Les conséquences économiques du changement climatique



OCDE

Les conséquences économiques du changement climatique

OCDE
DES POLITIQUES MEILLEURES
POUR UNE VIE MEILLEURE

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les interprétations exprimées ne reflètent pas nécessairement les vues officielles des pays membres de l'OCDE.

Ce document et toute carte qu'il peut comprendre sont sans préjudice du statut de tout territoire, de la souveraineté s'exerçant sur ce dernier, du tracé des frontières et limites internationales, et du nom de tout territoire, ville ou région.

Merci de citer cet ouvrage comme suit :
OCDE (2016), *Les conséquences économiques du changement climatique*, Éditions OCDE, Paris.
http://dx.doi.org/10.1787/9789264261082-fr

ISBN 978-92-64-24863-2 (print)
ISBN 978-92-64-26108-2 (PDF)
ISBN 978-92-64-26111-2 (e-pub)

Les données statistiques concernant Israël sont fournies par et sous la responsabilité des autorités israéliennes compétentes. L'utilisation de ces données par l'OCDE est sans préjudice du statut des hauteurs du Golan, de Jérusalem-Est et des colonies de peuplement israéliennes en Cisjordanie aux termes du droit international.

Crédits photo : © "sh12 on your wall" par Upupa4me, 2012 (CC BY-SA 2.0 *https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/*).

Les corrigenda des publications de l'OCDE sont disponibles sur : *www.oecd.org/editions/corrigenda*.

© OCDE 2016

Vous êtes autorisés à copier, télécharger ou imprimer du contenu OCDE pour votre utilisation personnelle. Vous pouvez inclure des extraits des publications, des bases de données et produits multimédia de l'OCDE dans vos documents, présentations, blogs, sites Internet et matériel d'enseignement, sous réserve de faire mention de la source OCDE et du copyright. Les demandes pour usage public ou commercial ou de traduction devront être adressées à *rights@oecd.org*. Les demandes d'autorisation de photocopier une partie de ce contenu à des fins publiques ou commerciales peuvent être obtenues auprès du Copyright Clearance Center (CCC) *info@copyright.com* ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) *contact@cfcopies.com*.

Préface

À la veille de la Conférence des Parties (COP21) qui se tiendra fin 2015 à Paris, nos dirigeants sont confrontés à un dilemme fondamental : maîtriser les risques du changement climatique sous peine d'être incapables de juguler cette menace. Aujourd'hui, notre compréhension de l'échelle des risques posés par le changement climatique est beaucoup plus profonde et étayée par des éléments probants dûment vérifiés et universellement acceptés. Ce rapport, intitulé *Les conséquences économiques du changement climatique*, procède à une analyse détaillée des coûts de l'inaction des pouvoirs publics pour l'économie mondiale. Il se démarque des efforts déjà accomplis dans ce domaine par le fait qu'il s'appuie sur un cadre de modélisation économique plus abouti qui établit des liens entre les répercussions du changement climatique et l'activité économique régionale et sectorielle.

Tenter de comprendre ce que le changement climatique peut impliquer pour l'avenir de nos économies est une gageure. Il ne s'agit pas seulement d'aboutir à une estimation chiffrée du coût en termes de perte de produit intérieur brut (PIB) mondial. Nous devons parvenir à une analyse plus nuancée des conséquences du changement climatique sur l'activité économique régionale et sectorielle, comprendre comment ces effets se propagent à travers notre système économique et quels sont les risques de détérioration de la croissance économique à long terme. Les informations procurées par ce rapport seront précieuses pour aider les décideurs à gérer le risque significatif et grandissant de graves bouleversements climatiques.

Selon les simulations effectuées dans le cadre de cette étude, en l'absence de mesures supplémentaires visant à atténuer le changement climatique, l'effet négatif combiné sur le PIB mondial annuel pourrait être compris entre 1.0 % et 3.3 % d'ici 2060. Si la hausse des températures se poursuit pour atteindre 4° Celsius par rapport aux niveaux préindustriels en 2100, la perte de PIB pourrait se situer entre 2 % et 10 % à la fin du siècle par rapport à un scénario de référence « sans dommages ». Surtout, les conséquences nettes sur l'économie seraient négatives dans 23 des 25 régions modélisées dans l'analyse, et seraient particulièrement prononcées en Afrique et en Asie, où les économies régionales sont vulnérables à toute une série d'impacts climatiques.

Les résultats présentés dans ce rapport ne sont pas des prévisions de ce qui va se passer, ni une synthèse de tous les coûts sociaux du changement climatique. Il reste de nombreux éléments que nous ne pouvons pas quantifier, notamment en ce qui concerne les conséquences économiques du dépassement de points de basculement importants, dont les retombées sur l'économie pourraient être catastrophiques. Néanmoins, tout comme l'accumulation des risques avant la crise financière, l'incertitude ne doit pas être le prétexte à l'inaction. Ce rapport montre également que des politiques précoces et ambitieuses d'adaptation et d'atténuation pourraient réduire sensiblement ces risques.

L'OCDE continuera d'aider ses membres et pays partenaires à l'heure où les défis du changement climatique et l'impératif d'agir de façon plus radicale et déterminée se renforcent.



Angel Gurría
Secrétaire général de l'OCDE

Remerciements

Ce rapport a été préparé par Rob Dellink et Elisa Lanzi de la Direction de l'Environnement de l'OCDE. Matthias Kimmel (OCDE) a apporté d'importantes contributions à la rédaction, et Jean Chateau (OCDE) a participé à la construction du modèle ENV-Linkages. Kelly de Bruin (CERE, Suède) a dirigé les simulations basées sur le modèle AD-DICE. Francesco Bosello et Ramiro Parrado (CMCC, Italie) ont prodigué des conseils d'expert sur l'intégration des impacts du changement climatique dans les modèles économiques et fourni les informations qui ont servi à modéliser plusieurs conséquences du changement climatique, notamment en ce qui concerne la pêche, l'élévation du niveau des océans, les maladies et le tourisme. D'importantes contributions ayant trait à des éléments spécifiques de l'analyse ont été reçues de Yasuaki Hijioka (NIES, Japon), Yasushi Honda (Université de Tsukuba, Japon), Juan-Carlos Ciscar et Zoi Vrontisi (JRC-IPTS, UE), Hessel Winsemius (Deltares, Pays-Bas), Philip Ward (VU Amsterdam, Pays-Bas), Petr Havlík (IIASA, Autriche) et Ian Sue Wing (Université de Boston, États-Unis). Ces collaborateurs ne sont pas responsables du rapport final.

Le Comité des politiques d'environnement de l'OCDE (EPOC) était chargé de superviser l'élaboration du rapport. En outre, le Groupe de travail sur le climat, l'investissement et le développement (WPCID), le Groupe de travail n° 1 du Comité de politique économique (CPE-WP1) et les experts qui ont suivi le projet CIRCLE ont révisé les versions préliminaires.

Le projet a été géré par Shardul Agrawala, qui a également fourni un retour d'informations sur la modélisation et sur les versions antérieures. Marie-Jeanne Gaffard a apporté un soutien administratif et technique, et François Chantret s'est chargé de l'assistance statistique et technique. Janine Treves et Katherine Kraig-Ernandes ont accompagné le processus de publication du manuscrit final. Cette version définitive a également bénéficié des commentaires relatifs à une version antérieure de Nils-Axel Braathen, Simon Buckle, Anthony Cox, Guillaume Gruère, Ada Ignaciuk, Giuseppe Nicolletti, Andrew Prag, Simon Upton (OCDE), et de Juan-Carlos Ciscar (JRC-IPTS, Espagne), Sam Fankhauser (LSE-GRI, Royaume-Uni), Tom Hertel (Université de Purdue, États-Unis), Anil Markandya (BC3, Espagne), Paul Watkiss (Royaume-Uni) et d'un réviseur anonyme.

Table des matières

Acronymes et abréviations 11
Résumé 13

Chapitre 1. **Modélisation des conséquences économiques du changement climatique** 19
1.1. Introduction 20
1.2. Principales conséquences du changement climatique 23
1.3. Cadre d'analyse des impacts du changement climatique sur la croissance économique 28
1.4. Modélisation des impacts climatiques sectoriels et régionaux 35
Notes 46
Références 47

Chapitre 2. **Dommages du changement climatique imputables aux impacts considérés à l'horizon 2060** 53
2.1. Projection de référence sans dommages 54
2.2. Projections régionales et macroéconomiques centrales des dommages causés par certains effets du changement climatique 62
Notes 85
Références 85

Chapitre 3. **Vue d'ensemble du changement climatique** 89
3.1. Les coûts de l'inaction au-delà de 2060 90
3.2. Autres conséquences du changement climatique : mortalité, inondations et points de basculement 97
Notes 118
Références 118

Chapitre 4. **Avantages des politiques publiques** 125
4.1. Élaboration des politiques dans un contexte d'incertitude concernant l'intertemporalité 126
4.2. Arbitrages économiques entre adaptation, atténuation et dommages climatiques 128
4.3. Conséquences régionales et sectorielles des mesures d'atténuation 138
Notes 145
Références 146

Annexe I. **Description des outils de modélisation** 149

Tableaux

1.1. Catégories d'impacts climatiques considérés dans cette étude 24
1.2. Régions du modèle ENV-Linkages 31
1.3. Catégories d'impacts climatiques incluses dans le modèle ENV-Linkages 36
2.1. Croissance économique par région au cours de périodes sélectionnées 57
2.2. Influence des différentes hypothèses sur les impacts énergétiques 72
2.3. Niveaux de consommation par habitant et par région, pour différentes périodes 75
2.4. Impacts du changement climatique sur les rendements en Afrique subsaharienne 82
3.1. Dommages urbains potentiels résultant des inondations imputables au changement climatique, par région 105
3.2. Mortalité due au stress thermique selon les régions 108
3.3. Coûts économiques des décès prématurés imputables au stress thermique dans les pays de l'OCDE, calculés au moyen de la VVS 110
3.4. Consentement à payer pour la conservation des services écosystémiques, par région 112
4.1. Effets des différents taux d'actualisation 137
A1.1. Agrégats sectoriels du modèle ENV-Linkages 153
A1.2. Regroupements régionaux du modèle ENV-Linkages 153

Graphiques

1.1. Établissement d'un lien entre le modèle économique et les modèles du changement climatique 35
1.2. Impacts du changement climatique sur le rendement des cultures dans la projection centrale 38
2.1. Tendance démographique par région, projection de référence sans dommages 55
2.2. Évolution du PIB réel, projection de référence sans dommages 56
2.3. Composition sectorielle du PIB par région, projection de référence sans dommages 58
2.4. Production d'énergie primaire, projection de référence sans dommages 59
2.5. Évolution des émissions de gaz à effet de serre, projection de référence sans dommages 60
2.6. Indicateurs climatiques clés, projection de référence sans dommages 60
2.7. Augmentation moyenne de la température mondiale, projection de référence sans dommages 61
2.8. Dommages régionaux résultant des impacts climatiques considérés, projection centrale 63
2.9. Imputation des dommages aux impacts climatiques considérés, projection centrale 68
2.10. Dommages résultant des impacts climatiques considérés, projection centrale 70
2.11. Composition sectorielle des dommages résultant des impacts climatiques considérés, projection centrale 76
2.12. Sources des dommages résultant des impacts climatiques considérés par facteur de production, projection centrale 78

2.13. Dommages nationaux et mondiaux résultant des impacts climatiques considérés, projection centrale 79
2.14. Dommages agricoles régionaux dans les différents scénarios, sans fertilisation par le CO_2 81
2.15. Dommages mondiaux dans les différents scénarios d'impacts sur l'agriculture (effet fertilisant du CO_2 compris) 83
2.16. Fourchette des dommages agricoles régionaux dans les différents scénarios (effet fertilisant du CO_2 compris) 84
3.1. Dommages résultant des impacts climatiques considérés à très long terme, projection centrale 92
3.2. Dommages résultant des impacts climatiques considérés à très long terme, autre fonction de dommage 94
3.3. Dommages résultant des impacts climatiques considérés à très long terme, autres effets possibles sur la croissance 97
3.4. Effets du changement climatique sur la production animale en 2050 101
3.5. Dommages urbains résultant des inondations imputables au changement climatique, d'ici à 2080 104
3.6. Le changement climatique accentue la pression sur la biodiversité 111
3.7. Points de basculement régionaux 116
3.8. Taux de risque d'un événement catastrophique 118
4.1. Pourcentage des dommages résultant des impacts climatiques considérés neutralisés par l'adaptation 131
4.2. Dommages résultant des impacts climatiques considérés dans différents scénarios d'adaptation 132
4.3. Taux de réduction des émissions mondiales dans le scénario d'atténuation à moindre coût 133
4.4. Dommages résultant des impacts climatiques considérés dans différents scénarios d'atténuation 134
4.5. Composition des coûts résultant des impacts climatiques considérés dans différents scénarios d'adaptation et d'atténuation 135
4.6. Dommages résultant des impacts climatiques considérés dans le scénario d'atténuation à moindre coût 137
4.7. Hausses de température avec atténuation optimale, en fonction de différents taux d'actualisation 138
4.8. Dommages régionaux résultant des impacts climatiques considérés, avec et sans politique d'atténuation 140
4.9. Variations structurelles de l'économie mondiale dues aux dommages résultant des impacts climatiques considérés et aux politiques d'atténuation 143
A1.1. Structure de production d'un secteur générique dans le modèle ENV-Linkages 150

Suivez les publications de l'OCDE sur :




http://twitter.com/OECD_Pubs


http://www.facebook.com/OECDPublications


http://www.linkedin.com/groups/OECD-Publications-4645871


http://www.youtube.com/oecdilibrary


http://www.oecd.org/oecddirect/

Ce livre contient des...


Accédez aux fichiers Excel® à partir des livres imprimés !

En bas des tableaux ou graphiques de cet ouvrage, vous trouverez des *StatLinks*. Pour télécharger le fichier Excel® correspondant, il vous suffit de retranscrire dans votre navigateur Internet le lien commençant par : *http://dx.doi.org*, ou de cliquer sur le lien depuis la version PDF de l'ouvrage.

Acronymes et abréviations

CAP	Consentement à payer
CO_2	Dioxyde de carbone
ECS	Élasticité constante de substitution
EGC	Équilibre général calculable
GBP	Livre Sterling
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
Gt	Gigatonnes
MEI	Modèle d'évaluation intégré
NIES	National Institute for Environmental Studies
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
ONU	Organisation des Nations Unies
PIB	Produit intérieur brut
PPA	Parités de pouvoir d'achat
PPM	Parties par million
PTF	Productivité totale des facteurs
RCP	Profil représentatif d'évolution de concentration
SCE	Sensibilité climatique à l'équilibre
SRES	Rapport spécial du GIEC : Scénarios d'émissions
TPPP	Taux de préférence pur pour le présent
UE	Union européenne
USD	Dollars des États-Unis
VAV	Valeur d'une année de vie
VVS	Valeur d'une vie statistique

Résumé

Ce rapport présente une évaluation quantitative mondiale détaillée des conséquences économiques directes et indirectes du changement climatique (dommages climatiques) pour un certain nombre d'impacts : modifications du rendement des cultures, perte de terres et de capital due à l'élévation du niveau des océans, modification des prises de poissons, dommages matériels causés par les ouragans, modifications de la productivité du travail et des dépenses de santé imputables aux maladies et au stress thermique, modifications des flux touristiques et de la demande d'énergie pour le chauffage et le refroidissement. D'autres impacts importants du changement climatique sont étudiés hors du cadre de modélisation.

La plupart des études existantes des dommages climatiques s'appuient sur une représentation stylisée et agrégée de l'économie. Le présent rapport utilise un cadre de modélisation en équilibre général dynamique multisectoriel et multirégional détaillé, le modèle ENV-Linkages de l'OCDE, qui établit un lien entre les effets du changement climatique et certains aspects de l'activité économique tels que la productivité du travail, l'offre de facteurs de production, notamment de capital, et les modifications de la structure de la demande. Cette étude détaillée, qui sert à évaluer les dommages à l'horizon 2060, est complétée par une analyse plus simplifiée des dommages après 2060, effectuée au moyen du modèle d'évaluation intégrée AD-DICE.

Ce rapport ne présente qu'un scénario économique possible qui ne peut rendre compte de tous les impacts du changement climatique. Il ne s'agit pas de prévisions de ce qui va se passer, ni d'une synthèse de toutes les conséquences du changement climatique. Il apporte toutefois des informations instructives sur les effets des impacts considérés sur la composition du produit intérieur brut (PIB) dans la durée et sur la diffusion des conséquences sectorielles dans d'autres secteurs et régions.

