est peu complexe et que la surface de la zone inondée est plane). Leurs seuils/points d'inflexion permettent ainsi de déterminer les événements à étudier. Il peut être intéressant de s'intéresser à ces relations (cf. Illustration 16) dès les phases d'avant-projet sommaire afin d'apporter des éléments dans les réflexions sur les stratégies d'aménagement.

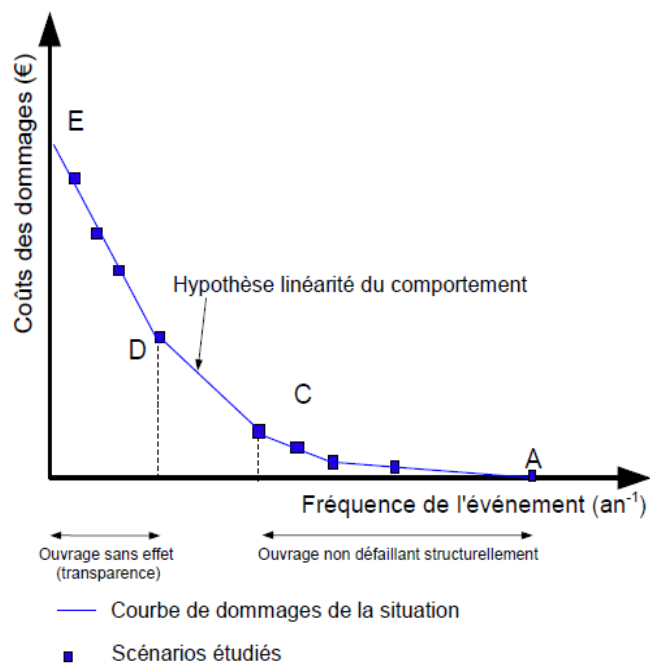


Illustration 21 : Scénarios étudiés à partir des seuils identifiés dans la distribution des enjeux et des dommages et courbe dommages-fréquences obtenue

#### Identifier les seuils dans la distribution des dommages et des enjeux (e et f de l'illustration 16)

Lorsque la topographie de la zone inondée est peu complexe et que l'on peut négliger les phénomènes de propagation et ainsi considérer que la surface de la zone inondée est assimilable à un plan, il est possible d'identifier au sein de la zone inondée des classes d'iso-hauteur (d'iso-profondeur) d'eau.

