HAL
archives-ouvertes.fr

Économie de l'adaptation au changement climatique

Stéphane Hallegatte, Franck Lecocq, Christian Perthuis De

To cite this version:

Stéphane Hallegatte, Franck Lecocq, Christian Perthuis De. Économie de l'adaptation au changement climatique. [Contrat] Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer. 2010, 89 p. hal-01189449

HAL Id: hal-01189449

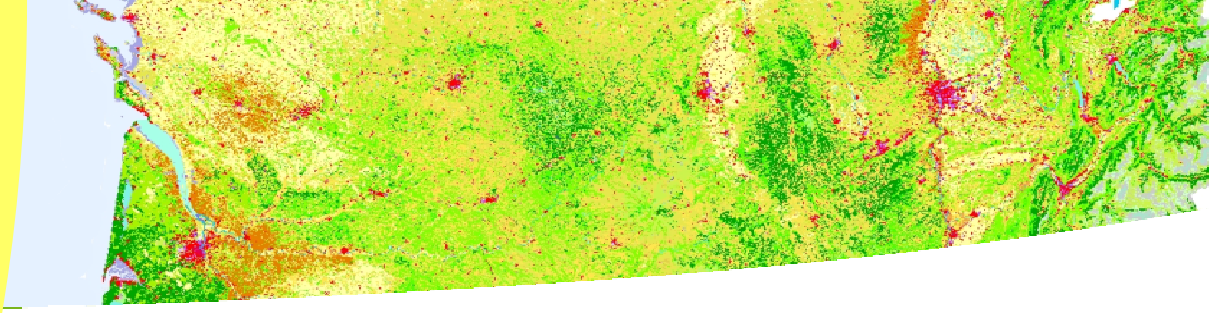
https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01189449

Submitted on 6 Jun 2020

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.

CONSEIL ÉCONOMIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE



Février 2010

Économie de l'adaptation au changement climatique

Christian de Perthuis
Stéphane Hallegatte
Franck Lecocq

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer

Economie de l'adaptation au changement climatique

Rapport du Conseil Economique pour le Développement Durable

Stéphane Hallegatte [a,b] Franck Lecocq [c,d] Christian de Perthuis [e]

[a] Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement, CIRED

[b] Ecole Nationale de la Météorologie, Météo-France

[c] AgroParisTech, Engref UMR 356 Economie Forestière, F-54000 Nancy, France

[d] INRA, UMR 356 Economie Forestière, F-54000 Nancy, France

[e] Université Paris-Dauphine, Programme de Recherche Economie du Climat (PREC)

Avec l'appui de Patrice Dumas (CIRED et CIRAD), Maria Mansanet-Bataller (Mission climat de la Caisse des Dépôts et Consignations), Baptiste Perrissin Fabert (CEDD) et Boris Solier (Université Paris-Dauphine, PREC)

Résumé

L'adaptation est restée pendant longtemps le parent pauvre du débat et des politiques sur le changement climatique. Mais la diffusion de l'information sur le changement climatique amène de nombreux acteurs à s'interroger sur la meilleure manière d'en limiter les conséquences, et on voit éclore une multitude d'initiatives sur l'adaptation, notamment au niveau local. L'adaptation prend aussi une importance croissante dans la négociation internationale.

L'adaptation peut être définie comme « l'ensemble des évolutions d'organisation, de localisation et de techniques que les sociétés devront opérer pour limiter les impacts négatifs du changement climatique et en maximiser les effets bénéfiques ». Elle recouvre des formes d'actions très variées qui s'appliquent à de nombreux secteurs. Ses problématiques diffèrent suivant les zones et les échelles géographiques et sa mise en œuvre implique de combiner des instruments très divers.

Le présent rapport propose un cadrage économique général du problème de l'adaptation afin d'aider les acteurs publics et privés à construire des stratégies d'adaptation efficaces. Pour ce faire, il dresse les enjeux généraux de l'adaptation, identifie les leviers pertinents de l'action publique puis en décrit les implications pour la conception des stratégies d'adaptation.

Quatre enjeux majeurs pour les stratégies d'adaptation

En premier lieu, il faut tenir compte de trois type d'incertitudes qui s'additionnent : celles sur l'évolution future du climat – les impacts attendus du changement climatique étant incomparables selon qu'on se situe dans un scénario de hausse moyenne de +2°C ou de +4°C ; celles sur les conséquences possibles d'un scénario climatique donné au plan local ; et celles sur l'évolution des capacités d'adaptation de nos sociétés dans le futur. L'incertitude impose notamment d'évaluer les mesures d'adaptation en tenant compte du degré de flexibilité qu'elles préservent pour l'action future, à mesure que viendra s'ajouter de l'information supplémentaire.

Toutefois, compte tenu des inerties techniques, économiques, politiques, institutionnelles et culturelles, il n'est pas toujours possible de prendre des mesures d'adaptation parfaitement flexibles. Par exemple, la durée de vie du capital dans des secteurs comme les infrastructures, le bâtiment ou la forêt est du même ordre de grandeur que l'échelle de temps du changement climatique. Dans ces cas de figure, il est nécessaire de faire des choix relatifs à l'adaptation en l'absence d'information complète, malgré le risque de « maladaptation » ex post.

En troisième lieu, le changement climatique est un processus continu. Par conséquent, la question n'est pas de savoir comment s'adapter à un « nouveau » climat, mais de savoir comment et à quel coût nous pouvons adapter nos sociétés à un climat « sans cesse changeant ». L'adaptation doit donc être comprise comme une politique de transition permanente sur le très long terme. Un plan d'adaptation sur quelques années n'est qu'une étape dans ce processus.

Enfin, il est dans certains cas trop coûteux ou techniquement impossible de s'adapter « à la marge » en maintenant à l'identique et au même endroit les activités ou les services existants. S'adapter au changement climatique requiert souvent des bifurcations vers d'autres activités et/ou d'autres localisations. La présence de bifurcations requiert en particulier que les politiques d'adaptation soient élaborées et conduites dans un cadre intersectoriel. Elle implique également que les impacts à venir du changement climatique soient intégrés dès aujourd'hui dans les choix d'aménagement du territoire et les plans d'urbanisation. La question des transitions entre activités et/ou entre régions devient dès lors un enjeu central.

Le rôle de l'action publique en matière d'adaptation

La légitimité de l'action publique en matière d'adaptation n'est pas automatique car les bénéfices des mesures d'adaptation sont le plus souvent privés, ce qui incite les ménages, les entreprises et les collectivités à s'engager spontanément dans l'adaptation. Il existe cependant

des circonstances dans lesquelles cette adaptation spontanée risque d'être insuffisante, voire contreproductive. Une réflexion est nécessaire au cas par cas pour déterminer les champs dans lesquels l'intervention de l'autorité publique est requise. Le rapport en identifie quatre.

En premier lieu, les pouvoirs publics ont un rôle clé à jouer dans la production et la diffusion de l'information sur le changement climatique, ses impacts et les moyens de s'y adapter afin de permettre aux acteurs privés de prendre leurs décisions en connaissance de cause. Transmettre l'information sur l'incertitude et sur les outils à même de la prendre en compte est ici essentiel.

Un second type d'action publique vise à adapter les normes, les règlements et la fiscalité qui encadrent l'action des acteurs publics et privés. Le rapport prend l'exemple des normes qui affectent la demande en eau et celles qui concernent le capital fixe à longue durée de vie. A côté des normes techniques *stricto sensu*, il peut s'avérer nécessaire d'adapter les normes procédurales, ainsi que d'autres normes non directement liées au climat, mais qui impactent la capacité à s'adapter, par exemple les normes architecturales dans le domaine du bâtiment.

Un troisième type d'action publique concerne les institutions. En modifiant de manière rapide et imprévisible les circonstances, le changement climatique va exercer une tension croissante sur les institutions et contrats existants. Il convient de s'assurer que les institutions sont capables d'identifier les signaux précurseurs des tensions et des crises, d'équilibrer les intérêts des différentes parties prenantes, et de mettre en œuvre, de manière crédible, les solutions qu'elles proposent. L'histoire suggère que les institutions jouent un rôle essentiel dans l'adaptation. Par exemple, le succès de la Hollande face aux inondations tient autant à la mise en place des institutions nécessaires à la gestion du risque qu'à la capacité technique à ériger des digues.

Le quatrième type de mesures publiques face au changement climatique recouvre l'action directe d'adaptation de l'Etat et des collectivités locales sur les infrastructures publiques, les bâtiments publics et les espaces et écosystèmes dont les collectivités publiques ont la charge : parcs naturels, forêts domaniales et communales par exemple. Plus largement, il s'agit d'intégrer les impacts à venir du changement climatique dans les politiques d'aménagement de l'espace et les grands investissements qui impactent le maillage du territoire.

Les méthodes à utiliser pour construire une stratégie d'adaptation

Un processus en sept étapes pour construire une stratégie d'adaptation est décrit dans le rapport. Il commence par une identification large des mesures d'adaptation possibles ; ensemble qui est ensuite réduit grâce à l'identification des mesures les plus urgentes : en particulier celles prévenant des impacts imminents ou concernant des choix à faire aujourd'hui mais ayant des conséquences à très longs termes. La plus ou moins grande pertinence économique permet de restreindre un peu plus l'éventail initial des possibles.

Sur cette base, une stratégie d'adaptation peut être construite, notamment en recherchant des mesures robustes et flexibles qui permettent de prendre en compte l'incertitude sur les climats futurs, et en maximisant les co-bénéfices engendrés par l'adaptation. Les mesures dont les co-bénéfices sont supérieurs aux coûts, souvent qualifiées de « sans regret », sont ici particulièrement intéressantes. Se doter d'indicateurs permettant d'évaluer l'efficacité des mesures retenues à mesure qu'elles sont mises en œuvre est aussi essentiel à la construction d'une stratégie d'adaptation.

A condition d'intégrer correctement l'incertitude, le calcul économique constitue un outil efficace pour évaluer l'opportunité économique des mesures d'adaptation envisagées. Mais d'autres approches, notamment multicritères, sont aussi nécessaires pour informer au mieux les choix individuels et collectifs en matière d'adaptation en tenant compte de la complexité des conséquences du changement climatique et des actions d'adaptation.

Table des Matières

Economie de l'adaptation au changement climatique 1
Rapport du Conseil Economique pour le Développement Durable 1
Résumé 2
Table des Matières 4
Introduction 5
1. Qu'est-ce que l'adaptation au changement climatique ? 7
1.1. Une définition générale de l'adaptation 7
1.2. Incertitude, dynamique, inertie et bifurcations : quatre enjeux majeurs pour les stratégies d'adaptation 7
1.3. Evaluation des coûts globaux de l'adaptation au changement climatique 10
2. Rôle et modalités de l'action publique face à l'adaptation 11
2.1. Les justifications de l'intervention publique en matière d'adaptation 11
2.2. Les modalités de l'action publique pour l'adaptation 14
2.2.1 Production et diffusion de l'information 14
2.2.2 Adaptation des normes, des règlements et de la fiscalité 16
2.2.3 Adaptation des institutions 17
2.2.4 Adaptation des investissements publics 19
2.3. Exemples de mesures d'adaptation possibles dans quelques grands secteurs 20
2.3.1 Construction et urbanisme 20
2.3.2 Infrastructures d'énergie et de transport 20
2.3.3 Eau et agriculture 21
2.3.4 Ecosystèmes 22
2.3.5 Assurance 23
3. Les dimensions territoriales et spatiales de l'adaptation 24
3.1. Maintenir l'existant ou bifurquer ? 24
3.1.1 Reconversions d'activité 24
3.1.2 Déplacements de population et d'activités 25
3.1.3 Implications méthodologiques et institutionnelles des bifurcations 25
3.2. L'adaptation du territoire national dans le contexte international 26
3.3. L'allocation des ressources pour l'adaptation entre régions et entre secteurs 27
4. Les étapes de mise en oeuvre d'une stratégie d'adaptation 29
5. L'utilisation des instruments économiques dans l'élaboration d'une stratégie d'adaptation 32
5.1. Comment comparer les mesures d'adaptation en présence d'incertitudes ? 32
5.2. Quels scénarios climatiques choisir pour mener l'analyse ? 34
5.3. Application du calcul économique à l'évaluation des politiques d'adaptation 35
6. Conclusion & recommandations 38
Références 39
Annexe A. Coût des impacts du changement climatique et de l'adaptation en France. Résumé du rapport du groupe interministériel 42
Annexe B. Du partage global entre adaptation et atténuation 45
Annexe C : L'adaptation des infrastructures énergétiques au changement climatique 46
Annexe D : Adaptation, gestion des risques et analyse coûts bénéfices : illustration sur le cas de la région Languedoc-Roussillon et de la montée du niveau de la mer 62
Annexe E. Adaptation au changement climatique, les approches de l'OCDE et de la Banque Mondiale 84

Introduction

Pour limiter les conséquences négatives du changement climatique sur les sociétés, on peut soit réduire les émissions de gaz à effet de serre (**atténuation**), soit s'adapter aux changements du climat (**adaptation**). Ces deux modalités n'ont cependant pas été traitées de manière symétrique, l**'adaptation au changement climatique étant restée pendant longtemps le parent pauvre du débat sur le changement climatique**. Ce déséquilibre traduit les réelles difficultés que soulève l'adaptation, comme le traitement de l'incertitude sur les impacts futurs du changement climatique ou un certain nombre d'autres problèmes méthodologiques qui seront abordés dans la suite de ce rapport. Mais il résulte aussi d'une volonté délibérée d'esquiver la discussion sur l'adaptation, perçue par certains acteurs comme une solution inférieure, car n'agissant que sur les conséquences du changement climatique et non sur ses causes, voire comme une solution dangereuse, car risquant de freiner la discussion sur l'atténuation.

La situation a beaucoup changé depuis le milieu des années 2000. La diffusion massive de l'information sur le changement climatique conduit **de nombreux acteurs publics et privés, particulièrement à l'échelle locale, à s'intéresser aux impacts du changement climatique et à se poser la question de ce qu'ils pourraient faire pour en limiter les conséquences** [(1)]. La prise de conscience que le climat va de toute façon changer, même si les politiques d'atténuation conduites au plan internationale sont un succès, rend l'adaptation d'autant plus urgente [(2)].

Pour le décideur, **« s'adapter au changement climatique » est cependant très loin d'être un concept opérationnel**. L'adaptation recouvre en effet des formes d'action très variées (protection directe des personnes ou du capital, actions facilitant cette protection, réaction face aux impacts, etc.), dans de très nombreux secteurs (agriculture, eau, énergie, transport, etc.), avec des problématiques très différentes selon les zones et les échelles géographiques (côtes, montagnes, zones urbaines, etc.) et avec des instruments très divers (normes, information, mesures fiscales, transferts, choix d'investissement dans les infrastructures, etc.).

L'objectif du présent rapport est de donner un cadrage économique général facilitant l'établissement de stratégies d'adaptation efficaces par les décideurs publics et privés. Le point de départ de ce rapport est qu'au delà des situations particulières, les actions d'adaptation soulèvent des questions similaires et présentent des caractéristiques communes dont l'étude permet de formuler des recommandations de portée générale. Bien entendu, ce rapport ne saurait remplacer des analyses économiques détaillées de chaque problème d'adaptation. En particulier, ce rapport n'examine pas les sources de financement des mesures d'adaptation, en se limitant à pointer les problèmes de distribution que ce financement peut poser. Ce rapport fournit en revanche les bases méthodologiques pour préparer les analyses détaillées des problèmes d'adaptation.

Le rapport est structuré en cinq sections. Les trois premières décrivent différentes facettes du problème que soulève l'adaptation pour la décision publique, et les deux suivantes, de nature plus méthodologique, abordent la question de l'évaluation économique des mesures d'adaptation et de la construction d'une stratégie nationale.

---

[1] On observe ainsi depuis le milieu des années 2000 de nombreuses initiatives relatives à l'adaptation au changement climatique, que ce soit au niveau des collectivités locales (de nombreuses municipalités se sont ainsi doté de plan climat qui intègrent à la fois atténuation et adaptation), des entreprises (par exemple dans le domaine de l'ingénierie ou de l'énergie), ou des branches professionnelles (par exemple dans les secteurs de l'assurance ou de la forêt).

[2] Même si les émissions de gaz à effet de serre (GES) étaient stoppées net aujourd'hui, le climat va de toute manière continuer à changer par rapport à ce qu'il est aujourd'hui du fait de l'inertie du système climatique. Et si les émissions de GES continuent, ce qui est probable, le climat subira des changements supplémentaires – dont l'amplitude dépendra, en revanche, du niveau d'émissions, et donc du succès, ou de l'échec, des politiques internationales d'atténuation.

La première section pose le cadre méthodologique du rapport en définissant l'adaptation et en en rappelant les caractéristiques principales.

La seconde section est consacrée au rôle et aux modalités de l'action publique dans un monde où les bénéfices des actions d'adaptation sont majoritairement privés, et où, par conséquent, la légitimité de l'intervention publique n'est pas toujours évidente. L'intervention publique peut même avoir des effets pervers si elle incite les agents à des comportements plus risqués (« l'aléa moral » des économistes). Cette section rappelle les circonstances dans lesquelles l'intervention publique pour l'adaptation est souhaitable ou nécessaire et recense les différents instruments que l'autorité publique peut utiliser à cet effet. Elle présente enfin un certain nombre d'applications dans différents secteurs.

La troisième section est dédiée à la dimension spatiale et territoriale de l'adaptation dont la mise en œuvre ne peut résulter de la simple juxtaposition de mesures sectorielles. Cette section rappelle ainsi combien la distribution spatiale des activités et des hommes pourrait être affectée à terme par les impacts du changement climatique dont certains agiront de façon indirect sur le territoire national du fait des changements induits dans le fonctionnement des marchés ou les flux migratoires. Elle aborde par conséquent les questions d'adaptation au niveau international, et les questions qu'elles soulèvent, en particulier la question de « l'additionalité » des ressources dédiées à l'adaptation.

La quatrième section propose une méthode pour bâtir une stratégie d'adaptation au niveau national **en l'absence d'une métrique commune** permettant de comparer leurs performances entre elles. Ce processus en sept étapes commence par une identification large d'un ensemble de mesures d'adaptation possibles, qui est ensuite réduit grâce à l'identification des mesures les plus urgentes : celles prévenant des impacts imminents ou concernant des choix à faire aujourd'hui mais ayant des conséquences à très longs termes.

La cinquième section, enfin, examine les différentes approches possibles pour évaluer économiquement les mesures d'adaptation en situation d'incertitude sur les impacts futurs du changement climatique. Elle montre en particulier comment le calcul économique (privé ou public) peut être mobilisé pour aider à dimensionner chaque mesure et à faciliter l'allocation des ressources entre mesures concurrentes.

Le rapport est complété par plusieurs annexes, qui proposent successivement une revue du récent rapport interministériel sur le coût des impacts du changement climatique pour la France (annexe A), une discussion du partage global entre atténuation et adaptation (B), une discussion détaillée des enjeux soulevés par l'adaptation dans le domaine des infrastructures (C), une illustration de l'utilisation de l'analyse coûts bénéfices au cas des digues (D) ; et enfin une revue des travaux récents de l'OCDE et de la Banque Mondiale sur l'adaptation.

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre de la réflexion en cours sur l'adaptation au niveau national. Suite au Plan Climat 2004, actualisé en 2006, un rapport interministériel sur le coût des impacts du changement climatique et de l'adaptation a permis de faire l'état des lieux de la connaissance sur les impacts du changement climatique au niveau national (MEEDDM et al., 2009). Une démarche de concertation nationale sur l'adaptation est en cours, qui doit déboucher sur un Plan National d'Adaptation prévu d'ici 2011, qui devra ensuite être traduit au niveau local. Ce calendrier rejoint celui de l'Union Européenne, qui prévoir d'élaborer un Livre Blanc sur l'adaptation d'ici 2011, et une stratégie communautaire d'adaptation d'ici 2013.

La préparation de ce rapport a été précédée par la tenue de trois séminaires tenus à l'automne 2009 dans les locaux du CEDD. Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des participants à ces séminaires pour leurs contributions. Les auteurs sont bien entendu entièrement responsable du contenu du présent document, qui n'engage en rien les participants à ces séminaires.

1. Qu'est-ce que l'adaptation au changement climatique ?

Cette section propose une définition générale de l'adaptation (1.1), avant de mettre l'accent sur quatre caractéristiques conditionnant sa mise en œuvre (1.2) et de réunir quelques ordres de grandeurs sur les coûts de cette mise en œuvre (1.3).

1.1. Une définition générale de l'adaptation

On peut définir l'adaptation aux changements du climat comme « **l'ensemble des évolutions d'organisation, de localisation et de techniques que les sociétés devront opérer pour limiter les impacts négatifs de ces changements et maximiser leurs effets bénéfiques** » (de Perthuis, 2009) [3]. Par exemple, éloigner les populations et le capital productif de zones rendues inondables par le changement climatique, adopter des variétés de plantes plus résistantes et mieux adaptées aux climats du futur, ajuster les réseaux énergétiques aux variations attendues de la consommation d'énergie ou réhabiliter des zones urbaines après des désastres naturels liés au changement climatique sont toutes des actions d'adaptation.

Suivant Smit et al. (2000), deux formes d'adaptation peuvent être distinguées. L'**adaptation réactive** consiste à réagir *ex post* aux impacts adverses du changement climatique, lorsqu'ils se produisent. L'**adaptation anticipative**, au contraire, consiste à agir avant que les impacts ne se produisent pour réduire la vulnérabilité à ces impacts et en limiter les conséquences adverses ou en tirer des bénéfices nouveaux. Par exemple, évacuer les personnes d'une zone inondée et les réinstaller dans une zone plus sûre est de l'adaptation réactive ; alors que changer le plan d'occupation des sols en prévision d'inondations futures est de l'adaptation anticipative.

Si elle est intuitivement claire, **la frontière entre adaptation anticipative et adaptation réactive est parfois difficile à tracer avec précision**. Par exemple, le Plan Climat adopté en France après la canicule de 2003 peut être interprété à la fois comme une réaction à l'évènement de 2003, et comme une manière d'anticiper des évènements similaires dans le futur.

La distinction entre adaptation réactive et adaptation anticipative reste néanmoins très importante du point de vue des politiques publiques car les motivations de ces deux formes d'adaptation sont différentes. L'adaptation anticipative (comme l'atténuation) utilise des ressources aujourd'hui pour prévenir des crises possibles dans le futur ou tirer des bénéfices des changements du climat. A l'inverse, l'adaptation réactive utilise des ressources pour faire face à des évènements au moment où ceux-ci se produisent. En pratique, **des décisions de politiques publiques sont souvent plus faciles à prendre après une crise**. **Mais les coûts des actions préventives peuvent souvent s'avérer largement plus faibles que les coûts des actions réactives**, même si celles-ci sont actualisées [4].

1.2. Incertitude, dynamique, inertie et bifurcations : quatre enjeux majeurs pour les stratégies d'adaptation

L'une des difficultés majeures pour l'élaboration des stratégies d'adaptation est le traitement de l'incertitude. **Cette incertitude résulte en réalité de la somme de trois composantes :**

---

[3] Les techniques visant à réduire artificiellement le changement climatique via une intervention additionnelle sur le climat (« géo-ingénierie ») ne sont pas comprises dans le champ de ce rapport.

[4] Par exemple, un système d'alerte aurait probablement permis de limiter considérablement les pertes humaines liées au tsunami de 2004 dans l'Océan Indien (Athukorala et Resosudarmo, 2005), mais un tel système n'a été installé qu'après cet événement. De la même manière, dans une analyse comparée, Hallegatte (2010) montre que la gestion des risques purement réactive à la Nouvelle Orléans conduit à des catastrophes de plus en plus graves et coûteuses ; alors que la gestion du risque proactive en Hollande a permis une maîtrise des risques depuis plus d'un demi-siècle.

- **L'incertitude sur le scénario global d'évolution du climat**. Les impacts des changements climatiques et les risques associés sont incomparables suivant qu'on se situe par exemple dans un scénario de hausse moyenne des températures de 2°C ou de 4°C par rapport à la période préindustrielle. Face à ce type d'incertitude, il serait dangereux d'agir aujourd'hui en fonction d'un seul des deux scénarios. En se situant dans le scénario à 2°C on prend le risque de différer trop longtemps des mesures nécessaires pour faire face aux impacts d'un scénario à 4°C. En se situant dans le scénario à 4°C, on prend le risque de surinvestir dans des actions d'adaptation et donc de gaspiller des ressources.
- **L'incertitude sur la façon dont les différents scénarios globaux se traduisent localement**. Par exemples les modèles climatiques divergent en France sur la façon dont le changement climatique va affecter la fréquence et l'intensité des épisodes de tempêtes dans le nord du pays. L'incertitude est donc accrue lorsqu'on a besoin d'évaluer les impacts locaux du changement climatique pour mettre en place une stratégie d'adaptation. De plus, les évolutions des climats locaux sont masquées par la variabilité naturelle, ce qui rend leur détection particulièrement difficile.
- **L'incertitude sur la réponse des grands cycles (eau par exemple), des écosystèmes et des sociétés aux changements globaux et locaux du climat.** Or cette réponse est, elle aussi, particulièrement incertaine. Par exemple, le hêtre, essence feuillue particulièrement commune en France, pourrait sous certains scénarios climatiques voir son aire de répartition diminuer drastiquement d'ici à 2100 pour ne plus subsister que dans le Nord-est du pays et dans les zones de montagne (Badeau et al., 2004). L'opportunité d'engager des actions d'adaptation préventives, par exemple ne plus planter de hêtre et le remplacer par des essences plus robustes au changement climatique, dans une région donnée, dépend à la fois du scénario de changement climatique pour cette région, et de la réponse de l'écosystème (ici la forêt) à ce changement – deux paramètres incertains.

Comme le montrera la suite du rapport, la bonne méthode pour tenir compte de cette incertitude est de veiller à ce que l'ensemble des agents économiques disposent de la meilleure information possible sur les impacts du changement climatique et de privilégier les approches qui permettent de conserver de la flexibilité pour l'action future, à mesure que viendra s'ajouter une information supplémentaire à notre connaissance actuelle.

Une seconde spécificité de l'adaptation est son caractère dynamique. L'adaptation n'est pas une action unique, visant à passer d'une situation stable à une nouvelle situation, différente mais stable elle aussi. Pendant des siècles, au contraire, les sociétés auront à faire face à un climat qui change à un rythme soutenu [(5)]. **L'enjeu est donc de savoir comment et à quel coût nous pouvons adapter nos modes de vie et notre système économique à un climat « sans cesse changeant ».** Pour cela, il est important de considérer l'adaptation comme un processus essentiellement transitoire, et de long terme ; un plan d'adaptation sur quelques années n'étant qu'une étape dans un schéma de très long terme (cf. section 4).

Troisième caractéristique importante à prendre en compte : les inerties de nos systèmes socio-économiques. L'incertitude et le caractère dynamique de l'adaptation seraient plus faciles à prendre en compte s'il était possible de corriger en permanence les trajectoires d'adaptation. Mais de nombreux secteurs présentent une inertie importante qui oblige à faire des choix dont les conséquences sont à long, voire à très long terme. Ainsi, les échelles de temps de plusieurs secteurs économiques, comme le secteur forestier ou les secteurs lourds en infrastructures (logement et urbanisme, production d'énergie, gestion des inondations…) sont du même ordre

[5] Les émissions passées de gaz à effet de serre suffisent à faire augmenter le niveau de la mer sur plusieurs millénaires.

de grandeur que l'échelle de temps du changement climatique. Les décisions concernant la localisation des actifs ont des horizons temporels particulièrement longs, qui dépassent largement la durée de vie du capital installé. De plus, il ne faut pas oublier que l'inertie n'est pas que technique, et qu'il faut tenir compte des inerties institutionnelles, réglementaires, voire culturelles. L'inertie socio-économique qui résulte de tous ces mécanismes a trois conséquences :

- **D'abord, définir les mesures d'adaptation devient plus complexe car il faut commencer à agir très longtemps à l'avance**. Par exemple, un bâtiment construit en 2000 avec une durée de vie de 150 ans (ce qui est classique à Paris) devra être adapté au climat actuel de Paris, mais aussi au climat de Paris en 2150, qui sera probablement très différent du climat actuel. Or, il est plus complexe de construire un bâtiment (ou toute autre infrastructure) adapté à une large gamme de climats qu'à un seul climat bien défini. Il convient donc soit de construire des bâtiments adaptés à une gamme étroite de climats et donc moins chers, mais dont la durée de vie opérationnelle risque d'être réduite (il pourrait par exemple s'avérer nécessaire de détruire et de reconstruire en 2050 alors que les bâtiments sont toujours en bon état), soit de construire de manière à faire face à des climats variés, avec une durée de vie opérationnelle potentiellement plus longue.
- **Ensuite, la combinaison de l'incertitude sur les impacts du changement climatique et de la longue durée de vie du capital entraîne un risque de maladaptation** (voir encadré n°1). La maladaptation n'est pas seulement relative au climat futur. En effet, nos sociétés ne sont pas nécessairement adaptées au climat d'aujourd'hui. Cette maladaptation actuelle est souvent appelée « déficit d'adaptation ». Par exemple, des investissements importants ont été faits dans des zones inondables – même en l'absence de changement climatique – et s'adapter au changement climatique ne doit pas forcément se faire en maintenant le niveau de risque actuel, que l'on peut juger trop élevé. L'annexe de ce rapport illustre ce cas sur l'adaptation de la protection côtière de la région Languedoc-Roussillon (Annexe D). Quand la situation présente peut être qualifiée de sous-optimale, un plan d'adaptation peut inclure des mesures qui seraient désirables même en l'absence de changement climatique – ce que l'on qualifie souvent de « réduction du déficit actuel d'adaptation » – et des mesures qui ne se justifient que parce qu'il y a un changement du climat – et qui constituent l'adaptation au sens strict.
- **Enfin, les échelles temporelles de l'adaptation font qu'on ne peut pas attendre beaucoup des retours d'expérience et de l'apprentissage par la pratique** (*learning-by-doing*)**.** Ce troisième point rend particulièrement stratégique les choix à effectuer en matière de « bifurcations » dans la localisation des activités et des hommes.

Une quatrième difficulté pour l'élaborer des stratégies d'adaptation tient au fait que **dans de nombreux cas, il est trop coûteux ou techniquement impossible de s'adapter « à la marge » en maintenant à l'identique des activités ou des services sous le nouveau climat**. **S'adapter au changement climatique requiert alors de « bifurquer » vers de nouvelles activités et/ou vers de nouvelles localisations**. Par exemple, il est probable que les stations de sport d'hiver de basse et moyenne altitude ne puissent à terme continuer à offrir des prestations de ski (voir encadré n°2). Pour pouvoir envisager de telles bifurcations, il est nécessaire que les politiques d'adaptation soient élaborées dans un cadre intersectoriel où le développement des territoires dans leur ensemble est pris en compte. En outre, l'expérience montre que les transitions posent souvent des problèmes difficiles.

Encadré n°1 : Le concept de « maladaptation »

Des mesures conçues pour s'adapter aux effets du changement climatique peuvent conduire à des résultats non conformes aux attentes, et les risques de « maladaptation » ne doivent pas être sous-estimés. La maladaptation est définie par le GIEC comme « un changement dans les systèmes naturels ou humains qui conduit à augmenter la vulnérabilité au lieu de la réduire ».

Une situation de maladaptation peut par exemple survenir après une erreur de calibrage, c'est-à-dire d'une mauvaise calibration des mesures d'adaptation consécutive à une mauvaise anticipation de la nature ou de l'ampleur des changements futurs ou d'une réponse inadéquate à cette anticipation. Elle peut aussi survenir lorsqu'une mesure d'adaptation a aboutit à un transfert de vulnérabilité d'un système à un autre, ou d'une période à une autre (une mesure peut être positive sur une période et négative ensuite, ou inversement).

Deux sources de maladaptation doivent être distinguées. En premier lieu, une situation de maladaptation ex post peut résulter de décisions tout à fait appropriées compte tenu des informations disponibles ex ante. Du fait de l'incertitude sur les impacts du changement climatique, l'analyse ex ante ne permet en effet souvent que de restreindre l'univers des choix d'adaptation possible, sans le limiter à un seul point. Le choix de la mesure à prendre parmi cet ensemble de mesures compatibles avec l'information disponible ex ante sur le changement climatique relève ensuite d'une forme de pari de la société (voir section 5). Par exemple, il peut apparaître souhaitable aujourd'hui de mieux réguler les nouvelles constructions dans les zones côtières basses. Pourtant, si on s'aperçoit en 2050 que c'est le scénario le plus optimiste sur la montée du niveau de la mer se réalise, cette mesure d'adaptation pourra apparaître alors comme non adéquate, même si elle est (et reste) désirable aujourd'hui. Ce type de maladaptation n'est pas évitable, et ne peut donner lieu à un regret ex post, dès lors que toute l'information disponible a bien été exploitée ex ante.

En revanche, une situation de maladaptation peut aussi résulter d'un « mauvais choix » ex ante, c'est-à-dire d'une mauvaise prise en compte de l'information disponible, par exemple si des mesures d'adaptation sont mises en place en ne tenant compte que d'un unique scénario climatique, sans inclure l'incertitude, ou encore si les signaux précurseurs de changements climatiques locaux ne sont pas détectés suffisamment pas tôt par les acteurs. Ce type de maladaptation peut donner lieu à un regret ex post, puisque toute l'information disponible n'a pas été correctement exploitée ex ante. Elle pourra être évité, si les méthodologies de développement des stratégies d'adaptation sont bien conçues et correctement mises en œuvre.