La modélisation s'appuie sur les estimations existantes des répercussions d'un certain nombre d'impacts climatiques sur les moteurs de la croissance dans les ensembles régionaux du modèle au niveau macroéconomique et sectoriel. L'approche par la fonction de production permet une évaluation détaillée d'un sous-ensemble de répercussions directes et indirectes du changement climatique sur l'économie pour un certain nombre d'impacts climatiques. L'analyse considère qu'aucune mesure d'atténuation n'est prise en plus de celles déjà appliquées et que seulement les mesures d'adaptation autonome aux dommages, déterminé par la réaction du marché, sont mises en œuvre.

Les projections ne rendent pas compte de l'ensemble des incertitudes et des risques considérables liés au changement climatique qui pourraient impliquer des dommages bien plus importants (à plus longue échéance notamment), ou des conséquences économiques plus faibles que celles de la projection centrale. D'importantes incertitudes trouvent leur source dans les hypothèses concernant la croissance économique, la démographie, la

réponse du système climatique à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre (GES), les projections climatiques régionales et la valeur attribuée aux effets du changement climatique. D'importants risques d'évènements climatiques majeurs sont associés aux incertitudes concernant la réponse du système climatique à des hausses de température supérieures à 2°C, le dépassement de points de basculement irréversibles et les impacts non marchands du changement climatique. Parmi toutes ces sources d'incertitudes, la fourchette des conséquences pour le PIB indiquée ci-dessous prend uniquement en compte les incertitudes relatives à la réponse du système climatique à l'élévation des concentrations de GES.

Principaux résultats

- Les simulations du modèle ENV-Linkages de l'OCDE indiquent que les dommages marchands pour les impacts considérés dans l'analyse devraient progressivement augmenter au fil du temps, à un rythme plus rapide que la croissance de l'activité économique mondiale. **En l'absence de nouvelles mesures climatiques, les effets conjugués des différents impacts considérés sur la croissance annuelle du PIB mondial devraient s'intensifier pour atteindre 1.0 % à 3.3 % d'ici à 2060,** la projection centrale s'établissant à 2 %. Cette fourchette reflète l'incertitude concernant la sensibilité climatique à l'équilibre (SCE), qui est une mesure de la réaction du climat à un doublement de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère – la fourchette probable utilisée allant de 1.5°C à 4.5°C. Pour une fourchette plus large, allant de 1°C à 6°C, la perte de PIB pourrait se situer entre 0.6 % et 4.4 % en 2060.
- Si la hausse des températures se poursuit pour atteindre 4°C par rapport aux niveaux préindustriels en 2100, les projections AD-DICE indiquent que la perte de **PIB pourrait se situer entre 2 % et 10 % à la fin du siècle par rapport à un scénario de référence « sans dommage »** (fourchette probable de sensibilité climatique à l'équilibre). Si l'on en croit les projections expérimentales réalisées à l'aide du modèle AD-DICE, le maintien des émissions de gaz à effet de serre sur leur trajectoire actuelle d'ici 2060 condamnera le monde à subir des dommages économiques estimés entre 1 % à 6 % à la fin du siècle, même si les émissions étaient réduites à zéro en 2060. Cependant, les évaluations des impacts causés par des hausses de températures plus fortes sont beaucoup moins robustes ; les dommages pourraient aller jusqu'à 12 % en 2100 lorsque les non-linéarités dans la fonction de dommage sont importantes.

Parmi les impacts modélisés dans l'analyse, les modifications concernant le rendement des cultures et la productivité du travail ont les conséquences négatives les plus marquées, et se traduisent par une baisse annuelle du PIB mondial de 0.9 % et 0.8 % respectivement à l'horizon 2060 pour la projection centrale. Si l'on comptabilise l'effet fertilisant du CO_2, les dommages tombent à 0.6 % pour l'agriculture, les projections indiquant un effet particulièrement prononcé en Afrique (réduction de 1.5 % à 1.0 % des dommages à l'agriculture d'ici 2060 en Afrique subsaharienne).

Les dommages causés par l'élévation du niveau des océans deviennent aussi graduellement plus importants après le milieu du siècle. Les dommages dans les secteurs de l'énergie et du tourisme sont mineurs à l'échelle mondiale, car les effets positifs dans certaines régions compensent les dommages subis par d'autres. Les dommages d'origine climatique causés par les ouragans pourraient avoir des retombées importantes sur les communautés locales, mais les conséquences macroéconomiques projetées sont très faibles.

- **Les projections indiquent des conséquences négatives nettes sur l'économie dans 23 des 25 régions modélisées dans l'analyse. Elles sont particulièrement prononcées en Afrique et en Asie, où les économies régionales sont vulnérables à toute une série d'impacts climatiques, notamment au stress thermique et à la chute des rendements agricoles.** Les pertes de PIB projetées à l'horizon 2060 pour les impacts considérés dans l'analyse se situent entre 1.6 % et 5.2 % au Moyen-Orient et en Afrique du Nord, entre 1.7 % et 6.6 % en Asie du Sud et du Sud-Est (Inde comprise) et entre 1.9 % et 5.9 % en Afrique subsaharienne (chiffres agrégés sur la base des parités de pouvoir d'achat). Ici également, les projections régionales ne tiennent compte que des incertitudes liées à la sensibilité climatique à l'équilibre ; notons par ailleurs que les incertitudes sont plus importantes au niveau régional qu'au niveau mondial.
- **Les résultats du modèle indiquent que pour certains pays, en particulier ceux qui se situent à des latitudes plus élevées, les conséquences positives sur l'économie des impacts considérés dans l'analyse sont plus importantes que les dommages causés par le changement climatique, du moins jusqu'en 2060. Les gains économiques sont réalisés dans le domaine du tourisme, de l'énergie et de la santé.** L'évaluation générale montre aussi que les pays relativement moins affectés par le changement climatique bénéficient d'avantages commerciaux. Les projections ne tiennent pas compte cependant des effets négatifs potentiels de l'occurrence de points de basculement climatique et d'autres effets du changement climatique qui ne sont pas modélisés dans l'évaluation. Les effets produits au plan local pourraient également être très éloignés des moyennes nationales.
- **L'ampleur réelle des dommages régionaux dépendra en partie de la capacité des économies à s'adapter aux impacts climatiques en modifiant leurs technologies de production, leurs modes de consommation et la structure des échanges commerciaux internationaux.** Par exemple, les projections indiquent qu'en cas de réduction de la superficie de terre et du capital disponible sous l'effet de l'élévation du niveau de la mer, les terres et le capital seront redistribués entre les secteurs, ce qui aura des répercussions sur l'ensemble de l'économie. L'ampleur des effets indirects au niveau sectoriel et régional confirme qu'il est important de suivre une approche économique multisectorielle et multirégionale. Dans les pays plus lourdement touchés, notamment en Inde, il se produit aussi des effets d'interaction non négligeables et la perte de PIB totale est inférieure à la somme des pertes individuelles correspondant aux différents impacts, ce qui indique que lorsqu'ils s'attèlent à un ensemble d'impacts, les pays peuvent apporter des réponses plus appropriées que lorsqu'ils prennent en compte chaque impact individuellement.
- La modélisation appliquée dans la présente étude ne peut fournir qu'une image partielle des conséquences du changement climatique étant donné qu'elle ne permet pas de tenir compte des aspects non marchands du bien-être (décès prématurés, par exemple), ni des impacts sur lesquels il n'existe pas suffisamment de données.
  - **Les dommages urbains imputables aux inondations** sont très incertains à l'échelle mondiale, en partie parce qu'ils dépendent des projections des précipitations régionales et locales et des réponses comportementales, deux éléments hautement incertains. De plus, seuls les dommages potentiels en l'absence d'efforts d'adaptation ont pu être évalués. L'Inde et la Chine sont, de loin, les deux pays pour lesquels les projections de dommages urbains imputables aux inondations sont les plus élevées ; les

dommages liés aux inondations urbaines provoquées par le changement climatique apparaissent bien moins importants dans les pays de l'OCDE.

- Les régions qui enregistreront le nombre le plus élevé de d**écès prématurés imputables au stress thermique s**ont celles les plus peuplées (comme la Chine et l'Inde) ou dans lesquelles le vieillissement augmente le pourcentage de la population qui est vulnérable (comme les États-Unis et l'Union européenne).
- S'agissant de la **perte de services écosystémiques**, le chiffre projeté à l'horizon 2060 correspond à environ 1 % du PIB dans la plupart des pays à revenu élevé, en utilisant la méthode du consentement à payer pour protéger ces services.
- Bien que les seuils de températures associés au **déclenchement de phénomènes particuliers de grande ampleur**, incertains mais à fort impact demeurent incertains, d'une façon générale, leur probabilité d'occurrence augmente avec l'intensification du changement climatique, provoquant des répercussions graves et permanentes sur l'économie.

En tout état de cause, il est probable que les coûts de l'inaction présentés ici sous-estiment le coût total des impacts du changement climatique. Sans prétendre à l'exhaustivité, ce rapport propose aussi une réflexion qualitative sur plusieurs impacts climatiques importants qu'il n'a pas été possible de quantifier, notamment la réduction de la mortalité hivernale due aux froids extrêmes, la perturbation des infrastructures au niveau local sous l'effet d'événements météorologiques extrêmes, l'aggravation du stress hydrique et les incidences sur la sécurité (migrations et conflits, en particulier). Bien que pour certains de ces effets et dans certaines régions, les conséquences puissent être positives, les données réunies par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et d'autres instances indiquent d'autres risques importants d'événements climatiques majeurs associés à des conséquences négatives.

Principales conclusions

Compte tenu des pertes de PIB dans presque toutes les régions et des nombreuses autres conséquences importantes du changement climatique, exposées en détail dans ce rapport, l'action des pouvoirs publics est impérative. La mise en place, d'une part, de politiques ambitieuses d'atténuation visant à réduire les émissions à l'origine du changement climatique et, d'autre part, de politiques d'adaptation destinées à gérer au mieux les effets résiduels, devrait permettre d'éviter les conséquences les plus graves et de réduire substantiellement les répercussions économiques des dommages climatiques.

- Hormis les dommages marchands prévus, les responsables chargés de l'élaboration des politiques d'atténuation et d'adaptation doivent tenir compte des risques d'évènements climatiques majeurs non négligeables et des effets à long terme du changement climatique. En effet, la réduction des émissions produit une série d'avantages et minore les risques tandis que l'adaptation réduit les conséquences négatives des impacts climatiques qu'on ne peut plus éviter et aide les sociétés à agir pour préparer l'avenir. Par conséquent, l'action publique doit se fonder sur l'ensemble complet des dommages marchands et non marchands qui seront évités grâce aux réductions des émissions et ne pas simplement suivre le profil temporel des dommages marchands projetés dans l'exercice de modélisation.
- Les avantages des politiques d'adaptation induits par une réduction des dommages considérés pourraient représenter à eux seuls plus d'un point de pourcentage de PIB à la

fin du siècle, comme le montre l'analyse simplifiée réalisée à l'aide du modèle AD-DICE. Cette analyse montre aussi que si les obstacles à l'adaptation sont importants, et si les entreprises et les ménages ne parviennent pas du tout à s'adapter, les coûts du changement climatique pourraient même doubler.

- La mise en place précoce de mesures d'atténuation ambitieuses (destinées à minimiser les coûts climatiques totaux à long terme) peut aider les économies à diviser par deux les dommages au PIB d'ici à 2060 ; les effets économiques de la politique d'atténuation elle-même ne sont pas pris en compte dans les calculs. Elle peut aussi réduire le risque d'être condamné à subir les conséquences négatives à long terme du changement climatique. En dépit des possibilités offertes par les politiques d'atténuation pour limiter les impacts, les dommages imputables au changement climatique devraient rester néanmoins importants dans les régions vulnérables, notamment dans la plupart des pays d'Afrique et d'Asie.
- Les mesures d'atténuation non seulement réduisent le niveau attendu des dommages climatiques, mais elles peuvent aussi, si elles sont ambitieuses, considérablement atténuer les risques de dommages graves (d'après les simulations, la marge d'incertitudes tombe de 2-10 % à 1-3 % en 2100 pour les impacts climatiques considérés). En outre, la mise en place de politiques d'atténuation moins ambitieuses pendant les premières décennies induira des coûts plus faibles à court terme, mais des risques accrus à long terme (en valeur quantitative, ce résultat est fortement influencé par le choix du taux d'actualisation).
- Les politiques d'atténuation réduiront les impacts négatifs du changement climatique dans tous les secteurs de l'économie, mais le coût de ces politiques pour les différents secteurs ne sera pas proportionnel aux avantages attendus. Les dommages et les politiques d'atténuation tendent à modifier la structure de l'économie au profit des services. L'approche de modélisation économique détaillée est utilisé pour apporter un nouvel éclairage sur cet aspect, ici encore à l'horizon 2060.
  - Le **secteur de l'agriculture**, par exemple, en dépit de sa taille relativement petite, sera très fortement touché, directement et indirectement, par les dommages climatiques ; sachant qu'il s'agit d'un émetteur important, l'application de mesures d'atténuation strictes dans l'ensemble de l'économie pourrait entraîner des coûts élevés pour ce secteur.
  - S'agissant de la **production d'énergie et de l'industrie**, les dommages climatiques sont moins importants que les effets potentiels de l'application de politiques d'atténuation strictes dans l'ensemble de l'économie. Le renouvelable peut véritablement doper les activités de production en présence de politiques d'atténuation ambitieuses, mais globalement les effets négatifs sur les producteurs de combustibles fossiles dépassent ceux sur le secteur du renouvelable.
  - Les **services** devraient bénéficier des politiques d'atténuation car c'est un secteur relativement peu polluant, mais les dommages climatiques ont sur lui des effets négatifs. Toutefois, compte tenu de sa taille importante comparée à celle d'autres secteurs, la part relative du secteur des services dans le PIB total peut augmenter, c'est-à-dire qu'il se trouve relativement moins affecté que les autres secteurs.

Il serait opportun de mener d'autres recherches pour remédier aux principaux déficits de données sur les dommages d'origine climatique, en particulier sur les conséquences économiques régionales du dépassement de points de basculement importants, dont les

retombées sur l'économie pourraient être bien supérieures à celles qui ont été prises en compte dans la présente modélisation. Une méthodologie robuste est par ailleurs nécessaire pour intégrer dans l'évaluation les dommages non marchands et les co-avantages des politiques publiques.

Des politiques optimales en matière de changement climatique feront intervenir des mesures d'adaptation et d'atténuation, en tenant compte d'un certain niveau de dommages résiduels. Lorsque les responsables publics évaluent les coûts et les avantages des mesures d'atténuation, il leur faut ajouter une prime de risque pour rendre compte des risques de dépassement de points de basculement irréversibles et éviter les risques d'évènements climatiques majeurs qui impliqueraient des dommages encore plus graves. Enfin, certaines mesures publiques peuvent produire des co-avantages importants dont il est possible de bénéficier immédiatement et localement, notamment une amélioration de la qualité de l'air, et dont il conviendra de tenir compte dans le choix des mesures à prendre.

Chapitre 1

Modélisation des conséquences économiques du changement climatique

Ce chapitre commence par exposer brièvement les principales catégories d'impacts du changement climatique. Il présente ensuite la méthode utilisée pour déterminer l'influence des impacts du changement climatique sur la croissance économique. Il montre que le coût de l'inaction à l'horizon 2060 peut être évalué par une démarche faisant appel à une fonction de production pour établir un lien entre les impacts climatiques et certains moteurs de la croissance dans le modèle d'équilibre général dynamique de l'OCDE, ENV-Linkages, et indique comment et pourquoi cette démarche peut être complétée par une modélisation plus simplifiée de l'évaluation intégrée des impacts à long terme au moyen du modèle AD-DICE. Le chapitre se termine par une description de la façon dont la méthode de la fonction de production est employée pour modéliser les différents impacts dans le modèle ENV-Linkages.

