

Adaptation et gestion des risques : usages et limites de l'analyse coût-bénéfice

Stéphane Hallegatte, Patrice Dumas

▶ **To cite this version:**

Stéphane Hallegatte, Patrice Dumas. Adaptation et gestion des risques : usages et limites de l'analyse coût-bénéfice. Gestion des risques naturels, leçons de la tempête Xynthia, Quae, pp.197-207, 2012. hal-00836774

HAL Id: hal-00836774

https://enpc.hal.science/hal-00836774

Submitted on 21 Jun 2013

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

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

Adaptation et gestion des risques : usages et limites de l'analyse coût-bénéfice

11

Stéphane Hallegatte, Patrice Dumas

Face aux changements des aléas et du niveau moyen de la mer, des analyses quantifiées du risque d'inondation deviennent de plus en plus nécessaires. C'est notamment le cas pour des décideurs publics qui doivent arbitrer entre divers investissements et régulations capables de limiter les risques. Dans un contexte de contrainte budgétaire forte, il devient essentiel d'être capable de justifier des bénéfices que l'on peut retirer d'un investissement dans une digue ou une protection. En l'absence d'évaluation, ces investissements ont tendances à être considérés comme moins prioritaires que d'autres actions dont les bénéfices sont plus évidents et observables que des pertes évitées.

Cet article présente les avantages et les inconvénients de l'analyse coût-bénéfice pour déterminer un niveau de protection approprié. Cette méthode a un intérêt en terme d'arbitrage budgétaire, pour permettre d'investir là où c'est le plus utile, et un intérêt politique, pour rendre visible des bénéfices économiques qui – parce qu'ils prennent la forme de dommages évités – ne sont pas immédiatement visibles[1].

L'analyse coût-bénéfice présentée ici permet également d'analyser l'impact que peut avoir la montée du niveau de la mer sur des risques déjà existants en zone côtière, et donc de chiffrer un coût supplémentaire lié au changement climatique. Elle montre également bien que l'adaptation et la gestion des risques doivent être conçues ensemble, pour en maximiser l'efficacité et en réduire les coûts.

Pour cela, on va s'intéresser ici à un exemple simple et purement illustratif : quelles protections faudrait-il mettre en place pour protéger les côtes de la région Languedoc-Roussillon. Cette région est choisie car certaines données y sont disponibles. Cependant, même dans cette zone, toutes les données nécessaires n'ont pas été collectées, ce qui illustre le besoin de plus d'analyse et de collecte d'information. Aussi, cette étude n'a pour vocation que d'illustrer une méthode, de proposer des ordres de grandeur et de les discuter. Cette illustration utilise la méthodologie proposée dans Hallegatte *et al.* (2008a) et appliquée dans Hallegatte *et al.* (2008b) sur la ville de Copenhague. Elle se fonde ici sur les résultats du sous-groupe « risques naturels » du Groupe interministériel sur l'évaluation des impacts économiques du changement climatique (2009).

Pour simplifier l'analyse, on va faire plusieurs hypothèses simplificatrices, mais qui ne changent rien à la méthode. Tout d'abord, on considère que toute la côte est potentiellement submergée, et qu'il n'y a pas de protections naturelles élevées (falaise, côte rocheuse), ce qui est tout à fait acceptable pour la région. Ensuite, on va supposer – en l'absence de données plus précises – que la région dispose

1 Dans la loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement, les modalités d'applications des programmes d'actions de prévention des inondations (PAPI), l'analyse coût-bénéfice est rendue obligatoire si le montant global des travaux ou aménagements dépasse : soit 25 % du montant total du PAPI, soit 2 M€ HT. (Source : http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000022470434&categorieLien=id).

actuellement de protections, sous la forme de digues, naturelles ou artificielles, à un niveau uniforme de 1 m par rapport au niveau de la mer normal actuel. On suppose également qu'on doit aujourd'hui reconstruire ces digues, et qu'il faut donc décider immédiatement de la hauteur que l'on souhaite leur donner, sur l'ensemble du siècle jusqu'en 2100, et que cette hauteur sera homogène sur l'ensemble de la région.

Dans l'analyse de l'adaptation, il est essentiel de ne pas supposer que la situation actuelle, supposée ici avec des digues de 1 m, est une situation optimale. Il est courant en effet que les niveaux de protection observés sur le terrain ne viennent pas d'une analyse précise des risques et d'un choix politique explicite. Elles sont souvent le résultat d'un processus historique empirique de gestion des risques. On observe donc des situations dans lesquelles le niveau de risque peut être trop élevé, comparé au niveau qui serait jugé idéal si une analyse de risque était conduite, ou trop faible, c'est-à-dire avec des coûts de protection trop élevés par rapport à un niveau optimal.

Or, les stratégies d'adaptation sont très différentes selon que l'on part d'une situation idéale, où le niveau de risque d'inondation est à sa valeur optimale, ou d'une situation sous-optimale.

Cette différence est illustrée par le tableau 11.1. La situation réelle aujourd'hui est celle de la case 1, une situation où le risque n'est pas forcément à sa valeur optimale.

Tableau 11.1. Différentes définitions de l'adaptation.

Diverses définitions de l'adaptation peuvent se représenter dans le tableau 11.1, qui se lit de la façon suivante.

Le passage de la case 1 à la case 2 est la « réduction du déficit d'adaptation », c'est-à-dire le passage d'une situation sous-optimale à une situation qui serait optimale en l'absence de changement climatique.

Le passage de la case 2 à la case 4 est l'adaptation proprement dite, c'est-à-dire l'investissement nécessaire uniquement en raison du changement climatique, pour passer d'un état optimal sans changement climatique à un nouvel état optimal avec changement climatique. Ce type d'adaptation peut être qualifié « d'adaptation stricte », et correspond aux actions qui ne seraient pas désirables sans changement climatique, et qui deviennent désirables uniquement parce qu'il y a un changement de climat.

Le passage direct de la case 1 à la case 4 est la trajectoire qu'il faudrait suivre en pratique, c'est-à-dire un passage de la situation actuelle sous-optimale sans changement climatique à une situation optimale avec changement climatique. On peut qualifier cette adaptation « d'adaptation optimale ».

Enfin, le passage de la case 1 à la case 3, c'est-à-dire le maintien du risque à son niveau initial, peut être qualifié « d'adaptation à niveau constant ». Ce type d'adaptation à niveau constant est souvent celui qui est analysé dans la littérature scientifique, quand les auteurs partent – à tort – du principe que la situation actuelle est optimale.

Stratégie d'adaptation considérée dans cette analyse sur le Languedoc-Roussillon

La géomorphologie du littoral dans la région est celle d'un système lagunaire avec des lidos séparant la mer des étangs, qui s'étendent entre quelques formations rocheuses (par exemple, le lido de Sète à Marseillan entre les formations calcaires et

volcaniques du néogène d'Agde et les calcaires secondaires du mont Saint Clair à Sète). Plus au sud (Pyrénées-Atlantiques), c'est une côte faite de falaises et de plages de poche. Les lidos ont été fortement urbanisés récemment et il y a toujours des pressions fortes pour les aménager ; ces zones sont particulièrement vulnérables à la montée du niveau la mer.

Aujourd'hui, les côtes du Languedoc-Roussillon sont le plus souvent protégées par leurs plages, elles-mêmes protégées par des dispositifs anti-érosion (notamment des épis). On trouve aussi des brise-lames qui cherchent à casser les vagues et à limiter l'intrusion d'eau et la submersion, et plus rarement des digues (par exemple à Port Camargue). On a également appliqué récemment de nouvelles approches de protection « douces » avec des rechargements en sables. Par exemple, l'opération de rechargement du golfe d'Aigues Mortes a utilisé 1 million de m^3 de sable prélevé dans la flèche sous marine de L'Espiguette (Source : Goneri Le Cozannet, BRGM).

Dans ce chapitre, on suppose toutefois que les seules protections sont des digues de 1 m. On suppose également que ces digues doivent être reconstruites, et qu'il faut donc décider de leur nouvelle hauteur, en supposant que cette hauteur sera homogène sur l'ensemble de la région. Les limites de l'analyse proposée sont importantes. D'abord, on ne s'intéresse qu'au problème de submersion, sans prendre en compte le problème d'érosion, majeur dans la région Languedoc-Roussillon (voir par exemple les résultats du projet Response[2]). Ensuite, on n'étudie qu'une méthode de protection, à savoir des digues, et on analyse le choix entre protéger par des digues ou abandonner le terrain à la mer. Or, même si les digues sont utiles, notamment dans les zones très urbanisées, on sait aujourd'hui qu'elles ont autant d'inconvénients que d'avantages. En particulier, elles créent des effets indésirables, notamment en accélérant l'érosion dans les zones non endiguées, en dénaturant les paysages, et en posant de graves problèmes pour les écosystèmes locaux (Clark, 1996). Il existe de nombreuses autres méthodes pour faire face à l'érosion et à la montée du niveau de la mer, comme l'apport de sable sur les plages qui est très utilisé aujourd'hui. Ensuite, en supposant une hauteur de protection homogène, on s'interdit une approche plus fine, qui combinerait la protection des zones les plus densément urbanisées et peuplées, le retrait des zones les moins denses, et l'apport de sable sur les plages dans les zones non urbanisées. Finalement, supposer une protection constante sur le siècle est évidemment une hypothèse trop simplificatrice, l'approche optimale étant sans doute d'agir en continu au cours de ce siècle. Toutefois, cet article a vocation à illustrer comment l'approche économique peut aider à décider des mesures de réduction du risque, et ne cherche pas à évaluer la stratégie optimale de protection de la région Languedoc-Roussillon. Ces limitations ne représentent donc pas un problème majeur.

Le bénéfice de protéger par des digues les côtes de la région Languedoc-Roussillon a deux composantes principales :
– éviter la perte de logements et d'infrastructures qui seraient définitivement inondés par la montée du niveau moyen de la mer ;
– réduire les risques d'inondation pour des logements et infrastructures qui ne seraient pas inondés en temps normal, mais seulement lors d'épisodes de marée de tempête.