Prendre la mesure du risque de maladaptation consiste notamment à privilégier le choix de stratégies « sans regret », qui permettent de réduire la vulnérabilité au changement climatique tout en ayant des bénéfices immédiats et une efficacité indépendante de l'incertitude sur les évolutions climatiques, ou des stratégies « flexibles » ou « réversibles », que l'on peut modifier en cas d'arrivée de nouvelles informations.

1.3. Evaluation des coûts globaux de l'adaptation au changement climatique

Les coûts de l'adaptation au changement climatique résultent des coûts d'investissement et des coûts de fonctionnement liés à la mise en place de stratégies d'adaptation. Il est important de noter que l'adaptation ne sera pas capable d'annuler complètement les impacts du changement climatique. Par conséquent, le coût global du changement climatique résultera des coûts d'adaptation plus du coût des impacts résiduels, une fois les mesures d'adaptation mises en place. Tout l'objectif d'une stratégie d'adaptation réussie est par conséquent de trouver la bonne répartition temporelle et spatiale des dépenses d'adaptation qui minimisent dans le temps cette facture globale.

Il existe plusieurs estimations du coût de l'adaptation à l'échelle mondiale (voir Agrawala et Fankhauser, 2008 pour une revue). Ces estimations tentent d'évaluer le coût des mesures

d'adaptation qui seront mises en place, en particulier dans le secteur des infrastructures. Elles suivent deux méthodologies distinctes : des approches dites « top-down », qui partent des montants investis chaque année dans les secteurs sensibles aux conditions climatiques et supposent que le changement climatique induira un surcoût (de l'ordre de 10%) sur ces investissements ; et des approches « bottom-up » qui cherchent à identifier et évaluer les investissements nécessaires dans chacun des secteurs concernés (protection des côtes, eau, agriculture, etc.).

Les estimations « top-down » de la Banque Mondiale et du Programme des Nations Unies pour le Développement aboutissent à des évaluations comprises entre 4 et 109 milliards de dollars par an, dans les pays en voie de développement. La Convention Cadre des Nations Unis propose une évaluation de 44 à 166 milliard de dollars par an, pour l'ensemble des pays. Au premier ordre, ceci correspondrait à des coûts de 1 à 6 milliards de dollars par an en France, mais ces estimations doivent être considérées avec beaucoup de précaution compte tenu de la simplicité des méthodes utilisées qui surpondèrent les coûts d'investissement mais néglige les coûts de fonctionnement.

Les estimations « bottom-up » suivent des méthodologies diverses selon les secteurs considérés, et utilisent des hypothèses qui ne sont pas forcément cohérentes entre elles. Ceci rend difficile d'agréger leurs résultats pour aboutir à un chiffre sur le coût de l'adaptation à l'échelle globale ou nationale. On peut toutefois noter que ce type d'analyses suggère en général des coûts d'adaptation inférieurs aux estimations des études top-down.

Ajoutons que ces études n'informent que très peu sur la répartition de ces coûts entre les budgets publics, les producteurs et les consommateurs. Or, l'efficacité d'une stratégie d'adaptation implique non seulement d'avoir une estimation réaliste des coûts d'adaptation mais aussi une capacité à les répartir entre les différents acteurs privés et publics.

2. Rôle et modalités de l'action publique face à l'adaptation

Cette section examine les raisons qui justifient théoriquement l'intervention publique en matière d'adaptation (2.1), avant de recenser les différents types d'instruments à considérer (2.2) en s'appuyant sur des exemples dans quelques grands secteurs (2.3).

2.1. Les justifications de l'intervention publique en matière d'adaptation

Comme noté plus haut, l'atténuation réduit tous les risques liés au changement climatique, connus comme inconnus, et quelle qu'en soit la localisation En termes économiques, **l'atténuation produit un bien dit public** [(6)]. La théorie économique suggère que les biens publics sont produits spontanément en quantité insuffisante, chaque agent économique ayant intérêt à profiter du bien public produit par les autres, sans pour autant faire d'effort lui-même. Du point de vue de la théorie économique, l'action publique est donc légitime (et nécessaire) pour faire en sorte que le bien public soit produit au niveau socialement optimal.

Le cas de l'adaptation est différent. En effet, l'adaptation réduit seulement certaines classes de risques, le plus souvent dans des zones géographiques bien précises. En termes économiques, **l'adaptation produit le plus souvent des biens dits privés**. Par exemple, renforcer un bâtiment pour résister à des tempêtes plus intenses ne bénéficie qu'aux habitants de ce bâtiment. Dans certains cas, l'adaptation peut aussi produire des biens ou des services dits « de club » : par

[6] En économie, un bien est dit public s'il est à la fois non-rival (le fait que quelqu'un le consomme n'empêche pas d'autres de le consommer) et non-exclusif (il n'est pas possible d'empêcher quelqu'un de consommer ce bien). La qualité du climat est typique d'un bien public, puisque le fait que je jouisse du climat n'empêche pas mon voisin de jouir du même climat, et puisqu'il est impossible d'empêcher quelqu'un de jouir du climat.

exemple, l'accès à un système de prévision saisonnier payant. Elle peut enfin produire des biens publics, mais le plus souvent relatif à une seule région ou à un seul secteur : par exemple, une digue qui protège indistinctement toutes les personnes vivant derrière elle. Dans ce dernier cas, la question est moins celle du partage public/privé des actions à conduire que celle de la répartition des responsabilités entre autorité publique nationale et locale.

La théorie économique suggère que, dans un monde idéal, les biens privés devraient être produits par les individus ou les entreprises qui en bénéficient, et non par les gouvernements. Par exemple, si un particulier installe un climatiseur chez lui, il en tirera les bénéfices lors de la prochaine canicule. De même, si un forestier choisit aujourd'hui des essences robustes au changement climatique, ses héritiers futurs tireront profit de ce choix car ils auront du bois à vendre.

Il existe cependant des circonstances dans lesquelles la production privée d'adaptation par les ménages ou les entreprises (parfois appelée « adaptation spontanée ») risque d'être insuffisante, et où l'intervention publique pour l'adaptation est justifiée du point de vue de la théorie économique pour des raisons d'équité et/ou d'efficacité.

- **Mauvaise diffusion de l'information disponible** : L'expérience suggère que l'information existante sur le changement climatique, ses impacts, et sur les options d'adaptation n'est pas aujourd'hui disponible de manière suffisamment large. Ceci crée des situations d'asymétrie d'information susceptibles d'une part de mener à des situations de maladaptation (voir encadré n°1) et d'autre part d'entraver le bon fonctionnement du marché, de créer des rentes de situation et de creuser de nouvelles inégalités. Les pouvoirs publics ont ici un rôle important à jouer dans la production d'information (recherche fondamentale, R&D) et dans la diffusion de cette information auprès des ménages, des entreprises et des collectivités locales. Ce point est détaillé en section 2.2.1.

- **Barrières à l'action collective au niveau local** : L'adaptation requiert souvent une coopération importante entre les agents au niveau local pour pouvoir fournir des biens publics locaux (digue, systèmes d'irrigation, etc.). L'action publique peut s'avérer nécessaire pour faciliter la négociation entre les acteurs concernés. L'appui à la coordination peut passer par exemple par la mise en place de standards et de normes (section 2.2.2), mais aussi par une action sur les institutions (section 2.2.3) comme la création de forum de discussion ou des activités de médiation.

- **Routines de décision et prise en compte insuffisante du long terme dans les décisions privées d'investissement**: il est souvent observé que les décisions privées d'investissement tiennent insuffisamment compte du long et très long terme (par exemple enneigement futur dans les stations de ski de moyenne montagne), ce qui peut justifier une action publique. De même, elles considèrent parfois comme acquise la fourniture de services de base par les autorités publiques, alors que des changements importants de conditions climatiques pourraient rendre cette fourniture impossible ou trop onéreuse (par exemple, accès à l'eau pour l'agriculture sur le long terme). Ceci peut justifier une action publique pour faciliter la prise en compte de cette nouvelle situation.

- **Effets externes** : Certaines actions d'adaptation peuvent ne pas être rentables du point de vue privé, mais l'être du point de vue de la collectivité. Par exemple, il peut ne pas être rentable pour un propriétaire d'isoler son logement pour réduire la consommation d'énergie liée à la climatisation, alors que le bénéfice collectif est important si un grand nombre de propriétaires le font. A l'inverse, il peut être rentable pour un promoteur de construire dans une zone inondable, alors que le coût de l'inondation pour la collectivité est bien plus important (tension sur le système de santé, relogement temporaire des personnes sinistrées, etc.). De même, il peut être rentable pour le secteur agricole

d'augmenter l'irrigation, mais il faut tenir compte du prélèvement en eau supplémentaire qui peut avoir des effets négatifs sur d'autres acteurs (notamment les producteurs d'électricité) et sur les écosystèmes. Les actions d'adaptation auront également des impacts sur la consommation d'énergie, et donc sur les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'utilisation massive de climatisation ou de dessalement d'eau de mer sont des exemples de conflits entre adaptation et atténuation ; une isolation renforcée des bâtiments permettant d'améliorer le confort des logements en cas de fortes chaleurs et de réduire la consommation de chauffage en hiver est au contraire un exemple de synergie entre ces objectifs. **Une action optimale pour un acteur peut donc avoir des externalités négatives sur d'autres acteurs et ne pas correspondre à l'action optimale socialement.** D'où le rôle de l'action publique pour éviter ces effets induits *ex ante*, via par exemple les normes, la fiscalité ou les institutions (sections 2.2.2 et 2.2.3).

- **Fonction d'intérêt général des grands réseaux d'infrastructures :** Parmi le capital à protéger du changement climatique se trouvent les réseaux (rail, route, communication, énergie, information, etc.) qui ont une qualité de bien public (ainsi que des coûts fixes très élevés). La protection de ces réseaux du changement climatique est d'autant plus importante qu'ils génèrent des bénéfices importants pour la société en fournissant des services essentiels comme l'énergie, le transport ou les communications—services dont la production doit être assurée même en période de crise. Outre les normes permettant d'influencer l'action privée dans ces secteurs, l'adaptation concerne aussi l'investissement public (section 2.2.4).
- **Inadéquation des normes et réglementations existantes** : certains secteurs économiques sont fortement réglementés, au point que les acteurs risquent de ne pas répondre au changement climatique parce qu'ils ne prennent en compte les aspects environnementaux et climatique que via le respect de normes et règlements fixes. C'est par exemple largement le cas du secteur du génie civil. Dans de telles situations, on ne peut attendre d'adaptation spontanée en l'absence d'incitations supplémentaires, et l'action publique est nécessaire pour permettre une adaptation, soit en modifiant les normes et règlements de manière à prendre en compte le changement climatique, soit en déléguant l'adaptation aux acteurs en changeant les contraintes réglementaires de manière à ce que l'adaptation spontanée devienne possible [(7)].
- **Pauvreté et contraintes de budget :** Les interventions précédentes sont relatives à l'efficacité de l'allocation des ressources. Mais une autre raison majeure justifiant l'intervention publique est l'équité. Certains individus, entreprises, communautés locales ou même pays peuvent en effet ne pas être en mesure de financer eux-mêmes les mesures d'adaptation, même si ces mesures sont dans leur intérêt privé. La collectivité (locale, régionale, nationale ou internationale) peut souhaiter aider ces agents via des mécanismes de transfert par exemple fiscaux (voir section 2.2.2).

En résumé, même si l'adaptation produit en général des bénéfices privés ou des biens publics locaux, la théorie économique identifie plusieurs cas de figure dans lesquels l'action publique est justifiée. Les mêmes arguments peuvent être transposés à l'échelle internationale pour justifier l'intervention de la **communauté internationale** en soutien à des mesures d'adaptation dans des pays donnés.

En revanche, l'action publique en faveur de l'adaptation n'est pas toujours justifiée. Une analyse au cas par cas est nécessaire, et le gouvernement ne devrait soutenir des actions d'adaptation que si les bénéfices de ces mesures pour la collectivité sont supérieurs aux coûts de

[7] Les normes étant en général mises en place pour compenser un manque d'incitation, déléguer l'adaptation aux acteurs ne peut se faire qu'en mettant en place les incitations adéquates.

leur mise en œuvre. Le calcul économique public fournit un outil pour réaliser de telles évaluations. La discussion sur cet outil est reprise en section 5.

2.2. Les modalités de l'action publique pour l'adaptation

La discussion précédente suggère quatre modalités principales pour l'action publique en matière d'adaptation : la production et diffusion d'information ; l'action sur les normes, la régulation et la fiscalité ; l'action sur les institutions ; et l'action sur les décisions d'investissement public. L'action publique en matière climatique est ainsi loin de se réduire à de coûteuses dépenses en capital ou en infrastructures. On verra en fait que certaines modalités d'action peuvent être efficaces avec des coûts quasiment nuls.

2.2.1 Production et diffusion de l'information

La première responsabilité de l'autorité publique concerne la production et la diffusion d'information sur les changements climatiques, sur leurs impacts et sur les moyens de s'y adapter. La **recherche fondamentale** relève de l'action publique, les résultats de la recherche fondamentale étant le plus souvent des biens publics. L'Etat dispose de nombreux moyens pour inciter à la production de connaissances pertinentes pour l'évaluation des impacts et pour l'adaptation, que ce soit seul (appels d'offre de l'Agence Nationale pour la Recherche par exemple) [(8)], ou dans le cadre européen. L'enjeu est de fournir à temps les éléments de recherche fondamentale suffisants pour que les méthodologies et les technologies utiles pour l'adaptation puissent se développer.

Sous réserve d'inventaire, on peut anticiper que le secteur privé prendra en charge une partie de l'effort de R&D concernant les **innovations techniques**, dès lors qu'il lui est possible de capturer une partie des rentes qui en découlent (par exemple, en développant puis en commercialisant des variétés de plantes plus résistantes aux sécheresses). La question pour la collectivité nationale et internationale sera, le cas échéant, d'identifier les domaines où des technologies d'adaptation importantes du point de vue social ne serait pas développées par l'innovation privée [(9)]. Un enjeu connexe sera d'arbitrer entre l'appui à l'innovation dans le secteur privé (objectif de développement économique) et le transfert de technologies d'adaptation vers acteurs et les pays n'ayant pas les moyens de les acquérir sur le marché (objectif de solidarité et d'aide au développement).

L'autorité publique doit en second lieu veiller à la diffusion d'information sur les impacts du changement climatique et sur les moyens de s'y adapter. La difficulté est ici que cette information est parcellaire, controversée, et en évolution constante avec les progrès scientifiques. Même si cette information est disponible dans des publications scientifiques, la rassembler et la mettre en forme dans un format et un langage utilisable par les décideurs a un coût considérable. En France, l'ONERC a fait ce travail de mise à disposition depuis sa création, mais avec des moyens limités comparé à ce qui se fait dans d'autres pays (notamment le Royaume-Uni avec le programme UKCIP qui s'occupe à la fois de recherche et de mise à disposition de l'information aux entreprises, collectivités territoriales et ménages). Il faut toutefois noter le projet DRIAS, lancé récemment et qui rassemble les producteurs d'information climatique français (notamment Météo-France et l'IPSL) pour mettre en place une plateforme unique de distribution des sorties de modèles climatiques.

---

[8] Les Ateliers de Réflexion Prospective ADAGE et CEP de l'ANR proposent des pistes de recherche concernant l'adaptation, pour le secteur agricole pour le premier, et de manière plus générale pour le second.

[9] On peut faire ici une analogie avec le sous-investissement des entreprises pharmaceutiques dans la lutte contre le paludisme – pourtant très prévalent au niveau mondial – relativement à l'investissement dans la lutte contre d'autres maladies plus prévalentes dans des pays à hauts revenus.

Les informations nécessaires seront cependant très différentes selon les régions et les secteurs considérés. **Dans ce contexte, une complémentarité entre secteur public et secteur privé est à rechercher**. Le premier devrait diffuser à coût quasi-nul l'information générique sur les scénarios climatiques, les impacts et l'adaptation, car cette information se rapproche d'un bien public. Le second (avec éventuellement des institutions publiques) pourrait fournir des analyses plus détaillées par région ou par secteur en fonction de la demande, car ces analyses demandent un travail spécifique et ont un coût marginal significatif. Un tel schéma soulève cependant plusieurs questions. En premier lieu, il convient de s'assurer que l'information détaillée reste abordable pour les acteurs locaux les moins riches – ce qui peut requérir la mise en place de dispositifs spécifiques (subventions par exemple). En second lieu, se pose la question de la mise en commun ou de la mise à disposition d'information entre acteurs locaux : les producteurs privés d'études sur le climat n'y ont a priori pas intérêt, mais la multiplication des études locales aurait aussi un coût significatif. Un troisième enjeu concerne la validation et la vérification de la qualité de l'information distribuée, dans un contexte où les échelles de temps mises en jeu ne permettent pas un retour sur expérience et un contrôle par effet de réputation sur les producteurs d'informations de mauvaises qualités. L'encadré n°2 montre sur un exemple le rôle stratégique de l'information pour la décision des acteurs privés.

Un troisième volet important de l'action publique concerne la détection des signaux précurseurs du changement climatique. Compte tenu des inerties temporelles précédemment décrites, il est important que toutes les informations pouvant être tirée de l'observation des impacts locaux des changements climatiques soient interprétées le plus rapidement possible afin d'enrichir le corpus commun de connaissance sur les impacts du changement climatique. Cette détection des signaux précoces implique une grande faculté d'adaptation des institutions en place (voir section 2.2.3).

Encadré n°2 : L'impact de l'information sur les conditions de concurrence : le cas des exploitants de stations de sport d'hiver

Le lien entre le réchauffement climatique et les sports d'hivers a fait l'objet d'une étude de l'OCDE (Abegg et al. 2007) qui montre l'importance du rôle de l'information pour le fonctionnement des marchés et les conditions de concurrence entre acteurs.

Six cent soixante domaines skiables sont actuellement exploités dans les Alpes, générant des recettes qui en font la première activité économique de la région. Mais le milieu est particulièrement sensible au réchauffement : les Alpes sont l'une des parties d'Europe où la température monte le plus rapidement. Les séries historiques montrent qu'en moyenne la hausse des températures y a été supérieure de plus de 50% à la moyenne du réchauffement dans le monde durant les quarante dernières années. Pour s'adapter au réchauffement, les exploitants de stations de sport d'hivers sont ainsi confrontés à une double incertitude : (i) le scénario climatique d'ensemble et (ii) sa traduction sur les conditions locales avec une très fortes probabilité pour qu'un scénario global d'un réchauffement de 2°C se traduise par une hausse de plus de 3°C au-dessus des champs neigeux.

Un déficit récurrent d'enneigement gêne déjà l'exploitation d'une soixantaine de stations. Si le thermomètre gagne en moyenne 2°C durant les prochaines décennies, l'OCDE estime qu'une centaine de stations supplémentaires feront face à une pénurie de neige. S'il gagne 4°C, il ne restera guère que 200 stations pouvant fonctionner : celles qui sont situées au-dessus de 2000 mètres.

Spontanément, les stations recourent à la fabrication de neige artificielle. Ce type d'adaptation spontanée accroît l'énergie utilisée, ce qui alourdit les coûts d'exploitation et émet des gaz à effet de serre. Il requiert de l'eau - plus de 10 millions de m^3 chaque hiver en France - qu'il est coûteux d'aller chercher. Reste un ingrédient indispensable au fonctionnement des canons : le

froid ! Quand le thermomètre refuse de descendre suffisamment, les canons restent inutilisés et les skieurs doivent se replier sur des stations de plus hautes altitudes ou se convertir à la randonnée. Le retour des investissements engagés au titre de l'adaptation est donc fonction inverse de la gravité de l'impact qu'il est censé corrigé.

Sous l'angle économique, l'impact du réchauffement sur les conditions d'exploitation des stations de ski dans les Alpes peut être analysé comme une perte pour l'ensemble du secteur. Dans un premier temps, elle revêt la forme d'un accroissement des coûts de production puis dans un second temps d'une perte en capital avec la fermeture probable des stations de basse et moyenne altitude. Mais ce qui est important est que cette perte modifie le jeu concurrentiel avec des gagnants et des perdants.

La perte globale du secteur sera la résultante de multiples ajustements entre certains acteurs qui vont tirer leur épingle du jeu et d'autres qui seront affaiblis, et parfois voués à disparaître. Les règles du jeu concurrentiel sont modifiées : l'avenir des exploitants spécialisés sur des stations de moyenne montagne ne parvenant pas à se reconvertir est compromis ; les opérateurs se spécialisant sur les stations les plus hautes vont au contraire bénéficier de reports de clientèle et d'avantages relatifs en matière de coûts. Si on étudie la structure du secteur, il apparaît qu'un nombre limité d'opérateurs interviennent sur plusieurs domaines et se spécialisent sur les stations de haute montagne, comme le plus important d'entre eux : la Compagnie des Alpes, entreprise cotée, qui a recentré sa stratégie d'investissement sur les stations de haute altitude du fait du réchauffement. Les exploitants de moyenne et basse montagne font l'objet d'un dégagement des grands opérateurs.

Les dissymétries d'information passées ont ainsi permis à certains acteurs du secteur, mieux informés, de prendre des décisions d'investissement à haute altitude qui leur feront bénéficier pendant plusieurs décennies d'un avantage comparatif sur les autres opérateurs du secteur. Il subsiste néanmoins une incertitude sur le point d'arrivée : à terme, s'il ne subsiste plus du tout de neige, tout le monde aura perdu. Compte tenu des conséquences pour l'ensemble du territoire, le tourisme hivernal faisant vivre une grande partie de la population dans les régions concernées, ces questions nécessitent une réflexion publique poussée.

2.2.2 Adaptation des normes, des règlements et de la fiscalité

L'adaptation des normes et règlements existants en fonction des changements à venir du climat est une exigence assez évidente pour tout ce qui concernent l'adaptation du capital fixe à longue durée de vie (bâtiments, infrastructures de transport, grands ouvrages, etc.). Mais revisiter les normes publiques à la lumière du risque climatique est un enjeu qui concerne de nombreux autres secteurs économiques.

Pour le capital fixe à longue durée de vie, la puissance publique fixe typiquement le **niveau de risque acceptable**, via, par exemple, les normes de dimensionnement des grands ouvrages, les normes relatives aux nouvelles constructions [10], ou la délimitation des zones constructibles. Ces normes sont le plus souvent fondées sur la fréquence passée des catastrophes naturelles, fréquences qui ne correspondent plus au risque présent, et encore moins futur. Dans le cas des normes de construction dans le génie civil, par exemple, l'Etat fournit aux acteurs le niveau de résistance qui est attendu, ce niveau étant en général calculé par les services de l'Etat à partir des données historiques [11]. Avec le changement climatique, ces normes doivent toutefois évoluer. On peut imaginer deux solutions. Dans la première solution, l'Etat met en place une procédure pour réactualiser la norme de manière régulière, de manière à ce que cette norme soit toujours à jour. Dans la seconde solution, l'Etat décide déléguer ce travail aux acteurs

[10] Ces normes nécessitent de faire le lien avec d'autres objectifs politiques, et notamment les résultats du Grenelle de l'Environnement sur la réduction de la consommation énergétique du bâti.
[11] Cette information s'apparentant à un bien public, il est justifié que l'Etat la distribue librement (cf. section 2.2.1).

économiques en mettant en place des normes qui « suivent » (voire « précèdent ») le climat. Par exemple, l'Etat peut fixer comme norme pour des ouvrages d'art la capacité à résister à la crue centennale, sans annoncer le niveau de cette crue, laissant ainsi aux acteurs économiques le soin de la déterminer. En pratique, ceci demande la mise au point par l'Etat de normes procédurales pour s'assurer que cette analyse de risque est réalisée de manière correcte, comme cela a été fait, avec plus ou moins de succès, pour les normes prudentielles dans le secteur financier [(12)].

A côté des normes techniques *stricto sensu*, il peut s'avérer nécessaire d'adapter les **normes procédurales**. Par exemple, rendre obligatoire une étude de vulnérabilité / robustesse par rapport au changement climatique pour les grands ouvrages publics et privés [(13)]. Et plus largement, faciliter l'adaptation peut passer par la modification d'autres **normes non directement liées aux risques climatiques, mais qui impactent la capacité à s'adapter**. Dans le cas du capital fixe à longue durée de vie, les normes architecturales et les normes d'aménagement jouent ainsi un rôle critique. A Paris, par exemple, l'installation de volets aux fenêtres a été interdite pendant 30 ans au nom de la protection du paysage urbain. De même, des réglementations relatives aux espaces verts trop restrictives peuvent décourager le développement de l'arbre en ville, instrument de la lutte contre les pics de chaleur. En examinant les changements possibles de ces normes, l'enjeu pour les décideurs publics (locaux comme nationaux) est ici de faire la part des choses entre l'objectif de faciliter l'adaptation au changement climatique et les autres objectifs auxquels répondent ces normes, comme la protection des paysages urbains, ou la gestion des risques liés aux espaces verts.

Finalement, il faut également mentionner l'existence de routines, d'habitudes et de normes implicites, qui influencent le fonctionnement des organisations, des entreprises et des ménages. Ces routines et normes ne peuvent pas être modifiées sur une simple décision. Au contraire, les faire évoluer demandera différentes actions en termes de diffusion d'information et d'éducation (notamment dans la formation continue). Dans certains cas, ces normes et habitudes sont fortement inertes. Dans d'autres, elles peuvent se modifier extrêmement rapidement, comme dans le cas du tabac dans les lieux publics. Outre les normes publiques, d'autres instruments économiques comme la fiscalité sont susceptibles d'inciter les agents économiques à modifier leurs routines. Par exemple, les règles de la fiscalité foncière revêtent une importance particulière car elles peuvent inciter à différents modes d'occupation de l'espace.

2.2.3 Adaptation des institutions

Une troisième forme de mesure publique d'adaptation concerne les institutions. La typologie établie par le rapport sur le Développement Mondial 2003 de la Banque Mondiale assigne trois fonctions essentielles aux institutions dans un contexte de changement environnemental : identifier les signaux précurseurs des changements et des crises, équilibrer les intérêts des différentes parties prenantes, et être capables de mettre en œuvre, de façon crédible, les solutions qu'elles proposent (Banque Mondiale, 2003).

L'identification des signaux précurseurs des impacts du changement climatique a déjà été évoquée dans la section concernant le traitement de l'information. Elle est essentielle, car plus ces signaux sont identifiés tôt, plus la palette des mesures d'adaptation à la disposition de la collectivité est large. Dans ce contexte, il est nécessaire de vérifier, d'une part, que les institutions existantes collectent bien les informations pertinentes pour identifier les signaux liés au changement climatique, et d'autre part que cette information est bien croisée et traitée à

[12] Depuis les normes de Bâle II, les régulateurs financiers ont délégué aux grandes banques d'investissement le soin de proposer les modèles de risque permettant de calculer les ratios prudentiels requis dans le bilan des banques. Ce type de régulation est en train d'être étendu aux assureurs (Solvency2).

[13] La Banque Mondiale et l'Agence Française de Développement ont ainsi introduit dans leurs cycles de projet un test de vulnérabilité au changement climatique pour les projets incluant du capital à longue durée de vie (infrastructure notamment).

temps pour fournir des signaux d'alerte exploitables. En France, Météo-France est chargé de la surveillance de l'atmosphère et du suivi des évolutions climatiques, et l'ONERC du suivi d'indicateurs des impacts. En cas de nécessité, notamment au niveau régional, de nouvelles institutions ou de nouveaux arrangements peuvent être à créer. Les nouvelles technologies de l'information fournissent aujourd'hui des outils pour réaliser ces fonctions, par exemple via l'imagerie satellite ou la création de systèmes de suivi décentralisés de l'état des écosystèmes pour compléter les institutions existantes sur le modèle des réseaux de veille médicaux.

La capacité à produire des arrangements équilibrés est critique, car les institutions existantes sont susceptibles d'être soumises à des tensions de plus en plus importantes du fait du changement climatique. Par exemple, le partage de l'eau entre utilisateurs est susceptible de devenir dans le futur encore plus conflictuel qu'il ne l'est aujourd'hui. De manière similaire, les impacts du changement climatique sont susceptibles d'entraîner des tensions dans les partenariats publics privés (PPPs), du fait de l'émergence de risques non prévus dans l'arrangement initial [(14)]. Dans ce contexte, il peut s'avérer nécessaire de revoir les arrangements institutionnels existants, voire d'en concevoir de nouveaux. Par exemple, en exacerbant les tensions entre offre et demande sur le réseau électrique, le changement climatique peut requérir une coopération plus importante entre les acteurs européens du secteur.

La **crédibilité des arrangements et la capacité des institutions à les faire respecter** est un problème général qui n'est pas un spécifique à l'adaptation au changement climatique. En revanche, du fait de la forte incertitude sur les dommages du changement climatique, et du fait que l'information est en croissance rapide, la pérennité des arrangements requiert que ceux-ci soient suffisamment **flexibles** pour s'adapter aux circonstances. La définition de normes « adaptatives » (voir section précédente) est un exemple de manière par laquelle cette flexibilité peut être intégrée dans des arrangements contractuels. Introduire des éléments de flexibilité géographique est en particulier un enjeu majeur dans le cadre du changement climatique. Ici encore, il faudra être attentif aux risques d'aléa moral si l'Etat s'engage à aider certains acteurs dans leur adaptation en cas d'impact très négatif, pour ne pas créer d'incitation perverse poussant les acteurs à ne pas anticiper leur adaptation, et à utiliser les impacts qu'ils supportent pour justifier une aide publique.

Les mesures institutionnelles sont appelées à jouer un rôle important dans toute stratégie d'adaptation. Ceci peut être illustré par une analyse comparée de la réponse de la Louisiane et de la Hollande face à la montée du niveau local de la mer de respectivement 50 et 20 cm au cours du XXème (Hallegatte, 2010). Le succès de la Hollande depuis 1953 tient plus à la mise en place des institutions nécessaires à la gestion du risque (la Delta Commission) qu'à l'implémentation de mesures techniques (digues, etc.). Ces institutions ont en effet garanti un traitement sur la durée du risque et des renforcements réguliers des protections, en lieu et place du traitement ponctuel par le renforcement des digues après chaque catastrophe, comme on le rencontre en Louisiane.

Pour s'assurer que les institutions jouent leur part dans l'adaptation au changement climatique, un préalable nécessaire est de définir précisément les responsabilités. Alors que l'adaptation va concerner de très nombreuses institutions et organisations existantes, la prise en charge de cette nouvelle problématique ne se fera pas forcément de manière automatique et concertée. Il faut donc éviter, d'une part, que des initiatives contradictoires soient prises par plusieurs organisations qui décident de s'attaquer de manière non concertée à l'adaptation au changement climatique et, d'autre part, que certaines problématiques ne soient tout simplement

[14] La littérature pointe ici l'importance de la flexibilité des contrats pour permettre des renégociations bénéfiques pour les deux parties en cas de circonstances changées (Cochran, 2009 pour le cas des infrastructures de transport). Mais il faut également veiller à ce que le changement climatique ne devienne pas un prétexte pour des demandes de renégociations opportunistes de la part des entreprises – un problème commun dans les PPPs (Irwin, 2007).

pas abordées, faute d'une prise d'initiative de l'un des acteurs possibles. Cette question se pose de façon particulièrement aiguë lors de la définition des échelles spatiales pertinentes : alors que l'adaptation implique des choix politiques territoriaux qui sont certainement à définir à l'échelle locale, elle demande aussi une coordination entre les territoires pour éviter des incohérences coûteuses. La mise en place de stratégies efficaces d'adaptation passera donc par la mobilisation des institutions existantes et de leurs compétences, mais aussi par des outils de coordination permettant de profiter des initiatives sectorielles ou régionales, tout en évitant les contradictions et des incohérences.

Un autre domaine où les institutions devront s'adapter est celui de la gestion des crises (adaptation réactive). En cas de catastrophe ou de crise, la réponse d'urgence demande souvent des moyens supérieurs à ce dont dispose la région ou l'Etat touché. Il est donc utile de mettre en commun ces moyens d'urgence, comme le font par exemple les pays européens pour les moyens de lutte contre les feux de forêts, ce qui requiert une action en amont. Le même problème se pose lors de la phase de reconstruction, le manque de moyen provoquant parfois une hausse des prix et un ralentissement de la reconstruction (comme on l'a observé après la catastrophe d'AZF à Toulouse, avec le manque de vitrier et l'augmentation de leurs tarifs, ou après les tempêtes Lothar et Martin de 1999 et le manque de bûcherons, voir aussi Hallegatte, 2008 sur le cas de Katrina en Louisiane). Dans cette phase, il est parfois possible de profiter de la reconstruction pour améliorer la situation, par exemple en améliorant les réseaux de transport ou la qualité des bâtiments au lieu de reconstruire à l'identique (ce que l'on observe dans l'immense majorité des cas). Ceci demande toutefois que les acteurs de la reconstruction aient les ressources nécessaires à une reconstruction intelligente, et le temps de la mettre en place, souvent en l'absence des revenus de leur activité normale interrompue par la catastrophe. Ces ressources financières peuvent être fournies par un système assurantiel performant ou par une aide publique ciblée [(15)]. Adapter les dispositifs de gestion de crise fait partie des mesures sans regret qui participent à l'adaptation au changement climatique car elles sont le plus souvent justifiables en l'absence de ce changement, pour faire face aux catastrophes naturelles.