1.1. Introduction

Un nombre croissant de données factuelles montrent que les changements intervenant au niveau du système climatique contribuent à toute une gamme d'impacts biophysiques et économiques dont l'économie se ressent déjà (voir, par exemple, les derniers rapports du Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat : GIEC 2013, 2014a, b ; voir également Dell et al., 2009, 2013). On prévoit de surcroît que les impacts futurs seront beaucoup plus importants (GIEC, 2014a). Une certaine part de changement climatique est déjà inéluctable mais, au-delà, de très nombreuses incertitudes aux conséquences incertaines demeurent, notamment par apport aux futures émissions de gaz à effet de serre et leurs conséquences sur le climat ou leurs impacts biophysiques et socio-économiques. On peut donc raisonnablement s'interroger sur l'intérêt pour les décideurs d'une analyse par modélisation des conséquences économiques du changement climatique à l'échelle mondiale. En effet, toutes ces incertitudes, conjuguées aux simplifications nécessaires à toute représentation de l'économie mondiale par modélisation, risquent d'hypothéquer tout résultat agrégé. C'est en réalité la direction de ces changements et les interactions qu'ils induisent dans le système économique, plutôt que leur ampleur, qui sont les plus instructives.

Le rapport vise à proposer, avec toutes les réserves nécessaires, un calcul du coût d'une absence d'intervention pour atténuer la trajectoire mondiale des émissions et, à l'inverse, des avantages liés à l'action. Les politiques visant à limiter les incidences du changement climatique auront des conséquences économiques mondiales, même si ces politiques ne sont pas appliquées partout pareillement. Comme son nom l'indique, le modèle ENV-Linkages est conçu pour mettre en lumière des liens, parmi eux les liens montrant comment les phénomènes physiques liés au changement climatique peuvent affecter les modes de production conduisant à des changements dans la composition de la croissance régionale et sectorielle. L'ampleur et les conséquences distributives de ces changements sont incertaines mais cette étude apporte des informations sur les tendances à long terme et les mécanismes d'interaction entre les impacts du changement climatique et l'activité économique. Ces informations devraient être utiles pour guider la gestion du risque de grave dérèglement climatique, dont le poids ne fait qu'augmenter.

Le rapport présente les résultats de la modélisation des évaluations des dommages du changement climatique sur la croissance économique pour les prochaines décennies. Il brosse le tableau d'un monde dans lequel une économie mondiale dynamique internalise les dommages du changement climatique. Dans ce processus, il continue d'offrir d'énormes gains de production mondiale et aussi, bien que façon inégale, de niveaux de vie. Ce que le modèle ne peut pas nous dire, c'est si ces niveaux de vie nouvellement acquis resteront fragiles ou auront, au contraire, un effet de levier sur l'économie, compte tenu du risque croissant d'événements climatiques extrêmes et coûteux et compte tenu du fait que les changements qui accompagnent ces processus de croissance sont, en général, non-linéaires.

Les impacts du changement climatique se feront sentir sur une période de temps très longue. Étant donné le degré élevé d'incertitude qui entache les projections de son évolution et de ses impacts, il n'est pas possible d'assujettir les coûts de l'inaction à une simple analyse coûts-avantages. Il importe, en fait, de baser toute comparaison des coûts et des avantages de différents trains de mesures sur une évaluation des risques prenant en compte le caractère intertemporel du problème. C'est pourquoi le rapport ne présente qu'une évaluation schématisée de certains des principaux avantages des politiques publiques, et notamment des mesures d'atténuation et d'adaptation.

De nombreux travaux ont été publiés sur les conséquences économiques du changement climatique (par exemple : Nordhaus, 1994, 2007, 2010 ; Tol, 2005 ; Stern, 2007 ; Agrawala et al., 2011) et sur la modélisation des coûts de l'action publique (voir notamment OCDE, 2012). Des études régionales approfondies ont également été consacrées aux conséquences du changement climatique, comme la Garnaut Review pour l'Australie (Garnaut, 2008, 2011), l'étude Risky Business pour les États-Unis (Risky Business Project, 2014), le projet Peseta pour l'Union européenne (Ciscar et al., 2011, 2014) et l'étude COIN pour l'Autriche (Steininger et al., 2015). Certaines études se sont aussi attachées à quantifier les coûts de l'inaction et les bénéfices de l'action publique dans le domaine du changement climatique. On notera en particulier le rapport Stern (2007), qui conclut que l'évolution du climat pourrait réduire le bien-être dans une proportion équivalente à une réduction *permanente* de la consommation par habitant comprise entre 5 % et 20 %. L'ampleur des conséquences des impacts climatiques sur l'économie continue, toutefois, de faire débat, comme le confirme le Groupe de travail II du GIEC (2014a), selon lequel les estimations de l'impact économique réalisées au cours des 20 dernières années « varient selon le degré de couverture des sous-ensembles de secteurs économiques, reposent sur un grand nombre d'hypothèses, dont beaucoup sont contestables, et ne tiennent souvent pas compte des changements catastrophiques, des points de basculement et de nombreux autres facteurs. Ces limitations étant reconnues, les estimations incomplètes des pertes économiques annuelles globales correspondant à un réchauffement supplémentaire d'environ 2°C varient entre 0.2 et 2.0 % du revenu (± 1 écart type par rapport à la moyenne) (éléments moyens, degré de cohérence moyen » (GIEC, 2014a).

La plupart de ces travaux partent d'une représentation simplifiée et agrégée de l'économie. Les études de modélisation types axées sur des projections des impacts du changement climatique dans le temps comprennent des modèles d'évaluation intégrée hautement agrégés, dans lesquels les dommages occasionnés par le changement climatique dans différents secteurs sont agrégés et utilisés pour réévaluer le bien-être en situation de changement climatique. Il est difficile de comparer de tels modèles, car chacun d'entre eux inclut généralement différentes catégories d'impact, mais il est évident que leurs projections des conséquences macroéconomiques globales d'impacts particuliers varient fortement (voir, par exemple, US Interagency Working Group, 2010, 2013). D'autres travaux, bien moins nombreux, font appel à des modèles d'équilibre général calculable (EGC) pour examiner les implications économiques des impacts du changement climatique dans des *secteurs* précis, souvent en utilisant une approche statique comparative (par exemple, Bosello et al., 2006, 2007). L'encadré 1.1 présente succinctement les principales différences entre ces types de modèles. Plus récemment, les modèles EGC ont aussi servi à étudier les conséquences des dérèglements climatiques sur l'ensemble de l'économie dans un environnement dynamique (voir Eboli et al., 2010 ; Bosello et al., 2012 ; Roson et Van der Mensbrugghe, 2012 ; Bosello et Parrado, 2014 ; Dellink et al., 2014).

Encadré 1.1. **Modèles d'équilibre général calculable et d'évaluation intégrée**

Les deux principaux types de modèles utilisés pour évaluer les conséquences économiques du changement climatique sont des modèles d'équilibre général calculable (EGC) et des modèles d'évaluation intégrée (MEI).

Les modèles EGC s'intéressent aux relations entre les différents acteurs économiques et contiennent une description complète du système économique couvrant de multiples secteurs : les ménages fournissent des facteurs de production (travail, capital, terre) et consomment des biens et services, tandis que les entreprises transforment les facteurs de production en biens et services, en employant des produits intermédiaires venus d'autres secteurs. Dans un modèle EGC multirégional, toutes les économies sont liées par les échanges internationaux. Pour évaluer les dommages causés par le changement climatique, la description détaillée de l'économie permet une représentation détaillée des incidences du changement climatique qui touchent avant tout les marchés, notamment la modification du rendement des cultures, des dépenses de santé, de la productivité du travail et de la demande énergétique.

Les MEI cherchent davantage à simuler les interactions entre les systèmes économiques et biophysiques, c'est-à-dire la façon dont l'activité économique exerce des pressions sur l'environnement, et celle dont les effets environnementaux affectent en retour l'économie. De nombreux MEI utilisés à l'appui de l'action publique (DICE, FUND et PAGE, notamment) sont fortement agrégés et ne contiennent qu'une description sommaire de l'économie. D'autres MEI sont plus détaillés dans la description du système biophysique, souvent au détriment des effets en retour de ce système sur l'économie. Le caractère plus simplifié des MEI les rend plus adaptés pour décrire une plus large gamme d'impacts du changement climatique de façon agrégée.

En principe, il n'existe pas de distinction claire entre les deux types de modèles : les modèles EGC améliorés tels que ENV-Linkages décrivent les émissions de l'activité économique dans le détail et intègrent les effets en retour des impacts climatiques sur le système économique, et sont de fait des MEI. De même, le module économique d'un MEI peut être élargi en un modèle EGC à part entière. Le degré de détail dont peuvent rendre compte les modèles EGC et MEI est limité par la puissance de calcul et, plus encore, par la nécessité d'éviter que la complexité du modèle le transforme en boîte noire.

La spécification des impacts du changement climatique dans les EGC et les MEI sera examinée à la section 1.3.

Sur la base de ces études récentes, le présent rapport utilise le modèle dynamique multisectoriel et multirégional EGC de l'OCDE, ENV-Linkages, pour analyser les conséquences économiques de différents impacts du changement climatique à l'horizon 2060. En utilisant un modèle économique détaillé, comprenant une représentation explicite des moteurs de l'activité économique, il est possible de relier les incidences du changement climatique à l'économie de façon beaucoup plus réaliste. L'analyse effectuée au moyen du modèle ENV-Linkages est complétée par une évaluation des conséquences du changement climatique après 2060 et par une analyse stylisée des avantages d'une action publique effectuée au moyen du modèle d'évaluation intégrée AD-DICE. Si la décomposition sectorielle et régionale du modèle EGC se prête de manière idéale à une étude détaillée des conséquences du changement climatique sur les différentes composantes de l'économie mondiale, et plus particulièrement des conséquences économiques plus larges qui se propagent dans toute l'économie, la structure d'optimisation du modèle d'évaluation

intégrée est mieux adaptée à l'étude des arbitrages à opérer au niveau de l'action publique et des répercussions à long terme. Les deux modèles utilisent le même scénario de référence des évolutions socioéconomiques (y compris celles de la population et du PIB), qui est basé, pour les pays membres de l'OCDE et les principaux pays émergents, sur le scénario de croissance globale à long terme de l'OCDE établi à l'horizon 2060 (OCDE, 2014a).

Le deuxième chapitre de ce rapport met l'accent sur les retombées de certains effets du changement climatique dans différents domaines de l'économie. Les catégories d'impacts examinées au chapitre 2 renvoient aux impacts considérés majeurs intéressant l'agriculture, les zones côtières, les phénomènes climatiques extrêmes, la santé, l'énergie et la demande de services touristiques. Pour la plupart des catégories, un certain nombre d'impacts économiques importants sont pris en compte dans la modélisation, tandis que les impacts non marchands sont examinés séparément au chapitre 3. Dans le cas d'autres impacts, notamment ceux qui concernent les services écosystémiques, le stress hydrique et les points de basculement, seules des observations ponctuelles sont présentées, car l'on ne dispose pas de données suffisamment robustes pour pouvoir étudier les dommages économiques.

Pour obtenir une indication de l'ampleur des effets, exprimée dans une unité de mesure largement connue des responsables de l'élaboration des politiques, les deux modèles rapportent ces impacts au produit intérieur brut (PIB). Cette méthode donne une mesure imparfaite des coûts économiques totaux du changement climatique, car elle ne tient pas compte des conséquences plus vastes sur le bien-être ou les coûts pour la société (qui peuvent être considérables). Elle permet néanmoins de comprendre les conséquences macroéconomiques (c'est-à-dire les effets économiques en retour) des impacts du changement climatique considérés ; la décomposition sectorielle du PIB peut mieux éclairer les variations intervenant dans les structures économiques sous l'effet des dommages associés au changement climatique. Le fait d'exprimer ces coûts en perte de PIB, qui est l'indicateur habituel de la croissance économique, aide en outre à faire comprendre l'importance du facteur climatique dans le cadre du processus de prise de décision économique habituel.

1.2. Principales conséquences du changement climatique

Le changement climatique aura des conséquences socio-économiques sur l'ensemble des grands secteurs économiques, comme l'agriculture, l'énergie ou les soins de santé, mais il entraînera aussi des modifications de l'offre et de la demande de biens et de services dans tous les secteurs de l'économie, bien qu'à des degrés divers. Les hausses de température, l'élévation du niveau de la mer et d'autres perturbations climatiques (modification des régimes de précipitations régionaux, cycle de l'eau, fréquence et intensité des événements météorologiques extrêmes) auront également des répercussions sur le mode de vie qui ne dépendent pas fondamentalement de l'activité économique ou ne sont pas liés à cette dernière, comme la sécurité humaine, la santé et le bien-être, la culture, les capacités des personnes et la qualité de l'environnement.

Le tableau 1.1 donne une description générale du choix d'impacts climatiques considérés dans ce rapport. Notons qu'il s'agit d'un sous-ensemble de tous les impacts du changement climatique, même dans les secteurs couverts. Ces catégories ne sont pas toutes totalement indépendantes et ne peuvent pas toujours être clairement séparées les unes des autres. Les phénomènes extrêmes, par exemple, non seulement ont un impact sur la santé de la population et causent des dommages au la terre et au capital, mais ils peuvent aussi

Tableau 1.1. **Catégories d'impacts climatiques considérés dans cette étude**

Agriculture	Modification du rendement des cultures (y compris la productivité des terres agricoles et le stress hydrique) Mortalité et morbidité des animaux d'élevage dues à l'exposition à la chaleur et au froid Modification de la productivité des pâturages et des terres de parcours Modification de la productivité de l'aquaculture Modification des prises de poissons	Modélisé Év. qualitative Év. indépendante Év. qualitative Modélisé
Zones côtières	Perte de terres et de capital due à l'élévation du niveau de la mer Impacts non marchands sur les zones côtières	Modélisé Év. qualitative
Phénomènes extrêmes	Mortalité, dommages causés à la terre et au capital par les ouragans Mortalité, dommages causés à la terre et au capital par les inondations	Modélisé Év. Indépendante
Santé	Mortalité due à l'exposition à la chaleur (y compris canicules) Morbidité due à l'exposition à la chaleur et au froid (y compris canicules) Mortalité et morbidité dues aux maladies infectieuses, cardio-vasculaires et respiratoires	Év. indépendante modélisé Modélisé
Demande d'énergie	Modification de la demande d'énergie à des fins de refroidissement et de chauffage	Modélisé
Demande de services touristiques	Modification des flux et des services touristiques	Modélisé
Écosystèmes	Perte d'écosystèmes et de biodiversité Modification des rendements des plantations forestières	Év. indépendante Év. qualitative
Stress hydrique	Modification de l'offre d'énergie Modification des quantités d'eau potable disponibles pour les utilisateurs finaux (y compris les ménages)	Év. qualitative Év. qualitative
Sécurité humaine	Troubles civils Migrations humaines	Év. qualitative Év. qualitative
Points de basculement	Événements perturbateurs de grande envergure	Év. indépendante

Note : « Modélisé » signifie que l'impact est capturé (au moins partiellement) par le cadre de modélisation principal ; « év. indépendante » fait référence à une évaluation quantitative à l'extérieur du cadre de modélisation principal ; et « év. qualitative » indique que seule une évaluation qualitative a été possible dans ce rapport.
Source : Compilation effectuée pour cette analyse.

inciter les résidents à s'adapter en migrant vers d'autres lieux ; ils peuvent en outre provoquer des traumatismes de longue durée chez les personnes directement ou indirectement touchées. L'agriculture est fortement tributaire d'écosystèmes opérationnels et de la disponibilité d'eau, tandis que les dommages subis par les zones côtières concernent, entre autres, les écosystèmes, les moyens de subsistance et l'agriculture. Pour éviter un double comptage, tous les impacts considérés dans cette étude ne sont affectés qu'à une seule catégorie, comme dans le tableau 1.1. Ce tableau indique également si ces impacts sont pris en compte dans la modélisation, s'ils entrent dans le cadre d'une évaluation quantitative indépendante ou s'ils font l'objet d'une réflexion qualitative.

Le Groupe de travail II du GIEC (GIEC, 2014a) décrit les impacts du changement climatique qui, selon les projections, devraient s'exercer sur l'économie, la société et l'environnement terrestre dans différents scénarios (y compris les trajectoires de concentration de gaz à effet de serre), en présentant, dans la mesure du possible, des informations sur le degré de vraisemblance, les faits probants et les consensus sur les conclusions ou sur les relations entre le changement climatique et les variables concernées. Le présent rapport n'entend pas résumer tous les impacts possibles. Sans prétendre à l'exhaustivité, les paragraphes suivants proposent quelques exemples d'incidences potentielles importantes du changement climatique relevant des catégories présentées au tableau 1.1. De nombreuses autres incidences ont été évaluées par le GIEC, mais il n'a pas été possible de les inclure dans le présent rapport.