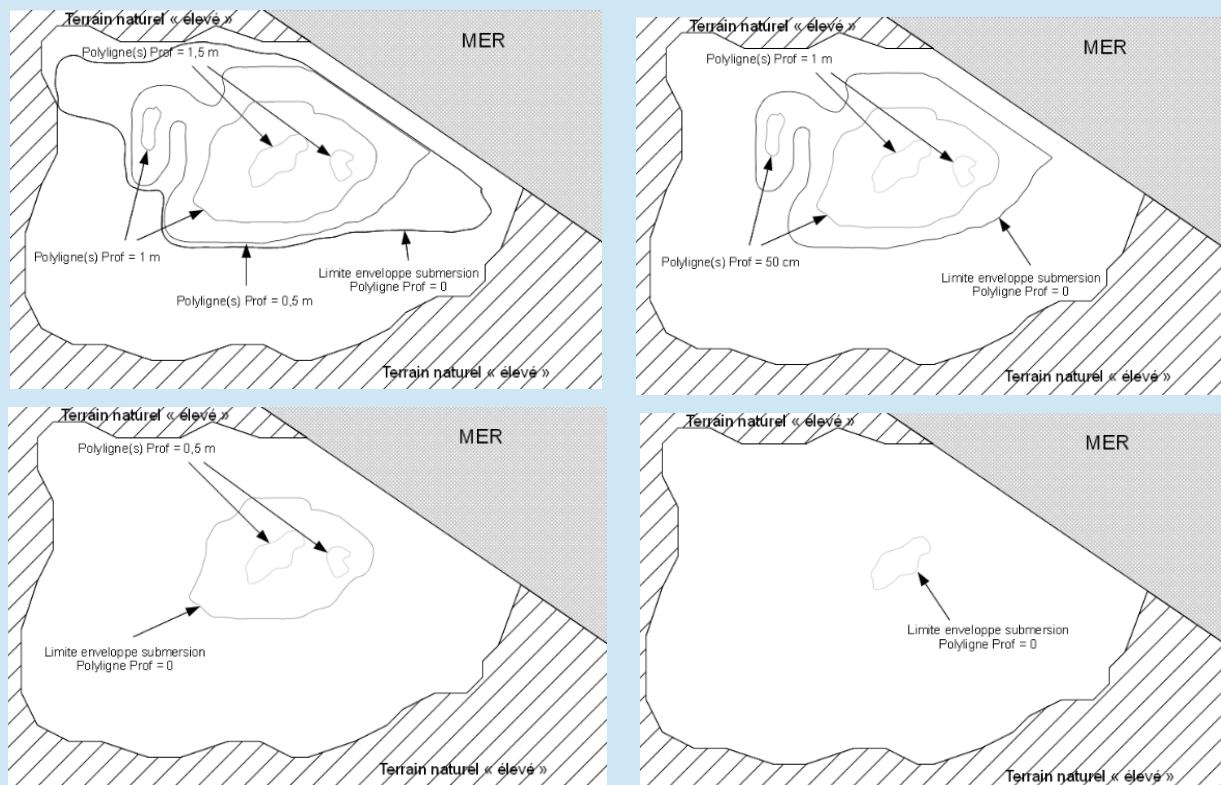
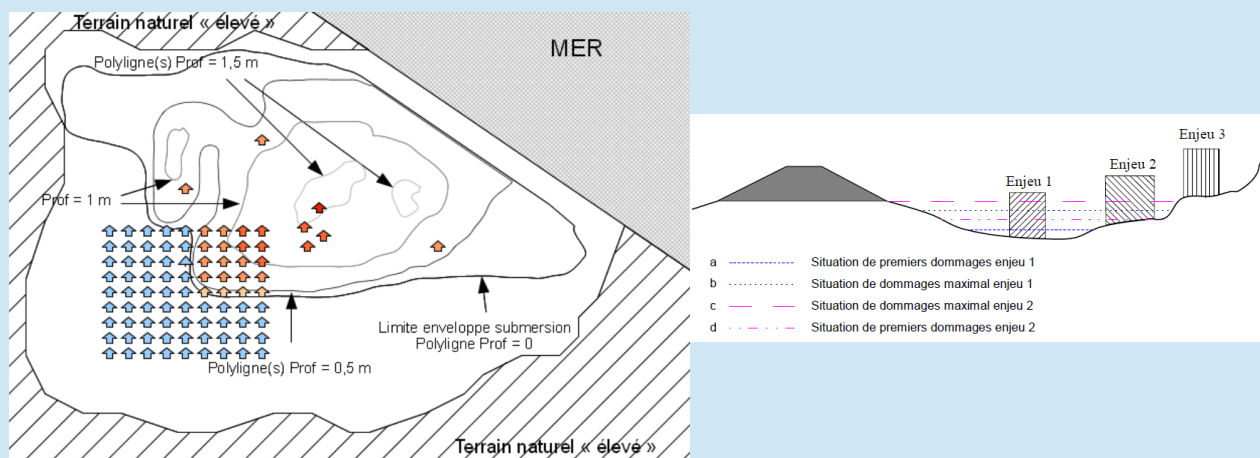


Illustration 22 : Cotes d'iso-profondeur d'eau sur un site fictif pour un niveau marin de 4 m, un niveau marin de 3,5 m, un niveau marin de 3 m et un niveau marin de 2,5 m.

Une fois les classes d'iso-hauteur définies, il est possible d'identifier les enjeux présents au sein de chaque classe et les dommages (à partir de courbes dommages-hauteurs d'eau pour certains types d'enjeux éventuellement) pour chaque cote d'eau atteinte (cf. Illustration 23).



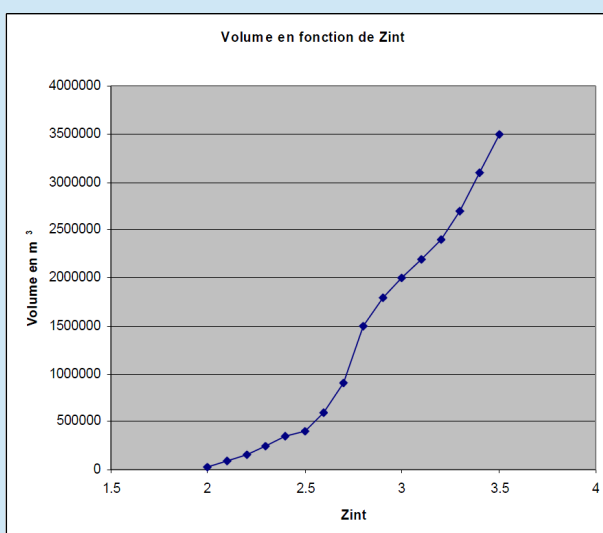
**Illustration 23 : Identification des enjeux dans des classes d'iso-profondeurs et estimation des dommages pour chaque cote d'eau atteinte**

Une relation peut ainsi être établie entre les dommages et la cote d'eau atteinte dans la zone inondée. Les seuils de cette courbe permettent de déterminer les événements à étudier.