2.2.4 Adaptation des investissements publics

Les trois modalités d'action précédentes consistaient pour l'Etat et les collectivités locales à créer un environnement adéquat pour permettre et favoriser l'adaptation privée. Mais l'Etat et les collectivités locales sont aussi un acteur direct de l'adaptation en tant que possesseur et opérateur de capital fixée à longue durée de vie (bâtiment, infrastructures, etc.), que gestionnaire d'écosystèmes, qu'employeur, etc. **Un quatrième type de mesure publique face au changement climatique concerne donc l'adaptation des infrastructures publiques existantes** (réseaux de transport de passager, de marchandises et d'énergie, réseau de télécommunication, etc.), ainsi que des bâtiments publics en général. Il s'agit aussi d'adapter les nouveaux investissements, par exemple en termes de dimensionnement et de localisation. Plus largement, ce groupe recouvre aussi les politiques structurant l'aménagement de l'espace, que ce soient les politiques d'urbanisme, les grands investissements (transport de biens et de marchandises, transport d'eau, etc.), les projets territoriaux de développement économique, etc. A terme, la question de la relocalisation des activités et des personnes se posera aussi (voir Section 2.3.2).

[15] On peut imaginer des fonds spécifiques pour aider les pays touchés par des catastrophes à faire face, sur la base du « European Union Solidarity Fund » ou du fond pour l'assurance des catastrophes dans les Caraïbes (CCRIF). On peut aussi imaginer des mécanismes plus généraux de type « rainy day funds », c'est-à-dire des fonds publics spéciaux abondés par des ressources fiscales en temps de vaches grasses, et utilisés dans les périodes de vache maigre. Il en existe dans plusieurs Etats des Etats-Unis, et dans certains pays en voie de développement.

2.3. Exemples de mesures d'adaptation possibles dans quelques grands secteurs

L'action publique face au changement climatique comporte certaines actions uniquement rendues nécessaires par le changement climatique lui-même. C'est par exemple le cas de la mise à disposition d'information sur les scénarios climatiques ou du recueil de signaux sur le changement climatique. D'autre part, il faut faire en sorte que le changement climatique soit pris en compte dans toutes les décisions pour lesquelles le climat joue un rôle. Il faut donc aussi intégrer l'adaptation au changement climatique dans des politiques sectorielles existantes, tant au niveau national que dans les collectivités territoriales. C'est par exemple le cas des politiques de gestion de l'eau ou de maîtrise des risques naturels, qui existent déjà mais doivent être ajustées en fonction des changements de climat attendus. **La présente section a pour objet d'illustrer les grandes catégories de mesures d'adaptation discutées précédemment au moyen d'exemples sectoriels** choisis au sein de secteurs dans lesquels l'intervention de l'action publique semble légitime. Il s'agit uniquement d'exemples, et cette partie ne vise absolument pas à l'exhaustivité. D'une part, de nombreux secteurs ne sont pas examinés ici. D'autre part, la discussion au sein de chaque secteur se focalise sur quelques exemples seulement. Un travail spécifique serait nécessaire pour identifier et valider les mesures d'adaptation possibles et construire une stratégie d'adaptation pour chacun des secteurs considérés.

2.3.1 Construction et urbanisme

En guise d'illustration de l'influence des inerties et de l'incertitude sur les décisions d'investissement, on aborde ici le problème de l'adaptation dans les secteurs dont le capital a une très longue durée de vie. Ces secteurs utilisent en effet du capital dont la durée de vie est du même ordre de grandeur que l'échelle de temps du changement climatique. Par conséquent, ce capital va devoir rester productif dans un climat changeant. L'enjeu de l'adaptation concerne non seulement les nouveaux investissements, mais aussi, et surtout, une fraction importante du parc déjà installé. Ces secteurs incluent le logement et les infrastructures urbaines abordés dans cette section, mais aussi le secteur énergétique et celui des transports présentés dans la section suivante.

Comme on l'a dit plus haut, la très longue durée de vie du capital complique la définition des mesures d'adaptation. Ainsi, un bâtiment construit en 2000 avec une durée de vie de 150 ans devra être adapté au climat actuel de Paris, mais aussi au climat de Paris en 2150, qui sera probablement très différent du climat actuel. Or on sait construire des bâtiments adaptés à différents climats, mais il est plus complexe de construire un bâtiment (ou tout autre infrastructure) adapté à une large gamme de climat qu'à un seul climat bien défini. L'enjeu est donc soit de réduire la réduire la durée de vie du capital (existant comme futur), mais au risque de coûts de remplacement élevés, soit de construire de manière plus robuste, pour être capable de s'adapter à des climats variés. En outre, le risque de maladaptation est important quand la durée de vie du capital est particulièrement longue (cf. section 1.2 et encadré n°1).

Pour orienter les choix d'investissement des acteurs privés et publics dans le domaine du bâtiment, le rôle essentiel des normes et réglementations a déjà été mentionné (section 2.2.2). Mais l'adaptation dans les secteurs dont le capital est à longue durée de vie passe aussi par la gestion des institutions (section 2.2.3) pour assurer, par exemple, la stabilité des partenariats public privé) et, bien entendu, par les choix d'investissement publics *stricto sensu* (section 2.2.4).

2.3.2 Infrastructures d'énergie et de transport

Les réseaux énergétiques et de transport jouent un rôle incontestable d'intérêt général et leur interruption prolongée engendrerait des coûts considérables pour l'ensemble de l'économie. Leur fonctionnement repose sur des infrastructures qui sont à très longue durée de vie (une partie significative du réseau de routes nationales françaises reprend le tracée des voies

romaines !). Il est du ressort de l'action publique de veiller à ce que ces infrastructures s'adaptent aux changements du climat.

Le cas des infrastructures énergétique est détaillé dans l'annexe C. Cette annexe révèle combien les infrastructures énergétiques, de production comme de transport, sont souvent localisées dans des zones de forte vulnérabilité aux changements du climat du fait de leur proximité des cours d'eau et de la mer. Cette proximité est liée tant à des contraintes techniques (refroidissement) qu'à des contraintes économiques (accès aux ports et voies maritimes). Un premier volet de l'adaptation sera donc de veiller à ce que ce maillage territorial résiste bien aux contraintes du climat de demain. Il devra également s'accompagner d'action tenant compte de la sensibilité élevé des conditions d'offre et de demande d'énergie aux changements du climat.

Le cas des infrastructures de transport a été étudié par Cochran (2009). Son analyse révèle que plusieurs infrastructures sont potentiellement soumises à un risque et que des analyses plus poussées s'imposent concernant la vétusté, les normes de construction et le contexte géographique des infrastructures. Elle montre également qu'en dépit de l'incertitude qui pèse sur la tendance des phénomènes climatiques extrêmes, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des inondations et des événements caniculaires s'avérera coûteuse et constituera une source de perturbations. Enfin, l'évolution des moyennes climatiques pourrait également conduire à des modifications dans la demande des infrastructures de transports, du fait de mutations en matière de flux touristiques, de peuplement et de production agricole.

Les mesures d'adaptation à prendre dans ce secteur visent principalement l'évolution des procédures de planification et des critères techniques afin de mieux préparer les nouvelles infrastructures au changement climatique ainsi que la réhabilitation et, dans certains cas, la protection des infrastructures existantes. La réussite de ces efforts dépendra de la capacité d'un certain nombre d'acteurs engagés dans la conception, la construction, la maintenance et l'exploitation des infrastructures de transport à développer et à mettre en oeuvre des approches cohérentes. Autrement dit, l'enjeu institutionnel est central. Des recherches complémentaires sont nécessaires pour comprendre plus précisément dans quelle mesure un modèle d'entreprise privé basé sur l'actionnariat acceptera les coûts supplémentaires qu'imposent les mesures d'adaptation pour l'exploitation des infrastructures de transport dans certaines régions.

2.3.3 Eau et agriculture

Le cas de la gestion de l'eau – où l'on a déjà noté que les tensions pouvaient être importantes (section 2.2.3) – fournit un exemple du rôle des normes, ainsi que de l'importance des interactions entre les secteurs, et notamment avec l'énergie, l'eau et la biodiversité.

De nombreuses normes et règlements peuvent en effet être utilisés pour contrôler le niveau de la demande en eau, par exemple en fixant des niveaux acceptables de prélèvement ou – dans des cas extrêmes – en décidant que certaines activités fortement consommatrices en eau (notamment agricoles) ne sont pas acceptables dans des zones déficitaires en eau. Il est également possible d'utiliser des instruments économiques, comme un prix de l'eau qui jouerait le rôle d'un signal-prix pour indiquer la rareté de la ressource et inciter à l'efficacité de l'utilisation et du prélèvement de l'eau. L'enjeu est de prendre en compte les arbitrages entre l'usage de l'eau par les secteurs économiques (production électrique, agricole, industrielle, domestique) et le maintien des débits nécessaires à la préservation des écosystèmes.

L'agriculture est l'un des secteurs les plus directement affecté par le changement climatique. L'adaptation se fera progressivement au niveau des acteurs économiques, via des modifications de pratiques agricoles (par exemple en modifiant les dates de semis ou en utilisant des variétés plus résistantes à la chaleur) et en changeant la production elle-même, avec un déplacement probable vers le Nord des productions françaises. Dans certains cas, on peut d'ailleurs attendre des gains nets pour certaines productions et certaines régions, au moins pour un réchauffement limité, dans la première partie de ce siècle. Ces actions individuelles d'adaptation nécessiteront

toutefois une action publique, ne serait-ce que pour les mettre en cohérence avec les politiques de gestion de l'eau et d'occupation des sols. De plus, certaines adaptations seront difficiles à conduire uniquement à un niveau individuel. Par exemple, la création de nouvelles filières sera sans doute nécessaire et, pour cela, une coordination nationale pourrait être utile en lien avec les organisations professionnelles. Des cas particuliers demanderont des actions spécifiques, comme les Appellations d'Origine Contrôlée, dont la définition basée sur un terroir et un climat pourrait avoir à être modifiée, par exemple dans la viticulture. Il faut toutefois noter que de nombreuses décisions concernant l'agriculture sont à relativement court horizon temporel, et ne nécessitent pas d'actions immédiates.

2.3.4 Ecosystèmes

De la même manière, les politiques publiques de gestion **des écosystèmes vont devoir être revues pour vérifier qu'elles sont bien compatibles avec le changement climatique**. Les écosystèmes menacés par le changement climatique (zones humides, zones forestières, etc.) produisent en effet de nombreux services environnementaux qui bénéficient à la collectivité (qualité des eaux et de l'air, protection de la biodiversité, etc.) (Chevassus au Louis, 2009), et l'intervention publique est à ce titre nécessaire pour veiller à ce que ces fonctions soient « produites » en quantité suffisante. L'action publique est à la fois indirecte (normes de gestion des forêts privées par exemple) et directe (gestion par l'Office National des forêts domaniales, parcs naturels, conservatoire du littoral, etc.). Le problème est cependant très complexe car la réponse des écosystèmes au changement climatique reste très mal connue. Un enjeu central est la localisation des écosystèmes (et donc de l'ensemble des institutions de protection comme les parcs nationaux, etc.) qui est susceptible d'évoluer dans le futur, ce qui peut requérir de modifier l'usage des sols, et, plus largement, de modifier le périmètre géographique de certaines activités.

Les écosystèmes forestiers offrent un exemple particulièrement intéressant. Le territoire français se situant sur la frontière entre climat méditerranéen, océanique et continental, l'impact du changement climatique sur les écosystèmes forestiers est potentiellement important avec une croissance de l'aire de répartition potentielle des essences méditerranéennes et, à l'inverse, une contraction de l'aire de répartition d'essences tempérées (hêtre par exemple). On retrouve ici, un besoin de R&D important pour mieux détecter et mieux comprendre les impacts du changement climatique sur les écosystèmes forestiers et les stratégies d'adaptation (Roman Amat, 2007), notamment l'introduction d'essences plus robustes (robiniers) voire d'essences exotiques. Dès lors que la durée de vie de certaines essences forestières est du même ordre de grandeur que celle des infrastructures, l'investissement public (ici le choix des essences) pose des problèmes similaires de décision en situation d'incertitude. Dans cette décision, les normes de gestion et la réglementation, notamment fiscale, jouent ici un rôle important et demandent à être revues dans le contexte du changement climatique. Enfin, le changement climatique repose la question des institutions forestières, et en particulier de la capacité de coopération dans les massifs caractérisés par une grande fragmentation de la propriété forestière privée.

Ces aspects apparaissent d'autant plus importants que **les écosystèmes ne sont pas uniquement un capital à protéger du changement climatique, mais peuvent aussi être mobilisés pour renforcer les capacités d'adaptation de nos sociétés à ce changement**. C'est le principe de « l'adaptation par les écosystèmes » (*ecosystem-based adaptation* en anglais). Ainsi, les zones naturelles humides protègent très efficacement des marées de tempête et des surcotes, et peuvent permettre de remplacer ou de compléter une digue ou autre protection en dur, évitant ou réduisant ainsi ses impacts négatifs sur la biodiversité, l'érosion, les paysages et l'attractivité touristique. Ce type d'approche est par exemple mis en place autour de la Nouvelle Orléans, en essayant de restaurer les zones humides qui ont été détruites au cours des derniers siècles.

2.3.5 Assurance

Le rôle de la régulation peut être illustré dans le cas du secteur de l'assurance, qui montre bien que l'adaptation n'est pas uniquement une question d'investissement et d'infrastructure.

Du point de vue des assureurs et réassureurs, le changement climatique implique de nombreuses modifications des pratiques, qui vont probablement devoir se transcrire dans des modifications de la réglementation du secteur de l'assurance. En premier lieu, l'approche actuarielle des probabilités d'occurrence de sinistre n'est plus valide, car le climat est en évolution. Ceci peut nécessiter de délaisser les approches fondées sur les données historiques et de se tourner vers les modèles d'évaluation des risques. C'est ce qui a été rendu obligatoire en Floride après le cyclone Andrew en 1992. En second lieu, l'augmentation de la probabilité d'occurrence des évènements extrêmes et la plus forte corrélation entre les risques rendent les risques de défaut plus importants pour les assureurs, et in fine pour les réassureurs, justifiant éventuellement des niveaux de réserves plus importants. En France, l'Etat étant un réassureur clé via le système CAT-NAT, ces changements nécessitent une réflexion de la part des pouvoirs publics.

Plus généralement, l'assurance peut aussi être considérée comme un outil pour l'adaptation. En particulier, une forte pénétration de l'assurance permet aux acteurs économiques touchés par une catastrophe de reconstruire plus rapidement et d'éviter les faillites (notamment des petites entreprises), et donc de remettre en route l'économie plus vite, ce qui limite les pertes économiques indirectes (voir Annexe D, encadré D2). De plus, la présence d'assurance (en particulier sur les pertes d'exploitation) permet aux acteurs de réaliser la reconstruction dans une situation plus sereine, et donc de saisir des opportunités d'amélioration, c'est-à-dire de reconstruire « mieux » au lieu de reconstruire à l'identique. Enfin, l'accès à l'assurance contre les risques naturels permet aussi à certains acteurs de prendre plus de risque, grâce au partage de ce risque et à son transfert à des acteurs qui peuvent le supporter. Le risque peut en effet apparaître comme un facteur de production permettant de renforcer l'assise des producteurs. Ainsi, un meilleur partage du risque grâce aux assurances permet d'augmenter la capacité de l'économie dans son ensemble à conduire les changements nécessaires à l'adaptation au changement climatique.

En théorie, si les primes d'assurance étaient représentatives du niveau de risque dans une zone donnée, l'accès à l'assurance pourrait aussi servir à fournir aux entreprises et aux ménages l'information sur leur niveau de risque sous la forme d'un signal-prix, qu'ils ne sont pas forcément capables d'évaluer seuls. Ceci n'est pas le cas dans la situation actuelle où les primes d'assurance pour les catastrophes naturelles sont identiques dans toutes les zones, à risque ou non. L'idée de prime d'assurances modulées en fonction du niveau de risque est toutefois controversée. En effet, la transition d'un système de primes fixes à un système de primes basées sur le niveau de risque est toutefois complexe à réaliser, car il peut engendrer des hausses vertigineuses de prix dont l'acceptabilité politique est incertaine. En outre, même en dehors de la phase de transition, des primes d'assurance directement liées au niveau de risque peuvent entraîner des difficultés pour les ménages les plus pauvres, qui s'installent parfois dans les zones les plus risquées pour rechercher des coûts du foncier moins élevés. L'augmentation de la prime d'assurance pourrait alors supprimer cette possibilité, conduisant à l'absence d'assurance ou à une difficulté accrue pour l'accès au logement.

D'une manière générale, la question de l'assurance des risques naturels ne peut être isolée de la question de l'accès au logement, du coût et de la disponibilité du foncier, et de l'aménagement du territoire. L'exemple de la Floride montre même que des primes d'assurance strictement fixées en fonction du niveau de risque peuvent mettre en danger la viabilité économique de certaines régions, avec des conséquences négatives fortes pour les populations. De plus, les zones à risque ne sont pas uniquement associées à des avantages privés (comme une vue sur la mer) mais apportent aussi des bénéfices collectifs (comme dans le cas

des zones portuaires qui sont à risque mais permettent de diminuer le coût des importations pour l'ensemble de la population, comme dans le cas de la Nouvelle Orléans). Des solutions mixtes tenant compte du niveau de risque pour créer un signal-prix, tout en conservant un élément fort de solidarité nationale peuvent être envisagées pour concilier ces différents impératifs. De telles modifications ne pourraient être mises en place qu'en cohérence forte avec les politiques d'aménagement, et notamment avec les zones de risques définies par les Plans Locaux d'Urbanisme et les Plans de Prévention des Risques.

3. Les dimensions territoriales et spatiales de l'adaptation

Une particularité importante des stratégies d'adaptation est leur dimension spatiale. **Une stratégie d'adaptation ne peut se contenter d'agréger des volets sectoriels et doit intégrer les différentes composantes de l'action publique dans une vision territoriale intégrée**. Trois questions principales sont alors posées : comment anticiper et gérer les modifications dans la localisation des activités et des hommes (3.1) ? Comment intégrer les impacts internationaux du changement climatique dans la gestion du territoire national (3.2) ? Comment répartir les efforts d'adaptation entre les différentes régions et différents territoires (3.3) ?

3.1. Maintenir l'existant ou bifurquer ?

On a vu en section 1.2 que dans certains cas, reconduire à l'identique des activités ou des services peut s'avérer trop coûteux, voire techniquement impossible. Dans ces cas, s'adapter au changement climatique requiert de changer de trajectoire de développement. **Cette bifurcation peut prendre soit la forme d'un changement de localisation, soit celle d'un changement d'activité sur le même site.** Un exemple extrême de changement de localisation est donné par certains états insulaires de l'Océan Pacifique, qui ne seront peut être plus habitables, à terme, si l'élévation du niveau des mers dépasse un seuil critique. Sur le territoire métropolitain, les impacts du changement climatique sur certaines zones côtières sont aussi susceptibles de provoquer à terme de telles relocalisations. Toute la question est de savoir quand et comment préparer ce type de mutation.

3.1.1 Reconversions d'activité

Un **exemple de changement possible d'activité sur un même site** est fourni par la région des Landes (même si le lien entre changement climatique et fréquence et intensité des tempêtes sur l'Atlantique Nord reste controversé). Après le passage des ouragans Lothar et Martin en 1999, puis celui de la tempête Klaus en 2009, l'activité principale de la région, à savoir la production de pin maritime, n'est pas nécessairement rentable, et la question se pose de savoir s'il ne vaut pas mieux, dans certaines zones au moins, abandonner la production forestière pour passer à d'autres activités agricoles ou de production d'électricité solaire. Comme l'économie de la région est aujourd'hui principalement fondée sur la filière bois, promouvoir des alternatives à la culture du pin maritime implique donc de réfléchir à des trajectoires de développement alternatives à l'échelle de la région toute entière.

L'histoire économique suggère que les économies spécialisées sont très vulnérables aux changements dans les variations de rentabilité de leur principal secteur économique. Dans les régions françaises où l'activité minière a disparu dans les années 1970, ou dans des régions désindustrialisées aux États-Unis, l'économie est restée déprimée au cours longues périodes de temps en dépit de l'appui financier reçu de grands niveaux national et fédéral. Ces expériences montrent que des économies spécialisées ont une capacité limitée à faire face aux chocs de rentabilité en transférant leurs ressources à de nouveaux secteurs. Au-delà d'un certain seuil, la « capacité de transition » est dépassée : le niveau d'éducation des employés du secteur touché peut devenir insuffisant pour le développement de nouveaux secteurs et la capacité d'investissement des nouveaux secteurs se révéler incapables de fournir les moyens nécessaires

aux reconversions. Les problèmes de capacité d'investissement sont particulièrement importants quand les revenus régionaux diminuent en raison de la baisse de rentabilité du secteur principal d'une économie spécialisée.

Dans la construction d'un plan d'adaptation, il faut donc distinguer les perturbations marginales qui demandent un simple ajustement des pratiques, et les changements structurels rendus nécessaires par le changement climatique. L'action publique et le soutien à la transition seront particulièrement nécessaires dans ces derniers cas qui devront être soigneusement identifiés.

3.1.2 Déplacements de population et d'activités

Un exemple de bifurcation géographique concerne le retrait des zones les plus à risque d'inondation, par exemple en raison de la montée du niveau de la mer. Dans certaines zones côtières à faible densité, il est en effet plus rationnel de procéder à un retrait vers l'intérieur des terres plutôt que d'essayer de protéger la zone à tout prix. Mettre en place un tel retrait pose toutefois des problèmes techniques, économiques, et politiques.

Dans un monde optimal et avec des anticipations parfaites, on pourrait imaginer que ce retrait se fasse de lui-même, la valeur des actifs et le montant des investissements décroissant régulièrement avec l'augmentation du risque dans la zone. Au moment où la zone doit être évacuée, les actifs seraient alors au terme de leur durée de vie (c'est-à-dire totalement dépréciés) et auraient donc une valeur nulle. Dans ce cas, le coût du retrait serait nul. En pratique, ceci est toutefois difficilement envisageable, pour trois raisons :

- D'abord, une zone urbanisée se compose de multiples types de capital (logements, route, réseau 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, il n'est pas possible d'arrêter tout entretien et de vivre dans des habitations qui se dégradent et dont le confort diminue. De même, il n'est pas envisageable de vivre avec des routes dont la qualité (et donc la sécurité) se dégrade avec le temps pour atteindre la fin de leur durée de vie au moment d'un retrait. Même si l'on se fixe un seuil minimal de confort et/ou de sécurité acceptable, caler les investissements de telle sorte que l'on aboutisse précisément, à une date donnée, à la fois à la dépréciation totale (financière) du capital et à ce niveau de confort et/ou de sécurité n'est pas réaliste du fait des incertitudes sur la dynamique de dégradation du capital. On voit bien que cette approche n'est pas réaliste, et que l'on ne peut éviter d'avoir à abandonner du capital encore utilisable (avec donc un coût non nul).
- Enfin, comme on l'a noté plus haut, caler les investissements pour que le capital soit déprécié juste au moment où le retrait est nécessaire demanderait une anticipation parfaite et une prise en compte rationnelle de la montée du niveau de la mer, tout à fait improbable dans la réalité.

Un retrait anticipé des zones à risque est donc peu crédible en l'absence d'une action publique pour le coordonner. Les collectivités locales peuvent en revanche permettre une action concertée (le « retrait stratégique »), en lien avec les plans d'urbanisation, l'action du conservatoire du littoral, et les politiques publiques d'investissement dans les infrastructures.

3.1.3 Implications méthodologiques et institutionnelles des bifurcations

D'un point de vue méthodologique, l'évaluation des bifurcations est plus complexe que l'évaluation des projets d'adaptation « à la marge ». En effet, la comparaison de deux équilibres économiques très différents l'un de l'autre requiert des modèles économiques multisectoriels, qui n'existent pas toujours, et dont l'usage reste complexe. En second lieu, deux équilibres très distants les uns des autres peuvent s'avérer difficiles à distinguer du point de vue

économique [16]. En revanche, **la différence entre les trajectoires se joue souvent au niveau des coûts de transition pour passer d'un équilibre à l'autre** ; des coûts dont l'évaluation est plus difficile car ils requièrent des modèles dynamiques.

Plus largement, **on touche ici à des questions institutionnelles sur la manière dont les territoires peuvent faire des paris sur leur avenir et leurs stratégies de développement**. Il s'agit d'exercices globaux, dans lesquels toutes les dimensions du développement économique doivent être prises en compte. Or, l'éclatement des responsabilités dans différents secteurs (eau, énergie, risques, etc.) rend difficile le pilotage de ce type de bifurcations. Le changement climatique pourrait toutefois précipiter et faciliter les réflexions dans ce domaine. En particulier, un lien doit être fait avec les pistes de réflexion ouvertes par le rapport du CEDD sur la croissance verte (Crifo et al., 2009) et sur les trajectoires sans carbone. Les bifurcations posent aussi de manière aigue la question de **l'accompagnement des transitions et de la gestion des effets distributifs des bifurcations,** sur les plans financiers, techniques et humains.

3.2. L'adaptation du territoire national dans le contexte international

L'adaptation au changement climatique ne s'arrête pas aux frontières nationales. Au contraire, le changement climatique impose à tous les pays, et en particulier aux pays en voie de développement, de revoir leurs stratégies de développement à la lumière des risques climatiques (Shalizi et Lecocq, 2009). Les impacts du changement climatique se feront en effet sentir sur l'ensemble de la planète, avec, potentiellement, des impacts nettement plus importants dans de nombreuses économies en voie de développement et en transition où les ressources (en capital physique, en capital financier, en capital humain, ou en capital institutionnel) sont moindres pour les affronter. Ces impacts internationaux auront de multiples **effets induits** pour le territoire national à prendre en compte dans l'élaboration d'une stratégie d'adaptation.

Au plan économique, ces effets induits vont se transmettre via les marchés, avec des implications pour le **commerce international** pas toujours faciles à anticiper. Des travaux dans le secteur de la forêt et de l'agriculture notamment suggèrent néanmoins des impacts forts, avec à la fois des risques et des opportunités selon les secteurs. Avec l'ouverture probable de nouvelles routes commerciales via l'océan arctique pendant les deux mois d'été, il faut attendre une modification de la géographie du commerce internationale qu'il vaut mieux anticiper pour en tirer des bénéfices. Par ailleurs, les technologies de l'adaptation au changement climatique peuvent également ouvrir de nouveaux marchés, notamment dans deux secteurs où les entreprises nationales disposent d'avantages compétitifs : la gestion de l'eau et les bâtiments et travaux publics.

L'impact du changement climatique futur sur les **migrations internationales** est potentiellement très élevé. Il pourrait massivement concerner les régions arides situées entre les tropiques humides et les zones tempérées très vulnérables au réchauffement du fait du déficit hydrique (Europe du sud-est, Proche Orient, Afrique du Nord, Asie centrale). Une grande partie de ces zones constitue déjà l'un des principaux réservoirs des flux migratoires à destination de l'Europe. Par ailleurs, le changement climatique aboutit à exacerber des tensions sur des ressources déjà rares, avec des implications potentiellement importantes – négatives ou positives – en termes de **sécurité** (partage international des eaux, par exemple) (Schwartz et Randall, 2003, et Hallegatte et Ambrosi, 2006).

Pour éviter les conflits futurs contre lesquels certains auteurs mettent en garde (Weltzer, 2009), il est essentiel de rattacher stratégie d'adaptation au changement climatique et **politiques de coopération et d'appui au développement**. Précisément, les effets induits du changement climatique pour le territoire national fournissent une justification supplémentaire pour l'aide au

[16] On trouvera chez Hourcade et Kostopoulou (1993) un exemple dans le secteur énergétique (voir aussi la discussion sur les changements de trajectoires de développement menée dans Najam et al., 2007).

développement. L'adaptation au changement climatique va générer de nouveaux besoins d'aide au développement, et va aussi nécessiter que les acteurs du développement intègrent cette dimension dans leurs projets et leurs programmes (AFD, 2006 ; Banque Mondiale, 2010). De plus, les pays industrialisés se sont engagés dans le cadre de la Convention Cadre des Nations Unis et du protocole de Kyoto à soutenir l'adaptation dans les pays en voie de développement. Les ressources dégagées sont jusqu'à présent restées très modestes (Drouet, 2009), mais sont susceptibles d'augmenter si les promesses faites à Copenhague en la matière sont tenues. Même si ces ressources restent en deçà des besoins tels qu'ils sont évalués par les agences de développement, leur mise en œuvre est susceptible de réduire les impacts négatifs du changement climatique à l'extérieur du territoire national. Compte tenu des interactions précédemment décrites, un tel processus faciliterait la mise en place d'une stratégie nationale d'adaptation en réduisant les pressions externes s'exerçant sur le territoire national.

La mise sur pied d'une véritable coopération internationale en matière d'adaptation au changement climatique est une pierre d'achoppement de la négociation climatique internationale depuis plusieurs années et une pomme de discorde entre pays développés et pays en développement. Elle butte sur trois questions : le montant des ressources à dégager ; la gouvernance des institutions chargées de la mise en place des transferts économiques et financiers ; la répartition des ressources dédiées à l'adaptation entre les différents pays. D'une certaine façon, ces questions se retrouvent à l'échelle nationale où il faut aussi trouver les moyens de répartir les ressources dédiées à l'adaptation entre les différentes régions et territoires.

3.3. L'allocation des ressources pour l'adaptation entre régions et entre secteurs

La question de savoir comment allouer les ressources pour l'adaptation entre régions et entre secteurs se pose ou se posera à toutes les échelles de décision – locale, régionale, nationale, et internationale. Nous l'illustrons ici avec l'exemple de l'allocation des ressources au niveau international ; exemple qui a été beaucoup étudié et dont on peut tirer des leçons pour d'autres échelles de décision.

Face à une question d'allocation de ressources rares, le réflexe de l'économiste est d'allouer les ressources vers les projets dont les bénéfices marginaux pour la société – c'est-à-dire le bénéfice social pour le dernier euro investi – **sont les plus élevés**. Cette règle de choix permet en effet d'obtenir le portefeuille de projets dont le bénéfice est le plus élevé pour un niveau de ressources données. L'application de cette règle soulève cependant deux problèmes : un problème d'évaluation et un problème de distribution.

Le problème d'évaluation sera discuté dans la section suivante du rapport. Contrairement aux mesures d'atténuation, il n'existe pas d'indicateur de performance commun aux mesures d'adaptation. En théorie, on peut certes toujours comparer les mesures entre elles en examinant leurs bénéfices monétaires, en termes de dommages évités. Mais ces bénéfices sont incertains, et pas toujours calculables ex ante. Se limiter aux seules mesures d'adaptation qui peuvent faire l'objet d'une analyse coûts bénéfices complète pourrait même se révéler contre-productif, car l'analyse serait alors biaisée vers les projets d'investissement dans le capital physique, au détriment des mesures d'adaptation les plus « soft », souvent très efficaces et moins coûteuses. Des réponses existent, mais elles requièrent d'expliciter les avantages et les inconvénients des différentes mesures considérées au moyen par exemple d'une démarche multicritère.

Le problème de distribution est lui aussi particulièrement délicat. Contrairement à l'atténuation, les bénéfices de l'adaptation sont essentiellement locaux. **On doit par conséquent comparer des mesures dont les bénéfices concernent des individus très**

différents [17]. L'approche traditionnelle de l'économiste est ici de considérer qu'il faut de toute manière choisir les projets les plus rentables, puis éventuellement procéder à des transferts afin de remplir les objectifs d'équité énoncés par la collectivité. La difficulté est qu'à l'échelle internationale, de tels transferts sont difficiles à envisager, en particulier si les dépenses d'Aide Publique au Développement (APD) et les dépenses d'adaptation sont séparées. En pratique, il est probable que les fonds internationaux dédiés à l'adaptation soient accompagnés d'une clef de répartition implicite entre grandes régions du monde, basée sur des considérations d'équité. A charge ensuite pour l'institution internationale responsable de l'allocation de ces fonds d'allouer les financements le plus efficacement possible au sein des différentes régions.

Une difficulté supplémentaire vient du fait que les pays en voie de développement réclament que les ressources dédiées à l'adaptation au changement climatique soient « additionnelles » à l'aide publique au développement (APD), afin de limiter le risque que l'augmentation des ressources pour l'adaptation se fasse au détriment de l'APD. Or il n'est pas toujours évident, en pratique, de séparer ce qui relève de l'adaptation de ce qui relève du développement stricto sensu. **Une seconde question est donc de savoir s'il convient d'établir une comptabilité séparée entre adaptation et APD, et si oui comment.**

Dans un petit nombre de cas, il est assez facile de distinguer ce qui relève de l'adaptation de ce qui relève de l'aide au développement. Par exemple, surélever une digue existante pour faire face à la montée du niveau de la mer relève de l'adaptation stricte. **Mais adaptation et développement sont le plus souvent liés.** D'une part, adaptation et aide au développement sont souvent financés dans le cadre d'un même projet : par exemple, un projet de développement rural qui contient une composante adaptation. Mais plus fondamentalement, adaptation et développement ne peuvent pas toujours être distingués. Par exemple, les projets d'éducation ont un impact sur la capacité des individus à s'adapter, sans qu'il soit possible de déterminer la « part » de tels projets qui relève de l'adaptation.

En théorie, une approche pourrait être d'identifier ce que le projet de développement contient de plus par rapport à ce qui se serait fait si le changement climatique n'avait pas été pris en considération. Mais évaluer cette différence requiert de construire une situation de référence hypothétique « sans adaptation ». Outre qu'elle est coûteuse en temps et en ressources, une telle construction peut s'avérer en pratique impossible lorsque l'adaptation et le développement sont liés, ou lorsque la présence du changement climatique entraîne des bifurcations entre activités. Dans ce dernier cas, le projet « sans adaptation » serait totalement différent du projet effectivement réalisé.