En *agriculture*, le changement climatique aura des conséquences dans différents sous-secteurs, notamment les productions végétales, l'élevage, les pâturages et les terres de parcours, ainsi que l'aquaculture. Ce sont toutefois ses impacts (notamment l'évolution des températures et des régimes de précipitations à l'échelle régionale) sur la productivité des cultures qui ont été le plus étudiés ; il en ressort qu'à l'échelle mondiale, les conséquences d'une hausse moyenne à forte des températures seront essentiellement négatives (Rosenzweig et al., 2013). Au niveau régional, toutefois, les impacts seront très différents selon les régions puisqu'ils seront positifs pour certaines et négatifs pour d'autres. La modification de la pluviosité, des concentrations atmosphériques d'ozone et de dioxyde de carbone (CO_2), l'évolution de la prévalence des maladies et des ennemis des cultures, ainsi que les phénomènes extrêmes favorisés par le changement climatique, auront probablement aussi des effets sur les futures activités agricoles, dans certains cas positifs et dans d'autres négatifs. Selon le GIEC (2014a), il est possible de dire, avec un degré de confiance élevé, qu'un accroissement des concentrations de CO_2 dans l'atmosphère stimulera les rendements des cultures (mais aussi les adventices), tandis que l'augmentation des niveaux d'ozone aura probablement un effet préjudiciable. Le changement climatique pourrait en outre avoir des conséquences qui dépendront des pratiques agricoles, notamment en ce qui concerne la préservation des campagnes, la sécurité alimentaire et le maintien de la biodiversité. Il pourrait également se manifester au niveau des externalités négatives de l'activité agricole, comme la pollution des sols et de l'eau. Cette relation et son sens ne sont toutefois pas clairement établis (Ahlheim et Frör, 2003 ; OCDE, 2001). Le rapport de l'OCDE (2014b) étudie en détail les effets du changement climatique sur le secteur agricole en s'intéressant plus particulièrement au système hydrique. Dans le cas de la pêche, le changement climatique devrait avoir des conséquences négatives dans la plupart des pays en développement – en particulier dans les régions tropicales. Les pays développés situés à des latitudes plus septentrionales pourraient quant à eux bénéficier de retombées positives (GIEC, 2014b).

Les *zones côtières* ou les systèmes côtiers comprennent les écosystèmes naturels (plages, falaises, lagunes, etc.) et les systèmes humains (zones de peuplement, villes, ports, production alimentaire, etc.). Elles conjuguent des éléments côtiers et des écosystèmes particuliers avec le cadre bâti, les activités humaines et les institutions qui organisent ces activités (GIEC, 2014a). Différents facteurs associés au changement climatique peuvent agir sur ces systèmes. Au-delà des variations probables de la fréquence et de l'intensité des tempêtes (et des ondes de tempête), de l'intensification des précipitations, du réchauffement des températures et de l'acidification des océans, l'élévation du niveau de la mer pourrait être la plus importante cause des dommages subis par les zones côtières. Les auteurs du rapport du GIEC ainsi que d'autres rapports s'accordent largement à reconnaître que l'élévation du niveau de la mer peut avoir un effet négatif sur la fourniture de biens et services marchands et non marchands dans les zones côtières par suite de phénomènes tels que les ondes de tempête, la submersion, l'intrusion d'eau salée et l'érosion des côtes. Cette élévation du niveau de la mer touchera aussi bien les systèmes naturels que les systèmes humains.

Les *phénomènes météorologiques extrêmes* seront très probablement modifiés par le changement climatique, mais différemment selon les régions. Il est probable que l'activité cyclonique (ouragans, notamment) s'intensifie d'ici la fin du XXIe siècle, sous l'effet de la hausse de la température moyenne mondiale en surface (GIEC, 2014a). Selon le GIEC (2013), sous l'effet de la hausse des températures, les épisodes de précipitations extrêmes deviendront très probablement plus intenses et plus fréquents sur la plupart des régions continentales aux moyennes latitudes et dans les régions tropicales humides d'ici la fin du

siècle. De même, les inondations fluviales devraient également, selon les projections, devenir plus nombreuses et plus fortes dans la plupart des bassins fluviaux. La baisse des précipitations et l'augmentation de l'évaporation peuvent entraîner des sécheresses qui pourraient devenir « plus longues, plus fréquentes, ou les deux dans certaines régions durant certaines saisons » (GIEC, 2014a). Les coûts économiques de ces évolutions et des dommages qu'elles causeront, d'après les projections, sont plus élevés qu'ils ne le seraient en l'absence de changement climatique. Ces dommages affecteront directement les économies à travers leurs impacts sur le capital physique (usines, logements, voirie et ponts, machines et outillages, matériel informatique, mais aussi infrastructure énergétique), les terres (ressources naturelles, par exemple), et le travail (main-d'œuvre). Des retombées indirectes sont également à attendre : perturbations des approvisionnements en électricité et des transports ou encore rupture temporaire de pratiquement toute l'activité économique locale. L'accroissement de la fréquence et de l'intensité des phénomènes extrêmes par suite du changement climatique se traduit également par des décès prématurés et des blessures, ainsi que des déplacements forcés de population à titre temporaire ou permanent, au détriment du bien-être et de la qualité de vie. Sont aussi affectés les écosystèmes et les services qu'ils fournissent. On constate par ailleurs que les pays ne parviennent jamais à totalement recouvrer les coûts macroéconomiques des destructions et affichent un PIB et un taux de croissance économique toujours plus faibles (Hsiang et Jina, 2014), bien que cela puisse dépendre du degré de développement et du stock de capital physique et humain. Logiquement, cette assertion devrait valoir pour les destructions induites par le climat.

Les impacts du changement climatique sur la *santé* comprennent des effets directs et indirects : mortalité et morbidité liées à la chaleur et au froid, maladies à transmission hydrique, alimentaire et vectorielle ; décès et bien-être ; et modification de la pollution atmosphérique et des allergènes. Des risques existent aussi pour l'infrastructure de santé et la santé au travail (OMS, 2012 ; 2014). Il n'est pas facile d'évaluer les coûts économiques des impacts sanitaires, car ils comprennent des coûts marchands et non marchands. La morbidité, par exemple, entraîne des coûts marchands dus à l'effet de maladies sur la productivité du travail, et des coûts non marchands comme la douleur et la souffrance.

La *demande d'énergie* subira aussi les répercussions du changement climatique. L'évolution de la demande d'énergie prend essentiellement la forme d'une réduction des besoins de chauffage en hiver et d'une augmentation des besoins de refroidissement en été. Les approvisionnements énergétiques peuvent également être perturbés, par exemple par des pénuries d'eau, ce qui peut se répercuter sur la demande d'énergie. Les changements qui ressortent des projections concernant le système énergétique sont conditionnés par les hypothèses relatives aux politiques d'atténuation. L'AIE (2013) propose une étude détaillée des liens entre le changement climatique et le système énergétique.

S'agissant du *tourisme*, les effets du changement climatique se traduisent par une évolution des conditions climatiques locales qui réduisent ou accroissent l'attrait de différents sites touristiques. Par exemple, les skieurs sont moins sûrs de trouver de la neige dans les Alpes, et le coût élevé de la production de neige artificielle fait monter les prix du ski alpin. Il s'ensuit des transformations des flux touristiques nationaux et internationaux, dont les effets viennent s'ajouter à l'augmentation des dépenses.

Les *écosystèmes* terrestres et aquatiques fournissent une multitude de services précieux pour les êtres humains et d'autres espèces, notamment sur le plan de l'alimentation, des matières premières, du climat et de la qualité de l'air, des habitats pour les espèces et des

possibilités d'appréciation et d'inspiration esthétiques (TEEB, 2014). Le changement climatique devrait accroître le stress exercé sur les services écosystémiques – directement et indirectement, par le biais de ses interactions avec d'autres facteurs dont il pourra intensifier les effets, comme le développement humain. Le réchauffement, qui est un facteur climatique majeur, et l'évolution des phénomènes extrêmes réduiront probablement la biodiversité et l'abondance des espèces ou, le cas échéant, contraindront certaines espèces (animales et végétales) à migrer vers de plus hautes latitudes ou à des altitudes plus élevées où les températures sont plus tolérables pour accroître leurs chances de survie. Les migrations vers le nord d'espèces piscicoles et aviaires (et des espèces d'arbres en général) sont un exemple de déplacement provoqué par la hausse des températures dans l'hémisphère Nord. Les fortes précipitations pourraient aussi avoir un impact indirect sur les écosystèmes en accélérant l'érosion des zones forestières qui sont déjà soumises à des pressions, par exemple par suite de récents abattages (EPA, 2015). La modification de l'offre de services écosystémiques et de la qualité de ces services affectera également le fonctionnement des secteurs économiques, et notamment les secteurs agricole, forestier et halieutique.

Le changement climatique devrait, d'après les projections, avoir un impact sur les *ressources en eau douce* qui sera positif ou négatif selon, essentiellement, la latitude géographique. Si les projections des changements climatiques régionaux des modèles de circulation générale du système climatique varient sensiblement, notamment en ce qui concerne les précipitations, il semble que de nombreuses régions humides situées à des latitudes moyennes et élevées connaîtront probablement un accroissement des volumes d'eau disponibles. Les nappes souterraines constituent le principal réservoir d'eau douce et sont relativement mieux protégées du changement climatique. Cependant, la recharge des nappes devrait être plus lente dans certains pays et la montée du niveau de la mer pourrait accroître la salinité de l'eau souterraine. De nombreux pays situés à des latitudes moyennes et en zone subtropicale sèche pourraient enregistrer une diminution de leurs ressources en eau et une augmentation du nombre d'épisodes de sécheresses prolongées, même si les incertitudes concernant les disponibilités d'eau au plan régional sont très importantes. Des baisses saisonnières ou de courte durée des quantités d'eau disponibles, imputables à la variabilité accrue des débits des cours d'eau (due essentiellement à l'accroissement de la variabilité des chutes de pluie) et à la diminution des quantités d'eau stockées dans la glace et dans la neige, pourraient néanmoins être observées dans des régions qui, selon les projections, disposeront de ressources en eau plus abondantes. Les effets préjudiciables du changement climatique sur la qualité de l'eau, comme les toxines produites par les algues, pourraient aussi contribuer à réduire les volumes d'eau douce disponibles (OCDE, 2012, 2013 ; GIEC, 2014a). Ces impacts s'exerceront, notamment, sur les utilisateurs finaux en réduisant les quantités d'eau potable disponibles, et sur les entreprises industrielles et commerciales en limitant les ressources en eau pouvant être consacrées à l'irrigation et la production d'énergie.

Selon le GIEC (2014a), il existe des indications très probantes que le changement climatique intensifiera des facteurs de stress ayant un impact négatif sur la *sécurité humaine*, qui peut être définie comme une situation dans laquelle le noyau vital des vies humaines est protégé et où les individus ont la liberté et la capacité de vivre dans la dignité (GIEC, 2014a). Les migrations forcées et l'incidence de troubles civils sont deux facteurs sources de stress majeurs pour la sécurité qui ont fait l'objet de nombreuses études et qui, de l'avis de beaucoup, seront amplifiés par le changement climatique. Les preuves d'une relation de cause à effet directe entre le changement climatique et ces facteurs spécifiques sont toutefois encore limitées et l'existence de cette relation est, elle-même, contestée par certains.

Au-delà des évolutions, décrites plus haut, qui se produisent dans un certain nombre de secteurs et de régions, il existe un risque de perturbations à grande échelle causées par le changement climatique (dits « phénomènes particuliers de grande ampleur »). Ces événements, qui font franchir un *point de basculement* (éléments de basculement), peuvent survenir lorsque de légères modifications du climat déclenchent un impact disproportionné et posent donc un risque systémique. Les modèles ne permettent pas d'évaluer facilement les implications des phénomènes climatiques d'envergure, tels que l'effondrement de la circulation thermohaline dans l'Atlantique Nord (arrêt du Gulf Stream) ou les chutes brutales de morceaux de la calotte glaciaire de l'Antarctique Ouest. S'il est peu probable que la majorité des phénomènes particuliers de grande ampleur se produiront au XXIe siècle (GIEC, 2013), à l'exception de la disparition partielle de la banquise arctique, les risques posé par la possibilité d'une élévation importante et irréversible du niveau de la mer par suite de la fonte de la calotte glaciaire « augmentent d'une manière disproportionnée avec une hausse supplémentaire de la température globale moyenne de 1°C à 2°C, et deviennent élevés au-dessus de 3°C » (GIEC, 2014a). Ces risques pourraient avoir de très graves conséquences pour l'économie mondiale, et leur seuil de déclenchement pourrait être franchi, mais les modifications du système climatique qui en sont responsables sont mal comprises et il est, de facto, impossible d'établir des projections robustes de leurs conséquences économiques.

En dépit des éléments d'information, de plus en plus nombreux, confirmant que les phénomènes particuliers de grande ampleur et d'autres impacts climatiques sont associés à des risques importants d'événements climatiques majeurs, ces risques sont entachés jusqu'ici de différentes incertitudes et en grande partie indépendants, et ils ont peu de chance de se concrétiser. Il est plus probable que certains d'entre eux se confirmeront et d'autres non. Or, lorsqu'il existe entre ces risques une corrélation positive (ce qui est le cas s'agissant de la hausse des températures mondiales), ils pourraient bien se combiner ce qui modifierait leur probabilité.

Ces catégories d'impacts, décrites dans le tableau 1.1, sont utilisées dans tout le rapport pour décrire la méthodologie et les résultats de l'analyse. Comme on le verra à la section 1.4, plusieurs de ces impacts ont été intégrés dans le modèle ENV-Linkages dans le but d'estimer les coûts de l'inaction dans le domaine climatique à l'horizon 2060. Cela ne signifie pas que les autres impacts n'ont pas de conséquences économiques ; leur omission du modèle est simplement due au fait que les données disponibles sont insuffisantes, ou encore qu'ils ont essentiellement des conséquences non marchandes qui ne peuvent être intégrées directement dans un cadre de modélisation économique. Ces impacts sont examinés au chapitre 3.

1.3. Cadre d'analyse des impacts du changement climatique sur la croissance économique

1.3.1. Un cadre multi-modèles

La procédure suivie dans un cadre type d'évaluation des dommages climatiques consiste à établir une relation entre les activités économiques et les émissions de gaz à effet de serre (GES), puis à évaluer la manière dont les augmentations anthropiques des concentrations atmosphériques de GES provoquent des changements au niveau des variables climatiques, comme les régimes de températures et de précipitations régionaux et mondiaux. Ces modifications climatiques ont, à leur tour, des impacts physiques et

biogéochimiques qui se répercutent sur la productivité de différents secteurs des économies régionales dans lesquelles ces impacts se manifestent et, à terme, provoquent des pertes économiques.

Cette démarche regroupe des aspects de tout ou partie des composantes suivantes : les déterminants du développement socioéconomique, les émissions causées par la croissance économique, le système atmosphère-océan-climat, les écosystèmes, les impacts socioéconomiques, les politiques d'atténuation et d'adaptation et les réactions économiques correspondantes, différents types de modèles privilégiant différents liens (Parsons et Fisher-Vanden, 1997).

Le présent rapport combine deux modèles en un cadre complémentaire unique de manière à prendre en compte le plus d'aspects possible. Un modèle d'équilibre général calculable sectoriel et régional est employé lorsque cela est possible, et l'analyse est associée à un modèle d'évaluation intégrée de vaste portée lorsque cela est nécessaire. Si le modèle EGC est idéal pour étudier les coûts marchands de l'inaction (ou les avantages de l'action) pour l'économie et pour les différents secteurs et régions au cours des prochaines décennies (jusqu'à 2060 dans le rapport), le modèle d'évaluation intégrée permet d'étudier les conséquences à long terme du changement climatique et les scénarios optimaux du point de vue de l'action publique. Étant donné son niveau d'agrégation, ce cadre de modélisation ne permet pas d'évaluer les conséquences du changement climatique au niveau infranational et local même si, pour les impacts considérés dans cette analyse (événements extrêmes par exemple), les conséquences locales dépassent de très loin les conséquences nationales et mondiales. En outre, comme dans les modèles EGC et MEI, les représentations classiques des agents économiques (ménages et entreprises) risquent d'être inappropriées en cas de choc très important et discontinu, non seulement à l'échelle locale, mais aussi en termes macroéconomiques.