### Établir la relation entre la cote atteinte dans la zone protégée et le volume d'eau (d de l' Illustration 16)

Lorsque la topographie de la zone inondée est peu complexe et que l'on peut négliger les phénomènes de propagation et ainsi considérer que la surface de la zone inondée est assimilable à un plan, la relation entre la cote d'eau atteinte dans la zone inondable et le volume d'eau présent dans la zone peut facilement être définie. Elle peut permettre d'identifier des seuils qui peuvent se retrouver dans la distribution des dommages.

Z <sub>int</sub>	Volume en m <sup>3</sup>
2	30 000
2.1	90 000
2.2	150 000
2.3	250 000
2.4	350 000
2.5	400 000
2.6	600 000
2.7	900 000
2.8	1 500 000
2.9	1 800 000
3	2 000 000
3.1	2 200 000
3.2	2 400 000
3.3	2 700 000
3.4	3 100 000
3.5	3 500 000



**Illustration 24 : Relation entre le volume d'eau de la zone inondable et le cote d'eau atteinte sur un site fictif**

### Établir la relation entre le volume d'eau dans la zone protégée et la fréquence de l'événement (a, b, c de l'illustration 16)

Il est possible de retrouver une fréquence d'événement à partir d'un volume d'eau dans la zone protégée. Du fait de la description d'un événement par deux paramètres (le niveau d'eau et la hauteur de vagues), plusieurs couples de paramètres possibles seraient susceptibles de générer ce volume (cf. Illustration 26).

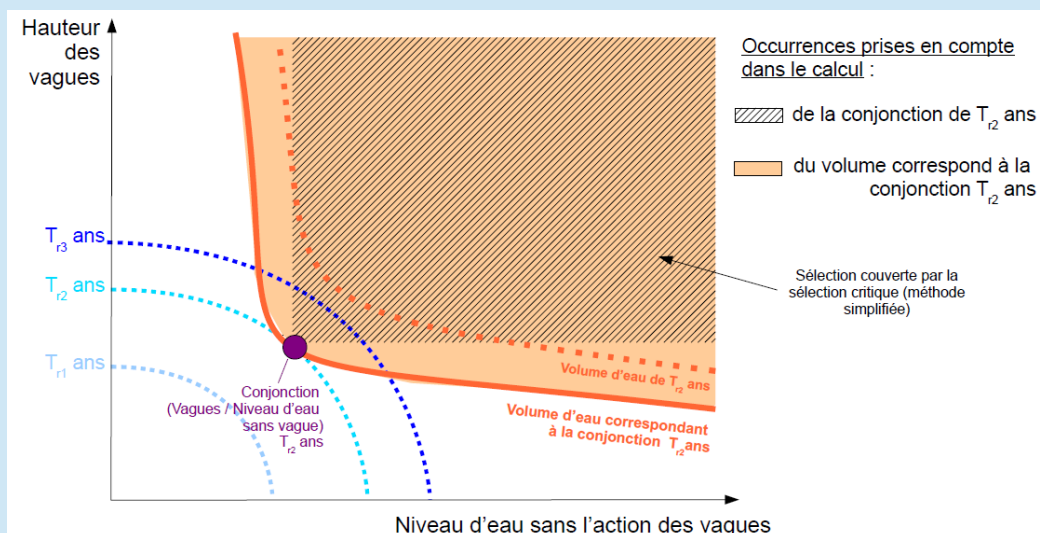


Illustration 25 : Probabilités de rencontrer chaque couple de paramètres niveau d'eau/hauteur de vagues (courbes de  $T_{r1}$  à  $T_{r3}$  ans) et couples susceptibles de générer un volume supérieur à un volume donné (surface orange) sur un site test

Deux méthodes permettent de retrouver la fréquence de l'événement :

- Méthode statistique simplifiée : On détermine l'événement le plus fréquent permettant de générer ce volume (point mauve permettant de couvrir la sélection critique hachurée de l'illustration 26)
- Méthode statistique complète : On détermine l'ensemble des événements permettant de générer ce volume (surface orange de l'illustration 26)

Ces méthodes sont décrites dans *Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes - Environnements maritime et estuarien* (CETMEF, 2013).