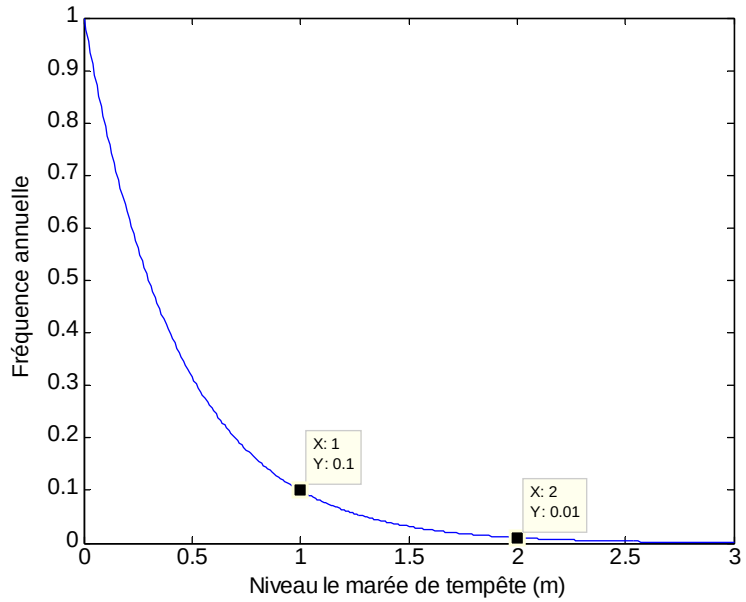
La première composante est un coût ponctuel et unique ; la seconde est un coût récurrent : le coût du risque, qui est augmenté par la montée du niveau de la mer.

---

2 Projet Response disponible sur : http://www.coastalwight.gov.uk/RESPONSE_webpages/

Les surcotes sont les augmentations temporaires du niveau de la mer provoquées par les tempêtes, en raison de la dépression et des vents violents qui « poussent » l'eau vers la côte. Ces surcotes s'ajoutent aux marées astronomiques pour faire monter le niveau de la mer et engendrer les marées de tempête. Sur la France métropolitaine, les surcotes sont fréquentes, mais dépassent rarement 2 mètres (Bordeaux en 1999 ; Dunkerque en 2007). Dans la région Languedoc-Roussillon, en l'absence de marée astronomique significative (> 30 cm), on considère qu'une marée de tempête de 1 mètre a une durée de retour de 10 ans (c'est-à-dire qu'elle se produit en moyenne tous les dix ans, ou qu'elle a une probabilité de 1/10 de se produire chaque année), et qu'une marée de 2 mètres à une durée de retour de 100 ans[3]. Il est important de noter qu'il s'agit de la fréquence pour une localisation dans la région, pas de la fréquence d'une marée de tempête sur la région dans son ensemble (celle-ci est supérieure).

Figure 11.1. Fréquence annuelle des marées de tempête, en fonction de leur niveau par rapport au niveau normal de la mer.



Nota bene : Il est important de noter qu'il s'agit de la fréquence pour une localisation dans la région, pas de la fréquence d'une marée de tempête sur la région dans son ensemble.

Pour simplifier, on va supposer que les fréquences annuelles des jours pendant lesquels une marée de tempête a lieu sont données par une exponentielle, comme le montre la figure 11.1, avec une fréquence de 0,1 pour un événement à 1 m et 0,01 pour un événement à 2 m. Avec cette hypothèse, le nombre total de marées de tempête est de 0,43 par an. Ces hypothèses sont cohérentes avec les chiffres disponibles, mais un travail plus élaboré serait ici nécessaire.

On se propose de mener une analyse coût-bénéfice des protections.

---

3 Pour être complet, il faut également tenir compte de l'effet de la houle et des vagues, qui peuvent projeter des paquets d'eau et créer une inondation derrière des digues, même si le niveau moyen de la mer reste en deçà de la hauteur des digues. En tenant compte de ces facteurs, le guide d'élaboration des plans de prévention des risques de submersion marine en Languedoc-Roussillon conseille l'utilisation d'une côte de mer centennale de 2 m (NGF) ; voir http://www.languedoc-roussillon.ecologie.gouv.fr/risques/subma/A5_GuidePPRsubmersion.pdf.

Analyse des coûts

La première étape, bien sûr, est d'évaluer le coût de cette protection contre les marées de tempête. Ici encore, il faut distinguer les coûts d'investissement et les coûts d'entretien. En utilisant les résultats d'une analyse du Pacific Institute (2009) sur la Californie, on va supposer qu'un mètre de digue de hauteur inférieure à 6 mètres coûte environ 5 000 € (indépendamment de la hauteur), et que le coût d'entretien annuel représente 10 % de cette valeur, soit 500 €/an et par mètre de digue. Pour une section de côte d'environ 200 km, on arrive à une somme de 1 milliard d'euros, plus 100 millions d'euros par an de maintenance. Entre 2000 et 2100, avec le taux d'actualisation proposé par le Commissariat au Plan (cf. encadré « Le taux d'actualisation »), ce coût de maintenance est équivalent à une dépense ponctuelle immédiate de 2,9 G€[4] en 2000. Donc la valeur nette présente de la protection est de 3,9 G€, incluant construction et maintenance jusqu'en 2100.

Il y a évidemment des coûts supplémentaires, liés à l'occupation du sol par la structure de protection, aux impacts sur la biodiversité, et au fait qu'avec une montée du niveau de la mer et l'érosion, la plage entre la mer et la structure peut être noyée, avec des pertes en termes récréatif et de paysage.

Le taux d'actualisation

En France, le Commissariat général au Plan a défini en 2005 un taux social d'actualisation variable, qui doit être utilisé pour évaluer les projets publics. L'usage d'un taux variable complique légèrement le calcul, mais ne pose pas de difficulté particulière. Ce taux est de 4 % pour les projets de court terme (jusqu'à 30 ans) et décroît au-delà de 30 ans vers 2 % pour les projets de long terme :

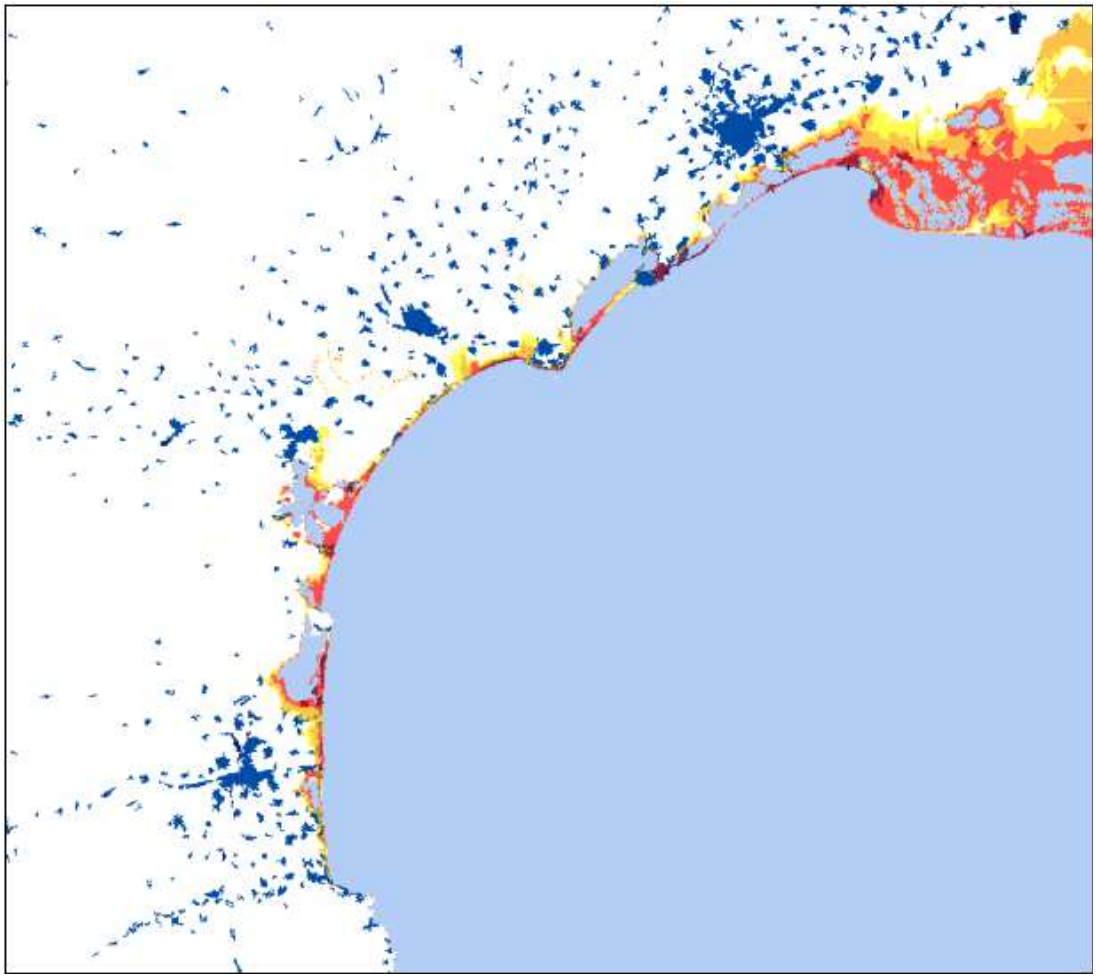
$\delta_n = 4\ \%$ si $n < 30$ ans

$\delta_n = [1{,}04^{30}\ 1{,}02^{(n-30)}\ ]^{(1/n)} - 1$ si $n > 30$ ans

Bien sûr, ce choix de taux d'actualisation est un choix politique, qui ne peut être justifié par la seule théorie économique, et les autres pays ont fait des choix différents (par exemple, 3 % et 7 % pour les États-Unis, un taux décroissant entre 3,5 % et 1 % pour le Royaume-Uni).

Figure 11.2. Carte de la région Languedoc-Roussillon, avec l'urbanisation en bleu et l'altitude par rapport au niveau de la mer en jaune/orange/rouge.