Les modèles d'évaluation intégrée (MEI) de grande envergure, en particulier les modèles établis sur la base des modèles DICE et RICE de Nordhaus (Nordhaus et Boyer, 2000 ; Nordhaus, 2010, 2012 ; de Bruin et al., 2009a, b ; Bosello et al., 2010), sont souvent utilisés pour évaluer les interactions entre l'activité économique et le changement climatique. Ils sont construits de manière à inclure une représentation stylisée d'autant de composantes que possible d'un cadre standard afin d'évaluer les coûts économiques du changement climatique. Ils sont basés sur des fonctions de dommage agrégées, calibrées pour correspondre au scénario de référence économique retenu comme hypothèse et utilisé pour soustraire les coûts globaux du changement climatique d'un indicateur économique approprié, comme le PIB. Les modèles d'évaluation intégrée sont généralement basés sur un cadre prédictif, qui peut servir à étudier les arbitrages entre, d'une part, la possibilité d'ajuster les niveaux d'émission et, d'autre part, la croissance économique en prévision des pertes économiques dues aux impacts du changement climatique futur, ainsi que les solutions envisageables pour réduire les dommages climatiques par des mesures d'adaptation.

Cependant, les effets du changement climatique ne s'exercent pas de manière uniforme sur les différentes activités économiques, et les récents efforts de modélisation ont tenté de prendre en compte cet aspect de la question. L'une des grandes difficultés consiste à saisir de manière adéquate l'hétérogénéité des impacts du changement climatique, leur localisation géographique et les réponses aux modifications des variables climatiques. Il faut cependant prendre aussi en compte la façon dont la nature et l'ampleur des impacts sur les systèmes

naturels et humains varient selon les régions, ainsi que les chocs qu'ils entraînent par le biais de différentes variables économiques, qui touchent certaines activités ou certains secteurs plus durement que d'autres (Sue Wing et Lanzi, 2014).

Pour remédier à ce problème, une étude récente s'est efforcée d'intégrer dans des modèles économiques décomposés par secteurs des informations tirées de modèles climatiques et d'études empiriques sur les dommages climatiques. Les modèles essentiellement utilisés pour ce type d'évaluation sont des modèles EGC, qui décrivent les régions et les secteurs économiques sous forme de flux commerciaux et d'activités productives. Ces modèles ont une structure régionale et sectorielle plus détaillée que les MEI, qui permet de mieux relier les impacts climatiques aux différents secteurs économiques. Cependant, l'inclusion des impacts non marchands du changement climatique est loin d'être évidente dans les modèles EGC : pour cette raison, ces modèles prennent généralement en compte un sous-ensemble d'impacts plus réduit que certains MEI détaillés – et un ensemble encore plus réduit des travaux publiés sur les impacts en général. Ces modèles ont aussi l'inconvénient de compliquer les calculs, car ils recalculent un équilibre économique à chaque étape. S'ils sont souvent dynamiques, ces modèles ne reposent pas, dans la plupart des cas, sur une structure prédictive. Ils ne permettent donc pas de déterminer un niveau d'atténuation optimal. Ils sont aussi généralement utilisés pour procéder à des analyses à plus court terme. Alors que les MEI peuvent produire des projections jusqu'à la fin du XXIe siècle et au-delà, les modèles EGC couvrent des périodes qui vont généralement jusqu'au milieu du siècle dans le cas des modèles relativement détaillés et jusqu'à la fin du siècle pour les modèles plus globaux. La durée plus limitée des périodes couvertes tient en partie au fait qu'il est difficile d'obtenir des informations fiables sur les modifications attendues de la production et la demande sectorielles et sur les autres tendances socioéconomiques, autant d'informations nécessaires pour calibrer les modèles.

Ces deux approches de modélisation présentent chacune des avantages et des inconvénients. Il est possible de surmonter ces inconvénients en créant un MEI décomposé par secteur, mais cela présente des difficultés sur le plan des calculs et signifie généralement que certains détails des caractéristiques sectorielles et régionales sont éliminés. On peut aussi, comme c'est le cas dans ce rapport, regrouper les deux approches pour les utiliser en complémentarité. En calant les deux types de modèles sur le même scénario de référence économique et en alignant les effets climatiques, il est possible de les utiliser comme des évaluations complémentaires pour étudier des aspects différents des mêmes évolutions. Toutefois, des différences persistent entre les deux modèles. En particulier, la représentation stylisée de l'économie et des dommages causés par le changement climatique obtenue avec AD-DICE ne peut pas entièrement reproduire le comportement sectoriel et régional qui sous-tend l'approche plus complexe du modèle ENV-Linkages.

Le présent rapport regroupe l'analyse des dommages du changement climatique au niveau des régions et des secteurs au moyen du modèle ENV-Linkages mis au point par la Direction de l'environnement de l'OCDE (Chateau et al., 2013) et une analyse des conséquences à long terme et de l'action publique réalisée au moyen du modèle AD-DICE (de Bruin et al. 2009a,b ; Agrawala et al., 2011). Les dommages causés par le changement climatique sont comparés aux projections du scénario de référence « sans dommages », qui reflète l'évolution des moteurs socioéconomiques de la croissance économique (voir la section 2.1) ; cette évolution ne tient pas compte des perturbations à court terme, ni des cycles économiques.

Le modèle ENV-Linkages est un modèle dynamique d'équilibre général calculable (EGC) qui décrit les interactions entre les activités économiques des différents secteurs et régions. La version utilisée aux fins de la présente analyse comprend 35 secteurs économiques (voir le tableau A1.1 de l'annexe) et 25 régions (indiquées dans le tableau 1.2), prend en compte les flux commerciaux bilatéraux et incorpore une description complexe de l'accumulation de capital faisant appel aux générations de capital, selon laquelle les progrès technologiques ne se propagent que lentement pour avoir un effet sur les stocks de capitaux existants. Le modèle établit également un lien entre l'activité économique et les pressions environnementales, en particulier les émissions de GES. Dans le modèle ENV-Linkages, les activités économiques sectorielles et régionales et les émissions de GES sont projetées à un horizon à moyen et long termes, jusqu'à 2060, sur la base de déterminants socioéconomiques comme les évolutions démographiques, la croissance économique et le développement des secteurs économiques (voir le chapitre 2).

Tableau 1.2. **Régions du modèle ENV-Linkages**

Ensembles régionaux du modèle	Pays et régions inclus dans le modèle ENV-Linkages
OCDE Amérique	Canada Chili Mexique États-Unis
OCDE Europe	Quatre grands UE (Allemagne, France, Italie, Royaume-Uni) Autres UE OCDE (autres pays de l'UE membres de l'OCDE) Autres OCDE (Islande, Norvège, Suisse, Turquie, Israël)
OCDE Pacifique	Australie et Nouvelle-Zélande Corée Japon
Reste de l'Europe et de l'Asie	Chine UE non-OCDE (pays de l'UE non membres de l'OCDE) Russie Région caspienne Autre Europe (pays européens non membres de l'OCDE et non membres de l'UE)
Amérique latine	Brésil Autre Amérique latine (autres pays d'Amérique latine)
Moyen-Orient et Afrique du Nord	Moyen-Orient Afrique du Nord
Asie du Sud et du Sud-Est	ANASE 9 (autres pays de l'ANASE) Inde Indonésie Autre Asie (autres pays en développement d'Asie)
Afrique subsaharienne	Afrique du Sud Autre Afrique (autres pays d'Afrique)

Source : Modèle ENV-Linkages.

Le modèle AD-DICE est basé sur le modèle d'évaluation intégrée DICE (Nordhaus, 1994, 2012), mais il est élargi pour inclure une représentation explicite de l'adaptation au changement climatique. La production économique génère des émissions de GES, mais le dioxyde de carbone industriel (CO_2) est le seul GES endogène. Les émissions accroissent le stock de CO_2 dans l'atmosphère et entraînent un changement des conditions climatiques, qui est représenté dans le modèle par une modification des températures atmosphériques par rapport aux niveaux de l'ère préindustrielle (1900). Les conséquences économiques du changement climatique (dommages climatiques), telles que mesurées par la variation du PIB, sont calculées en fonction des modifications des températures. Les dommages climatiques peuvent être réduits par des investissements dans des mesures d'atténuation

qui feront baisser les émissions de CO_2, ou par des ajustements de l'économie (c'est-à-dire des mesures d'adaptation). Le modèle est basé sur un cadre d'optimisation intertemporelle qui peut servir à trouver l'équilibre optimal entre les dépenses d'équipement, les investissements d'atténuation, les investissements d'adaptation et les coûts d'adaptation. La couverture du modèle est mondiale. AD-DICE et son cousin AD-RICE ont également été utilisés dans des études antérieures de l'OCDE, notamment par Agrawala et al. (2011), pour éclairer la dynamique à plus long terme des interactions entre le climat et l'économie, ainsi que la relation entre les politiques d'atténuation et d'adaptation. De plus amples détails sur ces deux modèles sont présentés dans l'annexe.

Pour accroître la comparabilité des deux modèles, ces derniers ont été calibrés en fonction du même scénario de référence économique dont on trouvera une brève description à la section 2.1. Dans le cas des pays membres de l'OCDE et des principaux pays émergents, cette base est le scénario de croissance globale à long terme de l'OCDE à l'horizon 2060 (OCDE, 2014a) ; le modèle ENV-Growth de l'OCDE a été utilisé pour les autres pays. Au-delà de 2060, AD-DICE a été calibré sur la base des taux de croissance du scénario de politiques inchangées du modèle DICE. La trajectoire des émissions dans les deux modèles a également été harmonisée de manière à accroître la comparabilité des résultats sur les impacts du changement climatique et les effets de l'action publique.

De plus, la fonction de dommage du modèle AD-DICE a été recalibrée en fonction des projections des dommages évalués au moyen du modèle ENV-Linkages à l'horizon 2060. Pour être précis, les paramètres des dommages climatiques et de l'adaptation ont été recalibrés à l'aide de données sectorielles sur les dommages tirées d'ENV-Linkages. Pour les évolutions à plus long terme, les paramètres de la fonction de dommage suivent la spécification originale du modèle DICE, ce qui veut dire qu'à très longue échéance, la fonction de dommage reproduit le modèle original DICE.

Malgré les différences qui demeurent entre les deux modèles, les conjuguer permet de présenter, dans ce rapport, des résultats sur différents aspects des conséquences économiques du changement climatique. En raison de son caractère simplifié, le modèle AD-DICE est mieux adapté à une analyse exploratoire basée sur des scénarios. L'essentiel de l'analyse vise toutefois les résultats sectoriels et régionaux produits par le modèle ENV-Linkages au moyen d'une fonction de production qui met en rapport, de manière aussi détaillée que possible, les impacts climatiques possibles considérés dans cette analyse avec la fonction de production sur laquelle repose la structure du modèle.

1.3.2. La méthode de la fonction de production

L'une des principales difficultés de la modélisation du lien entre les effets du changement climatique et les activités économiques consiste à prendre en compte de manière adéquate l'hétérogénéité des impacts du changement climatique. Ces derniers n'ont pas le même aspect ni la même intensité selon les régions et provoquent des chocs par le biais de différentes variables économiques qui touchent plus gravement certaines activités et certains secteurs que d'autres.

Il est possible d'étudier ce système complexe de facteurs économiques en faisant le lien entre chaque impact climatique et différentes variables de la fonction de production représentant l'activité d'une industrie ou d'un groupe industries particuliers dans la structure de base du modèle. Le cadre général de l'analyse est présenté dans Sue Wing et Fisher-Vanden (2013) et une description générale des applications des modèles figure dans

Sue Wing et Lanzi (2014). Dans une fonction de production, les biens sont produits au moyen d'intrants distincts (par exemple le travail et le capital), de biens intermédiaires et de ressources primaires.

En modélisant les impacts du changement climatique au moyen d'une fonction de production, il est possible d'obtenir, comme avec les modèles d'évaluation intégrée, le coût économique total des différents impacts climatiques considérés sur le PIB. Ces coûts globaux rapportés au PIB sont un indicateur de l'ampleur de l'impact du changement climatique sur la croissance économique future ; puisque, dans ce modèle, les dommages peuvent également toucher les stocks de capital, leur effet direct potentiel sur le taux de croissance de l'économie est pris en compte. Contrairement aux modèles d'évaluation intégrée (MEI) dans lesquels les dommages engendrés par le changement climatique sont soustraits globalement du PIB, la méthode de la fonction de production permet d'expliquer comment la composition du PIB se modifie dans le temps par suite de l'évolution du climat : quels sont les secteurs qui seront les plus touchés (pour les impacts considérés) et quelles variations des facteurs de production contribueront le plus aux variations du PIB.

Les impacts climatiques peuvent faire sentir directement leurs effets sur l'utilisation de travail, de capital, d'intrants intermédiaires et de ressources dans les secteurs[1]. Ils auront toutefois aussi des répercussions sur la productivité des facteurs de production. Les chocs climatiques préjudiciables à l'économie agissent donc de la même manière que des rétrogressions technologiques et exigent l'emploi de plus grandes quantités d'intrants pour obtenir un niveau de production donné.

L'établissement de liens explicites entre les impacts climatiques et les variables économiques sectorielles fonctionne bien pour les impacts qui s'exercent directement sur les marchés de biens et services marchands. S'agissant des impacts non marchands, il n'existe pas de lien direct avec une partie de la fonction de production, et les dommages doivent être évalués séparément. En principe, la fonction d'utilité pourrait être utilisée pour incorporer les dommages marchands et non marchands dans un cadre quantitatif, mais la définition d'une telle fonction est loin d'être évidente et devra faire l'objet de nouveaux travaux (on trouvera des détails au chapitre 3). C'est pourquoi certains des dommages non marchands sont examinés individuellement dans le chapitre 3 du présent rapport.

La modélisation des impacts climatiques par la méthode de la fonction de production dépend dans une très large mesure des données empiriques disponibles, mais aussi des possibilités d'inclure ces informations dans le cadre de modélisation. Les études empiriques qui quantifient les effets du changement climatique sur l'économie sont nombreuses, mais leur exhaustivité varie en fonction de leur couverture géographique et des impacts qu'elles prennent en compte (Agrawala et Fankhauser, 2008 ; OCDE, 2015). Par exemple, si de très nombreuses études traitent des dommages climatiques dans le domaine agricole, les études empiriques consacrées à la dépendance de la production d'énergie vis-à-vis de la disponibilité de ressources en eau et les effets du changement climatique sur cette dépendance sont encore limitées et ne couvrent qu'un petit nombre de régions (AIE, 2015).

La disponibilité de données empiriques influence également les décisions concernant la manière de modéliser chaque type d'impact (Sue Wing et Lanzi, 2014) dans l'environnement de l'EGC. Par exemple, les modifications du rendement des cultures dues au changement climatique peuvent être modélisées sous la forme d'un choc uniforme

s'exerçant sur toutes les cultures ou, lorsqu'on dispose de plus d'informations, de chocs différents selon les cultures et les régions. De même, les effets de l'élévation du niveau de la mer sur les zones côtières peuvent être modélisés dans l'EGC sous la forme d'un choc unique sur la productivité de tous les secteurs ou sous celle d'une réduction des superficies disponibles associée à une augmentation des investissements non productifs dans des mesures de protection dans les secteurs exposés.

L'intégration des dommages climatiques dans les modèles EGC signifie également qu'un certain niveau d'adaptation autonome aux dommages, déterminé par la réaction du marché, est modélisé. Dans les modèles comportant des décompositions sectorielles et dotés d'une structure de production et d'échanges complexe, une modification de la productivité d'un intrant particulier déclenche une réaction de substitution de la part des producteurs, qui a pour effet de modifier l'utilisation des différents intrants. La substitution est une puissante forme d'adaptation par le marché lorsque le niveau économique auquel les impacts se manifestent est atteint. L'introduction de l'adaptation par le marché dans le modèle signifie également que les estimations des coûts finaux des impacts du changement climatique devraient, en principe, être inférieures (ou supérieures) aux estimations des coûts obtenues lorsque les mesures d'adaptation ne sont pas prises en considération (ou sont jugés optimales), comme c'est souvent le cas dans les MEI. Cette caractéristique permet également aux concepteurs des modèles d'examiner à la fois les effets directs du changement climatique et ses effets indirects, notamment ceux qui font suite aux impacts commerciaux.