La même méthode (simplifiée ou complète) devra être retenue pour l'ensemble des scénarios étudiés dans le cadre de l'ACB.

#### 6.3.2.b - Description des événements hydrauliques

L'événement maritime hydraulique est défini par un **couple de paramètres niveau d'eau/hauteur de vagues** en pied d'ouvrage. Ces deux paramètres sont nécessaires pour bien décrire le niveau marin à la côte intégrant la surcote liée aux vagues d'une part, et pour permettre de prendre en compte les effets des franchissements dans le volume d'eau entrant d'autre part.

Pour l'analyse des événements maritimes, c'est-à-dire l'analyse des concomitances vagues/niveau d'eau, la détermination du niveau marin à la côte, la détermination des débits (formules empiriques de franchissement ou de surverse), il peut être fait référence aux méthodes exposées dans le *Guide méthodologique Plans de Prévention des Risques Littoraux* (MEDDE/DGPR, 2013) ou dans le guide *Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes - Environnements maritime et estuarien* (CETMEF, 2013).

### 6.3.3 - Cartographie de l'aléa submersion marine

L'étude de l'aléa submersion marine doit permettre de déterminer pour chaque scénario étudié :

- l'extension de l'inondation,
- les hauteurs d'eau : par tranches de 10 cm si possible. A minima, et en cohérence avec la Directive Inondations, travailler par tranches de 10 cm jusqu'à 1 m et par tranches de 1 m au-delà jusqu'à 2, 3 ou 4 m. L'application des courbes de dommages nécessitent en effet une précision importante des hauteurs d'eau.
- la durée de submersion : Elle peut être estimée à dire d'expert. Des classes de durée, variables selon les enjeux, permettent d'estimer les dommages.
- les vitesses d'écoulement : identification des zones de très forts écoulements capables d'engendrer des érosions ou des dégâts structurels (bande de précaution derrière les ouvrages, zones d'écoulement préférentiel...). Elles peuvent être estimées à dire d'expert ou avec l'appui d'une modélisation numérique.

En plus de l'aléa submersion marine, les zones soumises aux chocs de vagues et aux projections peuvent être identifiées.

### 6.3.4 - Estimation des dommages

La comparaison de deux situations dans le cas d'une méthode affinée conduit au schéma de la figure suivante (cf. Illustration 26), dans lequel :

- les dommages sont nuls en dessous de l'événement entraînant les premiers dommages pour les différentes situations d'aménagement étudiées ;
- les dommages sont équivalents, quelles que soit les situations d'aménagement comparées, au-delà de l'événement pour lequel l'effet des ouvrages est nul ;
- le DEMA est la surface comprise entre les deux courbes dommages-fréquences des

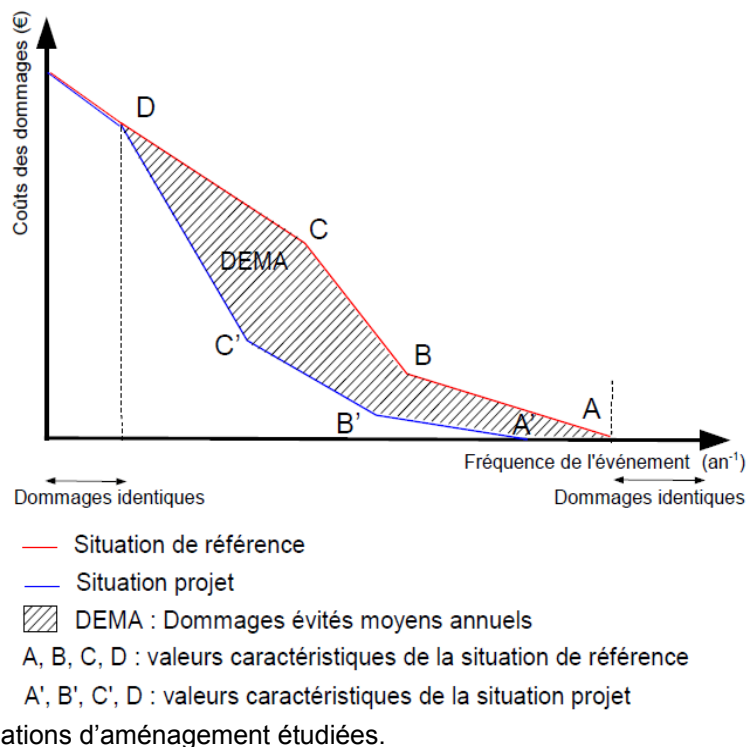


Illustration 26 : Courbe dommages-fréquences des situations non aménagée et aménagée et visualisation des DEMA