4 G€ signifie milliards d'euros.

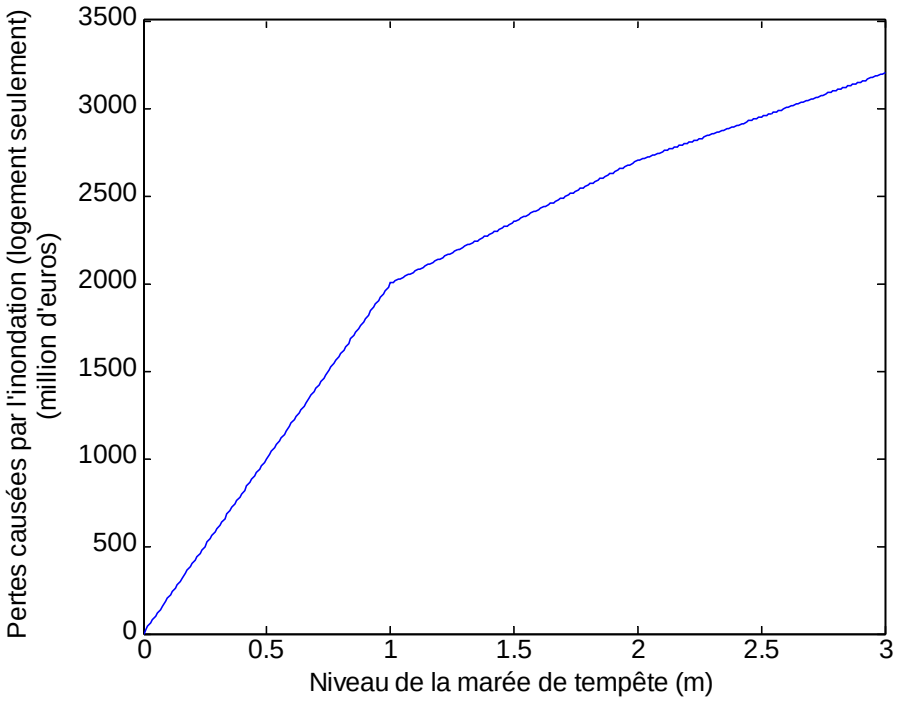


Analyse des bénéfices annuels, en l’absence de montée du niveau de la mer

Pour évaluer ces bénéfices, on part d’un recensement des logements en fonction de leur altitude[5], le long de la côte de la région Languedoc-Roussillon (voir la figure 11.2 et Le Cozannet *et al.*, 2009). On a aujourd’hui 104 500 logements entre 0 et 1 m d’élévation, 35 400 entre 1 et 2 m, et 25 000 entre 2 et 3 m. On suppose que ces logements sont répartis de façon homogène dans chacune de ces tranches d’élévation. On va supposer que les pertes lorsqu’un logement est inondé de manière temporaire sont de 20 000 € (soit 20 % de la valeur de construction). On peut donc ainsi calculer les pertes causées aux logements par l’inondation engendrée par une marée de tempête, en fonction de l’amplitude de celle-ci et en supposant que la côte n’a aucune protection. Les résultats sont dans la figure 11.3. On peut noter qu’en absence de protection côtière, les pertes potentielles engendrées par une marée de tempête en région Languedoc-Roussillon sont très importantes, et pourraient dépasser 2 milliards d’euros pour la tempête centennale.

Figure 11.3. Pertes causées aux logements pour différents niveaux de marée de tempête.

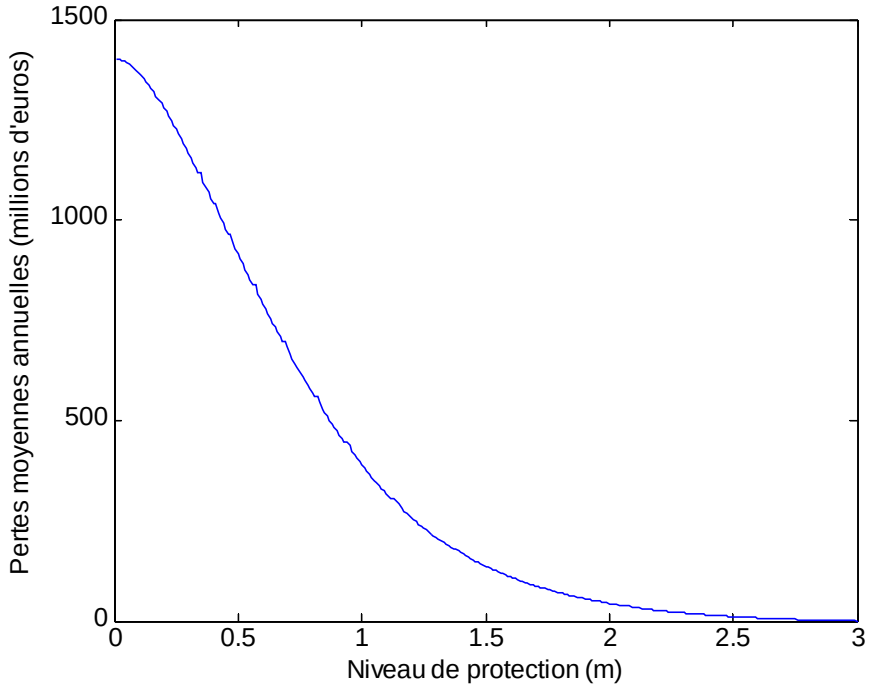
5 Il est important de noter les limites des données topographiques utilisées, la base BDTopo de l’IGN. Des données Lidar plus précises sur une partie du littoral ont en effet montré que les erreurs de cette base pouvaient être importantes (source : BRGM). Pour une définition opérationnelle des protections de la région, il serait donc nécessaire de commencer par une collecte d’informations géographiques de plus grande qualité que ce qui est aujourd’hui disponible.



On peut noter que ces pertes sont probablement surestimées, surtout pour les petites marées de tempête, car on a supposé que le patrimoine était réparti de manière homogène à l'intérieur de chaque tranche d'élévation de 1 m. En réalité, il est probable qu'il y ait beaucoup moins de bâtiments et d'infrastructure entre 0 et 0,5 m d'élévation qu'entre 0,5 et 1 m. Mais en l'absence de données plus précises, cette analyse est bâtie sur l'hypothèse la plus simple. Bien évidemment, les décisions d'investissement d'adaptation devront se fonder sur des données plus précises, qu'il faudra donc collecter. Cette collecte représentera d'ailleurs elle-même un investissement significatif.

À partir des fréquences de la figure 11.1 et des pertes de la figure 11.3, on peut calculer les pertes moyennes annuelles causées par les marées de tempêtes, en l'absence de toute protection. Ainsi, avec nos hypothèses, on trouve une perte annuelle de 350 M€. En supposant qu'on ait la même perte pour les entreprises, on aboutit à 700 M€ de pertes annuelles assurables. À cela s'ajoutent les pertes non assurables, qui incluent les dommages sur les infrastructures (réseaux routiers, électrique, adduction d'eau et assainissement, etc.) et les bâtiments publics. On considère souvent que les pertes directes totales (assurables et non assurables) sont le double des pertes assurables, donc ici 1 400 M€ par an. On néglige ici les pertes indirectes (comme celles sur la production industrielle ou sur les inégalités), car elles sont extrêmement difficiles à estimer (l'encadré « Les pertes indirectes » identifie ces impacts indirects et propose des pistes pour les évaluer).

Figure 11.4. Pertes annuelles dues aux marées de tempêtes dans la région Languedoc-Roussillon, en fonction de niveau de protection sur la côte (supposé uniforme).



Cela est bien entendu en l'absence de protection. Pour prendre en compte une protection à un niveau donné, on peut supposer que les pertes sont nulles pour toute marée de tempête d'amplitude inférieure à ce niveau et inchangées au-delà de ce niveau[6]. La figure 11.4 montre les pertes annuelles dues aux marées de tempêtes, en fonction de niveau de protection sur la côte, supposé uniforme sur toute la côte. On retrouve les 1 400 M€ en l'absence de protection, et on constate que les pertes diminuent rapidement avec le niveau de protection, pour atteindre 920 M€ pour une protection au niveau de 50 cm, 395 M€ pour une protection au niveau de 1 m et 44 M€ pour des protections de 2 m. En reprenant notre hypothèse initiale d'une protection de 1 m, on a donc des pertes annuelles moyennes de 395 M€.

Les pertes indirectes

Les pertes indirectes sont difficiles à évaluer, mais elles doivent être prises en compte. Certaines pertes sont purement économiques. Ainsi, au coût de remplacement d'une usine détruite, il faut ajouter la perte de production pendant le délai réel de reconstruction, qui peut atteindre plusieurs années. De même, dans l'habitat, la destruction d'une maison qui ne peut être reconstruite avant un an a un coût total égal au coût de reconstruction de la maison, plus la valeur d'un an de « service logement » produit par la maison. La valeur de cette perte de production au sens le plus large peut être très élevée, surtout quand des besoins fondamentaux sont en jeu (logement, santé, emploi, etc.). Appliquée à l'ensemble du système économique, cette différence peut être significative, principalement pour les catastrophes de grande échelle. Dans le cas de Katrina, on estime que ces pertes économiques indirectes sont de l'ordre de 50 milliards de dollars soit 50 % des pertes directes (Hallegatte, 2008 ; Lousiana Recovery Authority : http://lra.louisiana.gov/).

Il est délicat d'attribuer une valeur économique à d'autres pertes, qui sont plus éloignées de la sphère économique (par exemple, les pertes en vies humaines, les conséquences psychologiques et sociales sur les rescapés, ou l'impact sur les inégalités). Les négliger n'est toutefois pas une solution, car cela

6 Cette hypothèse suppose d'une part qu'il n'y a jamais de rupture de digue quand la hauteur d'eau est inférieure à la hauteur de la digue et d'autre part qu'une digue est totalement inefficace lors qu'elle est dépassée par la hauteur de l'eau. Ce dernier point est vrai dans certains cas, comme à La Nouvelle-Orléans lors du cyclone Katrina, car les digues ont alors totalement lâché. Dans le cas où les digues sont capables de résister à leur submersion totale, elles peuvent réduire le débit d'eau derrière la digue et donc limiter les pertes.

revient à leur attribuer une valeur nulle, ce qui est inacceptable.

Prenons l'exemple des pertes en vies humaines. En général, on transforme ces pertes en vies humaines en valeur économique en utilisant la « valeur statistique d'une vie humaine ». Cette méthode est très controversée, en particulier parce que ce terme suggère de manière déplacée l'existence d'un marché sur lequel on pourrait acheter et vendre des vies humaines. Il serait donc préférable de remplacer ce terme par « la volonté à payer de la société pour réduire les risques », qui est nettement plus acceptable.

L'idée derrière ce concept est la suivante. Il existe de multiples façons de sauver des vies : on peut investir dans la santé (par exemple, installer un scanner dans l'hôpital d'une petite ville), améliorer les infrastructures (par exemple, les infrastructures routières), réglementer plus durement la pollution urbaine, limiter la vitesse limite sur la route, durcir les réglementations incendie dans les habitations, etc. Toutes ces actions sauvent des vies et ont un coût. L'objectif de l'usage d'une volonté de la société à payer pour réduire les risques, appliqué à chacun de ces domaines, est d'éviter de dépenser beaucoup dans un secteur pour sauver peu de vies, alors qu'un investissement équivalent dans un autre secteur sauverait plus de vies. Cette valeur ne sert donc pas à évaluer les vies humaines, mais à distribuer des ressources limitées entre des secteurs, de manière à sauver le maximum de vies.