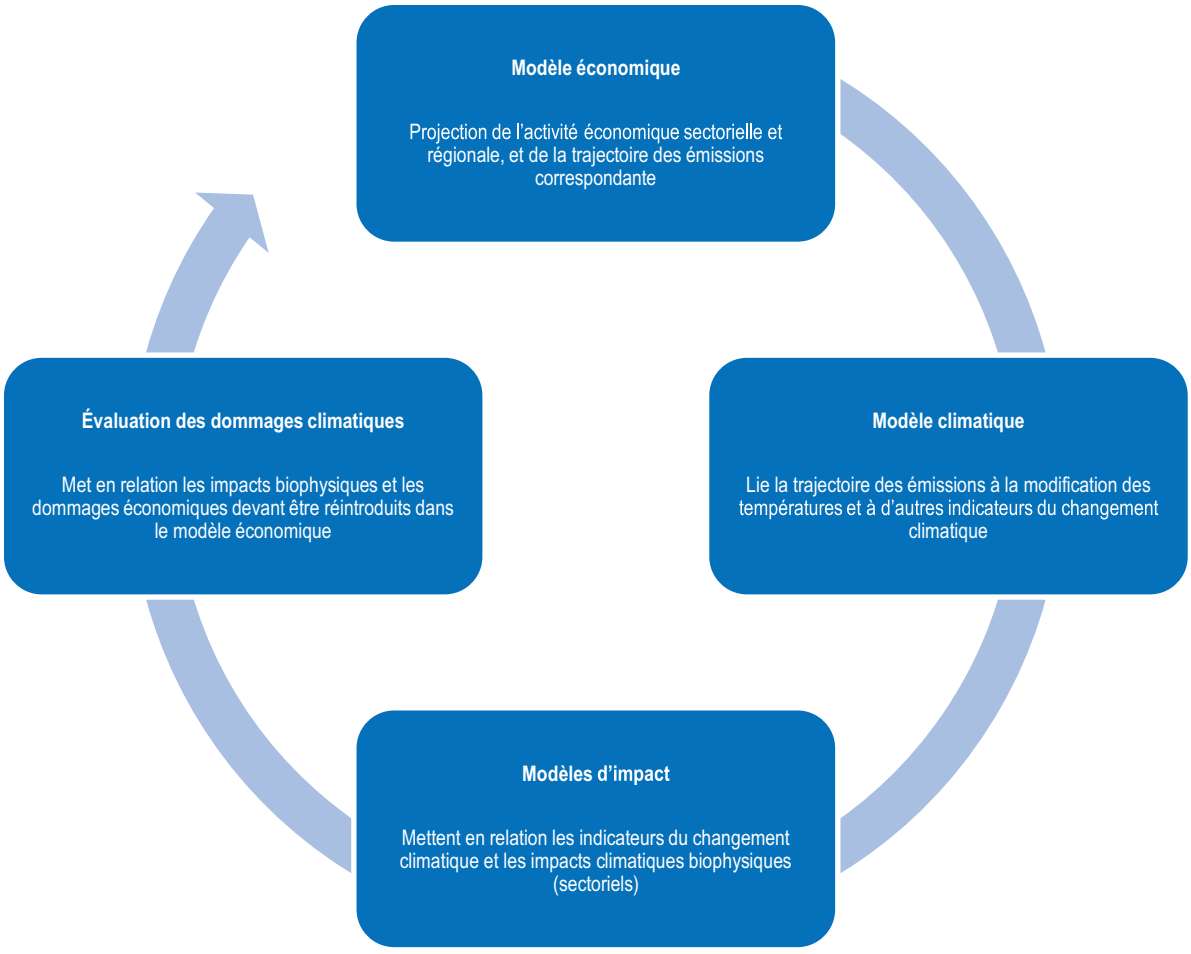
Les difficultés techniques que présente l'analyse détaillée des effets de rétroaction sectoriels et régionaux du changement climatique sur la croissance économique tiennent au fait que les différentes étapes des relations entre l'économie et le changement climatique ne peuvent pas être résumées de manière robuste dans une simple fonction de dommage, comme celles qui sont souvent utilisées dans les modèles d'évaluation intégrée. Le modèle économique sert à effectuer des projections de la croissance économique ventilées par secteur et par région. La structure régionale et sectorielle des modèles, ainsi que la décomposition par source d'énergie, permettent d'établir des projections des émissions de GES et, partant, une trajectoire des émissions. Une fois les émissions projetées, un module climatique, tel que MAGICC (Meinshausen et al., 2011), permet de traduire la trajectoire des émissions en variations des concentrations d'émissions et des températures. Les chiffres obtenus serviront alors d'intrants ou de référence pour obtenir les informations nécessaires sur les dommages climatiques dans le scénario considéré.

La trajectoire des températures peut être utilisée de deux manières différentes. Elle peut être intégrée dans des modèles sectoriels particuliers examinant un impact déterminé, comme le modèle des systèmes côtiers qui analyse les impacts de l'élévation du niveau de la mer, ou un modèle de cultures conçu pour calculer les modifications des rendements agricoles. Mais elle peut aussi servir de référence pour rechercher les études empiriques ou de modélisation qui ont déjà été consacrées aux trajectoires de température existantes. Les trajectoires de référence existantes sont généralement des profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) (Van Vuuren et al., 2012) ou, dans le cas des études plus anciennes, le Rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émission (SRES) (Nakicenovic et Swart, 2000). Dans ce cas, les données utilisées seront celles qui se rapportent à la trajectoire proche du scénario de référence retenu.

Dans la dernière étape de la méthode de la fonction de production, les informations obtenues sur les dommages climatiques sont intégrées dans le modèle par secteur et par

région, pour les variables les mieux adaptées à chaque effet climatique. Le résultat final se présente sous la forme d'un nouveau niveau de PIB sectoriel, régional et mondial qui prend en compte les coûts du changement climatique pour la croissance économique. Le graphique 1.1 récapitule ce processus.

Graphique 1.1. **Établissement d'un lien entre le modèle économique et les modèles du changement climatique**



Source : Compilation effectuée pour cette analyse.

1.4. Modélisation des impacts climatiques sectoriels et régionaux

Pour quantifier les impacts du changement climatique, le modèle ENV-Linkages utilise les informations disponibles concernant la manière dont les effets climatiques agissent sur les différents secteurs économiques. Les sources d'information proviennent essentiellement de modèles ascendants d'équilibre partiel, de modèles d'impacts climatiques et d'études économétriques[2]. Le tableau 1.3 récapitule les impacts considérés et les études dont ils sont tirés. Il s'agit des conséquences des changements induits par le climat pour l'agriculture et la pêche, les zones côtières, la santé et la modification de la demande de services touristiques et de la demande d'énergie pour le chauffage et le refroidissement.

La plupart des impacts considérés sont évalués dans le cadre du scénario 8.5 des profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP), qui décrit une trajectoire de changement

Tableau 1.3. **Catégories d'impacts climatiques incluses dans le modèle ENV-Linkages**

Impacts climatiques	Impacts modélisés	Source	Projet	Horizon
Agriculture	Modifications du rendement des cultures Modification des prises de poisson	Modèle IMPACT – Nelson et al. (2014) Cheung et al. (2010)	AgMIP SESAME	2050 2060
Zones côtières	Perte de terres et de capital due à l'élévation du niveau de la mer	DIVA model – Vafeidis et al. (2008)	ClimateCost	2100
Phénomènes extrêmes	Dommages au capital dus à des ouragans	Mendelsohn et al. (2012)		2100
Santé	Mortalité et morbidité associées à des maladies infectieuses, des maladies cardio-vasculaires et des maladies respiratoires	Tol (2002)		2060
	Morbidité liée à l'exposition à la chaleur et au froid	Roson et Van der Mensbrugghe (2012), et Ciscar et al. (2014) pour l'Europe	Banque mondiale, modèle ENVISAGE et Peseta II (Europe)	2060
Demande d'énergie	Modification de la demande d'énergie pour le chauffage et le refroidissement	AIE (2013)	WEO	2050
Demande touristique	Modification des flux et des services touristiques	HTM – Bigano et al. (2007)	ClimateCost	2100
Écosystèmes	Aucun impact supplémentaire n'est couvert dans la modélisation.			
Stress hydrique	Aucun impact supplémentaire n'est couvert dans la modélisation.			
Points de basculement	N'est pas couvert dans la modélisation.			

Source : Compilation effectuée pour cette analyse.

climatique résultant d'un rapide accroissement des émissions mondiales. Les scénarios RCP ont été formulés par Van Vuuren et al. (2012) et adoptés par le GIEC (2013 ; 2014a, b). Il est aussi possible d'établir une relation entre les impacts et le scénario légèrement plus ancien SRES A1B du GIEC (Nakicenovic et Swart, 2000), qui décrit un monde futur caractérisé par une croissance économique très rapide, une population mondiale qui atteint un maximum en 2050 pour diminuer par la suite, et la rapide introduction de nouvelles technologies plus efficaces pour toutes les sources d'énergie (GIEC, 2000). L'emploi de différents scénarios ne pose toutefois qu'un problème relativement mineur d'approximation dans la spécification de la référence RCP 8.5 car jusqu'en 2060, les profils des températures sont raisonnablement similaires dans le scénario RCP 8.5 et dans le scénario A1B. Ces deux scénarios sont également similaires à la référence du modèle ENV-Linkages en ce qui concerne les concentrations de GES.

La projection centrale utilise, dans toute la mesure du possible, les résultats produits par le modèle HadGEM3 (Madec et al., 1996) du Centre Hadley du Service météorologique du Royaume-Uni pour les spécifications des variables du système climatique. Dans le cas toutefois des impacts climatiques considérés, les seules données disponibles provenaient d'autres modèles climatiques.

Toutes les études sources ont une couverture mondiale. Provenant, pour la plupart, de modèles et de séries de données maillées, elles présentent les données avec une haute résolution spatiale, ce qui permet de les agréger pour les aligner sur les groupements régionaux du modèle ENV-linkages. Dans certains cas, les études sources spécifient des données d'impact regroupées dans des agrégats régionaux correspondant à ceux d'autres modèles EGC, notamment le modèle ICES[3] (Eboli et al., 2010 ; Bosello et al., 2012 ; Bosello and Parrado, 2014), qui est utilisé comme référence pour plusieurs impacts du changement climatique. Le modèle ICES présente un tableau régional détaillé très similaire à celui du modèle ENV-Linkages. Des calculs de moyenne simples ou d'autres hypothèses de simplification formulées pour l'occasion ont été utilisés afin de déterminer les impacts pour les quelques régions qui ne coïncidaient pas exactement entre les deux modèles.

Lorsque les sources de données n'allaient que jusqu'en 2050, les tendances entre 2040 et 2050 ont été extrapolées jusqu'à 2060. En principe, les impacts ne sont pas évalués pour une année particulière, mais pour une période de plusieurs années. Le cas échéant, les évaluations sectorielles des impacts pour une période à venir, 2045-55 par exemple, ont été traduites en impacts pour l'année médiane (dans ce cas 2050) après quoi des tendances annuelles ont été interpolées pour les périodes antérieures lorsqu'il n'existe pas d'autres informations.

On peut distinguer deux grandes catégories d'impacts du changement climatique. La première s'exerce sur le volet offre du système économique, c'est-à-dire la quantité ou la productivité des facteurs primaires. La destruction de terres et de capital par suite de l'élévation du niveau de la mer, les impacts sur la productivité des cultures dans le secteur agricole, et les impacts sur la productivité du travail dans le domaine de la santé humaine appartiennent à ces catégories. La seconde catégorie influe sur le volet demande. Les impacts sur les dépenses de santé[4] et la consommation d'énergie en font partie.

1.4.1. Agriculture

Les impacts du changement climatique sur l'agriculture qui sont pris en compte dans le modèle ENV-Linkages font intervenir des modifications du rendement des cultures par secteur et par région pour chacun des huit secteurs de cultures (voir à l'annexe 1 la désagrégation sectorielle du modèle ENV-Linkages). Les données utilisées pour les modifications de ces rendements (production physique à l'hectare) sont celles partagées par les équipes de modélisation participant au projet Agricultural Model Intercomparison Project (AgMIP) (Rosenzweig et al., 2013 ; Nelson et al., 2014 ; Von Lampe et al., 2014). Ce projet donne lieu à l'évaluation mondiale la plus robuste des impacts agricoles du changement climatique publiée à ce jour. Bien que les effets sur les prairies soient très similaires aux effets s'exerçant sur les terres cultivées, le projet AgMIP ne fournit pas d'indication sur la manière dont les prairies sont touchées, de sorte que les impacts sur l'élevage sont exclus de l'analyse du modèle. La projection centrale est effectuée à partir des scénarios disponibles partagés dans le cadre du projet AgMIP au moyen du modèle HadGEM, pour la spécification des variables du système climatique, conjugué au modèle de culture DSSAT (Hoogenboom et al., 2012 ; Jones et al., 2003). La spécification des impacts climatiques régionaux résultant de la combinaison de ce modèle est alors utilisée dans le modèle IMPACT de l'Institut international de recherche sur les politiques alimentaires (Rosegrant et al., 2012) pour calculer les chocs exogènes sur les rendements exercés par des variations au niveau des cultures et du stress hydrique par bassin versant. Ces chocs ont ensuite été regroupés en agrégats correspondant aux régions du modèle ENV-Linkages. Une trajectoire allant de 2010 à 2050 a été produite en modifiant proportionnellement l'effet du changement climatique sur le taux de croissance des rendements de façon à ce qu'en 2050, les chocs sur les rendements correspondent à la projection AgMIP pour les années 2050, ce qui donne un impact non linéaire sur les niveaux de rendement. Comme AgMIP, les estimations des chocs sur les rendements ne prennent pas en compte les effets fertilisants du carbone sur la végétation, car ces effets sont jugés trop incertains bien que, selon Rosenzweig et al. (2013), il s'agisse là d'un « domaine d'étude essentiel ».

Pour étudier plus avant les incertitudes qui entachent l'évaluation de ces impacts agricoles, le chapitre 2 examinera aussi ce qu'impliquerait le choix d'autres scénarios pour spécifier les répercussions sur le rendement des cultures, en se basant sur les autres

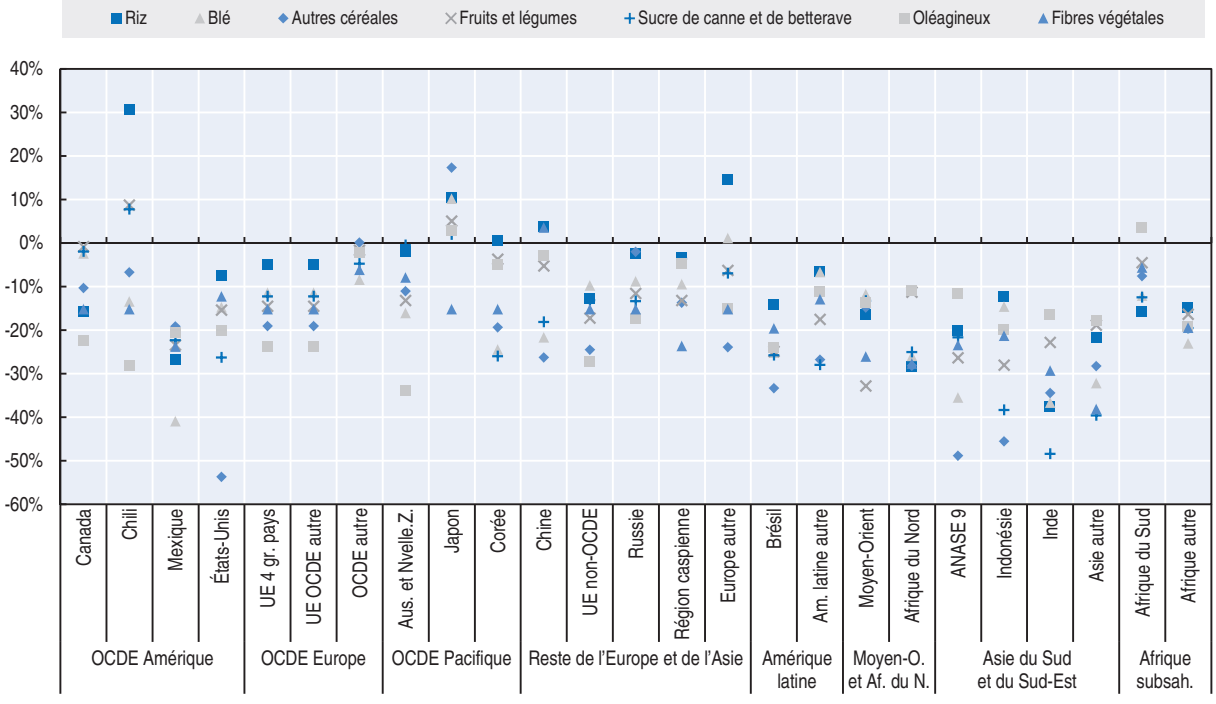
options possibles concernant le modèle de culture, le modèle climatique et – surtout – l'hypothèse de fertilisation par le CO_2.