Par conséquent, la séparation entre ressources dédiées à l'adaptation et ressources liées au développement semble présenter des risques majeurs dans sa mise en œuvre. Si elle devait néanmoins être mise en œuvre, il est essentiel que des normes simples permettent de calculer la part de la composante adaptation dans les projets de coopération, afin (i) de réduire les coûts de transaction, et (ii) d'éviter un biais en faveur des mesures d'adaptation les plus « pures » au détriment des mesures d'adaptation liées aux projets de développement.

Cette discussion a aussi des implications pour l'allocation des ressources au niveau national. Elle suggère en effet qu'il serait inefficace de baser la politique d'adaptation sur un seul budget dédié géré par une agence ou un Ministère unique, mais que – hors les mesures d'adaptation « pures », et en assurant la coordination d'ensemble – il est essentiel d'intégrer l'adaptation dans les différentes politiques publiques.

[17] Ce n'est néanmoins pas toujours le cas. Par exemple, des mesures favorisant la R&D en matière de technologies d'information, ou la fourniture d'informations sur les impacts du changement climatique, bénéficient potentiellement à l'ensemble de l'humanité.

4. Les étapes de mise en oeuvre d'une stratégie d'adaptation

Il existe de très nombreuses mesures pour faciliter l'adaptation au changement climatique ; voir par exemple le rapport du Groupe Interministériel sur l'évaluation des impacts économiques du changement climatique.

Toutes les mesures d'adaptation ne sont toutefois pas souhaitables, et certaines coûtent probablement plus cher que la valeur des impacts qu'elles permettent d'éviter. De plus, parmi les mesures efficaces et rentables, certaines vont être nécessaires et urgentes, alors que d'autres ne devraient être mises en place que dans plusieurs décennies. Il est donc important de disposer d'une méthodologie pour définir une stratégie d'adaptation qui soit à la fois cohérente et efficace. Plusieurs approches sont possibles, en fonction de la situation initiale et des moyens disponibles. **Le présent rapport propose une méthodologie possible.**

La méthodologie proposée se fonde sur l'idée principale que l'adaptation est un processus dynamique, et qu'il faut par conséquent concevoir une stratégie pour quelques années seulement, mais qui doit prendre en compte le très long terme et être réajustée tout au long du siècle au fur et à mesure que de nouvelles informations sont disponibles. Dans ce cadre, il ne faut pas seulement déterminer ce qu'il faut faire ; il faut surtout déterminer quand il faut le faire, en tenant compte des arbitrages temporels possibles, et qui doit le faire.

La méthodologie proposée ici pour construire la stratégie d'adaptation comprend 7 étapes, à appliquer en parallèle à chacun des secteurs concernés, puis de manière globale :

Etape 1 : **Construction de scénarios climatiques et économiques sur lesquels le travail va s'appuyer (cf. Section 5.2), et identification des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation possibles**. Une grande partie de ce travail a été réalisée par le Groupe Interministériel sur les impacts du changement climatique en France (voir l'Annexe A), mais certains impacts n'ont pu être évalués et demandent donc un travail supplémentaire.

Etape 2 : **Identification des mesures d'adaptation à considérer dans un plan d'adaptation, et de l'urgence à le faire.** Il n'est pas utile de mettre en place toutes les mesures d'adaptation immédiatement, et la définition d'un plan doit commencer par déterminer les mesures qui sont prioritaires. **Le choix de ces mesures dépend à la fois de l'échéance temporelle des impacts du changement climatique, et des échéances temporelles des secteurs économiques concernés.** En pratique, les mesures prioritaires sont celles qui visent à réduire les impacts qui sont, dans l'ordre décroissant d'importance :

- proches dans le temps (voir encadré n°3), ou qui s'observent déjà (par exemple, augmentation de la fréquence des canicules) ;
- éloignés dans le temps ou limités à un réchauffement fort, mais qui sont bien établis scientifiquement et pour lesquels les stratégies d'adaptation n'ont des effets que sur le très long terme (par exemple, montée limitée (<1m) du niveau de la mer et plan d'occupation des sols) ;
- éloignés dans le temps ou limités à un réchauffement fort et qui sont très incertains, mais avec des conséquences potentielles graves et pour lesquels les stratégies d'adaptation n'ont des effets que sur le très long terme (par exemple, montée très importante (>1m) du niveau de la mer)

Etape 3 : Pour chacun des ces impacts à traiter, les différentes mesures d'adaptation possibles doivent être identifiées, puis **évaluées par une analyse multicritères relativement simple de leurs coûts et bénéfices**. Cette évaluation peut se faire en utilisant des modèles ou méthodes quantitatives quand c'est possible, ou bien en se fondant sur des analyses qualitatives ou des

dires d'experts quand les modèles ne sont pas disponibles (ce qui est fréquent). Cette analyse doit répondre à plusieurs critères :

- **L'analyse ne doit pas se contenter d'intégrer les coûts monétaires de marché, mais doit aussi considérer les multiples dimensions des coûts et des bénéfices** [18] **:** les impacts sur la qualité de vie ; les impacts sur la santé ; les impacts sur la biodiversité ; les impacts sur les inégalités et la distribution des richesses ; les impacts sur la sécurité individuelle et collective. Il est particulièrement important d'évaluer qui paierait pour une mesure, quelles sources de financement pourraient être envisagées, ainsi qu'identifier qui profiterait directement des bénéfices de la mesure. Chaque mesure peut en effet entraîner des effets redistributifs, avec des gagnants et des perdants. **Il faut tenir compte de la répartition géographique et temporelle des coûts et des bénéfices**. En particulier, il faut se demander quand les coûts de la mesure se feront sentir (investissement initial vs. coût annuel) et quand les bénéfices seront réalisés.
- **L'analyse doit prendre en compte la cohérence (et les conflits) avec d'autres objectifs politiques et politiques sectorielles pour rechercher le maximum de synergies**. Par exemple, l'usage de la climatisation s'oppose aux objectifs de réduction de la consommation d'énergie ; la modification du bâti s'oppose à la préservation du patrimoine. En revanche, la mise en place de plans d'occupation des sols plus restrictifs en termes de risque acceptable permet une synergie avec la réduction des risques et des coûts des catastrophes naturelles. Ces oppositions ou synergies peuvent parfois s'exprimer sous la forme de coûts associés ou de co-bénéfices monétaires (par exemple, pour la consommation d'énergie), mais ce n'est pas toujours le cas (par exemple, préservation du patrimoine). **On recherchera donc les mesures sans regret, pour lesquelles les co-bénéfices justifient à eux seuls la mise en place de la mesure.**
- **L'analyse doit évaluer la robustesse de la mesure envisagée à l'ensemble des incertitudes présentes** : d'abord bien sûr l'incertitude climatique (est-ce une mesure qui donne des bénéfices sur l'ensemble des climats futurs possibles ?) mais aussi l'incertitude sur l'ensemble des développements socio-économiques (par exemple par rapport à la répartition géographique de la population française en 2050 ou à l'existence de nouvelles technologies pour économiser l'eau). **On recherchera en priorité des mesures robustes (qui sont bénéficiaires dans tous les cas) ou flexibles (qui peuvent s'ajuster en présence d'informations nouvelles).**

Etape 4 : L'étape précédente doit permettre d'identifier un ensemble relativement réduit de mesures prometteuses. **Sur ces mesures, des études plus poussées – et coûteuses en temps de travail et en collecte de données – peuvent être conduites**. C'est notamment le cas d'analyses coût-bénéfice telles que celle illustrée dans la contribution sur la protection de la région Languedoc-Roussillon en annexe de ce rapport. Ces analyses ne doivent pas négliger les points cités dans l'étape 3, et notamment l'incertitude sur l'évolution du climat et sur les tendances socio-économiques, les effets redistributifs (temporellement, géographiquement, et sociologiquement), ainsi que la cohérence avec d'autres objectifs ou politiques sectorielles. Ce type d'analyse complète (mais ne remplace pas) les études multicritères mentionnées précédemment en autorisant une prise en compte beaucoup plus fine des effets temporels et des arbitrages plus précis entre différentes solutions alternatives.

Etape 5 : **A partir des résultats des diverses analyses – notamment multicritères et coût-bénéfice – et des moyens disponibles, une sélection des mesures peut être effectuée**. Une attention particulière doit être portée à la cohérence entre différentes mesures d'une stratégie d'adaptation et à la cohérence avec les autres politiques sectorielles. Par exemple, les réponses apportées au changement climatique en termes de production électrique (refroidissement des

[18] Une discussion plus poussée de ces dimensions est proposée dans Hallegatte et al. (2008).

centrales thermiques et hydroélectricité), d'agriculture irriguée, et de protection de la biodiversité des écosystèmes fluviaux ne peuvent être conçues séparément, car le volume d'eau disponible doit être partagé entre ces usages et permettre à chacune de ces réponses d'être mise en place. Ainsi, des arbitrages entre mesures d'adaptation (et donc entre secteurs) seront nécessaires. La cohérence avec d'autres politiques sectorielles est également cruciale. Par exemple, l'adaptation de l'agriculture au changement climatique doit prendre en compte d'autres objectifs politiques (soutien du revenu des agriculteurs, réduction de l'usage des pesticides, etc.). Il faudra donc rechercher les synergies, et identifier les conflits. Ici encore, il faudra réaliser des arbitrages entre des objectifs politiques existants et l'adaptation au changement climatique.

Etape 6 : **Pour chacune des mesures sélectionnées, un plan d'adaptation doit prévoir des indicateurs d'efficacité de la mesure, ainsi qu'un horizon temporel pour lequel des effets doivent être visibles sur les indicateurs**. Pour une modification de politique d'occupation des sols, par exemple, le nombre de nouveaux bâtiments construits en zone inondable peut être suivi et sa réduction mesurée et contrôlée pour vérifier que la mesure porte ses fruits. Il faut noter que l'indicateur n'est pas forcément le niveau de dommage climatique lui-même. Ainsi, pour une politique d'occupation des sols, le nombre de bâtiment en zone inondable indique le succès d'une politique avant que ne devienne mesurable une baisse des pertes économiques liées aux inondations. A partir des horizons temporels des différentes mesures (qui peuvent être différents), la stratégie d'adaptation doit prévoir son évaluation et ajustement. Même si le suivi doit être continu, une révision complète doit être faite régulièrement. Celle-ci se fera probablement entre 5 et 10 ans après la mise en place de la stratégie.

Etape 7 : **Il faut conduire une évaluation de l'efficacité de la stratégie d'adaptation**, et ajuster la stratégie en fonction (1) des résultats des mesures précédentes, grâce aux indicateurs définis au moment où les mesures ont été mises en place ; (2) des nouvelles informations scientifiques sur l'évolution du climat ; (3) des évolutions socio-économiques et technologiques qui ont pu avoir lieu. Ceci se fait en rebouclant le même processus, en repartant de l'Etape 1.

Les questions liées à la mise en place opérationnelle d'un tel processus, et notamment des questions institutionnelles et légales qui en découlent, requièrent une analyse détaillée. Cette analyse est hors du champ du présent rapport.

Encadré n°3 : La prévision du changement climatique proche (2010-2030)

Pour mettre en place des plans d'adaptation, il serait extrêmement utile de disposer de prévisions de l'évolution du climat sur les deux prochaines décennies. Or, sur ces échelles de temps, le changement climatique reste relativement limité, et la variabilité du climat est telle que le signal climatique n'est pas dominant. En conséquence, les modèles climatiques, qui ne reproduisent la variabilité naturelle que d'une manière statistique, sont incapables de fournir une prévision des évolutions proches. Il est donc essentiel de ne pas sur-interpréter les résultats des modèles et de ne pas utiliser leurs sorties sans tenir compte de cette composante essentielle de l'incertitude qu'est la variabilité naturelle.

L'incapacité des modèles à prévoir les évolutions des deux prochaines décennies pourrait changer si les travaux sur la prévision décennale – aujourd'hui du domaine de la recherche – progressaient. Ceci demanderait toutefois des progrès important en termes de modélisation numérique, et une meilleure connaissance de l'état de l'océan, qui détermine l'évolution du climat sur ces échelles de temps. Cette meilleure connaissance requiert des réseaux de mesures plus développés dans les océans du monde entier. On ne peut donc attendre de progrès immédiat dans ce domaine.

5. L'utilisation des instruments économiques dans l'élaboration d'une stratégie d'adaptation

Dans la méthodologie proposée dans la section précédente, l'évaluation économique des mesures d'adaptation joue un rôle essentiel. La présente section se concentre donc sur la question de l'évaluation, c'est-à-dire sur les Etapes 3 et 4, pour proposer des approches permettant de tenir compte des spécificités de l'adaptation décrites dans la Section 1.2, c'est-à-dire principalement l'incertitude, la dynamique, l'inertie, et les possibilités de bifurcation.

L'analyse économique des mesures d'adaptation est en effet rendue délicate par le fait que, on l'a vu, les impacts du changement climatique et donc les bénéfices des mesures d'adaptation sont très incertains. En présence d'incertitude, plusieurs méthodes d'évaluation sont disponibles selon la nature de l'information dont on dispose sur les scénarios climatiques et selon la nature des hypothèses que l'on souhaite formuler (ou non) sur leurs probabilités d'occurrence (section 5.1). Dans toutes ces méthodes, le choix des scénarios climatique est un élément clé, et nous proposons en section 5.2 des éléments permettant de choisir les scénarios à considérer. **Nous argumentons cependant ici que malgré l'incertitude, le calcul économique (privé ou public) reste la méthode de référence, dès lors que l'information nécessaire est disponible.** La manière dont cette méthode peut être appliquée à l'évaluation des politiques d'adaptation est discutée en section 5.3, et dans l'annexe D sur la base d'un exemple.

5.1. Comment comparer les mesures d'adaptation en présence d'incertitudes ?

Nous décrivons ici quatre méthodes permettant de comparer entre elles des mesures d'adaptation dans un contexte d'incertitude sur le climat futur.

La première méthode est le calcul économique en situation incertaine : On traite ici l'incertitude sur les scénarios climatiques en leur attribuant des probabilités subjectives d'occurrence (c'est-à-dire fondées non pas sur des fréquences d'occurrence mais sur des croyances déterminées à partir des connaissances actuelles). On retrouve alors les principes du calcul économique en univers risqué. En particulier, le projet le plus intéressant sera celui qui maximise la valeur actualisée nette espérée (c'est-à-dire la moyenne des coûts et bénéfices pondérée par les probabilités d'occurrence de chacun des états du monde possibles) [(19)]. Quand les informations nécessaires sont disponibles, l'analyse coût-bénéfice est particulièrement utile car elle permet d'évaluer les politiques dans tous les cas possibles, et permet un arbitrage fin entre des mesures, par exemple quand ces dernières ont des conséquences différentes en termes de répartition temporelle ou spatiale des coûts et bénéfices. Même quand toutes les informations nécessaires au calcul ne sont pas disponibles, une analyse de sensibilité permet souvent de mettre en évidence des arbitrages qui ne sont pas forcément évidents a priori. On revient en détail sur l'utilisation de l'analyse coûts bénéfices pour évaluer les politiques d'adaptation dans la section 5.3.

Une critique souvent adressée à l'analyse coût-bénéfice en monde incertain est le faible poids qu'elle accorde aux scénarios à faible probabilité mais à conséquences importantes, alors que c'est souvent pour éviter ces scénarios que des politiques sont mises en place. Pour éviter ce problème, on peut utiliser des modèles dits de « gestion des risques », qui ont pour principe de limiter la probabilité que les pertes atteignent un niveau critique. Concrètement, on recherche la politique d'adaptation qui fait en sorte que les scénarios dans lesquels les pertes dépassent 1% du PIB aient une probabilité cumulée d'occurrence inférieure à,

[19] Pour tenir compte de l'aversion au risque, on peut également travailler en utilité espérée plutôt qu'en coûts et en bénéfices monétaires, ce qui permet de tenir compte des besoins fondamentaux et de l'asymétrie entre gains et pertes.

par exemple, un pour mille [20]. Le seuil de danger retenu (ici, 1% du PIB) et la probabilité d'occurrence cumulée (ici un pour mille) n'ont évidemment pas de valeurs objectives. Ces paramètres doivent être fixés par un processus politique.

Une extension de la méthode précédente est l'analyse séquentielle (Ambrosi et al., 2003), qui vise à minimiser le coût sur une période proche (disons 2010-2020) de se conserver la possibilité d'atteindre une cible donnée malgré l'incertitude. Dans le cas de la montée du niveau de la mer, par exemple, on peut supposer qu'il y a trois possibilités (20 cm, 80 cm, 140 cm), et que l'on saura la valeur réelle en 2020. Après 2020, on pourra donc mettre en place une politique optimale en fonction de la vraie ampleur de la montée du niveau de la mer, grâce à une analyse coût-bénéfice classique. Entre 2010 et 2020, en situation d'incertitude, on applique une stratégie visant à minimiser le « coût de l'erreur ». Ce coût s'exprime en valeur des bâtiments construits mais qu'il faut finalement abandonner si on a été trop optimiste sur la montée du niveau de la mer, et en perte d'opportunités de construction si on a été trop pessimiste (et donc trop restrictif sur les permis de construire) [21].

Ces trois méthodes requièrent cependant la donnée des probabilités d'occurrence subjectives de chacun des scénarios climatiques. Or, il est souvent délicat de fixer une valeur à ces probabilités dans le cas du changement climatique. On ne dispose souvent, en pratique, que d'un jeu de scénarios. Dans ce cas, on peut utiliser une approche de décision par scénarios (voir par exemple, Lempert et al., 2000), et rechercher les politiques qui sont acceptables dans un nombre maximum de scénarios. On ne cherche donc plus à maximiser les bénéfices dans un scénario donné (ou dans la moyenne des scénarios), mais plutôt à rester au dessus d'un niveau acceptable de bénéfices dans l'ensemble des scénarios (ou dans autant de scénarios que possible). La version la plus rigoureuse de cette méthode, dans laquelle on cherche à rester au dessus d'un niveau acceptable dans tous les scénarios, s'approche d'**une approche dite « maximin »**, dans laquelle on cherche simplement à optimiser le scénario le plus pessimiste. L'inconvénient est alors que l'ensemble des stratégies n'est déterminé que par l'hypothèse la plus pessimiste, qui est en général très peu probable. On donne donc tout le poids aux scénarios extrêmes, et aucun poids aux scénarios les plus probables. Dans des versions plus souples de l'approche par scénarios, on cherche simplement à limiter au maximum le nombre de scénarios dans lesquels les résultats sont considérés comme inacceptables, la norme de l'inacceptable étant évidemment fixé par un processus politique. Cette approche vise alors à implémenter des mesures suffisamment efficaces dans tous les scénarios, c'est-à-dire des mesures robustes à l'incertitude ; ou des mesures qui peuvent être ajustées ou annulées en présence d'informations nouvelles, c'est à dire des mesures flexibles ou réversibles (voir Hallegatte, 2009, pour une application à l'adaptation au changement climatique).

Deux remarques doivent être formulées en conclusion de cette revue. En premier lieu, il n'y a bien sûr aucune méthode parfaite. Les différentes méthodes proposées ici peuvent être utilisées en fonction de l'information disponible sur les probabilités d'occurrence, et en fonction des choix politiques, notamment sur le poids que l'on souhaite accorder aux scénarios extrêmes. Les différences entre les méthodes proposées ne sont cependant pas aussi importantes qu'il pourrait y paraître de prime abord. En effet, les probabilités subjectives peuvent être choisies pour refléter des préférences strictes à propos des scénarios extrêmes.

---

[20] De manière équivalente, on peut mettre en place une politique telle que les pires scénarios de probabilité 1 pour mille conduisent à des pertes inférieures à 1% du PIB.

[21] Cette méthode s'appuie sur les concepts de valeur d'option et de quasi-option (Henry, 1974, Arrow et Fisher, 1974), ainsi que sur la valeur de l'information, et prend en compte explicitement la possibilité de retarder une prise de décision pour éviter de s'engager dans une stratégie qui serait vulnérable à l'arrivée de nouvelles informations. Elle pousse également à favoriser les stratégies robustes, flexibles et réversibles qui sont capables de s'ajuster en présence de nouvelles données.

En second lieu, obtenir un résultat dans chacune des quatre méthodes requiert un choix politique (jeu de probabilités subjectives, éventuellement complété par un seuil de danger pour les méthodes 1, 2 et 3, détermination des scénarios à considérer pour la méthode 4). Autrement dit, quelle que soit la méthode retenue, la décision dans l'incertain reste *in fine* une décision politique, pour laquelle il n'est pas possible de définir une stratégie optimale de manière parfaitement objective. L'analyse permet de limiter le champ des stratégies cohérentes avec les informations disponibles, mais en général pas de déterminer « la » bonne stratégie, même si toute l'information disponible a été utilisée. Les risques de maladaptation sont donc importants dans tous les cas.

5.2. Quels scénarios climatiques choisir pour mener l'analyse ?

Dans toutes les méthodes décrites précédemment, il est nécessaire d'évaluer les coûts et les bénéfices des mesures d'adaptation dans **plusieurs** scénarios climatiques. En effet, **l'adéquation des mesures d'adaptation dépend largement du scénario climatique dans lequel on se place.** Par exemple (Hallegatte et al., 2007), la climatisation d'un certain nombre de lieux sensibles (maison de retraite, hôpitaux, logement de personnes âgées) peut suffire à s'adapter à un réchauffement climatique de faible ampleur, et il est inutile de modifier les normes de construction. En cas de réchauffement important, en revanche, une généralisation de la climatisation ou une modification du bâti devient indispensable, et il devient désirable de modifier dès aujourd'hui les normes de construction des bâtiments nouveaux. La question du scénario choisi est donc extrêmement importante. **Concevoir une stratégie d'adaptation en ne tenant compte que d'un unique scénario peut conduire à une maladaptation importante, et se révéler pire que l'inaction. C'est pourquoi la méthodologie proposée en Section 4 commence par la sélection des scénarios climatiques et économiques sur lesquels l'analyse va se fonder.**

En l'absence de politique climatique, les modèles du GIEC projettent un réchauffement de 2 à 6°C sur le globe d'ici à 2100, ce qui se traduit par un réchauffement compris entre environ 1.5°C et environ 8°C sur la France. **Cette gamme inclut l'incertitude venant du scénario d'émission de gaz à effet de serre, et l'incertitude sur la réponse du climat à une concentration donnée de gaz à effet de serre.** En présence de politiques climatiques, cette gamme se réduit, et en particulier sa borne supérieure diminue. Il semble toutefois aujourd'hui difficile de déterminer l'ambition des politiques climatiques futures, et l'objectif affiché internationalement de limiter le réchauffement à 2°C apparaît peu crédible. Pour la montée du niveau de la mer, l'incertitude est encore plus importante, avec des publications scientifiques projetant cette montée entre 20 cm et 1,5m selon les cas. Sur des échéances plus courtes (2010-2030), il est impératif de tenir compte de la variabilité naturelle, qui peut modifier significativement les évolutions climatiques et masquer ou amplifier le changement climatique global (voir encadré n°3).

Dans cette situation d'incertitude, il est raisonnable d'utiliser plusieurs scénarios, et de vérifier que les mesures mises en œuvre sont soit robustes à cette incertitude, soit peuvent être ajustées en présence de nouvelles informations. Pour le choix des scénarios, on peut proposer :

- **Un scénario optimiste**, supposant des politiques climatiques ambitieuses à l'échelle internationale (comparable à un scénario SRES/B1) et une réponse faible du climat aux gaz à effet de serre. Ce scénario supposerait une augmentation de température d'environ 2°C sur la France d'ici à 2100, et une montée du niveau de la mer de 30 cm.
- **Un scénario pessimiste**, supposant l'absence de mesures ambitieuses pour limiter le réchauffement climatique (un scénario comparable au scénario SRES/A2), et une forte réponse du climat. Ce scénario supposerait une augmentation de température d'environ 5°C sur la France, et une montée du niveau de la mer de 1m.

A partir de là, les précipitations et la structure géographique du changement climatique peuvent être extraites des sorties de modèles climatiques. Il existe une grande incertitude sur l'expression locale du changement climatique, et différents modèles aboutissent à des structures régionales très différentes. En théorie, il faudrait utiliser autant de modèles que possible pour réaliser ce travail. En pratique, on peut utiliser les modèles les plus contrastés (par exemple, le modèle américain du GFDL donne des précipitations en forte diminution sur l'ensemble de la France, alors que le modèle australien CSIRO-Mk3.0 projette une augmentation des précipitations sur le nord du pays).

Comme expliqué dans la section 4, **dans le cas d'impacts très importants et de longs délais d'adaptation (par exemple, pertes d'une surface fortement urbanisée en raison de la montée du niveau de la mer), il est rationnel de prendre en compte les scénarios les plus pessimistes, même si leur probabilité est très faible** [(22)]. Alors que pour des impacts plus limités, on peut se contenter de prendre en compte les scénarios les plus probables. On peut comparer cette approche à celle de l'assurance pour des agents averses aux risques: pour les événements très graves (incendie d'habitation ou invalidité), on est prêt à payer une assurance même si la probabilité d'occurrence est faible (car l'aversion au risque fait que la perte d'utilité augmente de façon non linéaire avec la perte) ; pour des événements moins grave, l'assurance ne se justifie plus quand la probabilité est trop faible, car on est capable de faire face si l'événement se produit. Ainsi, **le choix d'un scénario extrêmement pessimiste se justifie quand les conséquences potentielles sont très graves**, ce qui explique pourquoi la Hollande dont l'existence même est menacé par la montée du niveau de la mer, fonde sa stratégie d'adaptation sur une montée du niveau de la mer pouvant atteindre 2m. Dans le développement d'un plan d'adaptation, on peut donc parfois vouloir utiliser des hypothèses plus pessimistes dans certains secteurs particulièrement vulnérables.

5.3. Application du calcul économique à l'évaluation des politiques d'adaptation

Le calcul économique (privé ou public, selon le cas) fournit une méthode très puissante pour évaluer les politiques d'adaptation. Cette méthode – d'usage courant dans l'analyse des politiques publiques – est générale et s'applique à tout type d'investissements privés et publics. Une description complète de la méthode est largement hors du champ du présent rapport, et le lecteur intéressé trouvera des exposés détaillés de la méthode et de ses développements les plus récents. **On s'intéresse ici à la manière dont cette méthode peut être mobilisée pour évaluer les projets d'adaptation**, et plus particulièrement ici les projets d'investissement dans du capital à longue durée de vie.

L'objet du calcul économique est de comparer des projets ou des politiques entre elles afin de déterminer celui ou celle qui apporte le bénéfice net le plus important pour l'individu qui mène le calcul (calcul économique privé) ou pour la société dans son ensemble (calcul économique public). Pour illustrer notre propos, on utilisera ici deux exemples. Le premier concerne le choix d'essences forestières à planter aujourd'hui dans un contexte où la productivité future des essences est incertaine. Le second concerne le choix du niveau de protection (hauteur de digue) des côtes de la région Languedoc-Roussillon face à l'élévation du niveau de la mer. Ce second exemple est traité en détail dans l'Annexe D du présent rapport.

La démarche du calcul économique (privé comme public) est simple : (i) identifier les projets en concurrence ; (ii) identifier les sources d'incertitude ; (iii) évaluer les coûts et les bénéfices pour chaque projet, dans tous les états du monde possibles ; (iv) calculer la valeur actualisée des coûts et des bénéfices ; (v) calculer la valeur actualisée nette espérée des différents projets en

[22] Cette approche se rapproche du « hazard management » utilisé par exemple pour la dangerosité des produits chimiques.

concurrence (si on dispose ou on peut estimer les probabilités d'occurrence des états du monde) ; et (vi) évaluer la robustesse du résultat y compris aux hypothèses sur les probabilités.

L'identification des projets en concurrence dans le cas de l'adaptation ne pose pas de problème spécifique. En revanche, il est important de réaliser que **la situation initiale (actuelle) n'est pas nécessairement optimale vis-à-vis des risques climatiques actuels**. Bien définir la situation de référence par rapport à laquelle les mesures sont évaluées est essentiel pour que les chiffres fournis aient un sens (voir encadré n°4). Dans le cas des projets de protection face aux risques naturels, il est en effet courant que les niveaux de protection observés sur le terrain de proviennent pas d'une analyse précise des risques et d'un choix politique explicite, mais résultent d'un processus historique empirique. En particulier, réaliser des projets d'adaptation « à niveau de risque constant » (autrement dit, raisonner en coûts efficacité plutôt qu'en coût bénéfice) n'aboutit en général pas à une adaptation optimale par rapport au changement climatique.

La spécificité des projets d'adaptation est que leur évaluation doit prendre en compte les risques liés aux impacts du changement climatique (limiter ces risques est la raison d'être de ces projets). Comme on l'a souligné plus haut, l'incertitude sur les impacts du changement climatique est particulièrement importante, et ce d'autant plus que l'on s'intéresse à des petites échelles géographiques. D'une part, il est difficile d'énumérer les états du monde possibles. D'autre part, il n'est pas possible d'associer des probabilités d'occurrence objectives à ces états du monde – ne serait-ce que parce que leur réalisation dépend en partie des actions futures des sociétés humaines en matière d'atténuation.

Dans ce contexte d'incertitude radicale, une solution consiste à abandonner l'analyse coûts bénéfices pour d'autres méthodes de décision par scénario ou de type maximin, qui s'abstraient d'une distribution de probabilité au profit d'une analyse par scénarios possibles en utilisant l'une des trois méthodes autres que le calcul économique listées dans la section 5.1. Ce type d'analyse a l'intérêt de ne pas avoir à formuler des hypothèses sur les probabilités d'occurrence des états du monde, et de faire porter la discussion sur les états du monde acceptables par rapport à ceux qui ne le sont pas.

En revanche, les méthodes de décision par scénario ont pour inconvénient de rendre implicite la comparaison entre les coûts de la protection et les bénéfices attendus, comparaison qui reste centrale dans le débat sur les politiques publiques. **Il nous semble donc préférable, autant que possible, de s'en tenir à une analyse coûts bénéfices en utilisant au moins deux scénarios « optimistes » et « pessimistes » (cf. section 5.2) auxquels on affecte des probabilités d'occurrence subjectives – en prenant soin (i) d'examiner la robustesse des résultats aux probabilités retenues et (ii) de spécifier comme contrainte la non réalisation de certains états du monde jugés a priori inacceptables.** Ce type d'analyse permet en effet d'explorer de manière la plus large possible l'espace des possibles, d'identifier les éventuels points de rupture, et de tester la cohérence des discours entre croyances sur le changement climatique et niveau de l'action.

Il reste que dans ce contexte d'incertitude radicale, **le calcul économique comme les autres méthodes présentées dans la Section 5.1 ne sauraient fournir « la » bonne réponse sur le niveau d'adaptation, mais seulement une réponse contingente à un jeu de croyance sur le futur et à une attitude par rapport au risque**. In fine, la décision est d'ordre politique et le rôle de l'analyse est de l'éclairer. A ce titre, un critère essentiel de choix entre les méthodes présentés dans la section 5.1 est que **la méthode retenue doit être la mieux à même, dans les circonstances du moment, à être « langage et enjeu de négociation » entre les parties prenantes à la décision** (pour reprendre le mot de Claude Henry). La transparence des hypothèses et la clarté du calcul sont ici un élément absolument essentiel de l'analyse.

Encadré n°4 : Différentes définitions du coût de l'adaptation

Dans l'analyse de l'adaptation, il est essentiel de ne pas supposer que la situation actuelle 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 subi de risque naturel 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.

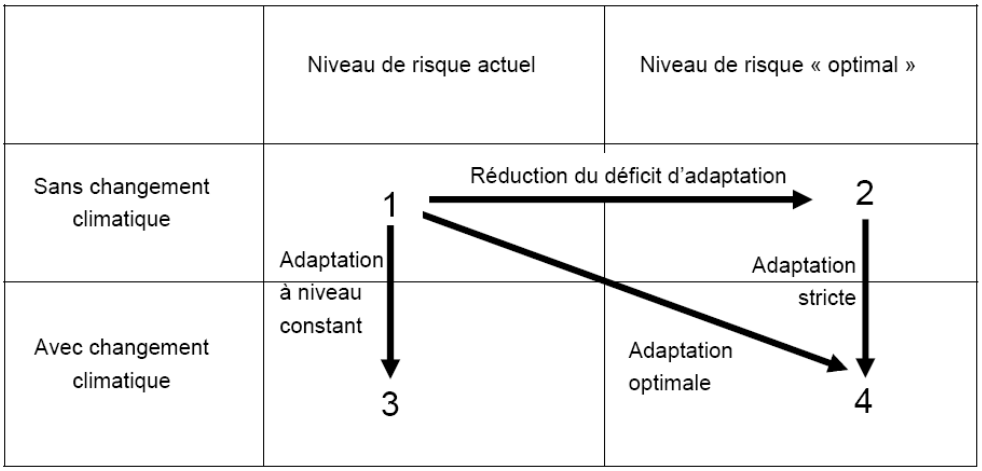
Or, les stratégies d'adaptation sont très différentes selon que l'on part d'une situation idéale, où le niveau de risque d'inondation est à sa valeur optimale, ou d'une situation sous-optimale. Cette différence est illustrée par le tableau ci-dessous. La situation réelle aujourd'hui est celle de la case 1, une situation où le risque n'est pas forcément à sa valeur optimale. Diverses définitions de l'adaptation peuvent se représenter dans le tableau ci-dessous, 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.