Des enquêtes suisses, suédoises et anglaises ont déterminé quelle somme les Européens seraient prêts à consacrer pour réduire les risques. Un consensus semble se dégager pour estimer la valeur statistique de la vie à environ 120 fois le PIB par habitant, soit entre 1 et 3 millions d'euros (2,45 pour le France). En France, le ministère des Transports et de l'Équipement recommande l'utilisation d'une valeur de la vie humaine de 1,5 million d'euros pour les transports en commun, et de 1 million d'euros pour les transports individuels. De la même manière, un blessé grave est comptabilisé à 225 000 € dans les transports en commun et à 150 000 € pour les transports individuels. Pour les blessés légers, ces chiffres deviennent 33 000 et 22 000 € (Source : Instruction cadre relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructure, 2005).

Il faut aussi évaluer les pertes culturelles et historiques. Pour cela, il est utile de distinguer la valeur d'existence et la valeur d'usage. La valeur d'existence du patrimoine est liée au fait que la conservation du patrimoine est une volonté en soi, à laquelle on peut attribuer une valeur économique même si elle n'apporte aucun revenu et ne satisfait aucun service. Cette valorisation est complexe car elle repose sur des considérations éthiques (voire philosophiques). En conséquence, elle doit être issue d'un processus politique. La valeur d'usage du patrimoine est liée à l'usage qui est fait de ce patrimoine, par exemple dans le cadre d'activités touristiques. Cette valeur est plus simple à évaluer, par exemple en chiffrant les revenus tirés d'une activité touristique ou en utilisant les coûts de transport (approche hédoniste).

Pour faire simple, on peut évaluer les pertes indirectes à partir du temps de reconstruction. En supposant une reconstruction sur 1 an, cela donne des pertes indirectes de l'ordre de 10 % des pertes directes. Pour des catastrophes de grande échelle, la reconstruction se fait plutôt sur 5 ans, et les pertes indirectes atteignent 50 % des pertes directes.

Dans une situation de niveau de la mer constant, cette courbe permet de faire une analyse coût-bénéfice et de déterminer le niveau « optimal » de protection.

Mais il faut faire attention à ne pas négliger d'autres facteurs importants. En effet, tous les coûts et tous les bénéfices ne sont pas ici pris en compte : par exemple, l'impact des digues sur la biodiversité ou la beauté des paysages n'a pas été inclus, et certains impacts des inondations ont également été négligés (comme l'effet sur les inégalités sociales). De plus, on suppose qu'il n'y a pas de risque de rupture de digue, alors que ce point est crucial dans la gestion des risques, notamment pour éviter les pertes en vies humaines. Enfin, il est important de noter que, de part l'utilisation d'une analyse coût-bénéfice et du taux d'actualisation du Commissariat Général au Plan, on suppose que les ressources non investies dans les protections peuvent être utilisées pour d'autres investissements productifs, sur lesquels la présence ou non de digues n'a pas de conséquences. Cette hypothèse est probablement bien vérifiée pour des calculs à l'échelle nationale pour un pays

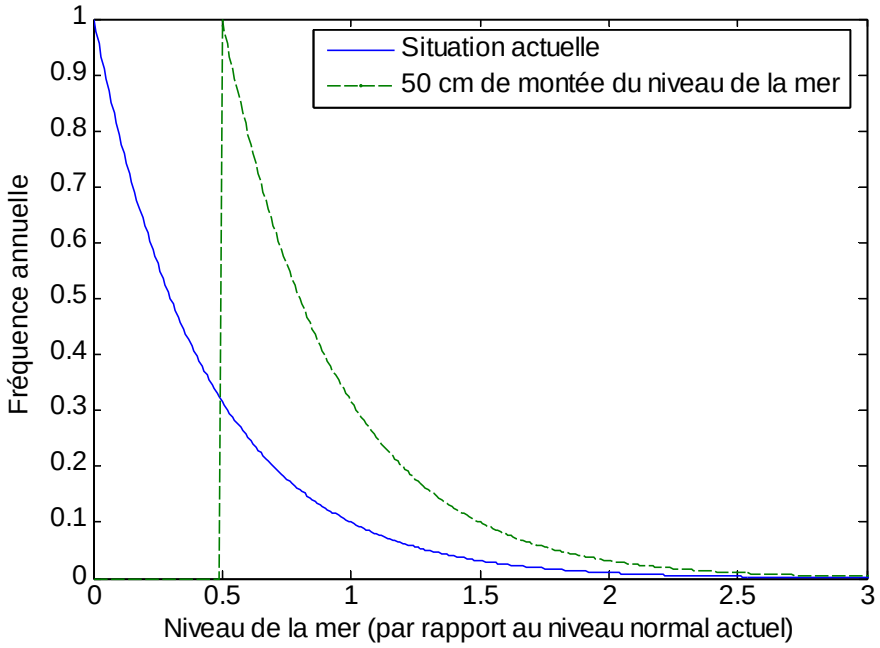
comme la France[7], mais ce n'est pas le cas à l'échelle d'une commune côtière qui investit uniquement dans une zone à risque d'inondation.

Ensuite, dans l'analyse de l'adaptation, il ne faut pas prendre comme présupposé que la situation actuelle est optimale : la gestion des risques a souvent été conduite de manière empirique, et il est tout à fait possible qu'il existe un « déficit d'adaptation » dans la situation actuelle (*adaptation gap* en anglais), c'est-à-dire un niveau de protection insuffisant.

Analyse des bénéfices annuels, après une montée du niveau de la mer de 50 cm

Regardons maintenant la situation avec 50 cm de montée de niveau de la mer sur le siècle. On effectue exactement la même analyse que précédemment, mais en décalant de niveau moyen de la mer de 50 cm. La figure 11.1 devient alors la figure 11.5.

Figure 11.5. Fréquence annuelle des marées de tempête, en fonction de leur amplitude, et par rapport au niveau normal actuel de la mer. Avec 50 cm de montée du niveau de la mer, les niveaux élevés deviennent plus fréquents.



La figure 11.4, qui donne les pertes moyennes en fonction du niveau de protection, devient la figure 11.6, qui présente les pertes annuelles pour deux niveaux de la mer, l'actuel et celui avec 50 cm de montée du niveau de la mer.

Quand on considère une montée du niveau de la mer de 50 cm, il faut faire une différence entre les cas où la protection actuelle est supérieure à 50 cm – auxquels cas il n'y a pas de perte permanente de capital – et les cas où la protection actuelle est inférieure à 50 cm. Dans ce dernier cas, en l'absence de mesure de protection additionnelle, certains logements et certaines infrastructures seront inondés de manière permanente, et pas seulement lors des marées de tempête. On suppose que dans ce cas, ces logements sont détruits définitivement, et ne sont donc pas à prendre en compte dans le calcul des pertes liées aux marées de tempête, faisant ainsi

7 Ce n'est pas le cas pour les petites îles comme les Maldives ou Tuvalu.

diminuer ces dernières. C'est ce qui explique que dans la figure 11.6, en présence d'une protection inférieure à 50 cm, les pertes annuelles sont égales à 1193 M€ avec 50 cm de montée du niveau de la mer contre 1400 M€ avec le niveau de la mer actuel : cette diminution du niveau de risque traduit simplement le fait qu'un grand nombre de logements très vulnérables sont définitivement détruits ! Cela est vrai dans notre exemple car il y a beaucoup plus de logements entre 0 et 1 m d'élévation qu'au-dessus d'un mètre, et parce qu'on ne regarde pas ici les pertes définitives en capital (qui seront analysées plus bas).

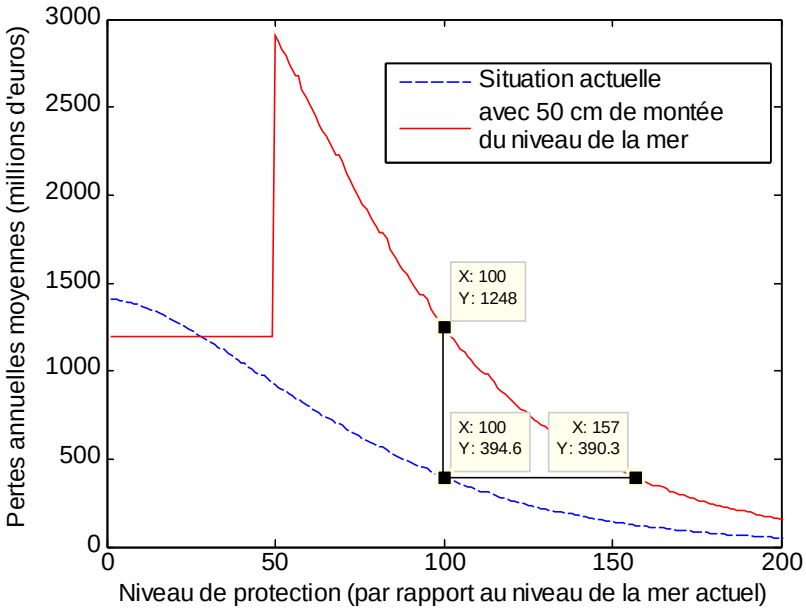
Si l'on suppose (de manière arbitraire en l'absence de données) que la région Languedoc-Roussillon dispose actuellement d'une protection d'un niveau de 1 m (ce qui correspond à un muret n'empêchant pas la vue sur mer), supérieure à la montée du niveau de la mer, il n'y a pas de perte définitive de capital. Dans ce cas, les pertes annuelles liées aux marées de tempête sont de 395 M€ avec le niveau de la mer actuel. En maintenant ces protections inchangées, et avec 50 cm de montée du niveau de la mer, ces pertes augmenteraient jusqu'à 1250 M€, soit une augmentation de 220 %.

Pour maintenir les pertes à leur niveau initial de 395 M€, c'est-à-dire pour faire une « adaptation à niveau constant », il faudrait faire passer les protections de 1 m par rapport au niveau de la mer actuel à 1,57 m par rapport au niveau de la mer actuel. De la même manière, en cas d'augmentation du niveau de la mer de 1 m, il faudrait surélever les digues jusqu'à 2,11 m par rapport au niveau de la mer actuel.

Il est intéressant de noter que pour faire une adaptation à niveau constant, donc maintenir le niveau de pertes annuelles, il faut élever les digues de plus que la montée du niveau la mer (57 cm *vs* 50 cm ; 111 cm *vs* 100 cm). En effet, augmenter les digues d'autant que la montée du niveau la mer (ici 50 ou 100 cm) maintient constante la probabilité d'une inondation. Mais comme l'inondation serait plus destructrice (car il y a plus de capital derrière la digue), la perte moyenne annuelle augmenterait. Pour maintenir constantes les pertes moyennes annuelles, il faut donc faire diminuer la probabilité d'occurrence d'une inondation.