### **6.3.5 - Études de sensibilité**

Plusieurs paramètres doivent faire l'objet d'une analyse de sensibilité. Ces analyses peuvent devenir lourdes dès lors qu'elles demandent l'étude de nombreux scénarios d'aléa complémentaires aboutissant à de nouvelles cartographies. Le nombre de scénarios complémentaires pourra être limité du fait que certains paramètres sont liés (fréquence des événements, niveaux marins, impact du changement climatique...).

Ces analyses de sensibilité doivent permettre de définir une amplitude de variation du DEMA.

#### **6.3.5.a - Fréquence des événements hydrauliques**

Une étude de sensibilité doit nécessairement porter sur la fréquence des événements retenus, ce qui revient à une étude de sensibilité des couples niveaux marins/vagues retenus pour chaque événement.

Pour cela, il est possible de réaliser différents types d'analyse de sensibilité pour chaque scénario étudié :

- Test d'une plage de sensibilité autour du niveau marin représentant le niveau de protection garanti par l'ouvrage. Deux niveaux marins compris dans une plage de  $\pm 25$  cm par rapport au niveau marin retenu seront testés, cette valeur correspondant à l'ordre de grandeur général de l'incertitude sur les niveaux. Des niveaux marins en dehors de cette plage pourront être définis dans les cas où les variations des niveaux marins extrêmes est importante par rapport au linéaire côtier étudié.
- Test d'une plage de fréquence autour des fréquences des scénarios étudiés.

#### **6.3.5.b - Horizon temporel**

L'horizon temporel peut faire l'objet d'une analyse de sensibilité. Lorsque deux projets sont étudiés, les horizons temporels de ces deux projets peuvent être testés.

#### **6.3.5.c - Changement climatique**

L'étude de l'impact du changement climatique peut être réalisée de deux manières (cf. 6.1.4) :

- si dans l'ACB l'aléa est considéré comme constant : l'analyse de sensibilité doit étudier l'aléa à une seconde échéance temporelle (fin de l'horizon temporel par exemple), où le niveau marin moyen est différent. Une seconde série de scénarios d'aléa, composant une seconde courbe dommages-fréquences, doit ainsi être réalisée.
- si dans l'ACB, une estimation des dommages est réalisée à partir d'un aléa évoluant par palier : il peut être utile de faire dans l'étude de sensibilité une analyse à aléa constant à deux échéances, début et fin de l'horizon temporel étudié.

Afin de ne pas trop alourdir les études et d'éviter de multiplier les cartographies à réaliser, pour l'analyse de sensibilité de l'impact du changement climatique, les niveaux marins testés précédemment peuvent être réutilisés en estimant leur nouvelle période de retour à l'échéance testée. Pour cela, il est possible de considérer une simple translation de la répartition des fréquences, de l'ordre de l'augmentation du niveau marin induit par le changement climatique.