Une fois les différents scénarios climatiques posés, l'identification et l'évaluation des coûts et des bénéfices des mesures d'adaptation ne soulèvent pas nécessairement de difficultés particulières. Deux points importants doivent néanmoins être soulignés ici. **En premier lieu,**

même pour un scénario climatique donné, les impacts et donc les coûts et les bénéfices des mesures d'adaptation peuvent être incertains. Par exemple, la réponse des écosystèmes forestiers au changement climatique est largement inconnue. **En second lieu, les chocs climatiques ont souvent des effets indirects significatifs** (par exemple, effet de la dégradation d'une infrastructure sur le reste de l'économie, etc.). Pour les catastrophes naturelles, l'Annexe D propose de manière indicative d'utiliser une majoration de 50% des dommages directs quand la catastrophe nécessite une reconstruction qui s'étale sur plus d'une année.

Par ailleurs, l'adaptation au changement climatique comprendra des mesures diverses qui toucheront tous les secteurs économiques et les infrastructures. Ces mesures auront donc des conséquences dépassant largement le cadre étroit de la lutte contre le changement climatique et pourront donc avec des co-bénéfices ou des co-coûts significatifs. Des exemples sont l'amélioration du confort dans les logements suite à des modifications des normes de construction, la réduction des risques naturels grâce à des protections côtières supplémentaires, les progrès dans l'accessibilité de certaines zones grâce à des changements d'infrastructure de transport, et la réduction des pollutions locales en raison de changements dans l'agriculture. On peut même imaginer que des investissements réalisés dans le cadre d'un plan d'adaptation permettent d'apporter une solution à certains problèmes préexistants. **Ces co-bénéfices et co-coûts ne doivent pas être oubliés dans l'analyse.**

Par construction, la plupart des questions d'adaptation qui se posent aujourd'hui – et qui, donc, sont susceptibles d'être analysées au moyen du calcul économique – concernent des choix dont les conséquences ont des implications à très long terme (plusieurs décennies au moins). Pour évaluer ces projets, comme pour évaluer les projets de mitigation, le taux d'actualisation retenu donc un élément important du calcul. Il n'est pas le lieu ici de rentrer dans le débat sur le taux d'actualisation (voir par exemple Lecocq et Hourcade, 2004 et Godard, 2008 pour une revue des débats soulevés par le rapport Stern). En effet, **pour les projets publics, le taux d'actualisation est fixé par le Commissariat Général au Plan** (Lebègue, 2005). En outre, le taux d'actualisation a souvent moins d'impact sur le résultat final que l'incertitude sur les impacts du changement climatique, et donc sur les bénéfices des mesures d'adaptation.

Une fois donnés les scénarios climatiques et leurs probabilités subjectives d'occurrence, une fois calculés les coûts et les bénéfices des mesures d'adaptation, et une fois donné le taux d'actualisation, obtenir la valeur actualisée nette des projets en compétition n'est plus qu'un exercice de calcul. En revanche, comme on l'a déjà souligné plus haut, **l'analyse de sensibilité est absolument essentielle pour que le résultat du calcul économique ait un sens.** De nombreuses méthodes sont disponibles pour réaliser cette évaluation, de la simple variation d'un paramètre – tous les autres étant constant – à des méthodes numériques complexes de type Monte Carlo par exemple. Le point important, encore une fois, est que le calcul économique (ou tout autre méthode exposée plus haut, d'ailleurs) ne peut prétendre fournir « le » meilleur projet d'adaptation, mais expliciter les conditions (y compris les croyances sur le changement climatique) sous lesquelles tel ou tel projet est préférable.

6. Conclusion & recommandations

Au terme de ce travail, trois messages principaux peuvent être tirés à partir desquels une série de recommandations a pu être dressée.

- Le premier message concerne la légitimité de l'action publique en matière d'adaptation qui n'est pas automatique car la majorité des actions d'adaptation génèrent des bénéfices privés. Une réflexion est donc nécessaire au cas par cas pour déterminer les champs dans lesquels l'intervention de l'autorité publique est requise
- En second lieu, l'action directe sur le capital public, peut-être la plus visible, ne constitue que l'une des composantes de l'action publique en matière d'adaptation. La

première responsabilité de la puissance publique en la matière est de fournir aux agents privés un cadre favorable à l'adaptation, notamment par des actions en termes de production et de diffusion de l'information, de normes, de réglementation, de fiscalité et d'institutions.

- Le troisième message concerne le rôle de l'analyse économique dans le processus de décision. A condition de correctement intégrer l'incertitude, le calcul économique constitue un outil pertinent d'évaluation des politiques d'adaptation au changement climatique. Cet outil est susceptible de réduire le champ des mesures pertinentes dans une situation donnée, sans toutefois permettre, le plus souvent, d'identifier « la » bonne mesure. Des arbitrages collectifs restent donc en général nécessaires pour la prise de décision.

Pour donner un sens plus concret à ces messages généraux, les éléments de recommandation suivants peuvent être formulés :

- Les pouvoirs publics ont un rôle clé à jouer dans la production et la diffusion de l'information nécessaire à la mise en place de l'adaptation par tous les acteurs économiques. En particulier, il faudra s'assurer que l'incertitude est prise en compte, et ce de manière adéquate, afin d'éviter des erreurs pouvant mener à une maladaptation qui pourrait être pire que l'inaction.
- Des investissements spécifiques seront nécessaires pour une adaptation réussie. Mais il faut rappeler l'importance des actions « douces », qui agissent sur les l'information, les normes, la réglementation, les institutions. Ces mesures à coût généralement faible peuvent générer des bénéfices importants, et sont des compléments indispensables aux politiques d'investissement.
- Sans privilégier une approche spécifique, il ne faut pas se concentrer sur les ajustements à la marge des structures économiques existantes sans évaluer les possibilités de bifurcations. C'est notamment le cas dans les régions qui dépendent d'une activité vulnérable au changement climatique.
- L'importance des enjeux de bifurcations sectorielles et spatiales (migrations des hommes et du capital) nécessite la création d'outils de coordination pour réfléchir aux politiques d'adaptation relatives à un territoire donné de manière intégrée, et pour éviter les incohérences et les conflits.
- Un plan d'adaptation doit se concentrer sur les besoins urgents, et ne pas chercher à adapter les sociétés à tous les impacts des 100 prochaines années ; l'identification des actions prioritaires est cruciale. Il faudra prendre en compte les impacts de très long terme, quand ils rendent nécessaires des actions dont l'efficacité n'est réelle que sur de très longue durée (par exemple, les plans d'urbanisme et d'occupation des sols).
- Des mécanismes de revues régulières sont nécessaires pour prendre en compte les nouvelles informations scientifiques et ajuster les mesures en conséquence. Pour cela, le développement d'indicateur de performance des actions d'adaptation est important.
- L'adaptation doit tenir compte des synergies et des conflits avec les autres objectifs politiques, et notamment avec les politiques d'atténuation du changement climatique et de protection de la biodiversité.

Références

Abegg, B, S. Agrawala, F. Crick, et A. de Montfalcon. 2007. *Changements climatiques dans les Alpes : adapter le tourisme d'hiver et la gestion des risques naturels*. Paris : OCDE.

Agence Française de Développement (AFD). 2006. *Prise en compte de la contrainte énergie-climat dans les projets financés - Analyse de la vulnérabilité* [www.afd.fr]

Agrawala, S., et S. Fankhauser (Eds.). 2008. *Economic Aspects of Adaptation to Climate Change*. Paris : OECD.

Arrow, K. J., et A. C. Fischer. 1974. "Environmental preservation, uncertainty and irreversibility." *Quarterly Journal of Economics* **88**(2):312–319.

Athukorala, P., et B.P. Resosudarmo. 2005. "The Indian Ocean Tsunami: Economic Impact, Disaster Management, and Lessons." *Asian Economic Papers* **4**(1):1–39.

Badeau, V., J.-L. Dupouey, C. Cluzeau, J. Drapier et C. Le Bas. 2004. "Projet CARBOFOR. Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Tâche D1. Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises." Rapport Final ECOFOR n°2002-17

Banque Mondiale. 2003. *Rapport sur le dévelopement mondial 2003. Développement durable dans un monde durable*. Washington, D.C.

Banque Mondiale. 2010. *Rapport sur le dévelopement mondial 2010. Changement climatique et développement*. Washington, D.C.

Chevassus-au-Louis, B. 2009. *Fixer la valeur économique de la biodiversité*. Rapport pour le MEEDDM, 29 avril.

Cochran, I. 2009. "Les infrastructures de transport en France : vulnérabilité au changement climatique et possibilités d'adaptation." Note d'étude de la Mission climat N°18. Paris : Caisse des Dépôts et Consignations.

Crifo, P., M. Debonneuil, A. Grandjean. 2009. *Croissance verte*. Rapport pour le Conseil Economique pour le Développement Durable. Paris : MEEDDM.

De Perthuis, C. 2009. *Et pour quelques degrés de plus, Nos choix économiques face au risque climatique*. Paris: Pearson.

De Perthuis, C., et A. Delbosc. 2009. *Idées reçues sur le changement climatique*. Paris: Cavalier bleu.

Drouet, A. 2009. "Financer l'adaptation au changement climatique." Note d'étude de la Mission climat N°17. Paris : Caisse des Dépôts et Consignations.

Godard, O. 2008. "The Stern Review on the Economics of Climate Change: contents, insights and assessment of the critical debate." *S.A.P.I.EN.S.* 1(1) [http://sapiens.revues.org/index240.html]

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. 2009. "Strategies to adapt to an uncertain climate change." *Global Environmental Change* **19**:240–247.

Hallegatte, S. 2010. "Challenges ahead: Risk management and cost-benefit analysis in a climate change context." In D. Guha-Sapir et I. Santos (Eds.) *The Economic Impact of Natural Disaster*. Londres: EarthScan. [in press]

Hallegatte, S., et P. Ambrosi (Eds.). 2006. "Changement climatique, Environnement et Sécurité, Questions Scientifiques et Enjeux Opérationnels." Numéro spécial des *Cahiers de la Sécurité*, Décembre.

Hallegatte, S., J.-C. Hourcade, et P. Ambrosi. 2007. "Using Climate Analogues for Assessing Climate Change Economic Impacts in Urban Areas." *Climatic Change* **82**(1-2):47–60.

Hallegatte, S., F. Henriet, et J. Corfee-Morlot. 2008. “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.

Henry, C. 1974. “Investment decisions under uncertainty: the ‘irreversibility effect’.” *American Economic Review* **64**(6):1006–1012.

Hourcade, J.-C., et M. Kostopoulou. 1994. “Quelles politiques face aux chocs énergétiques. France, Italie, Japon, RFA: quatre modes de résorption des déséquilibres.” *Futuribles* 189:7–27.

Groupement Intergouvernemental sur l’Etude du Climat (GIEC). 2007. “Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability.” In M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, and C.E. Hanson (Eds.) *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge : Cambridge University Press.

Irwin, T. 2007. *Government Guarantees: Allocating and Valuing Risk in Privately Financed Infrastructure Projects*. Washington, D.C.: The World Bank.

Lebègue, D. 2005. *Révision du taux d'actualisation des investissements publics*. Paris: Commissariat Général au Plan.

Lecocq, F., et J.-C. Hourcade. 2004. “Le taux d’actualisation contre le principe de précaution? Leçons à partir du cas des politiques climatiques.” *L’actualité Economique* **80**(1):41–65.

MEEDDM (Ministère de l’Écologie, de l’Énergie, du Développement Durable et de la Mer), Ministère de la Santé et des Sports, Délégation Interministérielle à l’Aménagement du Territoire et à l’Attractivité Régionale, Ministère de l’Alimentation, de l’Agriculture et de la Pêche. 2009. *Evaluation du coût des impacts du changement climatique et de l’adaptation en France*. Rapport de la deuxième phase. Paris.

Organisation pour la Coopération et le Développement Economique (OCDE). 2009. *Adaptation au changement climatique et coopération pour le développement*. Paris.

Najam, A., J. Sathaye, coordinateurs, C. Cocklin, T. Heller, J. Llanes-Regueiro, J. Pan, G. Petschel-Held†, S. Rayner, J. Robinson, R. Schaeffer, R. Swart, Y. Sokona et H. Winkler. 2007. “Sustainable Development and Mitigation.” In Bert Metz, Ogunlade R. Davidson, Peter R. Bosch, Rutu Dave et Leo A. Meyer (Eds.). *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 691-743. Cambridge : Cambridge University Press, Cambridge.

Roman-Amat, B. 2007. “Préparer les forêts françaises au changement climatique.” Rapport à MM. les Ministres de l’Agriculture et de la Pêche et de l’Ecologie, du Développement et de l’Aménagement Durables. Décembre.

Schwartz, P., et D. Randall. 2003. An abrupt climate change scenario and its implications for United States [http://www.edf.org/documents/3566_AbruptClimateChange.pdf]

Shalizi, Z., et F. Lecocq. 2009. “To Mitigate or to Adapt: Is that the question? Observations on an Appropriate Response to the Climate Change Challenge to Development Strategies.” *World Bank Research Observer*. doi;10.1093/wbro/lkp012.

Smit, B., I. Burton, R.J.T. Klein, et J. Wandel. 2000. “An Anatomy of Adaptation to Climate Change and Variability.” *Climatic Change* **45**:223–51.

Welzer, H. 2009. *Les guerres du climat, Pourquoi on tue au XXI° siècle*. Paris : Gallimard.

Annexe A. Coût des impacts du changement climatique et de l'adaptation en France. Résumé du rapport du groupe interministériel

Préparé par Baptiste Périssin Fabert (CEDD)

Ce rapport [23], publié en septembre 2009, suit une démarche sectorielle. Sans prétendre à l'exhaustivité, dix secteurs clés sont identifiés comme particulièrement sensibles aux changements climatiques (CC). Une évaluation des coûts des impacts et des mesures d'adaptation associées est réalisée pour chacun des secteurs à différents horizons (2020, 2050, 2100) à partir des scénarios polaires (optimiste / pessimiste) définis par le GIEC. Ces mesures d'adaptation ne prennent pas en considération celles qui seraient prises de façon spontanée et indépendante par les acteurs socio-économiques, mais concernent exclusivement les politiques publiques qui s'inscriraient dans le cadre d'un plan d'adaptation national. Les valeurs mentionnées dans le rapport doivent être considérées comme des ordres de grandeur et non comme des mesures précises des coûts de l'adaptation au CC. A ce titre, les auteurs estiment que l'agrégation des résultats ne serait pas pertinente et ne présentent ainsi que des évaluations factuelles des impacts du CC et du coût de l'adaptation secteur par secteur.

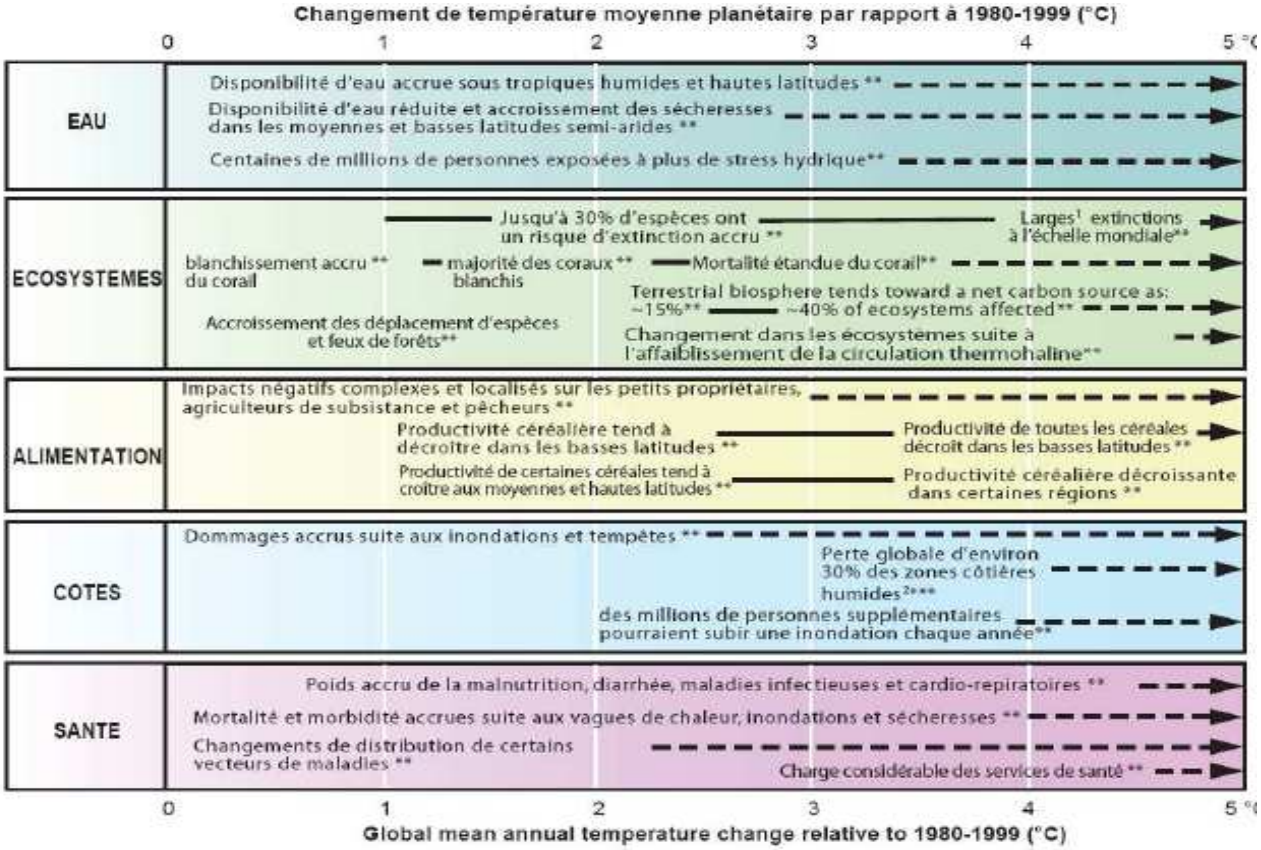
Cette analyse sectorielle déclinée sur le territoire français s'inscrit dans le cadre d'analyse des impacts fourni par le groupe 2 du GIEC et repris par le Banque mondiale dans son rapport 2010 sur le développement qui fait d'une hausse des températures de +2°C, un seuil au-delà duquel des dommages incontrôlables pourraient apparaître (cf. figure A1). Les études d'impacts accordent ainsi une place cruciale à la ressource en eau dont l'évolution à la baisse provoquerait des tensions dans le secteur agricole, forestier énergétique et porterait atteinte à la biodiversité. La hausse des températures aurait également des effets sur la santé et modifierait en profondeur le secteur du tourisme. Enfin, l'accroissement des risques résultant du CC aurait des conséquences sur les secteurs des assurances, sur les infrastructures routières et plus largement sur la gestion des territoires.

Ressource en eau: si la demande reste stable, un déficit de 2 milliards de m^3 par an pour la satisfaction des besoins actuels de l'industrie, de l'agriculture et de l'alimentation en eau potable serait observé à l'horizon 2050 (14% des prélèvements actuels). Dans certaines des zones plus touchées que d'autres (exemple: grand sud ouest) des conflits d'usage se multiplieraient et des déséquilibres majeurs des écosystèmes émergeraient. L'adaptation passe alors nécessairement par une meilleure gestion de la consommation. Le CC n'est ici qu'un aspect des changements globaux qui concernent le monde de l'eau. Les stratégies engagées dans la directive cadre sur l'eau, qui sont sans regret, représentent déjà des dépenses très importantes.

Secteur agricole: l'augmentation des périodes de croissance des plantes et des concentration en CO_2 favorise les rendements des cultures. Mais la prise en considération de l'accroissement des événements extrêmes, des variabilités inter annuelles, des risques sanitaires et de la baisse de la disponibilité en eau peuvent nuancer fortement la hausse de rendement escomptée. La multiplication d'événements de type canicule 2003 pourraient coûter en 2100 jusqu'à 300 millions d'euros par an seulement pour le blé. La viticulture sera particulièrement affectée par la modification des rendements avec une forte disparité régionale (perte de 200 millions d'euros par an dans la zone méditerranéenne). Des effets potentiellement négatifs sur la qualité et la typicité des vins sont à prévoir.

[23] La version intégrale du rapport est disponible à l'adresse suivante: http://www.ecologie.gouv.fr/Rapport-Evaluation-du-cout-des.html

Figure A1 : Impacts fondamentaux selon la hausse de température moyenne planétaire (GIEC, 2007)



Secteur forestier: A court terme, les gains de productivité liés à la fertilisation carbonée pourraient contrebalancer, en partie au moins, les pertes possibles liées au dépérissement, à la sécheresse, aux incendies etc. A moyen et long terme, les impacts devraient être importants. Pour les feux de forêts, l'aléa devrait s'aggraver dans les territoires déjà exposés et se propager vers le nord (et en altitude).

Risques naturels et assurances: les dommages sur les logements dus au retrait-gonflement des sols argileux, comme conséquence de l'augmentation des fréquences des canicules pèseront plus d'un milliard d'euros en 2100, contre deux cents millions aujourd'hui. Si l'urbanisation dans les zones à risques se poursuit, les coûts pourraient être multipliés par cinq. La remontée du niveau de la mer pourrait coûter plusieurs dizaines de milliards d'euros à l'échelle du siècle pour la seule région Languedoc-Roussillon. Le coût des dommages liés aux inondations par débordement de cours d'eau pourrait augmenter également.

Energie: le CC devrait s'accompagner d'économies d'énergie en hiver (moins de chauffage) mais de nouveaux pics de production à gérer pendant la saison chaude (plus de climatisation). De plus, il faut prévoir une baisse de productivité de l'ordre de 15% des centrales hydroélectriques en raison des tensions sur la ressource en eau.

Santé: certaines conséquences du CC pourraient s'avérer bénéfiques en raison de la baisse de la mortalité en hiver due au froid. Mais la plupart de ses effets seraient plutôt néfastes. Le coût social des décès prématurés de la canicule est estimé à 500 millions d'euros. Sans même parler des pertes humaines, les inondations ont un coût humain au travers du stress post traumatique qui fait suite à une catastrophe comme l'a montré la prise en charge des victimes des inondations du Gard.

Tourisme: la dégradation du confort climatique en été devrait concernée l'ensemble de la France métropolitaine, sauf le nord ouest et les alpes. A l'horizon 2100 l'impact sur le chiffre d'affaire estival devrait être significatif. En hiver, la diminution du manteau neigeux réduira la fiabilité de l'enneigement (55 stations / 143 restent viables avec un réchauffement de 4°C).

Infrastructures de transport: le CC pourrait rendre nécessaire des adaptations des infrastructures routières, pour pallier par exemple l'accroissement des aléas gravitaires. La submersion marine de certains tronçons provoquerait des dommages estimés à deux milliards d'euros

Biodiversité: des signes de modification de la biodiversité en raison du CC sont déjà observables. Les services rendus par la biodiversité sont estimés à 900 euros par hectare de forêt et à 300 euros par hectare de prairie (source: rapport CAS, 2009). Ces ordres de grandeurs montrent qu'il existe une perte économique à moyen terme à la diminution ou à la disparition de certains services de production et de régulation des écosystèmes (forêts de hêtre du sud et de l'ouest par exemple). C'est pourquoi, la préservation d'écosystèmes naturels choisis peut constituer une action d'adaptation en tant que telle.

Territoires: les notions de « transition vers le changement » et d'« apprentissage à la vulnérabilité » sont centrales pour saisir les enjeux locaux de l'adaptation. Pour accompagner les territoires dans leur stratégie d'adaptation, la meilleure connaissance du CC et l'organisation des compétences joueront un rôle majeur. Il est également nécessaire de prendre la mesure des rythmes sociaux qui permettront une évolution sans rupture vers de nouveaux modes de vie.

Annexe B. Du partage global entre adaptation et atténuation

Préparé par Franck Lecocq (AgroParisTech et INRA)

Le rapport a considéré l'adaptation de manière autonome. Mais l'adaptation n'est qu'une composante de la stratégie de lutte contre le changement climatique. A ce titre, **adaptation et atténuation sont liées**.

Deux niveaux doivent ici être distingués. En premier lieu, **adaptation et atténuation peuvent être liées au niveau technique du projet ou de la politique**. Par exemple, installer un climatiseur dans un bâtiment le rend moins sensible aux épisodes de canicule, mais augmente la demande électrique et les émissions de GES. Dans ce cas, adaptation et atténuation sont des substituts. Mais adaptation et atténuation peuvent aussi être des compléments au niveau du projet. Par exemple, réaliser une plantation à grande échelle est susceptible d'améliorer le climat local tout en retirant du dioxyde de carbone de l'atmosphère via la photosynthèse.

En second lieu, **adaptation et atténuation sont liées au niveau global**. En effet, l'efficacité des actions d'adaptation dépend souvent de l'effort global d'atténuation. Par exemple, le montant des investissements nécessaires pour développer la lutte contre les incendies de forêt dans une région telle que la Bourgogne ou le Limousin va dépendre de la manière dont augmentent l'intensité et la fréquence des sécheresses, et donc de l'effort d'atténuation qui aura été réalisé. Dans un tel contexte [24], **le niveau optimal d'atténuation et le niveau optimal d'adaptation ne peuvent plus être déterminés séparément** (Kane et Shogren, 2000, Lecocq et Shalizi, 2007) Par conséquent, il est important qu'au minimum la négociation sur l'atténuation soit informée des développements sur les coûts de l'adaptation.

Ce lien est d'autant plus important que l**'incertitude sur les bénéfices de l'adaptation est en général plus importante que l'incertitude sur les bénéfices de l'atténuation.** En effet, l'adaptation réduite en général les dommages du changement climatique dans une région particulier et/ou un secteur particulier. A l'inverse, en limitant la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre, l'atténuation réduit tous les impacts, quels qu'ils soient et où qu'ils se produisent. Or l'incertitude sur les impacts du changement climatique est d'autant plus importante que l'on s'intéresse à des zones géographiques plus petites (GIEC, 2007). Par conséquent, les bénéfices d'une action d'adaptation sont en général plus incertains que les bénéfices d'une action d'atténuation.

Références

Groupement Intergouvernemental sur l'Etude du Climat (GIEC). 2007. "Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability." In M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, and C.E. Hanson (Eds.) *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge : Cambridge University Press.

Kane, S., et J.F. Shogren. 2000. "Linking Adaptation and Mitigation in Climate Change Policy." *Climatic Change* **45**:75–102.

Lecocq, F., et Z. Shalizi. 2007. "Balancing Expenditures on Mitigation of and Adaptation to Climate Change: An Exploration of Issues Relevant to Developing Countries." *Policy Research Working Paper* 4299. Washington, D.C.: World Bank.

[24] Où le *bénéfice marginal* de l'adaptation dépend du niveau d'atténuation et où, symétriquement, le bénéfice marginal de l'atténuation dépend du niveau d'adaptation.

Annexe C : L'adaptation des infrastructures énergétiques au changement climatique

Préparé par Boris Solier (université Paris-Dauphine, PREC) et Maria Mansanet-Bataller (Mission climat de la Caisse des Dépôts) [25]

C1. Introduction

En dépit des différentes actions entreprises pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, certains effets des modifications du climat apparaissent être inévitables à moyen terme, en raison de l'inertie de la machine climatique. La température moyenne devrait augmenter en France, de même que la fréquence ainsi que l'intensité des événements météorologiques extrêmes. Nos sociétés vont par conséquent devoir s'adapter aux nouvelles variables climatiques afin d'en annuler les effets négatifs et de tirer parti des effets positifs. Une partie importante de l'adaptation va concerner les mesures mises en place pour garantir le fonctionnement des infrastructures existantes, qui ont des durées de vie généralement longues de l'ordre de plusieurs dizaines d'années et qui de fait subiront les premières modifications du climat.

Le secteur énergétique, élément moteur de l'économie, est composé de nombreuses infrastructures permettant de produire, de stocker et de transporter l'énergie sur le territoire. Les barrages hydroélectriques sont construits pour une durée supérieure à 100 ans, les centrales de production d'électricité thermique au charbon et au nucléaire quant à elles fonctionnent sur une période d'environ 50 ans, tandis que les infrastructures de transport (lignes à haute tension, oléoducs) possèdent une durée de vie de 40 ans, et les raffineries d'une vingtaine d'années. Ces infrastructures vont être impactées de différentes manières par le changement climatique, modifiant de la sorte les conditions de production et de consommation de l'énergie. C'est la raison pour laquelle il paraît intéressant d'étudier les stratégies d'adaptation qui sont applicables à ce secteur, l'objectif étant de garantir l'équilibre entre l'offre et la demande d'énergie, tout en préservant un certain degré d'indépendance énergétique.

La vulnérabilité des infrastructures énergétiques s'est déjà manifestée lors d'événements climatiques extrêmes récents (tempête de 1999, canicules des années 2003 et 2006) où de nombreuses interruptions de services sont apparues. Concernant les impacts à venir, une grande partie va être liée aux modifications induites par le changement climatique dans le cycle de l'eau. Le secteur énergétique est en effet fortement dépendant de la ressource en eau, que ce soit au niveau de la production (pour les besoins de refroidissement des centrales électriques) ou pour le transport (avec par exemple l'acheminement des produits raffinés par voies fluviales). Au regard des prévisions climatiques et sur la base des technologies existantes, on doit globalement s'attendre à des conditions plus difficiles de production de l'énergie en été, tandis que dans le même temps, la demande pourrait augmenter significativement. Néanmoins, la vulnérabilité des infrastructures dépendra en grande partie de leur localisation sur le territoire, tant les impacts seront différents d'une région à l'autre. D'où l'importance d'améliorer les méthodes de régionalisation des modèles afin de disposer de prévisions du climat à plus petites échelles. Au final, le changement climatique pénalisera certaines sources de production d'énergie et en favorisera d'autres, suscitant une redistribution de la production à la fois entre les différents modes mais également sur le territoire. L'ambition de cet article est de montrer que malgré les incertitudes qui pèsent sur la prévision des impacts du changement climatique, il est possible d'adapter dès à présent les infrastructures existantes.

Nous étudierons dans un premier temps la vulnérabilité des infrastructures énergétiques aux changements climatiques. Après avoir passé en revue les impacts mentionnés dans la littérature scientifique, nous analyserons plus en avant la vulnérabilité des infrastructures de production,

[25] Les auteurs tiennent à remercier Claude Laveu de Edf pour sa présentation au groupe de travail adaptation au changement climatique et infrastructures et pour sa relecture attentive de cette annexe.

de stockage et de transport de l'énergie en France. Pour ce faire, nous partirons des prévisions issues de la régionalisation par Météo-France et l'IPSL de deux scénarios du GIEC (A2 et B2). L'étude sera poursuivie dans une seconde partie par l'examen des mesures d'adaptation envisageables pour le secteur de l'énergie. Nous distinguerons dans cette section les actions qui peuvent être prises à court et moyen terme, des mesures d'urgences retenues en périodes de crise.

C2. Infrastructures énergétiques : Impacts climatiques et vulnérabilité

Les systèmes énergétiques se composent d'un grand nombre d'infrastructures qui sont plus ou moins sensibles aux variables climatiques. L'ampleur des impacts du changement climatique sur les infrastructures énergétiques dépendra du type d'infrastructure considéré et de la localisation de l'infrastructure sur le territoire. Certaines sources de production d'énergie, à l'instar des cellules photovoltaïques, pourront être favorisées par les modifications du climat. En revanche, les installations de production qui sont fortement dépendantes de la ressource en eau seront certainement pénalisées, notamment si elles se situent là où les augmentations de températures seront les plus fortes.

C2.1. Les impacts du changement climatique sur les infrastructures énergétiques : revue de la littérature

L'étude des impacts du changement climatique sur les infrastructures énergétiques est basée sur un certain nombre de rapports et d'études issus de divers organismes et centres de recherche. Cette section résume ainsi les principaux impacts mentionnés par ces études en termes de production, de distribution et de transport de l'énergie. Si un impact donné du changement climatique (par exemple l'augmentation de la température) sur un type d'infrastructure peut être commun à plusieurs territoires, la vulnérabilité du système énergétique aux changements climatiques varie d'un territoire à un autre en raison des divergences dans les mix énergétiques et dans l'intensité des modifications du climat.

Pour le continent européen, le rapport préparé par le Met Office Hadley Centre [(26)] identifie quelques 160 processus de production liés à l'énergie, puis détermine la sensibilité de ces processus à la météorologie et au climat et enfin classe les processus par ordre d'importance des impacts. Il est intéressant de noter que plus d'un tiers de ces processus sont plutôt sensibles aux températures et beaucoup sont sensibles aux vents et précipitations, au niveau de la mer et au niveau d'humidité du sol. Par ailleurs, le rapport du groupe interministériel sur les impacts du changement climatique en France (2008) a identifié les différentes variations du climat potentielles ainsi que les impacts sur le secteur énergétique. A chaque impact attendu a été associé une probabilité de survenance (de faible à élevée) et une gravité pour le secteur concerné en cas de réalisation. Le Tableau C1 ci-après présente les principaux impacts attendus en Europe de l'Ouest :

L'impact du changement climatique sur la demande d'électricité a également été établi en dehors des frontières de l'Europe. Une illustration de la corrélation entre le climat et la demande d'électricité a ainsi été mise en évidence au travers d'un rapport préparé par la California Energy Commission et l'Agence de Protection Environnementale de Californie (2006). Ce rapport fait état d'impacts directs de la hausse des températures moyennes sur la demande d'électricité en Californie.