Il faut également ne pas prendre le niveau de risque actuel comme une référence absolue, car il est tout à fait possible que la situation actuelle soit sous-optimale. Une stratégie optimale d'adaptation au changement climatique peut très bien conduire à une diminution du niveau de risque (si ce niveau est « trop » élevé aujourd'hui) ou à une augmentation du risque (si ce niveau est « trop » faible aujourd'hui, et donc engendre des coûts de protection trop élevés).

Figure 11.6. Pertes annuelles dues aux marées de tempêtes dans la région Languedoc-Roussillon, en fonction du niveau de protection sur la côte (supposé uniforme et mesuré par rapport au niveau de la mer actuel). On peut noter que si la protection est inférieure à 50 cm, alors elle est intégralement sous l'eau avec une montée du niveau de la mer de 50 cm, et devient donc totalement inutile (partie horizontale de la courbe rouge).



Analyse des bénéfices totaux, pour une montée du niveau de la mer de 1 m sur un siècle

Les bénéfices que l'on retire d'une protection se définissent comme « la valeur présente des dommages moyens évités grâce à la protection ». Mathématiquement, ils se calculent comme la somme, année après année sur la durée de vie de la protection, du bénéfice actualisé apporté par la protection, donc la différence entre les pertes avec une protection de x m et les pertes en l'absence de toute protection. Dans les cas les plus simples, les bénéfices dépendent de cinq paramètres : la durée de vie de la protection, le taux d'actualisation, la probabilité d'occurrence, les dommages que la protection permettrait d'éviter aujourd'hui, et le taux de croissance de ces dommages dans le temps (c'est-à-dire la croissance de la population et de l'économie dans la zone à risque).

Ici, on suppose d'abord que la population et l'économie ne changent pas ; leurs changements seront pris en compte plus bas. On suppose également que la durée de vie de la protection est de 100 ans, entre 2000 et 2100. On suppose enfin que le niveau de la mer augmente linéairement de 1 cm par an, entre 0 cm en 2000 et 100 cm en 2100. Le niveau chaque année n est donc simplement $Y_n = n$ (en centimètre par rapport au niveau de 2000).

Pour calculer les pertes, on fait la somme des logements définitivement perdus en raison de la montée du niveau moyen de la mer et des dommages causés par les marées de tempête. Pour les pertes permanentes, on a vu qu'il y avait 104 500 logements entre 0 et 1 m d'élévation, représentant une valeur de construction de 100 000 euros chacun, soit un total de 10,5 milliards d'euros. On ne tient compte ici que de la valeur de construction, et pas de la valeur du terrain de bord de mer, en supposant que la valeur tirée de la proximité de la mer est simplement transférée à un terrain un peu plus élevé, et que le logement est reconstruit à l'intérieur des terres, définitivement hors de danger. Il faut noter que si ce transfert n'a pas d'impact sur la valeur agrégée pour la société, il peut avoir des effets redistributifs brutaux et importants. Ces effets sont toutefois négligés ici.

En supposant que les entreprises représentent la même valeur que les logements, et

que les infrastructures publiques ont la même valeur que le patrimoine privé, on obtient une valeur totale de 42 G€ entre 0 et 1 mètre. En supposant une répartition homogène, les pertes pour une année donnée sont donc égale à 0 € si le niveau de la mer est inférieur au niveau de protection, et de 42 G€ multiplié par l'augmentation annuelle de niveau de la mer (soit 42 G€ $\times$ 0,01/1 = 420 M€/an) si le niveau de protection est dépassé. On obtient donc une série temporelle de pertes définitives.

Pour les pertes liées aux marées de tempête, on peut réaliser l'analyse de la section précédente pour chaque année entre 2000 et 2100, en faisant varier le niveau de la mer selon notre scénario. On obtient ainsi une série temporelle de pertes liées aux marées de tempête.

Les figures 11.7, 11.8 et 11.9 donnent deux exemples de ces séries temporelles, en l'absence de protection (figure 11.7), et pour des niveaux de protections de 50 cm (figure 11.8) et 100 cm (figure 11.9). On peut noter que pour des niveaux de protection faible, les coûts annuels liés aux tempêtes sont plus importants que la destruction des maisons situées dans les zones les plus basses. En effet, subir plusieurs tempêtes et reconstruire systématiquement peut s'avérer plus coûteux que l'abandon du capital. Cet effet disparaît avec la construction d'une protection de 1 m en climat présent, mais revient en force avec la hausse du niveau de la mer.

Figure 11.7. Pertes annuelles (en pertes permanentes de capital et en pertes moyennes annuelles liées au risque de marée de tempête) pour une montée du niveau de la mer de 1 m jusqu'en 2100, avec aucune protection. Le coût de destruction annuel est constant, car le capital est supposé réparti de manière homogène dans chaque couche de 1 m d'élévation et que, chaque année, un cm de plus est inondé de manière définitive. Les coûts annuels des tempêtes sont initialement très élevés parce que les réparations récurrentes sont plus chères que l'abandon des zones les plus basses. La destruction des zones les plus vulnérables permet une diminution des coûts annuels.

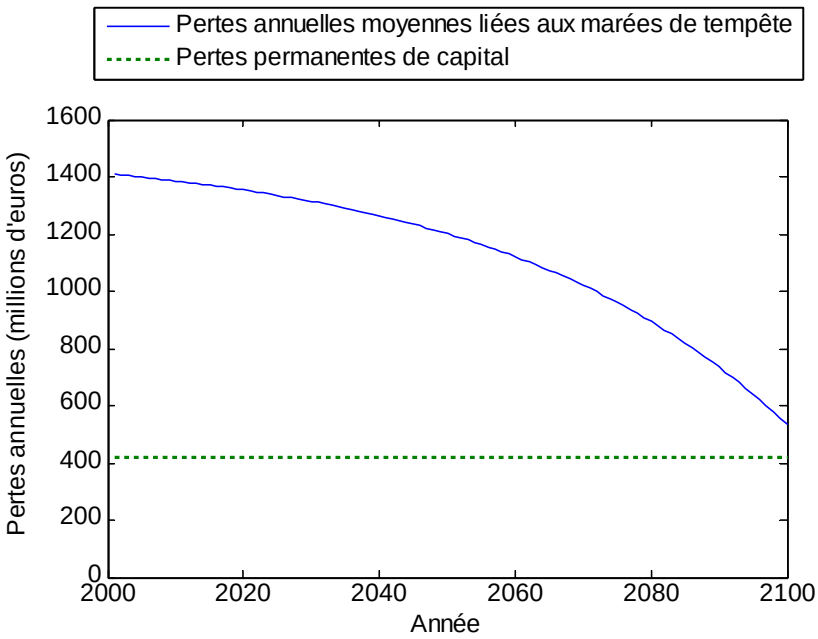


Figure 11.8. Pertes annuelles (en pertes permanentes de capital et en pertes moyennes annuelles liées au risque de marée de tempête) pour une montée du niveau de la mer de 1 m jusqu'en 2100, avec un niveau constant de protection à 50 cm au-dessus du niveau actuel de la mer. Le pic de pertes permanentes correspond au moment où la protection est dépassée, et où tout le capital situé à moins de 50 cm d'altitude est perdu. À ce moment, les pertes liées aux marées de tempête diminuent car du capital vulnérable a disparu.

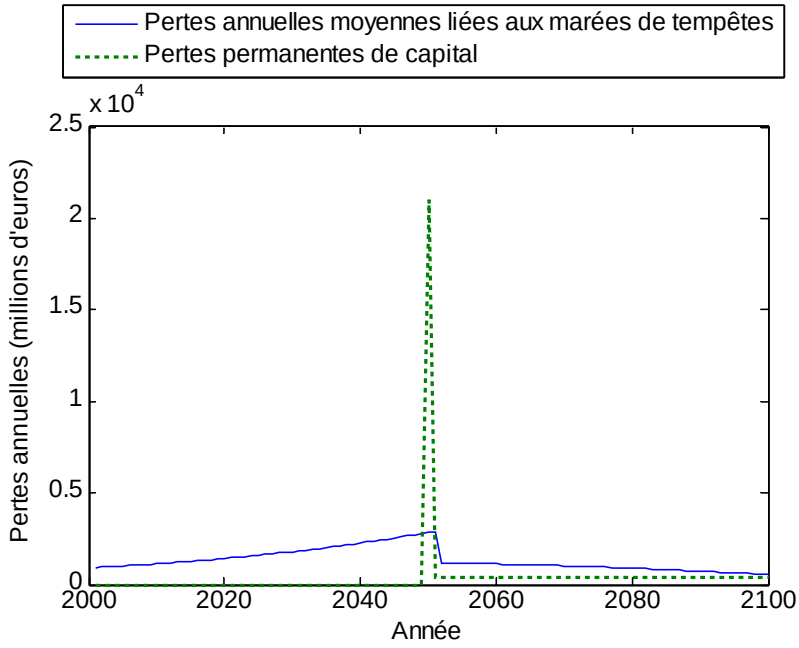
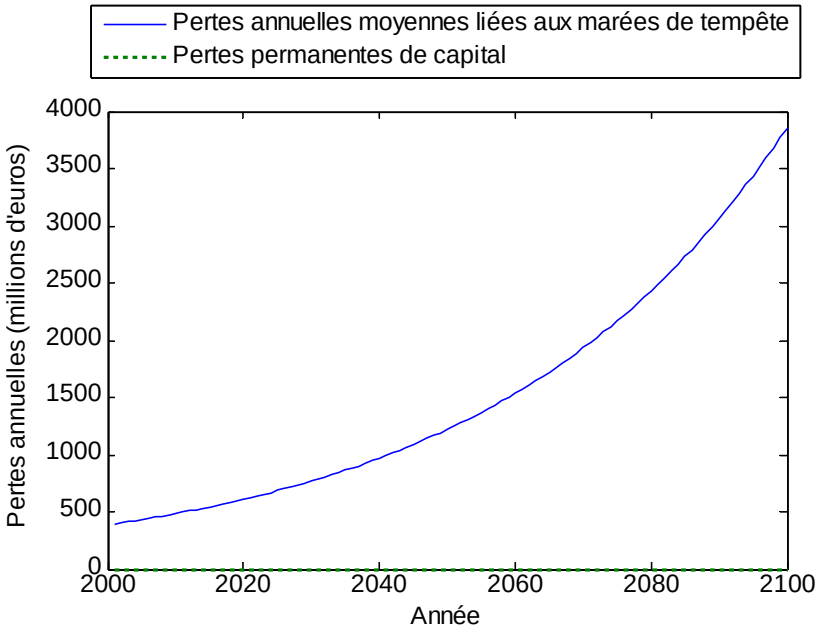


Figure 11.9. Pertes annuelles (en pertes permanentes de capital et en pertes moyennes annuelles liées au risque de marée de tempête) pour une montée du niveau de la mer de 1 m jusqu'en 2100, avec un niveau constant de protection à 100 cm au-dessus du niveau actuel de la mer. Dans ce cas, il n'y a pas de perte permanente de capital avant 2100.