#### **6.3.5.d - Comportement hydraulique et structurel de l'ouvrage**

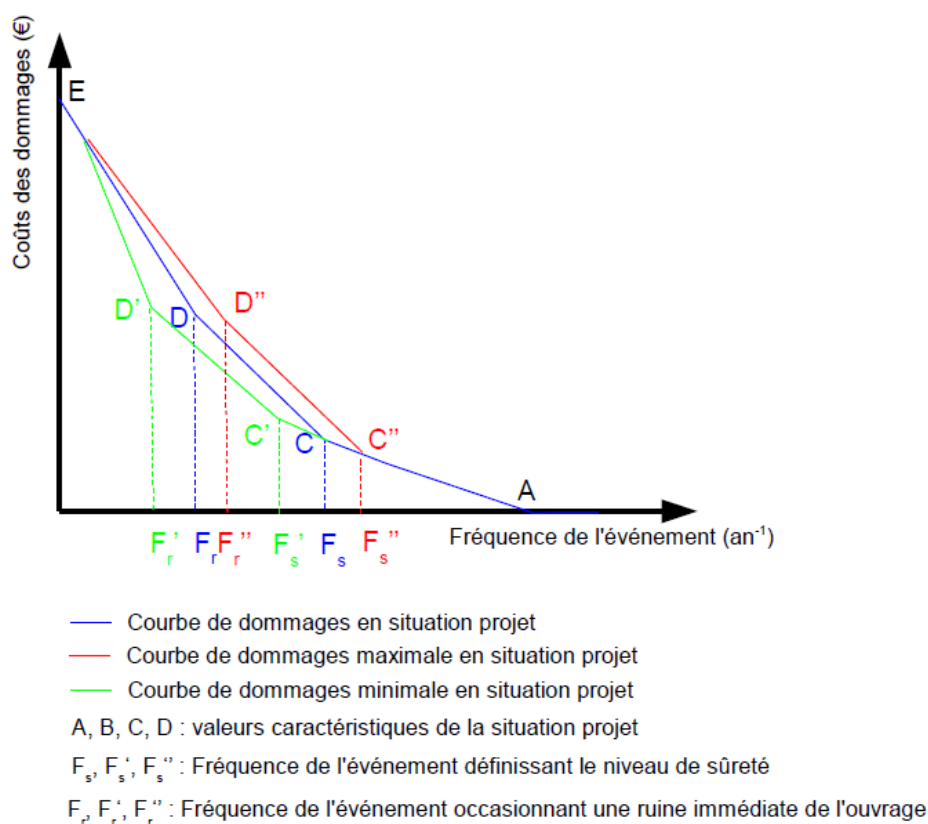
Une analyse de sensibilité doit être menée sur le comportement hydraulique et structurel de l'ouvrage.

Les informations concernant la détérioration de l'ouvrage (entre les points C et D) sont souvent peu disponibles. Une étude de sensibilité est donc indispensable par rapport à ce critère. Pour cela, il est nécessaire d'établir deux variantes de la courbe dommages-fréquences pour évaluer la sensibilité à ce critère :

- une variante estimant que les fréquences de l'événement définissant le niveau de sûreté et du niveau de ruine peuvent être surestimées (courbe verte Illustration 27).

- une variante estimant que les fréquences de l'événement définissant le niveau de sûreté et du niveau de ruine peuvent être sous-estimées (courbe rouge Illustration 27),

L'ordre de grandeur de ces surestimation et sous-estimation peut provenir des études d'avant-projets. Dans le cas où ces informations ne seraient pas disponibles, un ordre de grandeur de 10 à 25 % peut être retenu.



*Illustration 27 : Analyse de sensibilité de la courbe dommages-fréquences par rapport au comportement hydraulique et structural de l'ouvrage*

## 7 - Limites de la méthode

Les résultats de l'ACB sont soumis à de fortes incertitudes, d'où les nombreuses études de sensibilité nécessaires. Celles-ci ne permettent cependant que de tester séparément l'influence de chacun des paramètres, et elles doivent donc être analysées avec prudence. Aussi, il convient de considérer, pour l'analyse des situations d'aménagement projetées, l'ensemble des résultats de l'ACB (y compris ceux des études de sensibilité) et non un unique résultat. C'est l'étude de l'ensemble de ces éléments qui permettra de donner des indications sur la pertinence économique des projets étudiés.

Il est possible d'aller plus loin dans l'analyse de la robustesse du projet en réalisant une analyse d'incertitude, qui s'attache à qualifier les incertitudes associées aux différents paramètres mobilisés et à étudier leur propagation jusqu'aux résultats de sortie du modèle d'évaluation économique. Elle doit idéalement permettre de fournir des intervalles de confiance sur l'indicateur de la VAN. L'*Irstea* a publié un guide sur l'analyse d'incertitude dans les ACB (Grelot *et al.*, 2013).

## 8 - Glossaire

**Aménagement littoral** : Structure construite ou améliorée dans un objectif de protection contre les aléas côtiers, d'accès au littoral, de développement économique, de développement du tourisme... Ici principalement utilisé pour définir un aménagement de protection contre les aléas côtiers ; il peut comprendre plusieurs améliorations apportées à un même système de protection (augmentation du niveau de protection garanti d'un ou plusieurs ouvrages, rechargement...).

**Débordement** : Entrée d'eau au-dessus de la crête d'un ouvrage de protection, c'est à dire un écoulement d'eau continu par-dessus l'ouvrage, du fait du dépassement de la crête par le niveau d'eau en amont. Aussi appelé surverse.