[26] Met Office Hadley Centre est l'équivalent de Météo France pour le Royaume-Uni

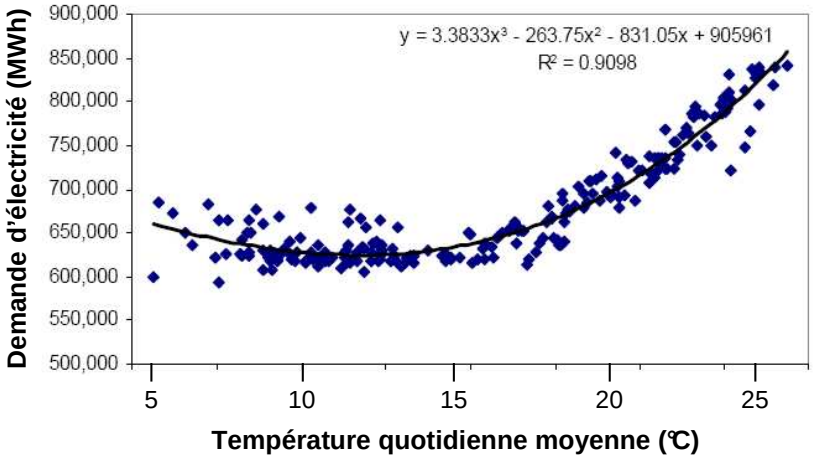
Tableau C1 : Impacts du changement climatique sur le secteur énergétique en Europe de l'ouest

Production d'énergie	Dommages directs aux **infrastructures de production énergétique** causés par le gel, les affaissements, les inondations et vents puissants
	Manque d'eau de rivière pour le **refroidissement des centrales électriques** (et mise en conformité plus difficile concernant la température de l'eau de sortie du circuit de refroidissement)
	Critères de construction offshore modifiés pour prendre en compte le changement climatique
	Risques d'inondation des **centrales nucléaires** côtières à cause de la montée des eaux et des raz-de-marée
	Des températures plus chaudes signifient une réduction de la densité de l'air utilisé pour la production des **centrales à gaz à cycle combiné (CCGT)** provoquant une baisse de l'efficience de ces centrales
	Changements dans la **production éolienne** et la disponibilité du parc éolien
	Recours à davantage de **biomasse** pour la combustion
	Production des **usines marémotrices** affectée par la montée des eaux et des raz-de-marée
	Possibilité de développement des sources d'**énergie solaire** avec la baisse des précipitations et le recul de la couverture nuageuse
	Diminution de la réserve en eau des **barrages hydrauliques** avec la réduction de la durée d'enneigement et des précipitations
Transport et fourniture d'énergie	Nécessité de réduire l'intensité du courant qui passe par des **câbles enterrés** du fait de températures plus chaudes et de sols plus secs
	Critères renforcés pour l'intensité du courant qui peut passer par des **câbles de transmission de courant électrique suspendus** afin de limiter l'affaissement des câbles sous l'effet de la chaleur
	Dommages directs **aux infrastructures de transport et de fourniture d'énergie** causés par le gel, les affaissements, les inondations et vents puissants : pylônes électriques à bas voltage (pylônes en bois) en Irlande en cas de tempêtes et fondations des pylônes électriques
	Difficulté du **transport par voie fluviale des produits pétroliers et fossiles** du fait de l'assèchement des rivières
Demande d'énergie	Changements dans la **saisonnalité** (demande accrue l'été et en baisse l'hiver du fait de températures plus douces) modifiant les besoins d'approvisionnement et les calendriers de maintenance des centrales : demande additionnelle l'été (jusqu'à +20-25% d'ici les années 2080 ne serait-ce que pour l'air conditionné pour Londres) pouvant causer des surcharges ou des *blackouts* si les investissements nécessaires pour des moyens de production supplémentaire en pointe ne sont pas entrepris

Source : Mission Climat de la Caisse des Dépôts d'après Met Office (2006), SNIFFER (2007) et London Climate Change Partnership (2002), MEEDDAT, ONERC (2008).

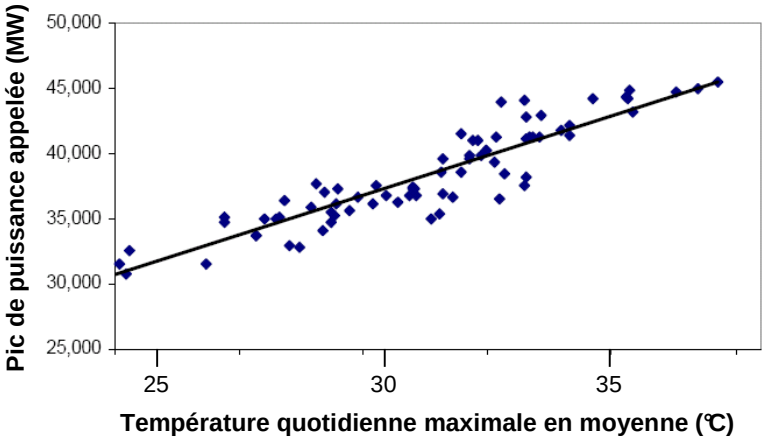
Ainsi, la Figure C1 met en relation les températures quotidiennes moyennes et la demande d'électricité (en MWh). La régression montre une « courbe en U ». Si les températures baissent, les besoins de chauffage augmentent et il y a une utilisation plus intensive de l'électroménager. Si les températures augmentent, les besoins en climatisation augmentent assez rapidement.

Figure C1 : Demande d'électricité en Californie et variation des températures quotidiennes



Source : California Climate Change Center (2006).

Figure C2 : Puissance appelée en pointe en Californie et variation des températures quotidiennes maximales en été



*Source : California Climate Change Center (2006).*Si la demande augmente progressivement en raison de l'élévation des températures moyennes,

les journées de fortes chaleurs vont se traduire par des périodes de pointe dans la demande d'électricité. La Figure C2 met en relation la température quotidienne maximale sur les mois d'été (juin à septembre) et, cette fois, les pics de puissance appelée. A partir de cette observation, il apparaît que pour un degré de température supplémentaire, une capacité additionnelle de 1 100 MW en pointe est nécessaire pour répondre à la demande accrue, soit l'équivalent d'une centrale nucléaire moyenne. En France, le gestionnaire du réseau de transport

de l'électricité (RTE) estime qu'une baisse de la température de 1°C en hiver se traduit par une augmentation de la puissance appelée de 2100 MW, tandis qu'une hausse de 1°C en été entraîne une demande additionnelle de l'ordre de 500 MW [27].

Ces éléments ne peuvent néanmoins pas être transposés directement au cas de la France tant les impacts potentiels du changement climatique et la structure de l'industrie énergétique (mix de production énergétique, emplacements) sont idiosyncratiques. Cependant, ils permettent d'identifier certains impacts potentiels que les acteurs de la filière énergétique française ont le plus souvent également relevés et pour lesquels ils ont mis en place des scénarios de réponse de crise ou des solutions d'adaptation appropriées. La partie suivante s'intéresse donc au cas français et à l'impact du changement climatique sur les infrastructures énergétiques et l'équilibre offre demande d'électricité.

C.2.2. Les impacts du changement climatique sur les infrastructures de production, de transport et de stockage de l'énergie

Le changement climatique se traduira par des conséquences physiques sur les infrastructures en tant que telles et influencera leur mode d'utilisation, d'exploitation et de gestion. La compréhension de ces impacts sur une infrastructure donnée passe donc par l'analyse d'un large éventail de facteurs, tels que la situation géographique, l'élévation topographique, ainsi que la vétusté, l'utilisation et les caractéristiques de construction des infrastructures étudiées. Il est donc indispensable d'avoir une bonne connaissance des impacts climatiques prévus pour la zone géographique étudiée et partant, d'utiliser les résultats tirés des modèles climatiques.

Les modèles présentés dans le 4ème Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2007) visant à prévoir les impacts du changement climatique sont des modèles globaux (au niveau de la planète). Ils utilisent différentes hypothèses de croissance économique, des émissions des gaz à effet de serre, de la population, notamment pour élaborer des scénarios futurs plausibles. Cependant, pour compléter les modèles globaux et parce que les impacts varient à des échelles plus petites, il existe également des modèles régionaux qui couvrent une partie du globe à plus haute résolution, soit par un système de zoom, soit parce qu'ils ont une extension géographique limitée à une zone particulière. Ces modèles possèdent une meilleure résolution spatiale (20 à 50 km) sur la zone d'intérêt et simulent mieux les processus physiques régionaux ainsi que les évènements météorologiques extrêmes (vents forts, canicules, vagues de froid, sècheresses, pluies intenses).

Pour notre analyse, et à l'instar du rapport de Climpact (2005), nous allons considérer la régionalisation de deux des scénarios du GIEC (A2 et B2), réalisée par Météo France et l'IPSL, pour l'ensemble du territoire métropolitain français. Ces deux scénarios du GIEC prévoient une augmentation des températures moyennes avec une faible réduction de précipitations annuelles en France. En se fondant sur ces scénarios, les modèles de Météo France et de l'IPSL estiment que, d'ici à 2070-2099, les températures moyennes annuelles en France pourraient augmenter de 2°C à 3,5°C par rapport aux niveaux de 1960-1989 d'une part et que les précipitations pourraient être légèrement supérieures en hiver et sensiblement réduites en été d'autre part. Des résultats plus précis sont montrés dans le Tableau C2.

[27] *RTE, Bilan prévisionnel 2009*

Tableau C2 : Évolution moyenne attendue des précipitations et des températures en France pour la période 2070-2099 par rapport à la période 1960-1989

Températures	Moyenne annuelle	Hiver	Été
Scénario B2	2 à 2,5 ºC	1,5 à 2 ºC	2,5 à 3,5 ºC
Scénario A2	3 à 3,5 ºC	2,5 à 3 ºC	4 à 5 ºC
Précipitations			
Scénario B2	-5 % à 0	0 à +10 %	-25 à -5 %
Scénario A2	-10 % à 0	+5 à +20 %	-35 à -20 %

Source: Climpact (2005)

Comme nous venons de le voir, le système énergétique français est composé d'un grand nombre d'infrastructures physiques destinées à la production au stockage et au transport de l'énergie sur le territoire. Or ces infrastructures vont être impactées de différentes manières par les changements climatiques à venir. Les centrales thermiques ont des durées de vie généralement longue et subiront donc les effets des changements climatiques qui surviendront de façon inévitable dans 20 ou 30 ans. Les centrales nucléaires par exemple ont une espérance de vie de l'ordre de 50 ans et la durée moyenne entre le début de la construction et la connexion effective au réseau est d'environ 7 années [(28)], à laquelle s'ajoute le délai de conception. En outre, si on prolonge la durée de vie des centrales nucléaires à 60 ans, alors plus de la moitié des réacteurs seront encore en fonctionnement à l'horizon 2045. Toutefois, l'autorité de sûreté nucléaire (ASN) n'a pas encore donné son feu vert pour qu'une telle mesure soit étendue à l'ensemble des centrales en activité. Au contraire, les unités de production d'énergies renouvelables telles que les éoliennes et les cellules photovoltaïques ont une durée de vie beaucoup plus courte et requièrent moins de temps pour leur construction. Il sera nécessaire de prendre en compte ces éléments afin de déterminer le moment opportun d'entreprendre des mesures d'adaptation.

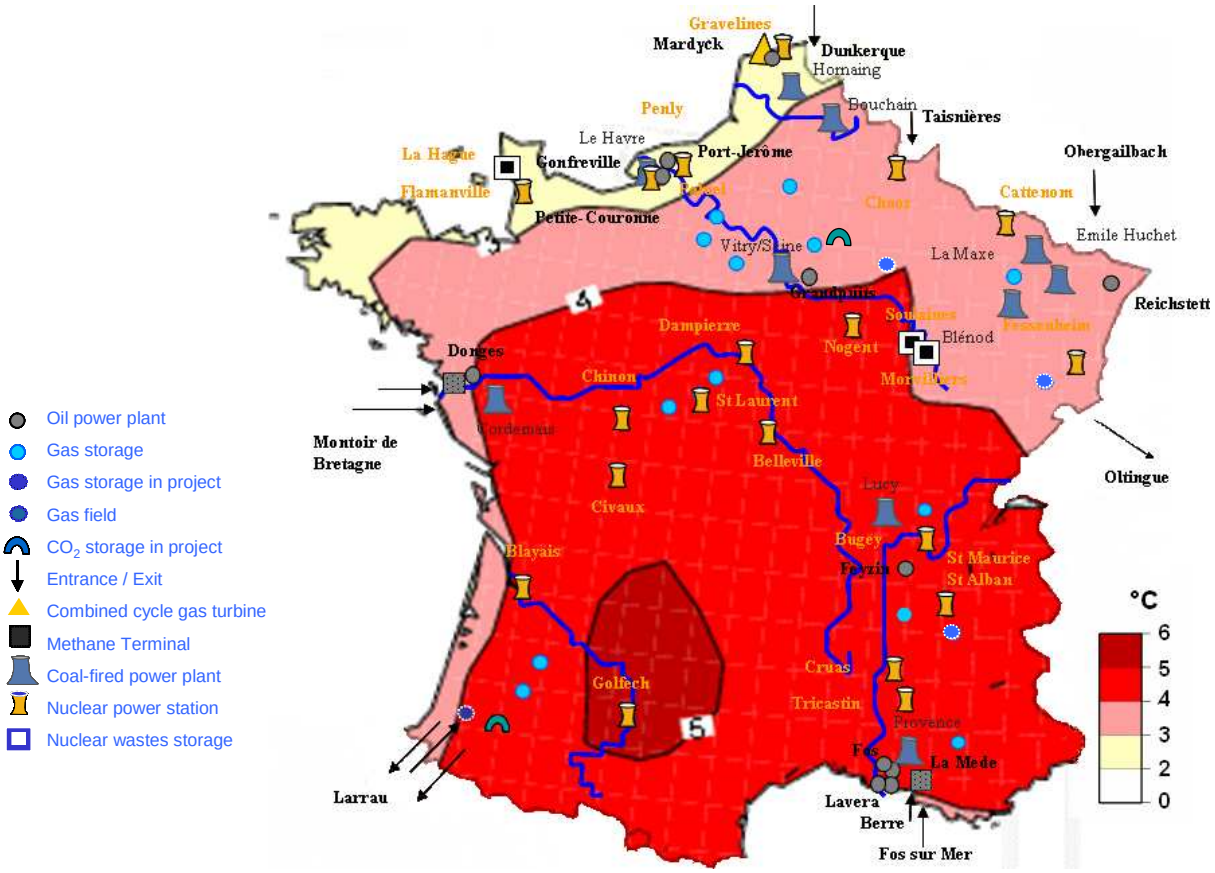
Impacts sur la production d'énergie

Les impacts des modifications du climat sur la production d'énergie des centrales thermiques sont de plusieurs natures et concernent aussi bien l'augmentation de la température que les changements qui interviendront dans le cycle de l'eau.

Tout d'abord, l'augmentation de la température moyenne va probablement entraîner une baisse de rendement des centrales à gaz à cycle combiné et notamment des turbines à gaz, via le réchauffement de l'air. Il ne faut néanmoins pas oublier que l'augmentation de la température dérivée des modèles climatiques régionalisés pour le territoire français n'est pas homogène. Ainsi, comme le montre la Figure 3, l'impact sur les infrastructures énergétiques dépendra en grande partie de leur localisation. On constate que si la température moyenne devrait augmenter sur tout le territoire, les régions du Centre et de l'Ouest de la France connaîtront les augmentations les plus fortes (jusqu'à 6°C). Par conséquent, à technologies constantes, les installations de production et de transport d'énergie situées dans le couloir rhodanien, ainsi que le long de La Garonne et de la Loire seront exposés à des augmentations de températures supérieures à la moyenne du réchauffement attendu.

[28] Calcul de l'auteur d'après le rapport du CEA, ELECNUC, *Nuclear power plants in the world*, 2008.

Figure C3 : Infrastructures énergétiques et augmentation des températures en France pour la période 2070-2099, selon le scénario A2 du GIEC

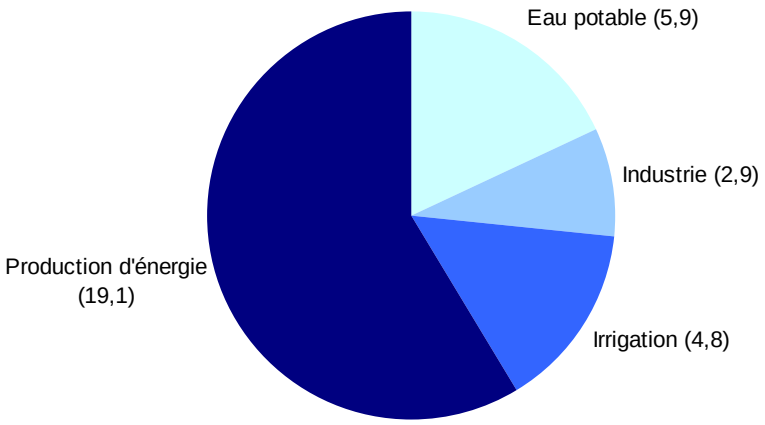


Source : Mission climat d'après l'observatoire de l'énergie et Météo France

D'autre part, une grande partie des impacts du changement climatique sur la production énergétique sera provoquée par les changements du cycle de l'eau. A titre d'exemple, les enjeux qui entourent la disponibilité des réserves en eau sont essentiels pour la production électrique puisque l'eau est un élément indispensable à la production d'électricité des centrales thermiques à flamme ou nucléaires d'une part et à la production d'électricité hydraulique d'autre part. En effet, en France, où 77 % de l'électricité brute est produite à partir du nucléaire et où 11 % environ provient des barrages hydrauliques [29], les besoins en eau du secteur énergétique apparaissent être conséquents. Ainsi, plus de 70 % des eaux de surface passent par une infrastructure de production d'énergie. Or le dérèglement climatique va modifier en profondeur le cycle de l'eau et renforcer la rivalité dans ses usages. Au premier plan des volumes d'eau prélevés (Figure C4) on trouve les secteurs de l'énergie et de l'agriculture. On peut noter qu'en raison de cette dépendance des installations de production énergétiques à l'égard de l'eau, la plupart d'entre elles, indépendamment de leur nature, sont donc situées en bordure de rivière et sur le littoral.

[29] MEEDDM, bilan énergétique de la France pour 2008, 2009.

Figure C4 : Répartition des volumes d'eau prélevés par usage en France en 2006 (milliards de m^3)



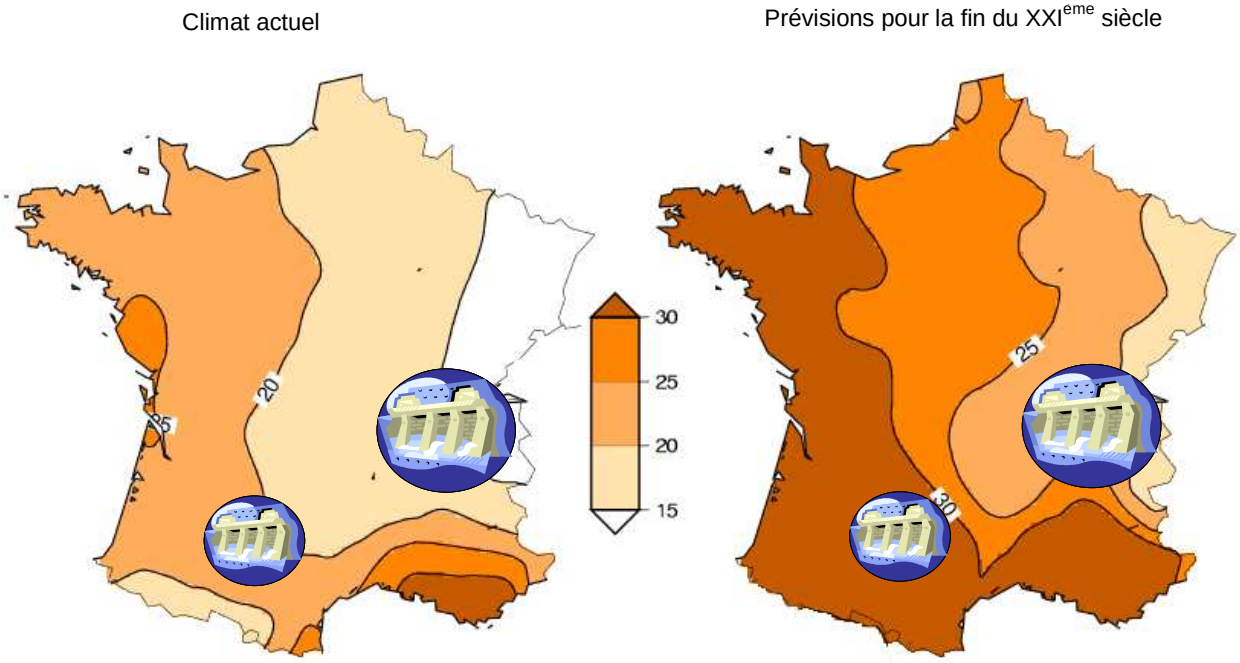
Source : Agence de l'eau, SOeS, 2008

La modification du cycle de l'eau va de fait ériger plusieurs obstacles à la production d'électricité. Le premier problème qui se pose est celui de la quantité. Le changement climatique va probablement réduire les disponibilités en eau et provoquer des cas de sécheresse des rivières, ce qui constitue un risque pour le refroidissement des condenseurs des centrales et tend à accroître la rivalité dans les usages de l'eau. Puisque les prélèvements d'eau et les débits nécessaires au refroidissement des centrales varient fortement selon la technologie considérée, la vulnérabilité à la diminution du débit des rivières d'une installation dépendra notamment de la technologie utilisée. Pour les centrales nucléaires par exemple, pour produire le même kilowattheure, une centrale fonctionnant en circuit ouvert d'une part nécessitera des débits d'eaux beaucoup plus importants et d'autre part entraînera une augmentation de la température des cours nettement supérieure à celle obtenue avec une centrale montée en circuit fermé et assortie d'un système aéroréfrigérant (tours). A l'inverse, les inondations quant à elles menacent directement la sécurité des infrastructures énergétiques. Le risque d'inondation par débordement c'est déjà concrétisé sur le site nucléaire du Blayais en Aquitaine lors de la tempête de 1999 où la digue de protection s'est avérée être insuffisante. Néanmoins ce risque vaut également pour les raffineries qui sont situés en bordure de littoral.

Le second problème est celui de la qualité de l'eau. En effet, l'eau qui sert au refroidissement des centrales est rejetée sous forme gazeuse (dans l'air) ou liquide (dans la rivière ou la mer). Dans ce dernier cas, la température de l'eau à la sortie de la centrale peut atteindre des valeurs élevées, avec un différentiel qui varie selon la technologie de refroidissement. Si cette élévation de températures peut être source d'externalité positive, comme c'est le cas pour le site nucléaire du Tricastin où l'eau chauffée par la centrale permet d'alimenter les bassins de la ferme aux crocodiles de Pierrelatte, elle peut s'avérer dangereuse notamment pour la biodiversité au-delà de certains seuils. Aussi, la réglementation impose une température maximale des eaux cyprinicoles en aval des centrales de 28°C (Arrêté du 26 novembre 1999). Par conséquent, l'augmentation de la température à la surface de la mer, ainsi que des cours d'eau, induite par le changement climatique va compromettre le respect de la réglementation et peut se traduire par des discontinuités dans le fonctionnement des centrales. Néanmoins et comme nous le verrons dans la troisième partie, des dérogations peuvent êtres accordées par l'Etat (conformément à la directive européenne 2006/44/CE modifiant la directive 78/659/CE). Ces dérogations se sont avérées être indispensables lors de la canicule de 2003 ou plusieurs centrales, à l'image de celle du Tricastin, n'ont pu satisfaire au critère de la température pendant les vagues de chaleurs.

Les énergies renouvelables seront également impactées par les modifications du climat. Au premier plan, on trouve la production d'hydroélectricité qui est fonction à la fois du niveau de remplissage des barrages ainsi que des écoulements pour la production des centrales au fil de l'eau. Or le changement climatique va accentuer les phénomènes extrêmes et donc augmenter la pluviométrie dans les zones humides et la réduire dans les zones sèches, ce qui modifiera les taux de remplissage des barrages hydrauliques et surtout leur saisonnalité. La Figure C5 montre parallèlement le nombre consécutif de jours secs en été sous le climat actuel et selon les prévisions pour la fin du XXIe siècle. On constate notamment que dans la région Rhône-Alpes, ce nombre augmente considérablement puisqu'il passe de moins de 15 jours avec le climat actuel, à une fourchette de 20 à 25 jours à la fin du XXIe siècle. De la sorte, comme le souligne le rapport de Juin 2008 du groupe interministériel sur les impacts du changement climatique, un assèchement des eaux de surfaces et des nappes phréatiques va entraîner une diminution des réserves contenues dans les barrages et donc de la production électrique.

Figure C5 : Nombre maximum de jours secs consécutifs en été selon le modèle ARPEGE



Source: Observatoire de l'énergie et IMFREX, Rapport final

Enfin, le raccourcissement des périodes d'enneigement se traduira par une disponibilité en eau moindre en été. D'une manière générale, tout changement dans les variables naturelles de vent et d'ensoleillement modifiera la production d'énergie éolienne et photovoltaïque ainsi que la localisation de ces sites de productions.

Impacts sur le transport et le stockage de l'énergie

Lorsqu'on considère les impacts du changement climatique sur la production d'énergie, tant les changements moyens que les extrêmes doivent être pris en compte. A l'inverse, l'analyse des conséquences des modifications du climat sur les réseaux de transport s'aborde plutôt sous l'angle des événements climatiques extrêmes. En effet, si les réseaux ont une résistance lambda à un certain impact du climat, la survenance d'un événement extrême dépassant les moyennes anticipées provoquera une rupture de l'infrastructure et des services rendus. De la sorte, les

mouvements de sols peuvent affecter l'ensemble des réseaux, i.e. les oléoducs, gazoducs et les lignes électriques. La multiplication des tempêtes et de leur ampleur, l'apparition de vents violents sont autant de menaces pour les lignes électriques aériennes. Tandis que les pics de chaleur font peser un risque de rupture sur les lignes électriques enterrées. Enfin, les crues ainsi que les étiages peuvent durablement compromettre le transport de produits raffinés par voies fluviales.

C.2.3. Les impacts du changement climatique sur la demande d'électricité

Le réchauffement climatique va avoir un impact conséquent sur la consommation d'énergie et sur les infrastructures de production et de transport. Cet aspect du changement climatique est depuis longtemps pris en compte par les opérateurs énergétiques puisqu'il conditionne notamment le choix des infrastructures de production, de transport et de stockage de l'énergie. Il est particulièrement primordial dans le cas de l'électricité, puisque cette dernière ne se stockant pas, l'électricité produite doit être à tout moment égale à celle consommée. Si cette identité n'est pas vérifiée, c'est tout le réseau qui est menacé, avec un coût du blackout potentiellement très élevé pour l'économie.

Tout d'abord, la demande d'électricité sera impactée par l'évolution de la température de l'air. En effet, comme le montrent Valor et al, (2001) l'évolution de la demande d'électricité en Espagne est fortement corrélée avec celle des températures. Aussi, en France, un hiver plus doux se traduit par des besoins en chauffage plus faibles et donc une consommation d'électricité et de gaz moindre. A partir du scénario A2 du GIEC, EDF estime à 10 % la baisse du nombre de degrés-jour moyen de chauffage [30] en hiver à l'horizon 2050. Tandis qu'un été plus chaud augmente la demande d'électricité due à l'usage plus étendu et intensif des appareils de climatisation. Néanmoins, en raison de la faiblesse du taux actuel d'équipement en climatiseur de la France, l'élasticité de la consommation énergétique à la variation de la température estivale reste encore relativement faible. Selon le bilan de RTE, la climatisation représentait en 2007 (dernière année pour laquelle les données sont disponibles) une proportion nulle dans la consommation totale d'électricité du secteur résidentiel. Mais cette part devrait sensiblement s'accroître en raison de l'augmentation progressive des températures. Par conséquent les résultats de l'étude de Valor et al. (2001) peuvent être extrapolés à la France sous l'hypothèse que le climat futur français ressemblera davantage au climat actuel en Espagne. D'autre part, il est important de rappeler que l'impact de la hausse des températures sur la consommation d'électricité ne sera pas le même selon les régions. Les départements du Sud de la France devraient ainsi connaître des variations plus importantes de la demande en été en raison d'un plus fort taux d'équipement. Le changement climatique entraînera par conséquent une redistribution de la demande d'électricité sur le territoire. Enfin, on peut noter que l'augmentation de l'ensoleillement se traduira également par une diminution des besoins en électricité en hiver du fait de la réduction des besoins d'éclairage et de chauffage des bâtiments.

Le second facteur climatique qui aura un impact sur la demande d'électricité concerne les événements climatiques extrêmes, tels que les vagues de froids ou de chaleur, et renvoie à la gestion de la demande de pointe. Si aujourd'hui, les principaux problèmes de fournitures de l'électricité concernent environ 400 heures de l'hiver, le changement climatique pourrait déplacer les pics de consommation les plus élevés en été. En effet, si les températures moyennes vont sensiblement augmenter et se traduire par une hausse progressive de la demande d'électricité, la plus grande fréquence, durée et intensité des journées de chaleurs, à l'image de la canicule de 2003, se traduiront par des augmentations fortes et soutenues de la demande en été. Ces périodes de fortes pointes représentent potentiellement un risque pour le réseau électrique puisqu'elles vont nécessiter des augmentations soudaines de la production à un

[30] Les degrés-jours de chauffages indiquent le nombre de degrés inférieurs à une température de référence (18°C) qui nécessite de chauffer les bâtiments. Lorsque la température baisse, le nombre de degrés-jours augmente.

moment ou les conditions de production sont compromises. Par exemple, l'augmentation de la température de l'eau complique le refroidissement des centrales thermiques classiques et nucléaires provoquant ainsi l'arrêt nécessaire de certaines tranches. Par conséquent, une réflexion profonde est nécessaire pour déterminer les mesures d'adaptation qui doivent être prises dès aujourd'hui afin d'assurer la pérennité du fonctionnement des installations de production et de transport de l'électricité durant ces événements extrêmes et limiter ainsi les tensions sur le réseau de transport et de distribution.

C3. Les mesures d'adaptation envisageables

Notre analyse des infrastructures énergétiques se poursuit sur une question essentielle : quels aspects devons-nous prendre en compte pour que les mesures d'adaptation deviennent envisageables ? On distingue pour ce faire les mesures d'adaptation concernant l'offre d'énergie, de celles relatives à la demande et aux mesures de gestion de crise. Nos conclusions reposent sur un cadre d'analyse constitué des hypothèses suivantes.

C3.1. Cadre conceptuel

Tout d'abord, il est relativement bien connu que l'adaptation est un sujet sensible à plusieurs facteurs d'incertitude. Deux types d'incertitudes doivent notamment être pris en compte lors du processus décisionnel menant à une action d'adaptation : (i) l'incertitude climatique, illustrée par les différents scénarios prévisionnels et liée entre autres à la croissance économique, aux émissions de gaz à effet de serre et à la croissance de la population ; (ii) l'incertitude concernant les impacts du changement climatique sur les écosystèmes et sur notre économie (qui seront différents en fonction du futur scénario réalisé) ainsi que leurs coûts.

L'incertitude climatique se traduit par le fait que les actions d'adaptation ne peuvent pas être identiques selon que l'on considère une augmentation de la température moyenne de la Terre d'ici la fin du XXIe siècle comprise entre 1,1°C et 2,9°C (prévue par le scénario B1 du GIEC[31], le plus optimiste) ou une augmentation comprise entre 2,4°C et 6,4°C (prévue par le scénario A1FI, le plus pessimiste). Par ailleurs, puisque les effets du changement climatique diffèrent d'un endroit à l'autre, les stratégies d'adaptation, contrairement aux actions de mitigation qui ont le même bénéfice partout sur la planète, devront s'aligner avec la dimension locale. Il est donc nécessaire de disposer de modèles climatiques régionalisés. Des auteurs tels que Planton et al (2008) analysent les impacts du changement climatique au niveau régional et plus précisément l'impact du changement climatique sur les événements extrêmes. Néanmoins il ne faut pas oublier que ce que ces modèles régionaux gagnent en résolution spatiale, ils le perdent sur le nombre de simulations que chaque centre peut réaliser. Les incertitudes liées à ces modèles régionaux sont moins bien cernées car ces modèles sont plus récents et il n'existe pas encore assez de simulations pour les évaluer.

La deuxième hypothèse considérée dans notre étude concerne le fait que les scientifiques estiment que les impacts du changement climatique commenceront à se faire sentir à partir de 2030. En effet, comme le souligne la contribution du groupe de travail n°1 au dernier rapport du GIEC, la détection d'un signal significatif dans les modèles climatiques n'est pas évidente à court et moyen terme. Ils ne sont en effet pas en mesure de différencier une variation du climat due au cycle naturel, d'une variation due au changement climatique pour la période 2010-2030.

Finalement, pour analyser les mesures d'adaptation envisageables pour le secteur de l'énergie, nous considérons uniquement les technologies existantes et nous estimons que les événements actuellement considérés comme extrêmes (à l'instar de la canicule de 2003) peuvent devenir des événements courants dans le futur.

[31] GIEC, 4ème rapport, 2007.

C.3.2. L'adaptation des infrastructures énergétiques

Le principal objectif des options d'adaptation est de prendre en compte dès maintenant les effets actuels et à venir du changement climatique dans nos décisions afin de limiter leurs impacts négatifs et de maximiser leurs effets bénéfiques. Ainsi, un objectif primordial est d'assurer la sécurité des personnes et des actifs. Concernant l'adaptation des infrastructures énergétiques nous pouvons distinguer trois points d'attaque : (i) l'adaptation des infrastructures de production d'énergie, (ii) l'adaptation de la stratégie qui permettra d'assurer l'approvisionnement de l'énergie et (iii) le développement de mesures pour mieux gérer une situation de crise.