Il est essentiel de noter qu'on a supposé ici une urbanisation inchangée, et un coût constant de construction et de réparation des logements. Ces hypothèses sont évidemment fausses. D'abord, il y a un processus continu d'urbanisation dans la région Languedoc-Roussillon, et le nombre de logements à risque est actuellement en augmentation. Selon les mesures qui seront prises pour limiter cette urbanisation, le niveau de risque pourra être très différent dans le futur. Cela peut être pris en compte simplement avec des règles de trois sur les pertes : si on estime que l'urbanisation dans la zone va augmenter de 1 % par an, il suffit de faire augmenter les pertes de 1 % par an dans les figures 11.7, 11.8 et 11.9.

Cela n'est toutefois vrai que si les choix concernant les protections n'influencent pas l'urbanisation dans la zone protégée, ce qui est une hypothèse discutable. Si les protections attirent les investissements dans la zone, il faut tenir compte du fait qu'on augmente le niveau de perte dans les cas où les protections sont dépassées, ou dans le cas où elles rompent. La mise en place de protection peut donc aussi faire augmenter les pertes. À l'opposé, si l'absence de protection entraîne une diminution des investissements et de la croissance économique, alors les bénéfices liés à la protection peuvent être plus élevés que ce qu'évalue l'analyse coût-bénéfice (on peut aussi considérer que l'absence d'investissements alternatifs en l'absence de protection réduit le taux d'actualisation). En l'absence de possibilité de mise en place de politiques spécifiques pour éviter ces cercles vicieux, il faut les prendre en compte dans l'analyse coût-bénéfice.

Aussi, les coûts de construction et de réparation pourraient varier dans le futur, même s'il est improbable qu'ils changent beaucoup. Plus complexe toutefois, une anticipation parfaite de la montée du niveau de la mer modifierait nettement les résultats. Par exemple, dans le cas d'une protection fixe de 50 cm (figure 11.8), les propriétaires de logement pourraient anticiper les pertes de capital de 2050, quand la digue devient trop fragile, et s'assurer que – en 2050 – les logements soient au terme de leur durée de vie (c'est-à-dire totalement déprécié) et aient donc une valeur nulle. En pratique, ceci est toutefois difficilement envisageable, pour trois raisons. D'abord, une zone urbanisée se compose de multiples types de capital (logements, routes, réseaux d'eau, etc.) qui ont des durées de vie très différentes, et il est difficile d'imaginer que tous ces capitaux puissent arriver à dépréciation en même temps. Ensuite, cette idée d'arriver en 2050 à une situation où le capital serait totalement déprécié est plus un artefact des modèles économiques qu'une réalité : un logement demande un entretien régulier pour maintenir la qualité de vie qu'il propose. Faudrait-il arrêter tout entretien des logements et vivre jusqu'en 2050 dans des habitations qui se dégraderaient et dont le confort diminuerait ? Et ferait-on la même chose avec les infrastructures ? Vivrait-on avec des routes dont la qualité (et donc la sécurité) se dégraderait avec le temps ? On voit bien que cette approche n'est pas réaliste, et que l'on a que le choix entre abandonner du capital encore utilisable et continuer d'entretenir un capital qu'il faudra ensuite abandonner en bon état. Enfin, troisième raison, ceci demanderait une anticipation parfaite et une prise en compte rationnelle de la montée du niveau de la mer, qui devrait avoir déjà commencé. L'observation des comportements récents ne soutient pas cette hypothèse. Il est cependant à noter que les capacités d'anticipation collective, et les impulsions de l'État ou des collectivités locales peuvent permettre une action concertée, par exemple de retrait des côtes, en lien avec les plans d'urbanisation ou l'action du conservatoire du littoral. Au final, il est ainsi probable que cette étude surestime légèrement les pertes totales en sous-estimant la capacité d'anticipation des agents économiques.

Calcul du bénéfice actualisé en 2000

On peut ensuite calculer la perte actualisée pour chacun des niveaux de protection, par exemple en utilisant le taux d'actualisation proposé par le Commissariat au Plan (cf. encadré « Le taux d'actualisation »). Les résultats sont présentés dans le tableau 11.1.

Pour chaque niveau de protection, on peut calculer le coût résiduel de la montée du niveau de la mer, à un niveau de protection donné. Par exemple, si les protections

actuelles sont à 1 m et restent inchangées au cours du siècle, alors le coût de la montée du niveau de la mer en Languedoc-Roussillon est de 17 G€. Ce coût varie largement en fonction du niveau actuel de protection, d'un maximum de 19 G€ pour une protection de 50 cm à 2,1 G€ pour une protection à 2 m et 236 M€ pour une protection à 3 m.

Ce tableau permet également de prendre des décisions sur des investissements de protection, en fonction de la situation actuelle : selon le niveau de protection actuel. En effet, l'investissement de 3,9 G€ dans de nouvelles protections est rentable ou non (nota : ceci est en supposant qu'il n'y a pas aujourd'hui de frais de maintenance). Par exemple, si les protections actuelles sont de 1 m, les pertes sont de 28 G€. Faire passer les protections à 2 m coûte 3,9 G€ et fait diminuer les pertes de 24,5 G€ (28 G€ – 3,5 G€), c'est donc un investissement très rentable. En revanche, si les protections actuelles sont de 3 m, les faire passer à 4 m fait diminuer les pertes de 400 M€ à 40 M€, soit un gain de 360 M€ pour un coût de 3,9 G€, ce qui n'est pas rentable.

Tableau 11.1. Pertes et coût de la montée du niveau de la mer en région Languedoc-Roussillon, en fonction du niveau de protection entre 2000 et 2100, et en supposant un niveau uniforme d'endiguement sur l'ensemble de la région et aucune autre action de protection.

Niveau constant de protection entre 2000 et 2100	Valeur nette présente des pertes, pour 1 m de montée du niveau de la mer en 2100 (valeur sans montée du niveau de la mer)			Coût résiduel de la montée du niveau de la mer
	Pertes définitives de capital	Pertes liées aux marées de tempêtes	Pertes totales	
0	12 G€ (0 €)	37 G€ (40 G€)	49 G€ (40 G€)	9 G€
0,50 m	7 G€ (0 €)	39 G€ (27 G€)	46 G€ (27 G€)	19 G€
1 m	0 G€ (0 €)	28 G€ (11 G€)	28 G€ (11 G€)	17 G€
2 m	0 G€ (0 €)	3,5 G€ (1,4 G€)	3,5 G€ (1,4 G€)	2,1 G€
3 m	0 G€ (0 €)	400 M€ (164 M€)	400 M€ (164 M€)	236 M€
4 m	0 G€ (0 €)	40 M€ (0,5 M€)	40 M€ (0,5 M€)	39,5 M€

Avec nos données, le coût de construction des digues est indépendant de leur hauteur. Dans un tel cas, si des digues sont construites, il est rationnel de les faire très hautes, pour limiter au maximum les impacts résiduels liés aux marées de tempêtes. Il faut toutefois prendre en compte les aspects non monétaires qui n'ont pas été mesurés ici, notamment les impacts de digues hautes sur l'apport récréatif des plages, sur les paysages et sur la biodiversité. Ces impacts peuvent expliquer pourquoi on préfère construire des digues de hauteur limitée, quitte à ne pas faire disparaître totalement les risques d'inondation.

Le coût de la montée du niveau de la mer

Le tableau 11.1 donne le coût de la montée du niveau de la mer pour un niveau de protection donné, c'est-à-dire les impacts résiduels du changement climatique, hors coût d'adaptation. Mais les impacts totaux du changement climatique sont la somme des impacts résiduels et des coûts d'adaptation. C'est ce que l'on va calculer ici.

Pour ce faire, il faut définir une situation de référence, et en particulier décider si la situation de référence est (1) la situation actuelle, que l'on suppose maintenue inchangée dans l'avenir ; (2) la situation actuelle, que l'on suppose modifiée à l'avenir selon un scénario de référence sans changement climatique ; (3) une situation optimale en l'absence de changement climatique. Selon le choix du scénario de référence, les résultats sont complètement différents. En d'autres termes, il faut décider si l'on définit l'adaptation comme « l'adaptation stricte » (partant d'une situation optimale et atteignant une situation optimale), « l'adaptation optimale » (partant d'une situation sous-optimale et atteignant une situation optimale), ou « l'adaptation à niveau constant » (partant d'une situation sous-optimale et atteignant une situation sous-optimale équivalente).

Adaptation optimale : la situation de référence est la situation actuelle avec une protection de 1 m

En supposant un niveau de protection actuel de 1 m, la situation actuelle apparaît sous-optimale. En effet, en supposant que le niveau de la mer actuel est stable, alors le coût annuel des inondations causées par les marées de tempête avec une protection de 1 m est de 395 M€ par an, ce qui correspond sur la période 2000-2100 à une valeur nette présente (en 2000) de 11,4 G€. Il serait donc rentable d'investir dans des protections supplémentaires à un niveau élevé, car le coût d'un tel investissement (3,9 G€ jusqu'à 6 m) est largement inférieur aux pertes évitables (11,4 G€). On peut donc dire que dans ce cas, et si on s'en tient aux coûts monétaires, il y a aujourd'hui un déficit d'adaptation important, qui demanderait un investissement de 3,9 G€ pour des digues d'au moins 4 m (ce qui abaisserait les pertes annuelles à un niveau inférieur à 0,5 M€). Il faut cependant bien garder à l'esprit les coûts non monétaires qui seraient certainement très différents entre une digue de 1 m et de 4 m.