**Défaillance d'un ouvrage** : incapacité à satisfaire un seuil ou un indicateur de performance, en réponse à une sollicitation, pour une fonction spécifique. La défaillance d'un ouvrage par rapport à son niveau de protection aurait pour conséquences des entrées d'eau non envisagées au droit de l'ouvrage entraînant une inondation avant l'atteinte du niveau de protection. La défaillance d'un ouvrage par rapport à son niveau de sûreté aurait pour conséquences des détériorations de l'ouvrage entraînant la rupture avant l'atteinte du niveau de sûreté. La défaillance d'un ouvrage peut être fonctionnelle (hydraulique), entrées d'eau non envisagées, ou structurelle, détériorations et rupture.

**Échéance temporelle** : Date retenue pour la caractérisation de l'aléa (Ex : 2020, 2100...).

**Événement hydraulique** : Conditions maritimes définies par un niveau d'eau au large et une hauteur de vagues, conséquences d'un événement tempétueux.

**Franchissement** : Entrées d'eau intermittentes au-dessus de la crête d'un ouvrage de protection du fait du déferlement des vagues et du jet de rive à la côte et sur les ouvrages, sans nécessairement que le niveau d'eau en amont dépasse la cote de crête de l'ouvrage.

**Horizon temporel** : Période d'étude (Ex : les 50 prochaines années). « Durée sur laquelle sont considérés les flux de coûts et de bénéfices associés au projet » (Erdlenbruch et al. 2007)

**Migration dunaire** : mouvement, vers l'intérieur des terres, de dunes mobiles non stabilisées par la végétation sous l'effet du vent. L'aléa migration dunaire correspond à l'envahissement durable de terres par les dunes sous l'effet du vent.

**Niveau de protection (=niveau de service)** : Niveau pour lequel l'ouvrage ou le système de protection assure une protection. Il peut être défini par une absence d'eau, ou au minimum l'innocuité des entrées d'eau, dans la zone protégée (d'autres origines d'inondation pouvant cependant être observées).

**Niveau de sûreté** : Niveau au-delà duquel le bon fonctionnement structurel n'est plus assuré (début de détérioration structurelle de l'ouvrage), au-delà duquel l'absence de rupture n'est plus garantie.

**Niveau d'eau** : au large, le niveau d'eau est la combinaison d'une marée au large et d'une surcote atmosphérique au large (effet de la pression et du vent).

**Niveau marin** : à la côte ou au droit de l'ouvrage, le niveau marin est la combinaison de la marée à la côte, d'une surcote atmosphérique à la côte (effet de la pression et du vent) et d'une surcote liée aux vagues (effet du déferlement de la houle à la côte).

**Ouvrage de protection** : Structure d'origine anthropique ayant pour objet la protection contre les aléas côtiers, évolution du trait de côte ou submersion marine.

**Recul du trait de côte** : déplacement vers l'intérieur des terres de la limite entre le domaine marin et le domaine continental, conséquence d'une perte de matériaux sous l'effet de l'érosion marine (érosion naturelle induite par les forces marines ou météorologiques) et/ou d'une érosion générée ou accélérée par l'homme (sur-fréquentation, extraction, aménagements et ouvrages de protection,

etc.). L'aléa recul du trait de côte correspond à une disparition de terres sous l'effet d'un recul durable de la limite terre-mer du fait d'une érosion ou de l'élévation du niveau moyen de la mer.

*Ruine d'un ouvrage* : Un ouvrage est considéré comme ruiné dès qu'il subit des détériorations structurelles pouvant entraîner la rupture (brèche). A partir du moment où celui-ci n'a plus aucune fonction hydraulique (transparence), on parle alors de ruine généralisée.

*Scénario d'aléa* : conditions définies par un événement hydraulique et une hypothèse de comportement des ouvrages associée. Un point sur la courbe de dommages est construit à partir de l'étude d'un scénario.

*Situation* : État des aménagements dans une configuration donnée : situation de référence ou projet.

*Submersion marine* : inondations temporaires de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques et océaniques défavorables (basses pressions atmosphériques et fort vent d'afflux agissant, pour les mers à marée, aux environs de la pleine mer) ; elles peuvent durer de quelques heures à quelques jours.

*Surverse* : cf. débordement

## 9 - Bibliographie

CEPRI - Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation. (2011). *L'ACB (analyse coût/bénéfice) : une aide à la décision au service de la gestion des inondations*, Novembre 2011, 42 p.

CETMEF (2013). *Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes - Environnements maritime et estuarien*. ISBN : 978-2-11-129364-9, Référence CETMEF : C 13.01, avril 2013, 180 pages.

CIRIA, MEDDE, USACE. (2013). *International Levee Handbook*. Ed. CIRIA, London, november.2013, 1348 p.