Étant donné que le modèle IMPACT, contrairement au modèle ENV-Linkages, ne comporte pas de fonction de production complète, les chocs exercés sur le rendement des cultures ont été exprimés en éléments spécifiques des fonctions de production des secteurs agricoles dans le modèle ENV-Linkages. Ces chocs sont représentés dans le modèle sous la forme d'une combinaison de la productivité des ressources en terre dans la production agricole, et de la productivité totale des facteurs des secteurs agricoles[5]. Cette spécification reflète l'idée que les impacts agricoles s'exercent non seulement sur les taux de croissance biophysique des cultures, mais aussi sur d'autres facteurs comme les pratiques de gestion[6].

Les répercussions du changement climatique sur le rendement des cultures varient selon les régions considérées, mais aussi selon les cultures. Le graphique 1.2 illustre les variations à l'échelle régionale du rendement des cultures en 2050 pour la projection centrale à l'aide du modèle climatique HadGEM conjugué au modèle de culture DSSAT. Le graphique exclut l'effet fertilisant du CO_2, l'incertitude relative au choix du modèle climatique et agricole. Par ailleurs, l'effet de fertilisation par le CO_2 est étudié plus avant au chapitre 2. Si ces cartes illustrent les impacts à l'horizon 2050, ceux-ci ne sont pas constants dans le temps. Ils suivent une tendance non linéaire entre 2050 et 2060 établie sur la base des augmentations observées au cours de la décennie précédente. Les impacts relatifs aux autres cultures peuvent être nettement différents des impacts établis pour le riz et pour le blé ; ils ne sont pas reproduits ici, mais sont décrits en détail dans Nelson et al. (2014). Notons que ces impacts renvoient aux chocs potentiels : dans le modèle EGC, les agriculteurs ont la

Graphique 1.2. **Impacts du changement climatique sur le rendement des cultures dans la projection centrale**

Variation en pourcentage des rendements en 2050 par rapport au climat actuel



Source : Modèle IMPACT, d'après l'étude AgMIP (Von Lampe et al. 2014).

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399544

possibilité de modifier leurs processus de production et de s'adapter à ces chocs, ce qu'ils feront pour réduire au minimum leurs coûts – l'adaptation induite par le marché est dans ce cas traitée de façon endogène dans le cadre de modélisation économique. Ce cadre exclut la possibilité d'étendre la superficie agricole irriguée. Dans les régions où le stress hydrique reste faible, cette option d'adaptation peut être une réponse importante au changement climatique (Ignaciuk et Mason-D'Croz, 2014), mais elle n'est pas prise en compte ici car les forces du marché ne sont pas suffisantes pour provoquer une large expansion des zones irriguées (Ignaciuk, 2015).

Les variations des rendements du riz paddy à l'horizon 2050 sont plus fortes dans les zones tropicales, notamment en Amérique centrale et au Mexique, dans les pays d'Afrique subsaharienne, dans certaines parties du Moyen-Orient et dans la majeure partie des pays d'Asie du Sud et du Sud-Est. Certaines régions enregistreront de forts impacts positifs. Les gains les plus élevés seront observés dans les régions du sud de l'Amérique latine, en particulier au Chili, au Japon et dans certaines parties d'Europe de l'Est et de l'Asie continentale. Cette hétérogénéité des impacts indique que le changement climatique modifiera fortement la structure des échanges de produits largement commercialisés comme le riz.

Les variations des rendements du blé à l'horizon 2050 sont moins différenciées, car la plupart des régions sont touchées de manière négative. Les impacts les plus graves seront ressentis au Mexique, en Afrique de l'Ouest et de l'Est, dans certains pays d'Afrique australe, au Moyen-Orient, en Asie du Sud et du Sud-Est, dans certaines régions d'Europe occidentale, comme la Belgique, les Pays-Bas et l'Allemagne. Si ces régions doivent être les plus touchées, les impacts négatifs seront généralisés et concerneront l'essentiel de l'Europe, de l'Asie continentale et de l'Amérique du Nord. Certaines régions bénéficieront du changement climatique. Il s'agit notamment des régions dotées de climats froids comme le Canada, la Russie et les pays scandinaves, de la majeure partie de l'Amérique centrale, de l'Argentine, de certains pays d'Europe de l'Est et de l'Asie continentale, et d'un petit nombre de pays africains.

Dans le secteur de la *pêche*, les dommages correspondent aux changements projetés des prises totales que pourrait entraîner le changement climatique. Ces variations sont modélisées dans ENV-Linkages sous la forme de réductions du stock de ressources naturelles à la disposition des secteurs halieutiques, et constituent une approximation des impacts du changement climatique sur les stocks de poissons et leurs répercussions sur le secteur de la pêche. Sachant que les données empiriques disponibles pour estimer les impacts sur le secteur de la pêche sont très peu nombreuses et que les incertitudes concernant les projections sont très importantes, les données d'entrée utilisée aux fins de la modélisation sont tirées d'une des évaluations les plus complètes réalisées à ce jour, le projet SESAME de l'EU qui, lui-même, utilise les résultats de Cheung et al. (2010). Cette étude emploie un modèle empirique (Cheung et al. 2008) dans lequel les prises maximales possibles sont une variable dépendante de la production primaire et de la distribution. Elle examine un éventail de 1 066 espèces exploitées de poissons et d'invertébrés. Les modifications futures de la distribution des espèces indiquées par les projections sont simulées au moyen d'un modèle (Cheung et al., 2008, 2010) qui commence par identifier les préférences des espèces pour différentes conditions environnementales puis établit un lien entre ces préférences et la capacité de charge escomptée. Les conditions environnementales considérées sont la température de l'eau de mer, sa salinité, la distance à la banquise et les types d'habitat, mais l'évaluation ne tient compte d'aucun effet lié à

l'acidification des océans. Le modèle suppose que la capacité de charge varie positivement avec l'adéquation de l'habitat de chaque cellule spatiale. Enfin, il permet de déterminer la variation des prises potentielles en procédant à une agrégation spatiale et entre espèces.

Les données utilisées pour le secteur de la pêche dans le modèle ENV-Linkages sont les variations en pourcentage des prises de poissons par rapport à 2000, comme décrit ci-dessus. Les régions subissant les effets les plus négatifs à l'horizon 2060 sont l'Afrique du Nord (-27 %) et l'Indonésie (-26 %). Certaines régions européennes, le Moyen-Orient, le Chili et plusieurs pays d'Asie du Sud-Est affichent des impacts allant de -10 % à -15 %. Des impacts négatifs, de moindre ampleur, sont aussi enregistrés pour la Chine, la Corée, le Brésil et d'autres pays d'Amérique latine, le Mexique et certains pays européens. Les prises de poissons augmentent en revanche dans certains pays. Les hausses les plus fortes sont notées pour la Russie (+25 %) et pour les cinq grands pays européens (+23 %). De faibles impacts positifs sont enregistrés pour les États-Unis, le Canada, l'Océanie et la Région caspienne. D'autres régions du monde (Inde, autres pays en développement d'Asie, Afrique du Sud et reste de l'Afrique) ne subissent pratiquement aucun effet.

1.4.2. Zones côtières

Les pertes de zones côtières consécutives à l'élévation du niveau de la mer ont été incluses dans le modèle ENV-Linkages sous la forme d'une diminution des superficies disponibles ainsi que des dommages causés au capital physique. Ces deux modifications concernent les variables des stocks de terres et de capital décomposées par région dans le modèle. Étant donné le peu d'informations disponibles sur les pertes en capital, les variations des stocks de terres et de capital sont évaluées de manière approchée, dans le droit fil de Bosello et al. (2012), suivant l'hypothèse selon laquelle l'évolution de l'offre de capital correspond à la perte de terres mesurée en pourcentage par rapport aux valeurs de référence.

Les estimations du recul du littoral dû à l'élévation du niveau de la mer sont fondées sur les résultats du modèle DIVA (Vafeidis et al., 2008) utilisé dans le projet FP7 ClimateCost de l'Union européenne (Brown et al. 2011) et sont produites par le modèle HadGEM. DIVA est un modèle sectoriel conçu pour étudier la vulnérabilité des zones côtières à l'élévation du niveau de la mer et à d'autres phénomènes ayant un impact sur les océans et les rivières, tels que les ondes de tempête, la modification de la morphologie des fleuves et la modification des régimes des marées. Il s'appuie sur une base de données mondiale sur les facteurs relatifs aux conditions naturelles et socioéconomiques concernant les zones côtières de la planète, présentée avec des détails spatiaux. Les variations des conditions naturelles et socioéconomiques des scénarios futurs possibles sont représentées par un ensemble d'algorithmes pour les impacts et l'adaptation. Les impacts sont ensuite évalués en termes de pertes physiques (superficies perdues en kilomètres carrés) et de coûts économiques (valeur des terres perdues et coûts d'adaptation).

Les régions les plus touchées par l'élévation du niveau de la mer se trouvent en Asie du Sud et en Asie du Sud-Est, les impacts les plus forts concernant l'Inde et d'autres pays en développement de la région. Les projections des pertes de terres et de capital exprimées en pourcentage de la superficie agricole totale de la région en 2060 par rapport à l'année 2000 sont de -0.63 % pour l'Inde et de -0.86 % pour les Autres pays en développement d'Asie dans ENV-Linkages. L'Amérique du Nord, à savoir le Canada, le Mexique et les États-Unis, est également touchée, mais dans une moindre mesure. Le Canada enregistre les plus fortes pertes de terres (et de capital) de la région (-0.47 % en 2060 par rapport à 2000). Les

impacts les plus faibles sont notés pour le Moyen-Orient (-0.35 %) et l'Europe ; dans cette dernière, c'est la région de l'ensemble de l'Europe non-OCDE (-0.37 %), qui comprend, entre autres, Israël, la Norvège et la Turquie. D'autres régions du monde, comme l'Afrique, l'Amérique du Sud et les régions d'Europe continentale ne sont, dans l'ensemble, guère concernées par l'élévation du niveau de la mer.

1.4.3. Phénomènes extrêmes

Il existe de nombreux types de phénomènes extrêmes et ils touchent l'économie de diverses manières. Étant donné, toutefois, les incertitudes qui caractérisent la fréquence et les dommages causés par ces phénomènes, et le fait qu'il est difficile d'imputer ces derniers au changement climatique, les données disponibles sur la manière dont l'économie sera affectée sont encore très limitées. Mendelsohn et al. (2012) ont récemment produit une évaluation quantitative et des projections des dommages des ouragans qui peuvent servir d'intrants dans un cadre d'analyse économique. Ils soulignent que les dommages régionaux sont très sensibles aux modèles climatiques utilisés pour projeter les futures conditions climatiques, et que l'on ne dispose pas de projection établie à partir du modèle HadGEM. L'analyse des conséquences économiques a donc été réalisée au moyen du modèle ENV-Linkages sur la base de moyennes provenant de plusieurs modèles,[7] ce qui peut, à l'évidence, atténuer certaines des conséquences les plus graves indiquées par les projections de modèles particuliers.

Mendelsohn et al. (2012) estiment, sur la base des projections, qu'à mesure que l'on avance dans le siècle, le changement climatique accroît la fréquence des tempêtes de forte intensité dans certains bassins océaniques, bien que les résultats dépendent du modèle climatique utilisé. Ces dommages induits par le climat sont introduits dans le modèle ENV-Linkages sous la forme de réductions des stocks de capital régionaux provoquées par les cyclones tropicaux. Faute d'informations suffisantes, il est posé en hypothèse que ces dommages touchent tous les secteurs (ce qui concorde avec le postulat du modèle EGC qui considère que les nouveaux investissements dans des biens d'équipement sont parfaitement ductiles à l'échelle de l'économie).

Mendelsohn et al. (2012) déterminent également que les dommages mondiaux actuels causés par les cyclones tropicaux se chiffrent à 26 milliards USD par an, soit 0.04 % du PIB mondial, et seront environ deux fois plus élevés (en valeur absolue) à la fin du siècle si les conditions climatiques actuelles se maintiennent, c'est-à-dire en raison de l'évolution des conditions socio-économiques[8]. Les projections font toutefois état d'un nouveau doublement de ces dommages à la fin du siècle sous l'effet du changement climatique. L'essentiel des dommages supplémentaires induits par le climat devrait, selon les projections, concerner l'Amérique du Nord, l'Asie de l'Est et la région Caraïbes-Amérique centrale, les pays les plus touchés étant les États-Unis, le Japon et la Chine.

1.4.4. Santé

Dans la catégorie des impacts sanitaires, le modèle ENV-Linkages couvre à la fois les maladies liées au climat et les effets associés au stress thermique. Les impacts sur la santé humaine renvoyant aux *maladies liées au climat* sont exprimés sous la forme de modifications de la mortalité et de la morbidité, suivant Bosello et al. (2012) et Bosello et Parrado (2014)[9]. Les maladies considérées sont des maladies à transmission vectorielle (paludisme, schistosomiase et dengue), des maladies cardio-vasculaires et des maladies respiratoires. L'évaluation des maladies cardiovasculaires couvre le stress thermique lié à la chaleur et au froid. Dans l'approche par la fonction de production, la technique retenue

pour modéliser ces impacts sanitaires consiste à exprimer les résultats des études empiriques sous la forme de modifications de la productivité du travail et de la demande de services de santé (Bosello et al., 2006) et ne tient pas compte explicitement des impacts sur le bien-être (désutilité) des décès prématurés d'origine climatique. Bien que d'autres facteurs soient touchés par les maladies liées au climat, la productivité du travail est la variable qui permet le mieux de saisir les effets économiques de ces maladies.

Les estimations de la variation de la mortalité due aux maladies à transmission vectorielle sont tirées de Tol (2002) et basées sur des travaux de modélisation (Martens et al., 1995, 1997 ; Martin et Lefebvre, 1995 ; Morita et al., 1994) ainsi que sur des chiffres de la mortalité et de la morbidité provenant des données relatives à la charge mondiale de morbidité établies par l'Organisation mondiale de la santé (Murray et Lopez, 1996)[10]. Ces études semblent indiquer que la relation entre le changement climatique et le paludisme est linéaire. Il existe une relation similaire pour la schistosomiase et la fièvre dengue. Pour tenir compte des variations de la vulnérabilité que peut entraîner une amélioration du niveau de vie, Tol (2002) adopte la relation entre le revenu par habitant et l'incidence des maladies (Tol et Dowlatabadi, 2001). Cette relation permet d'évaluer les conséquences pour le scénario de référence CIRCLE en utilisant la croissance projetée des revenus régionaux par habitant du modèle ENV-Linkages (voir le chapitre 2).

S'agissant des maladies diarrhéiques, les effets de la hausse des températures, qui fait augmenter la mortalité et la morbidité, sont décrits par une équation estimée, les impacts allant décroissant avec la hausse des revenus en raison d'élasticités-revenu négatives et la mortalité reculant plus rapidement que la morbidité (Link and Tol, 2004). Les données relatives aux décès prématurés dus aux maladies cardio-vasculaires et respiratoires sont basées sur une méta-analyse portant sur 17 pays (Martens, 1998). Tol (2002) extrapole ces constatations à tous les autres pays, en utilisant le climat actuel comme prédicteur principal. La mortalité associée aux maladies cardio-vasculaires (stress lié au froid et à la chaleur) et respiratoires (stress lié à la chaleur uniquement) n'est supposée concerner que la population urbaine.

Les conséquences des maladies induites par le climat sur la productivité du travail, résumées dans Bosello et al. (2012), ont été introduites dans le modèle ENV-Linkages. En 2060, les effets négatifs les plus importants sont enregistrés en Afrique et au Moyen-Orient (-0.6 % pour l'Afrique du Sud, -0.5 % pour l'Afrique du Nord et le Moyen-Orient, et -0.4 % pour les autres pays africains). Des impacts plus faibles sont notés pour le Brésil, le Mexique et des pays en développement d'Asie (-0.3 %), ainsi que pour l'Indonésie, les États-Unis, l'Asie du Sud-Est et la majeure partie de l'Amérique latine (-0.2%). Dans certaines régions, l'évolution de l'impact des maladies induites par le climat sur la productivité du travail est positive, en particulier en Russie (+0.5 %), au Canada (+0.4 %) et en Chine (+0.2 %). Les impacts notés pour les autres régions sont très faibles ou nuls.