En supposant que la digue est à 1 m, et que cette situation est considérée comme satisfaisante, on peut évaluer le coût de la montée du niveau de la mer comme la somme de l'investissement d'adaptation (considéré comme superflu sans changement climatique, mais désirable avec changement climatique) et de l'impact résiduel :

– 17 G€ en l'absence d'investissement d'adaptation ;

– 6 G€ avec adaptation pour faire passer la digue de 1 m à 2 m, si la situation de référence est la situation actuelle avec déficit d'adaptation, c'est-à-dire une situation sans changement climatique avec un niveau de protection inchangé à 1 m (6 G€ = 3,9 G€ d'investissement de protection et 2,1 G€ d'impact résiduel) ;

– 4,1 G€ avec adaptation pour faire passer la digue de 1 à 3 m, si la situation de référence est la situation actuelle avec déficit d'adaptation, c'est-à-dire une situation sans changement climatique avec un niveau de protection inchangé à 1 m (6,9 G€ = 3,9 G€ d'investissement de protection et 236 M€ d'impact résiduel) ;

– 3,9 G€ avec adaptation pour faire passer la digue de 1 à 4 m, si la situation de référence est la situation actuelle avec déficit d'adaptation, c'est-à-dire une situation

sans changement climatique avec un niveau de protection inchangé à 1 m (3,9 G€ = 3,9 G€ d'investissement et 39,5 M€ d'impact résiduel).

Adaptation stricte : la situation de référence est la situation optimale (avec une protection de 2 m)

On suppose toujours que les digues actuelles sont à 1 m au-dessus du niveau de la mer, mais on admet maintenant que la situation considérée comme « optimale » serait d'avoir des digues de 2 m. Nos chiffres suggèrent qu'une protection plus élevée serait encore meilleure d'un point de vue économique, mais on admet que pour des raisons esthétiques et d'attractivité touristique, les limiter à 2 m est considéré comme préférable. Dans une telle situation, il existe donc un déficit d'adaptation avec des digues à 1 m au lieu de 2 m.

Ce déficit d'adaptation demande – même sans changement climatique – un investissement de 3,9 G€ pour améliorer les digues et les passer à 2 m. En raison du changement climatique, toutefois, on admet qu'il faut plutôt faire passer ces digues à 3 m, c'est-à-dire les 2 m de la situation optimale actuelle plus 1 m pour prendre en compte la montée du niveau de la mer au cours du siècle. Comme le coût d'une digue ne dépend que marginalement de sa hauteur, le surcoût d'investissement est proche de zéro, et il ne reste donc comme coût du changement climatique que le coût résiduel, c'est-à-dire 236 M€.

On rappelle qu'en prenant la situation actuelle à 1 m comme situation de référence et en supposant une adaptation avec des digues à 3 m, on aboutissait dans la section précédente à des coûts du changement climatique de 4,1 G€.

On voit donc que, en prenant une situation optimale comme situation de référence et en ne comptant pas le financement du déficit actuel d'adaptation dans les coûts du changement climatique, on fait passer ce coût de 4,1 G€ à 236 M€. Ce calcul démontre que lorsqu'il existe un déficit d'adaptation et que la situation actuelle n'est pas optimale, alors le choix de la situation de référence est un paramètre clé du calcul du coût du changement climatique.

Adaptation à niveau constant : la situation de référence est la situation actuelle avec une protection de 1 m

Si une adaptation à niveau constant est mise en place pour l'année 2100, alors on cherche à avoir, à cette date et avec 1 m de montée du niveau de la mer, les mêmes pertes annuelles moyennes liées aux inondations qu'aujourd'hui avec des digues de 1 m et le niveau de la mer actuel, c'est-à-dire 395 M€/an. Comme expliqué plus haut, maintenir ce niveau de risque demande de rehausser les digues de 1 m à 2,1 m.

Dans ce cas, les pertes actualisées sur le siècle seraient de 1,1 G€ sans montée du niveau de la mer, mais elles atteignent 2,8 G€ avec une montée du niveau de la mer de 1 m sur le siècle. On peut noter que ces pertes résiduelles de 2,8 G€ sur le siècle sont inférieures aux pertes résiduelles sans changement climatique et sans adaptation (égales à 11 G€). Cela semble contradictoire avec le concept d'adaptation à niveau constant, mais reste vrai car le risque est ici moyenné (et actualisé) sur le siècle, alors qu'on suppose une adaptation à niveau constant en 2100, et non pas sur le siècle entier. En effet, comme on suppose ici que l'on choisit une fois pour toutes le niveau de protection en 2000, on suppose que l'on investit dès l'an 2000 dans des protections qui seront adaptées en 2100. Dans une telle situation, on a une forte « surprotection » au début du siècle, et on est en situation optimale à la fin du siècle.

En 2100, avec une montée du niveau de la mer de 1 m, l'adaptation à niveau constant (avec des digues de 2,1 m) conduit bien à un niveau de perte annuelle de 395 M€, comme dans la situation actuelle. Avant cette date, ces digues permettent toutefois de diminuer le niveau de pertes annuelles bien en deçà de cette valeur.

Dans cette stratégie, l'investissement est de 3,9 G€ pour augmenter le niveau des digues, les pertes résiduelles pour le siècle sont de 2,8 G€, et le coût du changement climatique est de 5,6 G€, soit 3,9 G€ d'investissement plus 1,7 G€ de pertes supplémentaires liées à la montée du niveau de la mer.

Adaptation optimale : la situation de référence est la situation actuelle avec une protection de 2 m

En guise de comparaison et d'illustration, on prend maintenant comme situation de référence la situation actuelle, mais on suppose que les digues actuelles sont à 2 m au-dessus du niveau de la mer. Dans ce cas, les pertes liées aux marées de tempête seraient de 44 M€ par an en l'absence de montée du niveau de la mer, soit une valeur nette présente en 2000 d'environ 1,4 G€. Sans changement climatique, il ne serait donc pas rationnel d'augmenter le niveau de défense, car le coût d'investissement pour mettre en place de hautes digues de 3,9 G€ serait supérieur aux pertes évitées de 1,4 G€. On peut donc dire qu'il n'y aurait pas de déficit d'adaptation aujourd'hui avec des digues (naturelles et artificielles) de 2 m.

Avec changement climatique, faire passer le niveau de protection de 2 m à 4 m ou plus n'apporterait un gain que d'environ 3,5 G€, légèrement inférieur au coût de modification, et l'investissement ne serait pas rentable. Le coût de la montée du niveau de la mer serait donc uniquement composé des coûts résiduels de 2,1 G€ liés à l'augmentation des risques d'inondation causée par les marées de tempête.

Comparaison des types d'adaptation

En supposant que les digues sont actuellement à 1 m, que la situation actuelle optimale serait avec des digues de 2 m, et que l'adaptation optimale après une montée de 1 m du niveau de la mer correspond à des protections de 3 m, on obtient le tableau d'adaptation 11.2.

Tableau 11.2. Application du tableau 1 à la situation de la région Languedoc-Roussillon et à la montée du niveau de la mer.

	Niveau de risque actuel (m)	Niveau de risque « optimal » (m)
Sans changement climatique	1	2
Avec changement climatique, en 2100	2,1	3

Il faut noter que les niveaux de 2,1 m et 3 m sont les niveaux pour l'année 2100. Comme on l'a expliqué plus haut, on suppose que l'on doit choisir le niveau de protection de l'ensemble du siècle en 2000, et donc que l'on investit dès l'an 2000 dans des protections qui seront adaptées en 2100. Dans une telle situation, on a une forte « surprotection » au début du siècle, et on est en situation optimale à la fin du siècle. On pourrait imaginer, sur la même base, une approche plus complexe visant à comparer les risques moyennés et actualisés sur l'ensemble du siècle. Cela démontre encore une fois qu'il y a de multiple façon de construire une stratégie d'adaptation et de gestion des risques.

Pour les stratégies envisagées ici, on peut calculer les coûts des actions et les risques résiduels. Les résultats sont présentés dans le tableau 11.3.

Cela montre par ailleurs que résorber le déficit d'adaptation, puis réaliser l'adaptation stricte, coûte plus cher (deux fois plus cher ici) que de passer directement de la situation initiale sous-optimale à une situation optimale avec changement climatique. Ici, le cas est caricatural car le coût de construction est identique quelle que soit la hauteur des digues. Mais dans toutes les stratégies, il est moins onéreux de passer directement d'une situation sous-optimale actuelle à la stratégie optimale avec changement climatique que de commencer par réduire le déficit d'adaptation, puis de s'intéresser à l'adaptation stricte. Il n'est donc pas désirable de séparer les problèmes entre la réduction du déficit d'adaptation dans le climat actuel et l'adaptation au changement climatique lui-même. Cela illustre le fait qu'il faut prendre en compte le changement climatique dans toutes les actions qui ont une influence sur le niveau des risques naturels, pour éviter de devoir réinvestir inutilement dans un avenir plus ou moins proche.

Tableau 11.3 Coûts et risques résiduels pour différentes définitions de l'adaptation, en supposant une adaptation à base de digue uniquement. Les coûts intangibles associés à la présence des digues (biodiversité, paysage, attractivité, etc.) ne sont pas pris en compte, mais augmentent avec la hauteur de la digue. Les mesures « douces » (par exemple, la recharge des plages) ne sont pas intégrées dans le calcul.

	Coût de construction et de maintenance des digues (hors coûts intangibles)	Risque résiduel après l'action, sans changement climatique	Risque résiduel après l'action, avec changement climatique
Pas d'action	0	11 G€	28 G€
Réduction du déficit d'adaptation actuel (passage de 1 à 2 m)	3,9 G€	1,4 G€	3,5 G€
Adaptation stricte (passage de 2 à 3 m)	3,9 G€	164 M€	400 M€
Adaptation optimale (passage de 1 à 3 m)	3,9 G€	164 M€	400 M€
Adaptation à niveau constant en 2100 (passage de 1 à 2,1 m)	3,9 G€	1,1 G€	2,8 G€

Limites de l'analyse coût-bénéfice

Bien sûr, on a supposé ici qu'il fallait fixer le niveau de protection en 2000, et jusqu'en 2100. On pourrait également imaginer des scénarios plus complexes, par exemple un scénario dans lequel on conserverait le niveau actuel de protection jusqu'en 2050, qui serait alors amélioré pour faire face à la montée du niveau de la mer. De tels scénarios demanderaient un travail supplémentaire, mais la méthode présentée ici serait inchangée.

De plus, d'autres mécanismes sont potentiellement importants. Par exemple, les populations peuvent être « averses aux risques », ce qui signifie qu'elles préfèrent perdre 10 € avec certitude, plutôt que de courir le risque de perdre 100 € avec une probabilité de 10 %. En moyenne, ces deux choix sont équivalents, mais une société averse au risque préférera éviter la situation de risque. De la même façon, l'aversion au risque fait que les sociétés peuvent préférer une perte faible et homogène sur

l'ensemble de la population à une perte lourde concentrée sur une petite partie (non connue au départ) de la population. Sans aversion au risque, l'assurance volontaire n'existerait pas.