L'adaptation des infrastructures de production d'énergie

L'étude de l'adaptation des infrastructures de production d'énergie nécessite de faire la distinction entre d'une part les infrastructures existantes et d'autre part la construction de nouvelles infrastructures. Dans les deux cas, les risques climatiques sont les mêmes, les trois risques les plus importants étant l'augmentation de la température de l'air et de l'eau, qui peuvent provoquer un dysfonctionnement de l'infrastructure, la diminution de la quantité d'eau disponible avec pour conséquence une réduction de la capacité de production d'énergie et l'augmentation permanente ou temporaire du niveau de la mer et des cours d'eau, qui peuvent provoquer la submersion de l'infrastructure.

Les actions d'actions d'adaptation dure[32] constituent une stratégie déjà mise en œuvre à l'heure actuelle pour adapter les infrastructures existantes. Cependant et parce que les effets du changement climatique tarderont à se matérialiser encore pendant plusieurs décennies (sous l'hypothèse de changement de climat avéré à partir de 2030), les investissements à réaliser durant cette période de temps doivent viser prioritairement le développement de nouvelles technologies (par exemple dans le cas des centrales nucléaires en favorisant le développement des systèmes aéroréfrigérants secs qui ne nécessitent aucune consommation d'eau, ni prélèvements de débits). En effet, des investissements précipités dans des mesures d'adaptation non-optimales accroîtraient le risque de maladaptation. Ce risque est potentiellement très élevé lorsqu'on envisage la construction d'infrastructures de protection, principalement puisque l'existence d'incertitudes concernant les scénarii climatiques qui vont se réaliser créer un risque de sous-dimensionnement de la protection. Néanmoins, il faudra continuer à gérer les infrastructures de protection déjà existantes. Dans le cadre des infrastructures énergétiques, la digue érigée en protection de la centrale nucléaire du Blayais illustre bien ce phénomène. En effet, à la suite de la tempête de 1999, une partie de la centrale électrique a été inondée. D'importants travaux de renforcement ont dû être entrepris et les paramètres hydrauliques extrêmes ont été revus à la hausse.

Ceci étant dit, il demeure indispensable de définir, par une analyse précise, le moment opportun pour réaliser les investissements nécessaires à l'adaptation des infrastructures existantes. A priori, la méthodologie la plus appropriée pour faire ce type d'analyse pourrait être celle des options réelles. Selon Lautier (2003) les conditions d'existence des options réelles sont au nombre de trois : l'incertitude du contexte, la flexibilité d'exercice d'option et l'irréversibilité de l'investissement. L'investissement dans une infrastructure existante pour l'adapter au changement climatique réunit ces trois conditions. Néanmoins, il faudra approfondir l'étude pour déterminer le cadre précis d'analyse et s'assurer de sa viabilité. A notre connaissance, il n'existe pas encore d'étude qui aborde le problème de l'adaptation des infrastructures, énergétiques ou autres, au changement climatique à partir de l'approche des options réelles. En revanche, des mesures d'adaptation douce peuvent d'ores et déjà être mises en place pour faciliter la résilience du secteur énergétique existant. Ce type de mesure inclut les services d'assurance ou les plans de gestion de crise que nous détaillerons plus loin.

[32] L'adaptation *dure* fait référence à l'adaptation qui implique un investissement financier important généralement dans des infrastructures.

En ce qui concerne les nouvelles infrastructures, il est utile de prendre en compte des paramètres d'adaptation dans l'objectif de minimiser d'un côté les risques connus au moment de la construction de l'infrastructure et de l'autre les risques sur lesquels il y a une faible incertitude. Parmi ces mesures d'adaptation, nous pouvons considérer tout d'abord le développement de nouvelles technologies. L'investissement dans la recherche de nouvelles technologies plus résilientes au climat futur anticipé constitue en effet une forme d'adaptation sans regret qui peut être envisageable dès à présent : même si l'effet du changement climatique diffère de celui prévu par les modèles, l'investissement et les connaissances tirées de la recherche ne seront pas perdues. Ensuite, l'expansion de l'utilisation des technologies déjà existantes et plus adaptées aux perspectives de climat futur, prévu par les modèles régionalisés, peut elle aussi augmenter la résilience future du secteur énergétique. Puis, pour adapter les infrastructures énergétiques à un climat qui change, il peut être utile de développer et/ou d'utiliser des nouvelles sources d'énergie, telles que les énergies renouvelables (hors hydraulique) qui sont, comme nous avons pu le constater dans la partie I.3, moins sensible aux variations du climat. D'autre part, la construction de nouvelles infrastructures énergétiques nous permet de choisir leur localisation. Pour ce faire, des études visant à minimiser les risques climatiques futurs à faible ou moyenne incertitude par le choix de localisation devront être réalisées. Ce qui en soi est une forme d'adaptation proactive. Planifier dès à présent la construction des infrastructures énergétiques constitue de la sorte une mesure d'adaptation. Enfin, notons que les pouvoirs publics peuvent jouer un rôle en définissant de nouvelles normes et critères techniques visant à favoriser l'adaptation des infrastructures.

L'adaptation nécessaire pour assurer l'approvisionnement d'énergie

Le rôle principal des infrastructures énergétiques est de garantir l'offre d'énergie à un niveau permettant de maintenir, de façon permanente, l'équilibre entre offre et demande dans le temps et l'espace. Puisque le changement climatique aura un impact sur la demande d'énergie, l'équilibre offre-demande pourra être perturbé si des stratégies du côté de l'offre ne se mettent pas en place. D'autre part, l'augmentation de l'intensité énergétique, qui provoque une dépendance de plus en plus importante de notre société, oblige les producteurs à réduire la fréquence et la durée d'éventuelles interruptions provoquées par l'excès de demande énergétique.

Comme nous l'avons vu précédemment, les impacts du changement climatique sur la demande d'énergie ne sont pas négligeables, il est donc important de se préparer à leur faire face. On s'attend surtout à une augmentation des températures aussi bien en hiver qu'en été, provoquant dans ce dernier cas une augmentation de la demande énergétique. Des stratégies d'adaptation devront viser d'un côté à maîtriser la demande et de l'autre à augmenter l'offre d'énergie. Des mesures telles que l'investissement dans des nouvelles infrastructures pour augmenter la capacité de production d'énergie, les politiques d'efficacité énergétique, ou les politiques qui visent à provoquer une consommation plus responsable de l'énergie, sont quelques exemples de stratégies d'adaptation sans regret qui sont actuellement entreprises dans le secteur énergétique et qui doivent être prolongées.

Vine (2008) formalise les stratégies d'adaptation de l'approvisionnement énergétique en les regroupant en quatre catégories : (i) stratégies pour réduire l'augmentation des pics de demande, (ii) améliorer la capacité de production d'énergie pour répondre aux pics de demande, (iii) mettre en place des politiques de réduction des émissions et accroître le potentiel d'adaptation et (iv) augmenter l'investissement dans la recherche et le développement.

Mesures de gestion de crise

Si nous partons de l'hypothèse selon laquelle le climat futur peut être tel que les périodes actuelles de crise (vagues de chaleur, tempêtes, …) deviendront plus courantes, il apparaît utile d'analyser les mesures prises à l'heure actuelle pendant ces périodes afin d'étudier leur applicabilité en cas de récurrence des crises. De la sorte, les épisodes de forte chaleur, survenus

au cours des mois d'août 2003 ou encore de juillet 2006, constituent une illustration intéressante des actions d'urgences qui ont été entreprises afin d'assurer la continuité dans la production d'électricité et la pérennité du réseau.

La canicule de 2003 constituait en effet l'été le plus chaud survenu depuis plusieurs décennies en France. Les vagues de chaleur qui ont frappé l'Europe ont notamment perturbé la production et le transport de l'électricité sur le continent. En France, ces vagues de chaleur ont entraîné simultanément des difficultés de fonctionnement du parc de centrales thermiques à flamme et nucléaires ainsi qu'une forte augmentation de la puissance appelée sur le réseau (avec un pic à 52700 MW, d'après le Ministère de l'économie, 2003). Du côté de la production, ce sont essentiellement les augmentations de la température des cours d'eau qui ont suscité des pertes de production, via la difficulté de refroidir les centrales. Les autres paramètres qui ont joué ont été l'augmentation de la température de l'air, qui concerne davantage les centrales thermiques à flamme que nucléaire, ainsi que les baisses de débits des cours d'eau. L'augmentation considérable de la demande, notamment dans les régions du Sud, a par ailleurs mis à mal le réseau de transport et de distribution de l'électricité puisque l'élévation des températures des lignes associées comportait un risque de rupture. L'augmentation de la température dans les réseaux souterrains de distribution de la ville de Paris a nécessité d'autre part des coupures de courants. De la sorte, en juillet 2006, plus de 2870 incidents ont été enregistrés par EDF dans les réseaux souterrains de la région parisienne et Sud-est. Côté demande, c'est en priorité les besoins de climatisations et de froid qui ont soutenu la puissance appelée. Par conséquent, des mesures de gestion de crise ont donc été mises en place pour garantir l'équilibre offre-demande d'électricité et limiter ainsi le coût de défaillance en cas d'arrêt d'installations.

Les principales mesures utilisées pour faire face à la canicule de 2003 ont porté à la fois sur la demande et sur l'offre d'électricité. En ce qui concerne la demande, l'opérateur historique de l'électricité en France a fait appel aux gros consommateurs industriels avec lesquels il avait conclu au préalable des contrats EJP (effacement les jours de pointe). Cette démarche a ainsi permis d'économiser environ 1500 MW de capacité de production. EDF a également joué sur la communication pour sensibiliser le public aux risques de l'augmentation de la demande électrique pour la stabilité du réseau, ce qui a permis de réduire la consommation de manière ponctuelle mais significative. Cela dit, la demande d'électricité étant relativement incompressible à court terme, le gros des mesures a donc été porté sur l'offre d'électricité. En premier lieu, EDF a ajusté ses échanges aux frontières en réduisant ses exportations de courant et en augmentant fortement ses importations. On peut toutefois noter que le solde commercial est resté positif tout au long du mois d'août. L'opérateur a par ailleurs procédé à des achats d'électricité sur le marché amont, de l'ordre de 2800 MW. Cette possibilité étant néanmoins limitée en raison de la dimension géographique de la canicule qui a affecté l'ensemble des pays d'Europe de l'Ouest. Afin de parer aux coupures de courants, EDF a fait appel à sa « Force d'Intervention Rapide d'Electricité » (FIRE), créée en 2000, qui a installé environ 700 MW de groupes électrogènes. Une telle mesure est importante puisqu'elle permet des actions rapides consécutives à la réalisation d'événements extrêmes. Enfin, la disposition qui a fait le plus débat a été l'attribution, sous l'accord de l'autorité de sûreté nucléaire (ASN), de dérogations environnementales aux centrales thermiques et nucléaires. Ces dérogations accordées au cas par cas visaient à maintenir l'exploitation des centrales en relevant les seuils de températures fixés pour les rejets d'eau en aval des installations. Au final, seules quelques centrales ont effectivement bénéficié de cette mesure.

Au final, on constate que la crise a été gérée sans recourir à des délestages et ce en dépit de l'existence d'un plan prévoyant les zones à déconnecter en priorité. Ce plan a du reste été actualisé pour l'occasion. Ces mesures d'urgences ont donc permis le maintient de l'équilibre offre-demande d'électricité avec un minimum de coupures mais ont représenté un coût global de 300 millions d'euros pour l'opérateur historique. A ce coût réglé par EDF, s'ajoute par ailleurs celui supporté par la collectivité du fait des pertes de productions et autres dégâts causés par les

coupures momentanées. Il convient de rappeler ici que ces dispositifs ont été adoptés dans l'urgence et n'ont donc pas de fait été socialement et économiquement optimaux. L'augmentation de la régularité de ces événements climatiques dans le futur requiert par conséquent de mettre en place une véritable stratégie d'adaptation des infrastructures énergétiques, afin de minimiser les pertes de production potentielles et partant les situations de délestages. Une marge importante de progrès réside ainsi dans la réduction de la sensibilité des installations de production électriques aux vagues de chaleurs. Concrètement, l'adaptation du calendrier d'arrêts des centrales se traduit déjà par la mise en maintenance de façon prioritaire en été des centrales situées en bordure de rivières. Ce dispositif pourrait être affiné pour mieux tenir compte des prévisions climatiques et ainsi cibler davantage les centrales situées en bordure des cours d'eaux dont les températures devraient augmenter plus fortement. Une autre mesure pourrait consister à prendre des contrats d'approvisionnements à terme sur le marché amont en prévision des périodes de fortes chaleurs. Mais, le prix du MWh pouvant être potentiellement très élevé à ces périodes, une telle mesure soulève la question des responsabilités dans la garantie de l'approvisionnement énergétique et du degré de défaillance qui peut-être socialement acceptable par la collectivité. En définitive, l'adaptation des infrastructures électriques au changement climatique nécessite d'anticiper quelles seront les modifications de l'équilibre offre-demande compte tenu des prévisions climatiques et de choisir les mesures optimales à mettre en place.

C4. Conclusion

Les changements climatiques attendus vont perturber l'équilibre offre-demande d'énergie sur le territoire français, en particulier pour l'électricité qui n'est pas aisément stockable. D'une manière générale, la rivalité dans les usages de l'eau devrait fortement augmenter sous l'effet des modifications du climat. L'augmentation de la température, qui sera différente selon les régions, va perturber le refroidissement des centrales thermiques et nucléaires et augmenter la demande d'électricité en été pour les besoins de climatisation. Les principales périodes de pointes où le réseau est proche de la défaillance, qui se situent actuellement en hiver, seront déplacées à la période estivale. D'autres paramètres climatiques vont intervenir, tels que l'augmentation du nombre de jours secs dans la région Rhône-Alpes et l'Est de la France qui va entraîner une réduction de la production des barrages hydroélectriques et une diminution des réserves en eau disponible pour la production des centrales thermiques. A l'inverse, les sources d'énergies renouvelables, telles que les éoliennes ou les cellules photovoltaïques, devraient moins être impactées négativement par le changement climatique, voire connaître une augmentation de leur productivité dans le cas de l'énergie solaire, avec l'augmentation des durées d'ensoleillement.

Lorsqu'il s'agit de construire de nouvelles infrastructures énergétiques, l'investissement dans le développement de nouvelles technologies résilientes au climat futur espéré émerge comme une stratégie d'adaptation sans regret. Il en va de même en ce qui concerne l'investissement dans les énergies renouvelables, qui sont moins vulnérables aux variations climatiques attendues. Les choix de la localisation des infrastructures constituent également une stratégie d'adaptation qui doit être encouragée par le financement d'études visant à identifier les zones les moins risquées. En revanche et compte tenu du fait que la plupart des infrastructures énergétiques seront encore présentes lorsque les premiers effets du changement climatique apparaîtront, il apparaît indispensable de les adapter aux risques climatiques identifiés. Si l'on suppose que les événements climatiques qui sont extrêmes sous le climat actuel deviendront plus fréquents dans le futur, il est alors possible de systématiser et d'améliorer les mesures prises aujourd'hui pour gérer ces crises. En ce sens, une stratégie efficace pourrait consister à renforcer le calendrier d'arrêts des centrales de production électrique, pour éteindre en priorité les tranches situées en bordures des cours d'eau dont les augmentations de températures en été seront les plus fortes. En définitive, toutes les stratégies permettant de maintenir, voire d'augmenter, l'offre d'énergie et de réduire la demande apparaissent être adaptées. De la sorte, l'investissement dans les

technologies des réseaux électriques intelligents constitue une mesure optimale, puisque ces réseaux permettent de réduire la pression exercée sur l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité. En effet, ils réduisent fortement la demande d'électricité en période de pointe par une meilleure gestion des équipements et soutiennent l'offre en mutualisant les sources de production décentralisées. D'une manière générale, l'investissement dans des infrastructures de protection est rarement une stratégie efficace, notamment en raison des incertitudes sur l'ampleur des événements extrêmes.

C5. Références

California Climate Change Center. 2006. "Climate Change and Electricity Demand in California." White Paper CEC-500-2005-201-SF, février.

CIA World Factbook. 2009. [https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/]

Commission européenne, Directive 78/659/CEE et 2006/44/CE, relatives à la qualité des eaux douces ayant besoin d'être protégées ou améliorées pour être aptes à la vie des poissons.

Lautier, D. 2003. "Les options réelles: une idée séduisante, un concept utile et multiforme, un instrument facile à créer mais difficile à valoriser." *Economies et sociétés*, Série économie de l'énergie, **9**(2-3):403–432.

MEEDDAT, Direction des études économiques et de l'évaluation environnementale, ONERC, groupe interministériel impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France, document d'étape, p 145-168, juin 2008.

Met Office. 2006. "Climate Change and Energy Management: A scoping study on the impacts of climate change on the UK energy industry".

Natural Resources Canada. 2008. "Climate Change Impacts and Adaptation: A Canadian Perspective." Climate Change Impacts and Adaptation Directorate Report.

Neuman, J. E., et J.C. Price. 2009. "Adapting to climate change: The Public Policy Response, Public Infrastructure." Resources For the Future, June.

RTE. 2009. *Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France*.

Valor et Al. 2001. Daily air temperature and electricity load in Spain. American Meteorological Society.

Vine, E. 2008. *Adaptation of California's Electricity Sector to Climat Change*. Public Policy Institute of California.

Annexe D : Adaptation, gestion des risques et analyse coûts bénéfices : illustration sur le cas de la région Languedoc-Roussillon et de la montée du niveau de la mer

Préparé [33] par Stéphane Hallegatte (CIRED, Météo-France) et Patrice Dumas (CIRED, CIRAD)

Afin d'illustrer l'usage de l'analyse coût-bénéfice pour l'adaptation au changement climatique et la maîtrise des risques naturels, on va s'intéresser ici à un exemple simple : quelles protections faudrait-il mettre en place pour protéger les côtes de la région Languedoc-Roussillon. Toutes les données ne sont pas disponibles pour ce travail, et 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 a fait acceptable pour la région. Ensuite, on va supposer – en l'absence de données plus précises – que la région dispose actuellement de protections, sous la forme de digues, naturelles ou artificielles, à un niveau uniforme de 1m 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 1m, 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.

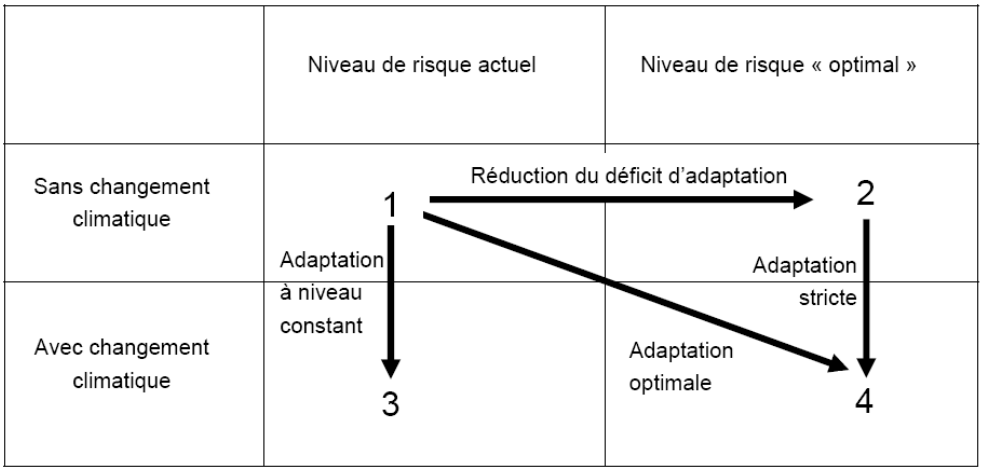
Or, les stratégies d'adaptation sont très différentes selon que l'on part d'une situation idéale, où le niveau de risque d'inondation est à sa valeur optimale, ou d'une situation sous-optimale. Cette différence est illustrée par le tableau D1. La situation réelle aujourd'hui est celle de la case 1, une situation où le risque n'est pas forcément à sa valeur optimale. Diverses définitions de l'adaptation peuvent se représenter dans le tableau D1, 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.

[33] Les auteurs remercient Gonéri Le Cozannet (BRGM) et Sylvie De Smedt (MEDDM/DGPR) pour leurs commentaires sur une précédente version de ce texte.

- 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.

Tableau D1 : Différentes définitions de l'adaptation



D1. 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 Sètes à Marseillan entre les formations calcaires et volcaniques du néogène d'Agde et les calcaires secondaires du Mt St Clair à Sètes). 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). Il y a également eu récemment l'application de nouvelles approches de protection « douces » avec des rechargements en sables. Par exemple, l'opération de rechargement du golfe d'Aigues Mortes a utilisée 1 million de m3 de sables prélevés dans la flèche sous marine de L'Espiguette (Source : Goneri Le Cozannet, BRGM).

Dans cet article, on suppose toutefois que les seules protections sont des digues de 1m. 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 LR (voir

par exemple les résultats du projet RESPONSE [34]). 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 LR. Ces limitations ne représentent donc pas un problème majeur.

Le bénéfice de protéger par des digues les côtes de la région LR a deux composantes principales : (1) éviter la perte de logements et d'infrastructures qui seraient définitivement inondés par la montée du niveau moyen de la mer ; (2) 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.

Les surcôtes 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 surcôtes s'ajoutent aux marées astronomiques pour faire monter le niveau de la mer et engendrer les marées de tempête. Sur la France métropolitaine, les surcôtes sont fréquentes mais dépassent rarement 2 mètres (Bordeaux en 1999 ; Dunkerque en 2007). Dans la région LR, en l'absence de marée astronomique significative (>30cm), 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 [35]. 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).

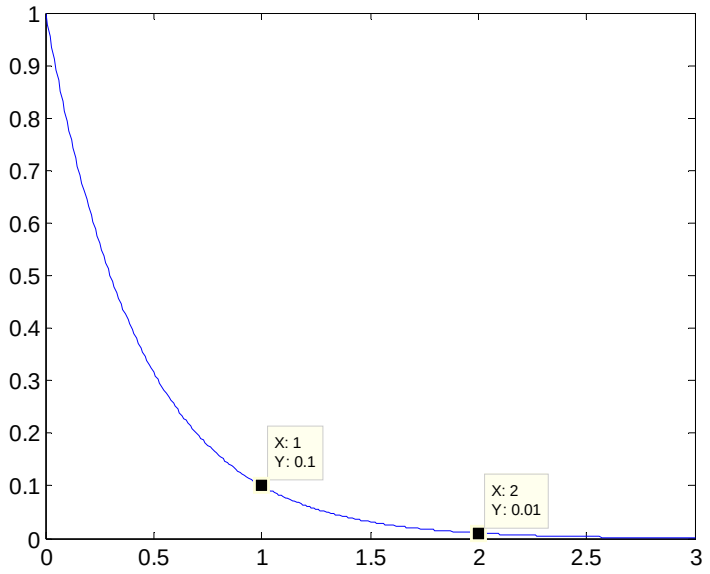
Pour simplifier, on va supposer que les fréquences annuelles des jours pendant lesquels une marée de tempête a lieu sont données par une exponentielle, comme le montre la Figure D1, avec une fréquence de 0,1 pour un événement à 1m et 0,01 pour un événement à 2m. Avec cette hypothèse, le nombre total 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.

---

[34] http://www.coastalwight.gov.uk/RESPONSE_webpages/

[35] 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 submersion marine en Languedoc-Roussillon conseille l'utilisation d'une côte de mer centennale de 2m (NGF).
Voir http://www.languedoc-roussillon.ecologie.gouv.fr/risques/subma/A5_GuidePPRsubmersion.pdf.

Figure D1 : Fréquence annuelle des marées de tempête, en fonction de leur niveau par rapport au niveau normal de la mer.



Note : 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.

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

D2. Analyse des coûts

La première étape, bien sûr, est d'évaluer le coût (C) 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 mètre coûte environ 5000€ (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 un milliard d'euro, 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 n°D1), ce coût de maintenance est équivalent à une dépense ponctuelle immédiate de 2,9 G€ 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.

Encadré D1 : Le taux d'actualisation

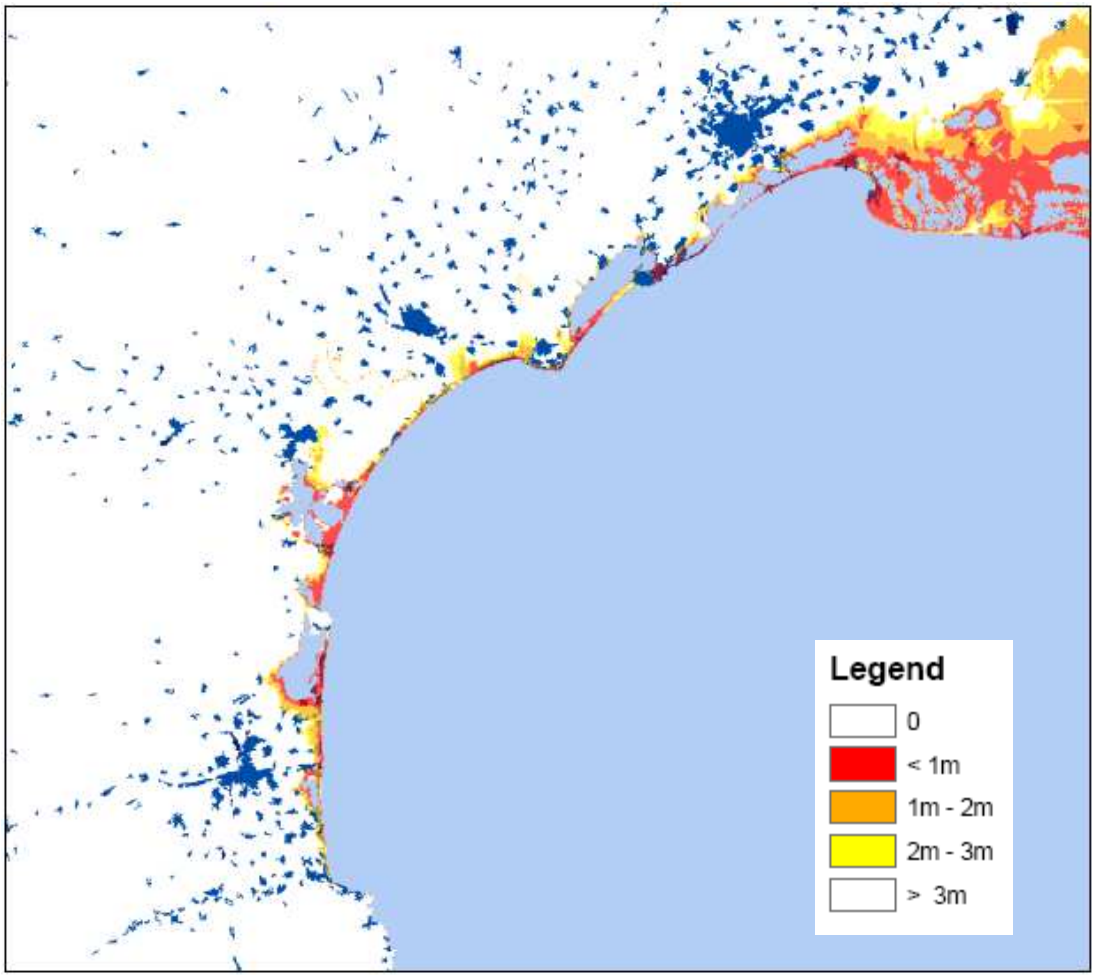
En France, le Commissariat Général au Plan a défini en 2005 un taux social d'actualisation variable, qui doit être utilisé pour évaluer les projets publics. L'usage d'un taux variable complique légèrement le calcul, mais ne pose pas de difficulté particulière. Ce taux est de 4% pour les projets de court 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

$\delta n = [\ 1,.04^{30}\ 1,02^{(t-30)}\ ]^{(1/t)} - 1$ 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 USA, un taux décroissant entre 3,5% et 1% pour le Royaume-Uni).

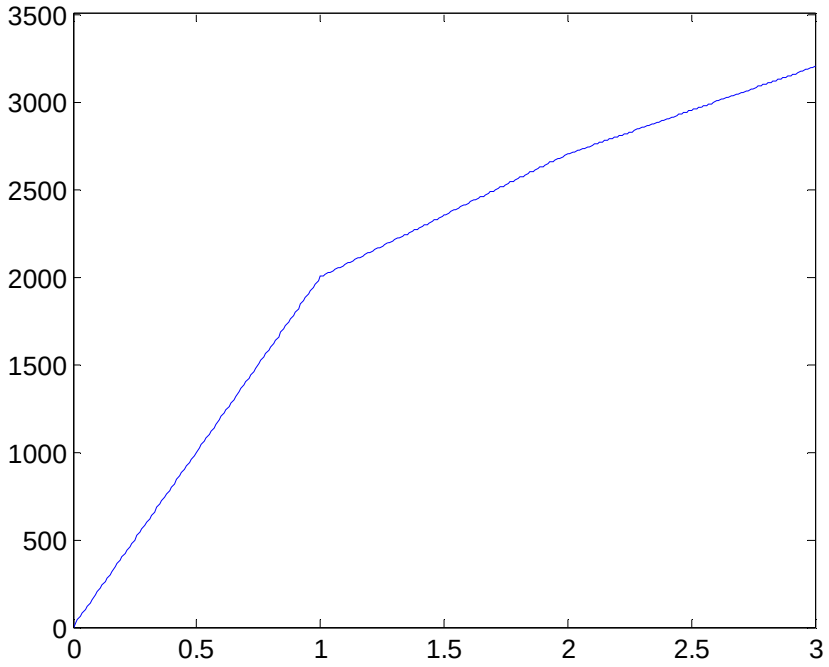
Figure D2 : Carte de la région Languedoc-Roussillon, avec l'urbanisation en bleu et l'altitude par rapport au niveau de la mer en jaune/orange/rouge.



D3. 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[36], le long de la côte de la région LR (voir la carte en Figure D2 et Le Cozannet et al., 2009). On a aujourd'hui 104 500 logements entre 0 et 1m d'élévation, 35 400 entre 1m et 2m, et 25 000 entre 2m et 3m. On suppose que ces logements sont répartis de façon homogène dans chacune de ces tranches d'élévation. On va supposer de les pertes lorsqu'un logement est inondé de manière temporaire est 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 D3. On peut noter qu'en absence de protection côtière, les pertes potentielles engendrées par une marée de tempête en région LR sont très importantes, et pourraient dépasser 2 milliards d'euros pour la tempête centennale.

Figure D3 : Pertes causées aux logements pour différents niveaux de marée de tempête.



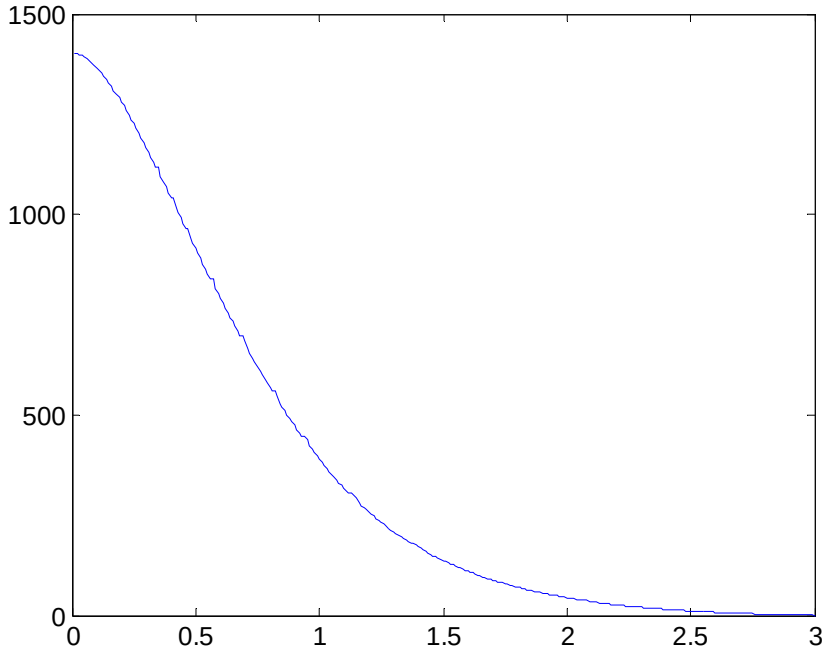
On peut noter que ces pertes sont probablement surestimées, surtout pour les petites marées de tempête, car on a supposé que le patrimoine était réparti de manière homogène à l'intérieur de chaque tranche d'élévation de 1m. En réalité, il est probable qu'il y a beaucoup moins de bâtiments et d'infrastructure entre 0 et 0,5m d'élévation qu'entre 0,5m et 1m. 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

[36] 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.

précises, qu'il faudra donc collecter. Cette collecte représentera d'ailleurs elle-même un investissement significatif.

A partir des fréquences de la Figure D1 et des pertes de la Figure D3, 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 millions d'euros. En supposant qu'on ait la même perte pour les entreprises, on aboutit à 700 M€ de pertes annuelles assurables. A cela s'ajoute 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 1400 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 n°A2 identifie ces impacts indirects et propose des pistes pour les évaluer).

Figure D4 : Pertes annuelles dues aux marées de tempêtes dans la région LR, en fonction de niveau de protection sur la côte (supposé uniforme).



Ceci 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 [37]. La Figure C 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 1400 M€ en l'absence de protection, et

[37] 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.

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 1m et 44 M€ pour des protections de 2m. En reprenant notre hypothèse initiale d'une protection de 1m, on a donc des pertes annuelles moyennes de 395 M€.