GRELOT, F., SAINT-GEOURS, N., BAILLY, J.-S. (2013). *Incertitudes dans les études ACB-DE. Guide méthodologique*. Rapport IRSTEA-AgroparisTech pour le Plan Rhône.

MEDDE/DGPR. (2013) *Guide méthodologique Plans de Préventions des Risques Littoraux*, décembre 2013, 169 pages.

MEEDDM -Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer- (2010). *La gestion du trait de côte*, Ed. Quae, 290 p.

MEDDM (2010). *Analyse coût-bénéfice - Annexes techniques*, déc. 2010, 78 p.

MEDDTL (2012). *Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte - Vers la relocalisation des activités et des biens*. MEDDTL/DGALN, 2012.- 19 p.

ONERC (2010). *Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en vue de l'estimation des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation possibles*, Synthèse n°2, février 2010, Direction générale de l'énergie et du climat / Service du climat et de l'efficacité énergétique / Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, créé au 1er janvier 2014 par la fusion des 8 CETE, du Certu, du Cetmef et du Sétra.

Le Cerema est un établissement public à caractère administratif (EPA), sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Égalité des territoires et du Logement. Il a pour mission d'apporter un appui scientifique et technique renforcé, pour élaborer, mettre en œuvre et évaluer les politiques publiques de l'aménagement et du développement durable, auprès de tous les acteurs impliqués (État, collectivités territoriales, acteurs économiques ou associatifs, partenaires scientifiques).

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (loi du 11 mars 1957). Cette reproduction par quelque procédé que se soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Impression : A déterminer

Coordination-Maquettage : Service éditions Cerema/Direction technique Eau, mer et fleuves

Achevé d'imprimer : Juillet 2015

Dépôt légal : Juillet 2015

ISBN : 978-2-37180-015-1

ISSN : 2276-0164

Prix : 32 euros

Illustration couverture ou crédits photos : « L'Aiguillon-sur-mer » – Marc Igigabel/CEREMA/DTECEMF

### **Editions du Cerema**

Cité des mobilités,  
25 avenue François Mitterrand  
CS 92803  
69674 Bron Cedex

### **Direction technique Eau, mer et fleuves**

134 rue de Beauvais  
CS 60039  
60280 Margny-Lès-Compiègne

### **Bureau de vente de la Direction technique Eau, mer et fleuves**

Cerema/Direction technique eau, mer et Fleuves  
151 quai du Rancy  
BP 30023  
94381 Bonneuil-sur-Marne cedex  
[bventes.dtecemf@cerema.fr](mailto:bventes.dtecemf@cerema.fr)

## La collection « Références » du Cerema

Cette collection regroupe l'ensemble des documents de référence portant sur l'état de l'art dans les domaines d'expertise du Cerema (recommandations méthodologiques, règles techniques, savoirs-faire...), dans une version stabilisée et validée. Destinée à un public de généralistes et de spécialistes, sa rédaction pédagogique et concrète facilite l'appropriation et l'application des recommandations par le professionnel en situation opérationnelle.

## Étude des aléas littoraux dans le cadre d'une analyse coûts-bénéfices (ACB)

Les analyses coût/bénéfice (ACB) sont des outils d'aide à la définition des stratégies de prévention des risques permettant d'estimer la rentabilité économique d'un projet. Développées initialement pour les projets de prévention des inondations par débordements de cours d'eau, les ACB littorales sont confrontées à des difficultés méthodologiques.

Les méthodes de détermination des aléas submersion marine et recul du trait de côte, aléa non abordé dans les documents existants, sont précisées dans ce document.

Pour que l'ACB puisse jouer son rôle d'évaluation de la pertinence des projets d'ouvrages de protection, l'impact de ceux-ci sur les aléas doit être finement défini.

Pour la submersion marine, deux niveaux de mise en œuvre d'une ACB sont proposés suivant l'avancée du projet. Le choix des événements théoriques à étudier pour construire la courbe dommages-fréquence est abordé en lien avec le comportement des ouvrages de protection (niveau de protection et niveau de sûreté) et les niveaux de dommages aux enjeux. Le changement climatique nécessite l'élaboration d'au moins deux courbes dommages-fréquence.

Connaissance et prévention des risques - Développement des infrastructures - Énergie et climat - Gestion du patrimoine d'infrastructures  
Impacts sur la santé - Mobilité et transports - Territoires durables et ressources naturelles - Ville et bâtiments durables



Prix 32€  
ISSN : 2276-0164  
ISBN : 978-2-37180-015-1