La prise en compte de l'aversion au risque peut modifier les résultats de l'analyse coût-bénéfice. Sans entrer dans les détails, la prise en compte de l'aversion au risque ne joue que très marginalement sur le résultat si on suppose que les pertes causées par les inondations sont réparties de manière homogène sur l'ensemble de la population (grâce à un système d'assurance complet ou par la prise en charge des pertes résiduelles par l'État). En revanche, si seule une petite partie de la population est durement touchée, la majorité étant épargnée (ce qui est souvent le cas), alors la prise en compte de l'aversion au risque peut augmenter les bénéfices d'une protection de plus de 20 % (cf. Hallegatte, 2006, sur le cas de La Nouvelle-Orléans).

Un dernier facteur à prendre en compte vient de l'aléa moral. En effet, si une protection est financée par l'ensemble de la population (quel que soit le lieu de résidence), l'ensemble de la population va payer pour la protection d'une partie de la population. Cette « subvention du risque » peut encourager une partie de la population à s'installer dans la zone à risque, menant à une augmentation du risque « financée » par l'ensemble de la population. Cela est d'autant plus vrai que la protection a une durée de vie importante : dans ce cas, les générations qui profitent des bénéfices de la protection ne sont pas celles qui l'ont financée. Cela crée d'importants problèmes d'équité intergénérationnelle. Une étude spécifique pourrait être conduite sur ce point, pour rechercher des moyens d'éviter cet aléa moral, par exemple en modifiant le niveau de taxe foncière et d'habitation en fonction du niveau des risques naturels dans une zone donnée.

Il est également important de noter que des protections physiques (par exemple des digues) ne sont jamais suffisantes si elles ne sont pas intégrées dans une politique d'occupation des sols. En particulier, il est indispensable d'éviter l'urbanisation et le développement des zones situées en dehors de la zone protégée[8]. Il faut également noter que les politiques de réduction des risques ont aussi des impacts potentiellement négatifs : par exemple, une gestion des sols restrictive peut conduire à une augmentation du prix des terrains, avec des conséquences sur le coût de la vie et sur l'accès à la propriété, voire à des conséquences en termes d'investissement dans la zone, les entreprises préférant privilégier les zones où les politiques sont moins strictes et les prix du foncier moins élevés. Ces conséquences sont complexes et indirectes, elles dépendent de très nombreux facteurs sur lesquels les décideurs locaux ont peu de prise (par exemple, la fiscalité nationale ou le climat économique). Elles sont donc difficiles à prévoir et à évaluer.

La figure 11.10 illustre une possibilité de stratégie de gestion des risques, qui inclut un « paquet de politique » visant à gérer des risques de probabilité décroissante.

Pour les risques très fréquents et peu intenses, qui reviennent toutes les quelques années, il est possible de se protéger grâce à des protections physiques, telles que des digues.

Mais les protections ne peuvent tout protéger, en particulier quand les événements deviennent trop intenses. Pour ce type d'événement, une action sur l'occupation des sols peut apparaître plus efficace, en éviter d'avoir du patrimoine et des populations

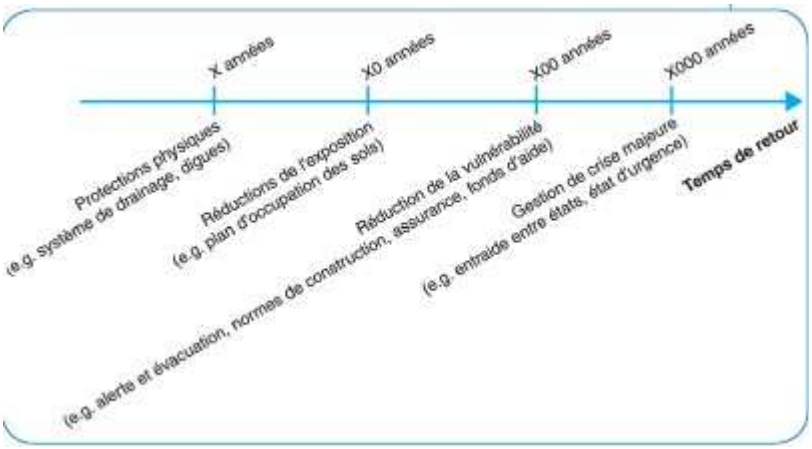
8 On peut même vouloir interdire l'installation dans la zone protégée, mais trop près de la digue, pour éviter de lourds bilans humains en cas de rupture brutale de la digue.

dans des zones trop difficiles à protéger physiquement. En France, c'est le rôle des Plan de prévention des risques d'inondation (PPRI).

Il n'est souvent pas possible d'interdire la construction dans des zones trop larges, car le coût foncier serait trop élevé, surtout dans les zones qui ne sont inondées que très rarement, une fois tous les deux siècles, par exemple. Pour ce type d'événement, il est plus efficace d'éviter les pertes humaines grâce à l'alerte et l'évacuation (éventuellement obligatoire) et de bons systèmes de secours (en France, c'est le rôle des Plans de Sauvegarde), et de gérer les pertes matérielles grâce à un système assurantiel ou des fonds d'aide. Si l'on ne peut éviter les pertes, il faut en limiter les conséquences sur le bien-être et aider les populations touchées à reconstruire et à faire face au choc (en France, le système Cat-Nat joue ce rôle, ainsi que l'action de l'État pour financer et aider les entreprises et ménages touchés).

Même ces systèmes atteignent parfois leurs limites, comme on l'a vu au Japon après le tsunami de 2011. C'est pourquoi une politique de gestion des risques doit intégrer une composante de gestion de crise majeure, avec une solidarité entre les états (par exemple avec le Fonds de Solidarité de l'Union Européenne).

Figure 11.10. Exemple de politique intégrée de gestion des risques.



Il faut également mentionner le rôle de l'incertitude sur le changement climatique futur. Pour simplifier la présentation du problème, on a considéré que la montée future du niveau de la mer était connue et égale à 1 m. Pourtant, on est aujourd'hui incapable de produire des projections précises du niveau de la mer pour les prochaines décennies, et le niveau de la mer en 2100 pourrait être entre 20 cm et 2 m plus élevé qu'aujourd'hui. Cette incapacité à prévoir ce phénomène provient du fait qu'on ne sait pas quelles seront les émissions futures de gaz à effet de serre, en particulier parce qu'on ne sait pas quelles politiques climatiques seront mises en place à l'échelle internationale, et du fait que la réponse en termes d'élévation du niveau de la mer pour des émissions données est difficile à anticiper. Ces incertitudes, qui s'ajoutent aux difficultés d'évaluation et de quantification des pertes potentielles et des risques, poussent à privilégier les solutions les plus souples et les plus flexibles, qui permettent d'ajuster l'action en fonction de nouvelles informations sur l'aléa ou sur la réaction des acteurs économiques. Par exemple, une politique de gestion du sol restrictive peut facilement être ajustée si l'on s'aperçoit que ses effets négatifs sont plus importants que prévus, ou que le risque est plus faible grâce à des

politiques climatiques. À l'opposé, un système de protection « en dur » à base de digues doit être conçu une fois pour toutes, et toute modification ultérieure est complexe et onéreuse. La mise en place de protection en dur s'accompagne donc d'un risque important de mauvaise conception (liée à la sur ou sous-estimation du risque) qui est alors difficile à corriger. La conception de toute politique de gestion des risques doit s'accompagner d'une réflexion sur les possibilités d'ajustement de la stratégie en cas d'arrivée de nouvelle information. Les politiques qui permettent un tel ajustement doivent être privilégiées, quand c'est possible.

Il faut aussi rappeler ici qu'une décision concernant les risques (naturels ou non) est toujours une décision politique et l'analyse coût-bénéfice ne doit être considérée que comme l'une des sources d'information utiles à cette décision. En particulier, de nombreux facteurs non monétaires sont difficiles à prendre en compte dans une analyse numérique, malgré leur importance : impacts sur la santé, sur l'héritage culturel, les conséquences psychologiques, l'impact sur les écosystèmes et l'environnement, etc.

Même dans les cas où les incertitudes sont grandes, et où le résultat ne penche pas de manière claire d'un côté ou d'un autre, l'analyse coût-bénéfice peut se révéler utile pour organiser la discussion : deux acteurs aux opinions opposées peuvent en effet justifier leur position en donnant les paramètres de l'analyse coût-bénéfice qui soutiennent leur choix. Ainsi, lorsque deux acteurs sont en désaccord sur le niveau de protection qu'il faut apporter, pour faire avancer la discussion, on peut utiliser l'analyse coût-bénéfice, qui permet d'expliciter les racines du désaccord (par exemple une divergence sur l'évaluation des dommages évitables, ou sur le taux d'actualisation qu'il faut utiliser). Le débat peut ensuite se faire plus facilement, en discutant du ou des paramètres qui expliquent la divergence de vue.

Ainsi, on peut considérer l'analyse coût-bénéfice comme un outil utile de communication et de débat, en évitant le piège de croire qu'elle peut apporter systématiquement et objectivement le niveau optimal de protection face aux risques naturels. En effet, la présence de nombreux facteurs difficile à quantifier, et le rôle des préférences locales concernant la gestion des risques font que la décision finale reste une décision politique dans laquelle l'analyse coût-bénéfice peut jouer un rôle, mais qu'elle ne peut remplacer.

Références bibliographiques

Clark J.R., 1996. *Coastal Zone Management Handbook*. Lewis Publishers.

Hallegatte S., 2006. A Cost-Benefit Analysis of the New Orleans Flood Protection System. *Regulatory Analysis* 06-02. AEI-Brookings Joint Center, March.

Hallegatte S., 2008. An adaptive regional input-output model and its application to the assessment of the economic cost of Katrina. *Risk Analysis* 28(3): 779-799.

Hallegatte S., Patmore N., Mestre O., Dumas P., Corfee Morlot J., Herweijer C., Muir Wood R., 2008a. Assessing Climate Change Impacts, Sea Level Rise and Storm Surge Risk in Port Cities: A Case Study on Copenhagen. *OECD Environment Working Paper* No. 3 ENV/WKP.

Hallegatte S., Henriet F., Corfee-Morlot J., 2008b. The Economics of Climate Change Impacts and Policy Benefits at City Scale: A Conceptual Framework. *OECD Environment Working Paper*, 4, ENV/WKP(2008)3. Paris: OECD.

Le Cozannet, G., Lenôtre N., Nacass P., Colas S., Perherin C., Vanroye C., Peinturier C., Hajji C., Poupat B., Azzam C., Chemitte J., Pons F., 2009. Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France pour les risques côtiers. Rapport du groupe de travail « risques naturels, assurances et adaptation au changement climatique » BRGM RP 57141, avril.