Encadré D2. 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 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 multiple façon de sauver des vies : on peut investir dans la santé (par exemple, installer un scanner dans l'hôpital d'une petite ville), on peut améliorer les infrastructures (par exemple, les infrastructures routières), on peut réglementer plus durement la pollution urbaine, on peut limiter la vitesse limite sur la route, on peut durcir les réglementations incendie dans les habitations, etc. Toutes ces actions sauvent des vies, et coûtent de l'argent. L'objectif de l'usage d'une volonté à payer de la société pour réduire les risques, appliquée 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'Equipement 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[38], mais ce n'est pas le cas à l'échelle d'une commune côtière qui investit uniquement dans une zone à risque d'inondation.

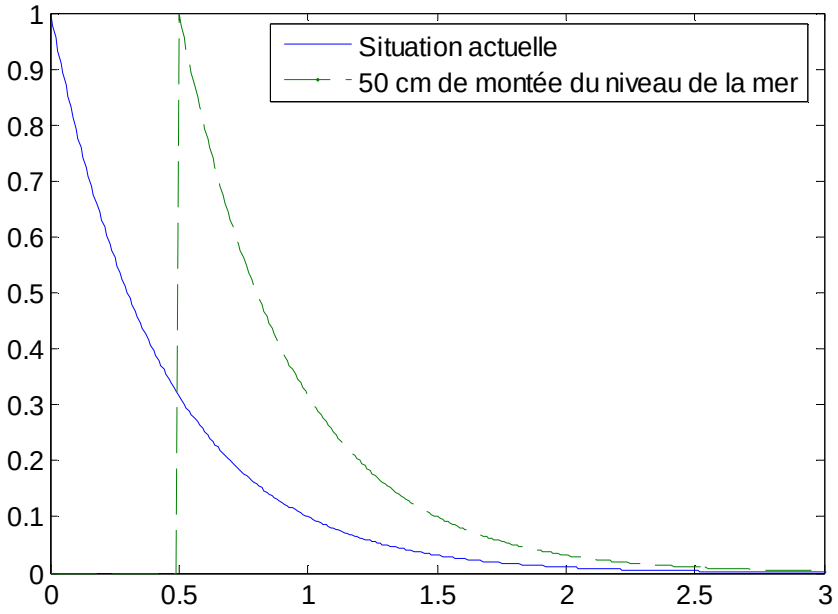
Ensuite, dans l'analyse de l'adaptation, il ne faut pas prendre comme présupposé que la situation actuelle est optimale : la gestion des risques a souvent été conduite de manière empirique, et il est tout à fait possible qu'il existe un « déficit d'adaptation » dans la situation actuelle (« adaptation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

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

D4. 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 D1 devient alors la Figure D5.

Figure D5 : 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 D4 qui donne les pertes moyennes en fonction du niveau de protection devient la Figure D6, 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 diminuer ces dernières. C'est ce qui explique que dans la Fig. 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 ! Ceci est vrai dans notre exemple car il y a beaucoup plus de logements entre 0 et 1m 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 LR dispose actuelle d'une protection d'un niveau de 1m (ce qui correspond à un muret n'empêchant pas la

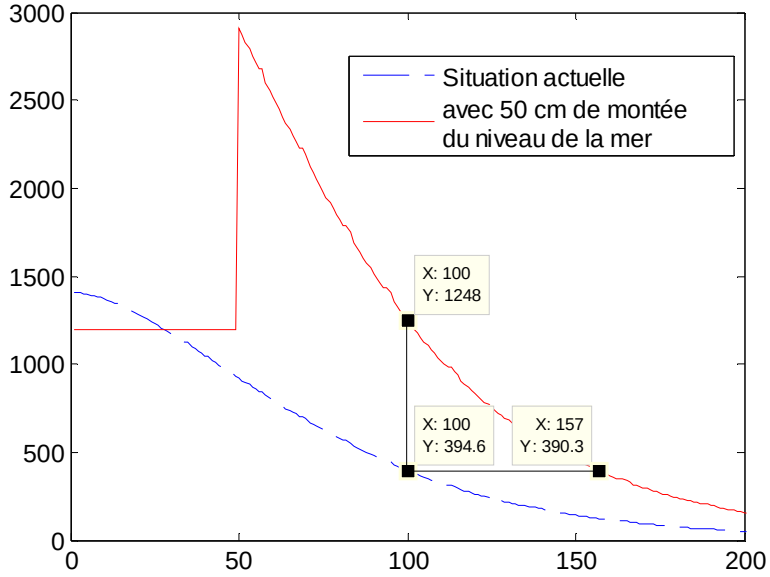
vue sur mer), supérieure à la montée du niveau de la mer, il n'y a pas de perte définitive de capital. Dans ce cas, les pertes annuelles liées aux marées de tempête sont de 395 M€ avec le niveau de la mer actuel. En maintenant ces protections inchangées, et avec 50 cm de montée du niveau de la mer, ces 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 1m par rapport au niveau de la mer actuel à 1,57m par rapport au niveau de la mer actuel. De la même manière, en cas d'augmentation du niveau de la mer de 1m, il faudrait surélever les digues jusqu'à 2.11m 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) maintien 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 D6 : Pertes annuelles dues aux marées de tempêtes dans la région LR, 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).



D5. 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 1m 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 transféré 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 42G€ multiplié par l'augmentation annuelle de niveau de la mer (soit 42G€ x 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 D7, D8 et D9 donnent deux exemples de ces séries temporelles, en l'absence de protection (Fig. D7), et pour des niveaux de protections de 50 cm (Fig. D8) et 100 cm (Fig. D9). 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 1m en climat présent, mais revient en force avec la hausse du niveau de la mer.

Figure D7 : 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 1m 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 1m 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.

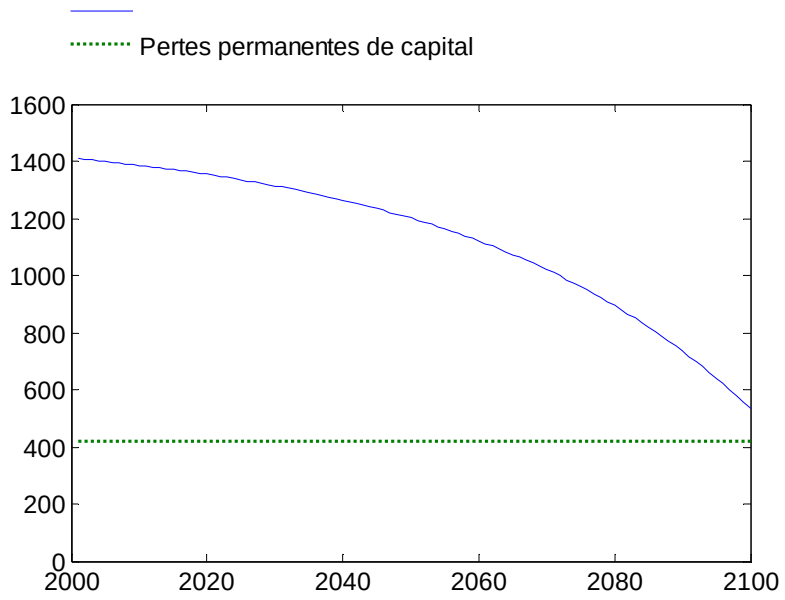


Figure D8 : Pertes annuelles (en pertes permanentes de capital et en pertes moyennes annuelles liées au risque de marée de tempête) pour une montée du niveau de la mer de 1m jusqu'en 2100, avec un niveau constant de protection à 50 cm au dessus du niveau actuel de la mer. Le pic de pertes permanentes correspond au moment où la protection est dépassée, et où tout le capital situé à moins de 50 cm d'altitude est perdu. A ce moment, les pertes liées aux marées de tempête diminuent car du capital vulnérable a disparu.

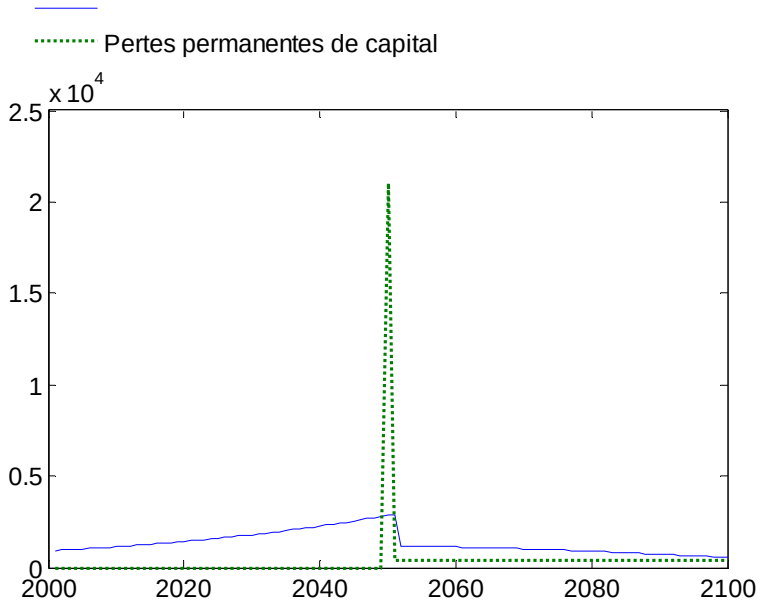
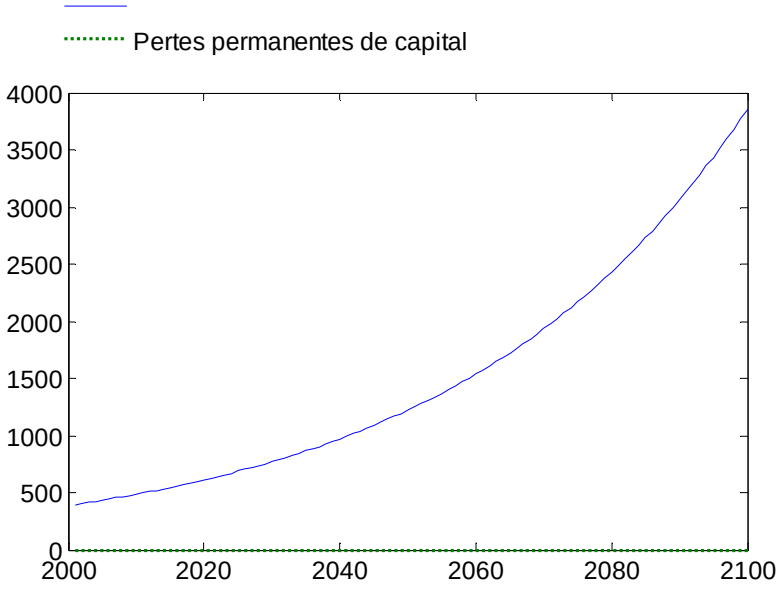


Figure D9 : Pertes annuelles (en pertes permanentes de capital et en pertes moyennes annuelles liées au risque de marée de tempête) pour une montée du niveau de la mer de 1m jusqu'en 2100, avec un niveau constant de protection à 100 cm au dessus du niveau actuel de la mer. Dans ce cas, il n'y a pas de 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 LR, 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. Ceci 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 D7, D8 et D9.

Ceci 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. A 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 D8), les propriétaires de logement pourraient anticiper les pertes de capital de 2050, quand la digue devient trop faible, 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, route, réseau 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 est 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'Etat 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.

D6. 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 D1). Les résultats sont présentés dans le Tableau D2.

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 1m et

restent inchangées au cours du siècle, alors le coût de la montée du niveau de la mer en LR 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 1m, les pertes sont de 28 G€. Faire passer les protections à 2m 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 3m, les faire passer à 4m 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 C2 : 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.

	Valeur nette présente des pertes, pour 1m de montée du niveau de la mer en 2100 (Entre parenthèse, la valeur sans montée du niveau de la mer)			Coût résiduel de la montée du niveau de la mer
Niveau constant de protection entre 2000 et 2100	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€
50 cm	7 G€ (0 €)	39 G€ (27 G€)	46 G€ (27 G€)	19 G€
100 cm	0 G€ (0 €)	28 G€ (11 G€)	28 G€ (11 G€)	17 G€
200 cm	0 G€ (0 €)	3,5 G€ (1,4 G€)	3,5 G€ (1,4 G€)	2,1 G€
300 cm	0 G€ (0 €)	400 M€ (164 M€)	400 M€ (164 M€)	236 M€
400 cm	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.

D7. Le coût de la montée du niveau de la mer

Le tableau précédent 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).

D7.1. Adaptation optimale : la situation de référence est la situation actuelle avec une protection de 1m.

En supposant un niveau de protection actuel de 1m, 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 1m 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 1m et de 4m.

En supposant que la digue est à 1m, 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 1m à 2m, 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 1m à 3m, 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 1m à 4m, 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) ;

D7.2. Adaptation stricte : la situation de référence est la situation optimale (avec une protection de 2m)

On suppose toujours que les digues actuelles sont à 1m au dessus du niveau de la mer, mais on admet maintenant que la situation considérée comme « optimale » serait d'avoir des digues de 2m. 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 2m est considéré comme préférable. Dans une telle situation, il existe donc un déficit d'adaptation avec des digues à 1m au lieu de 2m.

Ce déficit d'adaptation demande – même sans changement climatique – un investissement de 3,9 G€ pour améliorer les digues et les passer à 2m. En raison du changement climatique, toutefois, on admet qu'il faut plutôt faire passer ces digues à 3m, c'est-à-dire les 2m de la situation optimale actuelle plus 1m 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 1m comme situation de référence et en supposant une adaptation avec des digues à 3m, 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.

D7.3. Adaptation à niveau constant : la situation de référence est la situation actuelle avec une protection de 1m

Si une adaptation à niveau constant est mise en place pour l'année 2100, alors on cherche à avoir, à cette date et avec 1m 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 395M€/an. Comme expliqué plus haut, maintenir ce niveau de risque demande de rehausser les digues de 1m à 2,1m.

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 1m 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€). Ceci 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 toute 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 1m, l'adaptation à niveau constant (avec des digues de 2,1m) 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.

D7.4. Adaptation optimale : la situation de référence est la situation actuelle avec une protection de 2m.

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 2m 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 2m.

Avec changement climatique, faire passer le niveau de protection de 2 m à 4 m ou plus n'apporterait un gain que d'environ 3,5G€, 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.

D8. Comparaison des types d'adaptation

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

Tableau D3 : Application du tableau D1 à la situation de la région LR et à la montée du niveau de la mer.

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

Il faut noter que les niveaux de 2,1m et 3m 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. Ceci 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 D4.

Ceci 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 quelque 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. Ceci 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 D4 : Coût 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, paysages, 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 1m à 2m)	3,9 G€	1,4 G€	3,5 G€
Adaptation stricte (passage de 2m à 3m)	3,9 G€	164 M€	400 M€
Adaptation optimale (passage de 1m à 3m)	3,9 G€	164 M€	400 M€
Adaptation à niveau constant en 2100 (passage de 1m à 2,1m)	3,9 G€	1,1 G€	2,8 G€

D9. Limites des ces analyses

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. Des tels scénarios demandent 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'Etat). 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 (quelque 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. Ceci 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 financé. Ceci crée d'importants problèmes d'équité intergénérationnelle. Un travail spécifique pourrait être conduit 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[39]. 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.

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 1m. 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 2m 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 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. A l'opposé, un système de protection « en dur » à base de digues doit être conçu une fois pour toute, 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

[39] 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.

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.

D10. Références

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., N. Patmore, O. Mestre, P. Dumas, J. Corfee Morlot, C. Herweijer, et R. Muir Wood (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(2008).

Hallegatte, S., F. Henriet, et J. Corfee-Morlot. 2008. "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.

Heberger M., H. Cooley, P. Herrera, P. H. Gleick, et E. Moore. 2009. *The Impacts of Sea-Level Rise on the California Coast*. California Climate Change Center, the Pacific Institute.

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

.

Annexe E. Adaptation au changement climatique, les approches de l'OCDE et de la Banque Mondiale

Préparé par Baptiste Périssin Fabert (CEDD)

A la veille des négociations internationales sur le régime post-Kyoto, la crédibilité de la menace climatique n'est plus mise en cause. Le débat ne porte plus sur l'opportunité de l'action mais bien sur les modalités concrètes de l'action pour se préparer à la nouvelle donne climatique et se protéger contre les nouveaux risques induits. Il existe ainsi aujourd'hui, entre les grandes organisations internationales, un consensus sur la nécessité de mener conjointement des politiques d'atténuation du changement climatique et des politiques d'adaptation à ses effets. Et les fortes incertitudes qui demeurent sur l'évaluation économique, sur la répartition géographique et sur la nature même des effets du changement climatique ne jouent plus en faveur de l'attentisme. Au contraire, elles incitent les États à augmenter leurs efforts de recherche et à privilégier des projets sans regret et flexibles en cas d'arrivée de nouvelles informations qui exigeraient une bifurcation radicale.

L'objet de cette note est de présenter les stratégies d'adaptation au changement climatique préconisées par la Banque Mondiale et l'OCDE dans trois récents rapports publiés en automne 2009 (*2010, World Development Report*) et *The Global Report of the Economics of Adaptation to Climate Change Study*, de la Banque Mondiale; et *Adaptation au changement climatique et coopération pour le développement* publié par l'OCDE). Partant du même diagnostic sur l'urgence et la nécessité de l'action, les deux études apportent des éléments complémentaires sur les aspects financiers et institutionnels d'une adaptation réussie.

E1. Le consensus entre les grandes organisations internationales sur le diagnostic

E1.1. La menace climatique: le grand défi du XXIe siècle

Les rapports de l'OCDE et de la Banque Mondiale sur l'adaptation au changement climatique s'accordent pour prendre au sérieux la menace climatique. Ils reprennent en chœur les diagnostics présentés dans les rapports successifs du GIEC (Groupe Intergouvernemental des Experts du Climat) et fondent leurs analyses sur le spectre des scénarios envisagés par les climatologues. La cible des 2°C d'augmentation des températures par rapport à l'ère préindustrielle fait figure de référence incontournable du débat. Elle permet d'une part, de tracer la trajectoire optimale des efforts de réduction d'émissions de gaz à effet de serre (GES) à réaliser dans les prochaines décennies selon le scénario retenu, et d'autre part d'évaluer les besoins d'adaptation aux dommages résiduels induits par cette hausse de température.

Ainsi, bien que l'atténuation et l'adaptation soient très souvent présentées dans des rapports distincts qui évaluent leurs coûts respectifs et décrivent leurs projets associés, la Banque Mondiale et l'OCDE affirment qu'il faut privilégier une vision intégrée de ces deux réponses au changement climatique afin de profiter au mieux des synergies possibles. En effet, il est inutile de traiter de l'adaptation indépendamment de l'atténuation puisque les efforts à consentir pour s'adapter dépendront pleinement du niveau d'engagement pris par les pays pour réduire leurs émissions de GES. Toutefois, comme il est tout à fait irréaliste d'envisager une suppression totale des émissions à court ou moyen terme et donc la prévention de tout changement climatique, l'adaptation demeure un sujet pertinent en tant que tel dont les décideurs ne peuvent faire l'économie. Les capacités d'adaptation spontanée n'étant pas suffisantes pour répondre à l'ampleur du défi, des politiques et des projets spécialement dédiés à l'adaptation au changement climatique devront voir le jour.

E.1.2. L'adaptation au changement climatique: faire du développement autrement

Un autre point de consensus entre les analyses des deux organisations internationales porte sur le fait que l'adaptation ne se réduit pas à un problème d'environnement mais est avant tout un problème économique de développement. Il serait ainsi nécessaire d'élaborer des politiques de développement renouvelées et « *climate smart* » dont la pertinence serait systématiquement évaluée à l'aune de leur vulnérabilité au changement climatique. Si le développement est une condition nécessaire à l'adaptation (lutte contre la pauvreté, amélioration des soins, de l'éducation), les politiques traditionnelles de développement ne sont pas suffisantes pour se préparer aux effets du changement climatique et éviter la « maladaptation » (poursuite de politiques actuelles en matière d'infrastructures par exemple qui, faisant abstraction des effets du changement climatique, augmentent par mégarde l'exposition ou la vulnérabilité au changement climatique). Ainsi tout projet d'adaptation devrait être un projet de développement robuste aux futures évolutions du climat.

E2. Comment s'adapter aux nouveaux risques créés par le changement climatique? Le point de vue de la Banque Mondiale

E2.1. Choisir des projets en contexte d'incertitude

Dans un contexte d'information imparfaite et donc d'incertitude sur l'évolution du climat et des dommages climatiques, les stratégies de développement mises en œuvre devraient être non pas optimales, selon les critères d'optimalité traditionnels du calcul économique, mais « robustes », soit cohérentes avec les scénarios anticipés et capables de s'adapter à des *baselines* évolutives. Il faudrait ainsi privilégier les options flexibles et réversibles pour éviter d'enfermer les pays en développement dans des trajectoires de croissance non soutenables (infrastructures, pratiques culturales inappropriées au futur régime climatique) et pour leur permettre de réagir à l'arrivée de nouvelles informations. La Banque Mondiale met en avant des modèles de gestion adaptative et de décision fondés sur une analyse des nouveaux risques engendrés par le changement climatique. La bonne démarche à adopter face aux risques émergents est la suivante: les identifier, les quantifier, les comprendre et enfin les réduire. Mais le risque ne peut jamais être complètement éliminé et s'adapter ne consiste pas à se prémunir contre tous les risques mais à accepter un certain niveau de risque résiduel notamment face aux événements extrêmes contre lesquels une protection totale reste impossible.

E2.2. Identifier les risques et stratégies de couverture

Les principaux risques induits par le changement climatique auxquels les pays en développement doivent se préparer se concentrent dans les villes là où l'exposition des actifs économiques est la plus forte en raison de leur concentration. Avec le changement climatique les villes seraient plus exposées aux risques d'inondation (problème de drainage dans les villes trop denses, élévation du niveau des mers), de défauts d'approvisionnement en eau (avec la fonte des glaciers qui sont des réservoirs d'eau pour de nombreuses villes andines et indiennes) et de vagues de chaleur récurrentes. La construction de villes respectant une planification urbaine « *climate smart* » qui concilie une adaptation aux chocs climatiques de court terme et une adaptation aux changements de long terme est la condition nécessaire à toute adaptation réussie aux risques climatiques.

Pour gérer les risques physiques, outre la construction de villes plus résilientes, il est également efficace et souhaitable de restaurer des écosystèmes menacés, de bien gérer les espaces naturels existants, de développer des variétés résistantes à la sécheresse et d'investir dans des marges de sécurité (rehaussement de digues par exemple dont le coût peut être très faible).

Pour les risques financiers, le recours à un système d'assurance adapté permet de réduire la variance des pertes mais n'élimine pas le risque. L'assurance est un élément central d'une stratégie d'adaptation mais ne serait être une panacée car, en cas de dérèglement climatique généralisé, les risques peuvent devenir non assurables et le montant des primes totalement

prohibitif. Pour chacun des risques identifiés il convient ainsi d'étudier les complémentarités entre le public et le privé pour gérer le transfert de risque et de déterminer un niveau et/ou un type de risque pour lequel l'État doit se substituer au privé pour se porter assureur en dernier ressort. A ce titre, le fonds d'intervention d'urgence créé par seize pays caribéens peut être une source d'inspiration pour mettre en place un fonds mondial dédié non seulement aux catastrophes climatiques mais aussi au financement de l'adaptation.

Pour mieux gérer les risques sociaux enfin, la Banque suggère d'utiliser les connaissances des communautés de leur environnement pour leur donner le pouvoir de se protéger d'elle-même. Les communautés ont toujours cherché à s'adapter aux conditions climatiques de leur environnement en faisant preuve d'une inventivité foisonnante. Si cette capacité d'adaptation spontanée risque d'être insuffisante il est crucial de renforcer le droit des habitants locaux sur leurs terres, de profiter des capacités d'apprentissage locales et des réseaux d'information locaux. Par ailleurs, fournir des filets de sécurité sociale aux plus vulnérables pour les protéger contre la volatilité des cours des produits de première nécessité par exemple permettrait d'éviter de revivre les épisodes de crise alimentaire de 2008 qui risquent d'être plus fréquents dans une situation de dérèglement climatique.

E.2.3. Évaluation du coût de l'adaptation

La Banque Mondiale estime que le coût additionnel de l'adaptation dans les stratégies de développement des pays en développement est compris entre 75 et 100 milliards US$ par an, soit le même ordre de grandeur que l'ensemble de l'aide au développement actuel. Ce chiffre est à comparer aux 400 milliards US$ par an qui seraient nécessaires pour mener les politiques de mitigation du climat compatible avec la cible des 2°C. L'évaluation des coûts de l'adaptation repose sur la mesure des coûts des actions nécessaires pour s'adapter aux nouvelles conditions de vie sur terre dans un monde avec changement climatique par rapport à un monde sans changement climatique. Comme le déficit de développement est intégré au scénario de référence, les coûts de l'adaptation ne concernent que les coûts additionnels d'un développement adapté aux changements climatiques futurs. Ainsi les coûts des politiques qui auraient été entreprises de toute façon ne sont pas compris dans les coûts de l'adaptation.

Ce coût a une valeur fondamentalement conventionnelle puisqu'il est dépendant à la fois du niveau de l'atténuation qui sera atteint et du niveau d'adaptation aux dommages résiduels que la société juge souhaitable. Ainsi s'adapter à une hausse de 2°C n'implique pas les mêmes coûts que s'adapter à une hausse de 4°C. Par ailleurs, le coût n'est pas le même si l'objectif visé est l'adaptation totale, l'adaptation jusqu'à égalisation du coût marginal au bénéfice marginal, ou encore l'adaptation qui permet d'atteindre un niveau de bien-être équivalent à celui qui aurait prévalu sans changement climatique. Pour des raisons de réalisme politique, la Banque Mondiale fonde ses estimations de coût sur la cible de 2°C et sur le troisième critère de fixation du niveau d'adaptation.

Pour préciser la méthode de calcul suivie, deux scénarios polaires sont retenus (le plus humide, le plus sec envisagés par le GIEC). La distribution entre les pays des conséquences du changement climatique est clairement différente selon le scénario considéré. Dans les deux cas, la majorité des coûts proviennent de l'infrastructure, des zones côtières, de la fourniture d'eau et de la protection contre les inondations. Les impacts sur le secteur agricole touchent les rendements et les exportations des PVD qui chutent au profit des exportations des pays développés. Les régions les plus touchées sont l'Asie orientale et la région pacifique, suivies par l'Amérique Latine, la région Caraïbe et l'Afrique sub-saharienne; enfin les régions les moins touchées sont le Moyen Orient et l'Afrique du nord.

Figure E1 : Coûts annuels totaux de l'adaptation pour tous les secteurs, par région, de 2010 à 2050 (en milliards US $ de 2005, non actualisés)

Cost aggregation type	East Asia and Pacific	Europe and Central Asia	Latin America and Caribbean	Middle East and North Africa	South Asia	Sub-Saharan Africa	Total
National Centre for Atmospheric Research (NCAR), wettest scenario							
Gross sum	28.7	10.5	22.5	4.1	17.1	18.9	101.8
X-sum	25.0	9.4	21.5	3.0	12.6	18.1	89.6
Net sum	25.0	9.3	21.5	3.0	12.6	18.1	89.5
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), driest scenario							
Gross sum	21.8	6.5	18.8	3.7	19.4	18.1	88.3
X-sum	19.6	5.6	16.9	3.0	15.6	16.9	77.6
Net sum	19.5	5.2	16.8	2.9	15.5	16.9	76.8

Source : l'équipe d'économie de l'adaptation au changement climatique de la Banque Mondiale

La Figure E1 montre que le coût de l'adaptation augmente en valeur absolue jusqu'en 2050 mais diminue en part du PIB en raison de la croissance du PIB des pays pendant la même période. La Banque Mondiale reconnaît que ses estimations se situent dans une tranche haute de la fourchette des estimations existantes. Elle rappelle aussi que toute tentative d'évaluation demeure un exercice complexe qui repose sur des projections de croissance économique, de changements structurels, de comportements humains, de scénarios climatiques, d'investissements publics sur les quarante prochaines années qui impliquent le recours à des hypothèses simplificatrices, marquées par de larges incertitudes. Il est notamment difficile d'incorporer des processus d'innovation dans ces projections qui permettraient pourtant de réduire le coût futur de l'adaptation.

E3. Comment prendre en considération l'adaptation au changement climatique aux différents échelons de la prise de décision? Le point de vue de l'OCDE

L'originalité du rapport de l'OCDE est d'examiner les conditions institutionnelles d'une prise en considération réussie de l'adaptation au sein des décisions. Le rapport se présente comme un guide pratique à destination des décideurs qui détaille des procédures pour intégrer des stratégies d'adaptation au sein des politiques de développement à différents échelons de la prise de décision (national, sectoriel, projet, local).

E3.1. Un outil théorique pour guider les décisions: le concept de « prisme climatique »

Le concept de prisme climatique est un outil d'analyse pour l'examen des stratégies, des politiques, des plans, des réglementations ou des programmes. Son application possible aux différents niveaux de la décision permet de déterminer:

- le degré de vulnérabilité d'une action face aux risques du CC;
- la façon dont les risques liés au CC ont été pris en considération au moment de l'élaboration de cette action;
- dans quelle mesure l'action considérée risque d'accroître la vulnérabilité et d'entraîner une « maladaptation » ou de passer à côté d'une opportunité;
- les amendements ou révisions à apporter aux plans préexistants pour faire face aux risques climatiques.

Ainsi ce concept définit une procédure standardisée pour favoriser l'appropriation par les décideurs et par les institutions en charge de l'évaluation et de la mise en œuvre des projets du thème de l'adaptation. Il s'inscrit pleinement dans la démarche intégrée préconisée par l'OCDE

qui consiste à ne pas traiter séparément les questions de développement et les réponses à apporter aux changements climatiques.

E3.2. Les mesures prioritaires à appliquer aux quatre niveaux de la décision

A chaque niveau d'intervention le mode opératoire est le même. Il s'agit de faire ressortir les vulnérabilités présentes et futures aux risques climatiques, d'identifier les mesures d'adaptation, d'évaluer et de sélectionner les options d'adaptation, et enfin d'évaluer la « réussite » de l'adaptation.

Niveau national: placer l'adaptation au cœur des visions nationales de moyen long terme

- améliorer le dispositif de contrôle de la qualité des données et de veille climatique, dresser une cartographie des vulnérabilités et des possibilités d'adaptation;
- placer les autorités responsables de la coordination de l'adaptation au sein de centres de pouvoirs de haut niveau (cabinet du premier ministre);
- prendre en considération les risques climatiques lors de l'élaboration des visions de long terme ou des stratégies de développement durable;
- développer un argumentaire économique fort pour investir dans l'adaptation par le biais d'un fonds horizontal dédié à l'adaptation;
- interventions des donneurs internationaux par le biais de mécanismes de soutien budgétaire et des stratégies d'aide-pays et d'aide conjointe.

Niveau sectoriel: déterminer les investissements stratégiques dans un nouveau contexte climatique

- évaluer les informations disponibles sur les impacts et les vulnérabilités des secteurs;
- sensibiliser les responsables de la planification sectorielles et leurs homologues des agences d'aide aux répercussions du changement climatique;
- faire évoluer les réglementations fondées sur le climat passé vers des réglementations plus souples, adaptées à l'évolution des scénarios climatiques;
- renforcer les capacités internes des ministères sectoriels et des agences d'aide pour évaluer les effets du changement climatique dans certains secteurs;
- améliorer l'information sur les coûts et les bénéfices des mesures d'adaptation pour que les décideurs puissent les prendre en compte dans leurs choix.

Niveau projet: impératif de résilience tout au long du cycle de vie du projet

- tester, comparer, concilier les divers outils d'évaluation des risques climatiques;
- améliorer la disponibilité et la fiabilité des projections climatiques ramenées à une échelle plus fine, et communiquer en toute transparence aux gestionnaires des projets les incertitudes associées aux diverses projections;
- évaluation systématique des effets et de l'efficacité des mesures d'adaptation mises en œuvre;
- renforcer les capacités et piloter des initiatives pouvant aider les gestionnaires à mieux prendre en compte les mesures d'adaptation dans leurs cadres de décision.

Niveau local: promouvoir une large mobilisation de l'ensemble des parties prenantes de la vie locale sur les enjeux vitaux de l'adaptation

- recueillir et diffuser des informations pour l'adaptation au changement climatique en tirant partie à la foie des connaissances scientifiques et de l'expérience acquise au niveau local;
- procurer les ressources humaines, financières et techniques et les services nécessaires pour promouvoir l'adaptation localement;
- offrir une protection sociale aux plus vulnérables;
- s'assurer d'un cadre administratif et institutionnel adéquat. Il faudra pour ce faire concevoir des mesures incitatives en faveur de certains comportements de gestion des risques, réexaminer ou réviser les politiques qui accroissent la vulnérabilité au changement climatique et renforcer les institutions nécessaires pour gérer la communication et les processus de décision.

Ainsi, les rapports de l'OCDE et de la Banque Mondiale proposent des cadrages théoriques et de l'adaptation au changement climatique appliqué aux politiques de développement et des pistes de mesures concrètes pour guider les décideurs dans leurs choix en contexte d'incertitude. Les analyses développées dans ces études s'accordent pour affirmer que les politiques de développement ne peuvent plus se concevoir indépendamment des mesures de mitigation du climat ou d'adaptation aux dommages résiduels. Le défi est considérable. Il s'agit de faire pénétrer la contrainte climatique au cœur des processus de décision du niveau national au niveau local, et de lever des capacités de financement de l'ordre de l'ensemble de l'aide au développement actuel pour garantir une adaptation réussie.