Les variations des *dépenses de soins de santé* liées aux maladies liées au climat sont également celles indiquées dans Bosello et al. (2012). Le coût des maladies à transmission vectorielle est tiré des travaux de Chima et al. (2003), qui évaluent les dépenses de prévention et le coût des soins par personne et par mois. Les modifications des dépenses de santé sont faibles en pourcentage du PIB[11]. En 2060, c'est dans les pays en développement d'Asie (0.5 %), au Brésil et dans la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (0.3 %) qu'elles sont les plus élevées. La demande supplémentaire de services de santé est très faible dans les autres régions. Il est intéressant de noter qu'elle est négative

au Canada et dans les grands pays de l'UE, comme l'Allemagne et la France (-0.1 %) où les dépenses liées aux maladies cardiovasculaires reculent.

La modélisation du *stress thermique au travail* indique un impact sur la productivité du travail. Sont mis à profit les travaux de Kjellstrom et al. (2009), qui établissent un lien entre, d'une part, la température, la chaleur et l'humidité à l'échelle mondiale et, d'autre part, la capacité à travailler dans différents types d'activités (agriculture, industrie et services). Dans l'idéal, il faudrait combiner les réductions sectorielles de la capacité à travailler et les hausses de température pour déterminer les pertes de productivité du travail. Il n'existe malheureusement pas de données suffisantes pour y parvenir. Les données fournies par Roson et Van der Mensbrugghe (2012) permettent toutefois d'exprimer les profils climatiques régionaux sous forme de perte de productivité du travail en fonction de la hausse des températures moyennes mondiales. Les données de Ciscar et al. (2014) sont utilisées pour les régions européennes.

Jusqu'à présent, la plupart des évaluations (Eboli et al., 2010, Ciscar et al., 2014) ont commencé par agréger les pertes de productivité des différents secteurs puis ont appliqué les moyennes obtenues à tous les secteurs économiques. Les récents travaux de recherche (par exemple, Graff Zivin et Neidell, 2014 ; Somanathan et al., 2014) montrent que la productivité des secteurs dans lesquels le travail s'effectue essentiellement à l'extérieur (c'est-à-dire les activités exposées à la chaleur) se ressent, dans l'ensemble, beaucoup plus de la hausse des températures. Dans le cas des activités intérieures, il est possible d'éviter les conséquences les plus graves en climatisant davantage, ce qui est en partie pris en compte par les effets des variations de la demande d'énergie (voir, par exemple, Somanathan et al., 2014). Les impacts sont censés être limités aux secteurs exposés à la chaleur. Dans le droit fil de Ciscar et al. (2014), les pertes de productivité du travail sont concentrées dans les secteurs de l'agriculture, de la foresterie, de la pêche et du bâtiment, par opposition à la plupart des secteurs manufacturiers et des services (voir à l'annexe I la liste intégrale des secteurs pris en compte dans le modèle ENV-Linkages).

Les impacts les plus marqués sur la productivité du travail dus au stress thermique en 2060 sont constatés dans les régions qui affichent des proportions relativement élevées de travailleurs à l'extérieur et dont le climat est chaud. Les régions les plus gravement touchées, dans lesquelles les pertes de productivité sont de l'ordre de 3 à 5 % pour les activités extérieures pour une augmentation de un degré de la température, sont les pays européens non membres de l'UE non membres de l'OCDE, l'Amérique latine (y compris le Brésil et le Chili), le Mexique, la Chine, les autres pays en développement d'Asie, et l'Afrique du Sud. La plupart des pays de l'OCDE, y compris les États-Unis, le Japon et les pays de l'UE membres de l'OCDE enregistrent des effets moindres, inférieurs à 1 %[12].

Les impacts sanitaires du changement climatique ont des conséquences économiques qui sortent du simple cadre des coûts marchands. Ces coûts, notamment les décès prématurés, ne peuvent pas être pris en compte dans le modèle ENV-Linkages. Ils peuvent toutefois être évalués au moyen de techniques de consentement à payer et, dans le cas des décès prématurés, de la valeur d'une vie statistique. Ces impacts sont examinés plus en détail dans le chapitre 3.

1.4.5. *Demande d'énergie*

La *demande résidentielle d'énergie* devrait, selon les projections, varier sous l'effet du changement climatique. Comme on le verra au chapitre 4, le secteur énergétique est

fortement influencé par les politiques d'atténuation. Cependant, même en l'absence de mesures d'atténuation, l'offre et la demande d'énergie se trouveront modifiées. Les variations de la *demande de produits pétroliers, de gaz, de charbon et d'électricité* des ménages, qui en consomment moins pour le chauffage et davantage pour le refroidissement, sont directement prises en compte dans le modèle sous forme de variations de la demande de ces services énergétiques. Quant à la variation de la demande d'énergie du secteur résidentiel due au changement climatique, elle est calculée sur la base des données fournies par l'AIE concernant le chauffage et le refroidissement des locaux par vecteur, jusqu'en 2050, dans son scénario « politiques actuelles » (AIE, 2013a). Les données ont été extrapolées jusqu'en 2060 d'après les tendances de la demande de 2040 à 2050. L'AIE calcule ses projections à l'aide de son World Energy Model, modèle d'équilibre partiel à grande échelle conçu pour reproduire le fonctionnement des marchés de l'énergie à moyen et à long terme. Ce modèle permet d'établir l'offre et la demande d'énergie correspondant aux différents vecteurs (offre : charbon, pétrole, gaz naturel, biomasse ; demande : charbon, pétrole, gaz naturel, nucléaire, hydraulique, bioénergie et autres sources renouvelables) en fonction de l'évolution des prix de l'énergie, des prix du CO_2, des technologies et des déterminants socioéconomiques. Dans le scénario de référence, en l'absence de changement climatique, la demande de chauffage et de refroidissement augmente dans la plupart des économies, en grande partie sous l'effet de la hausse des revenus ; ce scénario prévoit aussi une forte tendance à l'électrification, qui influe particulièrement sur la demande d'énergie pour le chauffage. En cas de changement climatique, la demande de chauffage et de refroidissement des locaux subit l'influence de facteurs tels que la prévision des besoins découlant du changement climatique, exprimés en degrés-jours de chauffage et de refroidissement (AIE, 2013 ; AIE, 2014).

Globalement, selon les projections, la demande mondiale d'énergie pour le refroidissement des locaux augmente d'environ 250 % entre 2010 et 2060 en l'absence de changement climatique, et de 330 % si l'on tient compte du changement climatique. La hausse de la demande de chauffage est bien plus faible, puisqu'elle représente 42 % à l'horizon 2060 en l'absence de changement climatique et 16 % en cas de changement climatique, mais son niveau de départ est très supérieur. Les pays non membres de l'OCDE sont responsables de la majeure partie de l'augmentation de la demande de refroidissement et, surtout, de chauffage. En 2060, la demande résidentielle de refroidissement devrait représenter 27 % de la demande totale de chauffage et refroidissement des locaux, contre 9 % en 2010.

Les variations de la demande d'électricité imputables au changement climatique d'ici à 2060 peuvent résulter à la fois d'une augmentation de la demande de refroidissement (climatisation) et d'une baisse de la demande de chauffage électrique des locaux compte tenu de la hausse des températures moyennes. À l'échelle mondiale, la demande annuelle totale d'électricité ne devrait guère varier à cause du changement climatique d'ici à 2060, puisque les hausses de la demande de refroidissement en été devraient être compensées par les baisses de la demande de chauffage en hiver. Selon les projections, la moitié environ des 25 régions du modèle ENV-Linkages enregistrent une augmentation de la demande totale d'électricité en raison de besoins accrus de refroidissement, notamment l'UE7 (+11.4 %), le Chili (+8.4 %) et les pays de l'UE non membres de l'OCDE (+7.3 %). La Corée (-6.7%), les pays de l'OCDE-Europe non membres de l'UE (-3.7 %) et la Région caspienne (-3.1 %) font partie de l'autre moitié des régions dans lesquelles la hausse de la demande de refroidissement sera plus que compensée par le recul de la consommation d'électricité

pour le chauffage (étant donné le vif essor de l'électrification du chauffage dans le scénario de référence en l'absence de changement climatique). Dans la grande majorité des régions, la demande de chauffage et de refroidissement en cas de changement climatique ne devrait pas varier au-delà de plus ou moins 3 % de la demande résidentielle totale d'électricité du scénario de référence.

D'après les projections de l'AIE, la hausse de la température mondiale due au changement climatique fera baisser la demande résidentielle des principaux combustibles utilisés pour le chauffage des locaux, à savoir le gaz, les produits pétroliers et le charbon, par rapport au scénario de référence. Pour le chauffage des locaux résidentiels, la demande de gaz reculera de 7 % (de la demande totale de gaz des ménages) ; celle de produits pétroliers de 1 % (de la demande totale de produits pétroliers des ménages) ; et celle de charbon de 17 % (de la demande totale de charbon des ménages). Globalement, la demande de gaz, de produits pétroliers et de charbon pour le chauffage devrait reculer d'environ 3 % de la demande résidentielle totale de ces combustibles (ou de 2 % de la demande totale d'énergie pour le chauffage et le refroidissement, électricité comprise). Les variations pourront être plus prononcées au niveau régional : d'ici à 2060, les parts du gaz, des produits pétroliers et du charbon dans la demande résidentielle totale diminueront le plus dans les autres pays de l'UE (-19.8 %), l'Océanie (-17.6 %), l'UE7 (-13.5 %) et le Chili (-12.5 %). Dans les autres régions, la diminution de la demande de ces combustibles représentera moins de 10 % de la demande d'énergie des ménages (et moins de 2.5 % dans 12 régions).

Bien que le modèle intègre les répercussions du changement climatique sur la demande de refroidissement et de chauffage des locaux, l'analyse ne prend pas en considération les effets de l'évolution du climat sur les *approvisionnements énergétiques* (interruption de l'alimentation en eau de refroidissement dans les centrales thermiques du fait d'épisodes de chaleur extrême ou de sécheresses, variation des ressources en eau disponibles pour la production hydroélectrique, etc.) lorsqu'il s'agit d'effets directs, mais le modèle d'équilibre général (EGC) rend compte des effets endogènes induits sur les marchés de l'énergie par les répercussions sur la demande qui provoquent des variations des prix et des approvisionnements énergétiques. Au même titre que les autres effets sur la demande, le modèle intègre toutes les substitutions endogènes entre vecteurs énergétiques découlant des variations des prix et des niveaux de revenus.

1.4.6. Demande touristique

L'évolution des flux de *tourisme* reflète les évolutions projetées des destinations touristiques dues aux modifications du climat. Par exemple, la diminution prévue de la couverture neigeuse dans les Alpes pourrait inciter les touristes à aller skier dans d'autres régions. Ces modifications de la demande régionale de services touristiques sont tirées de simulations effectuées à l'aide du modèle HTM (Hamburg Tourism Model) (Bigano et al., 2007) ; l'analyse ne considère donc qu'une seule projection et d'autres modèles pourraient fournir d'autres projections, en particulier au niveau régional. Cette approche a cependant été largement utilisée dans le cadre des projets de recherche de l'UE (y compris le projet ClimateCost) et des applications précédentes des modèles EGC (Berrittella et al., 2006 et Bigano et al., 2008). Le modèle HTM est un modèle de simulation économétrique qui permet d'effectuer des projections du tourisme intérieur et du tourisme international par pays. La part des visiteurs nationaux dans le nombre total de visiteurs dépend du climat du pays d'origine et du revenu par habitant. Le changement climatique est représenté dans cette simple estimation par la température annuelle moyenne. D'autres variables, telles

que la taille du pays, sont incluses dans l'estimation, mais ces facteurs sont maintenus constants dans la simulation. Les visiteurs internationaux sont répartis entre tous les autres pays en fonction d'un indice général d'attractivité, du climat et du revenu par habitant des pays de destination, ainsi que de la distance entre le pays d'origine et le pays de destination. Les dépenses touristiques totales sont ensuite calculées en multipliant le nombre de visiteurs par la valeur estimée des dépenses individuelles moyennes.

Dans le modèle ENV-Linkages, les dommages engendrés par le changement climatique dans le secteur du tourisme ont été modélisés par modification de la qualité des services touristiques dans différentes régions. Contrairement à ce qu'indiquent Bosello et al. (2012), les variations de la demande touristique ne sont pas liées à des impératifs de dépense des ménages, mais découlent plutôt de changements de qualité du service fourni. Ces changements de qualité sont représentés dans le modèle sous la forme d'une variation de la productivité totale des facteurs du secteur des services touristiques. Les variations des dépenses touristiques consistent essentiellement en une redistribution entre les pays, accompagnée d'un déplacement des dépenses de consommation intérieure des dépenses touristiques au profit d'autres produits, les modifications des flux de tourisme intérieur n'ayant pas d'effet sur les dépenses à l'échelle de l'économie. Globalement, les dépenses mondiales consacrées au tourisme diminuent, ce qui indique un impact négatif net sur l'économie mondiale. La réduction des dépenses mondiales de tourisme est principalement due à la diminution de la qualité moyenne des services touristiques et, dans une certaine mesure, à la réaffectation par les consommateurs de leurs dépenses à d'autres catégories de consommation par suite de l'augmentation du prix des services touristiques.

Les effets régionaux revêtent une importance cruciale pour le tourisme, car certains pays subissent des effets négatifs tandis que d'autres profitent de l'évolution de la situation. Les pays qui affichent les gains les plus élevés en matière de dépenses touristiques à l'horizon 2060, exprimés en variation en pourcentage par rapport à la référence, sont le Canada (+92 %), la Russie (+66 %) et les États-Unis (+21 %). Des impacts positifs de plus faible ampleur (de l'ordre de +10 %) sont également enregistrés pour le Chili et le Japon. Par contre, les impacts négatifs les plus importants sont notés pour l'Amérique latine (à l'exclusion du Chili et du Brésil) (-27 %), le Mexique (-25 %) et l'Afrique (à l'exclusion de l'Afrique du Sud), ainsi que la Chine, l'Asie du Sud-Est et les pays en développement d'Asie (ou les impacts sont de l'ordre de -20 %). Des impacts négatifs de moindre ampleur sont affichés pour l'Afrique du Sud (-14 %), l'Indonésie (-13 %) des pays de l'UE membres de l'OCDE (-9 %) et la région caspienne (-7 %). Les impacts calculés pour les autres pays sont nettement moins importants.

Notes

1. Par exemple, la perte de terres, de bâtiments et d'ouvrages côtiers par suite d'inondations dues à l'élévation du niveau de la mer.
2. La majorité des informations utilisées provientde l'analyse de données fournies par des projets de recherche récemment achevés ou en cours, notamment dans le cadre des sixième et septième programmes-cadres de l'Union européenne (FP6 et FP7), comme ClimateCost, SESAME et Global-IQ ainsi que d'exercices de comparaison de modèles comme AgMIP. Ces données ont été gracieusement fournies par les chercheurs impliqués dans les projets en question.
3. Le modèle ICES model est exploité par le CMCC (Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici), en Italie. Pour des informations détaillées sur le modèle, veuillez consulter le site web de l'ICES (en italien ou en anglais) : *www.cmcc.it/models/ices-intertemporal-computable-equilibrium-system*.

4. Les impacts sur la santé sont calculés selon une approche fondée sur le coût de l'inaction, qui ne tient pas compte d'autres coûts pour la société. Une évaluation de l'ensemble des conséquences économiques aboutirait à des coûts plus élevés.
5. En l'absence d'autres informations, la variation en pourcentage des rendements est divisée à parts égales entre ces deux éléments.
6. Notons que les modifications de la productivité du travail liées au stress thermique en agriculture sont prises en compte dans la catégorie « impacts sur la santé ».
7. Mendelsohn et al. (2012) utilisent, pour projeter les émissions, le scénario SRES A1B dans lequel le changement climatique est moins important que dans le scénario de référence CIRLE ; en raison de cette différence, les dommages causés par les ouragans sont ici légèrement sous-estimés mais il n'est pas tenu compte de cet effet car les écarts à l'horizon 2060 sont faibles.
8. Notons que pour Hsiang et Jina (2014), qui mettent l'accent sur les conséquences pour la croissance économique à long terme, l'impact des cyclones tropicaux sur l'économie mondiale est bien plus marqué.
9. Les effets sur la mortalité n'ont pas été pris en compte dans le modèle dans le cas des autres dommages climatiques. Toutefois, dans le cas des maladies, il n'a pas été possible de dissocier les effets sur la morbidité et sur la mortalité, de sorte qu'ils sont inclus dans l'évaluation.
10. On reconnaît que de ce fait, l'évaluation ne peut tenir compte des informations publiées récemment, notamment des mises à jour de l'étude sur la charge mondiale de morbidité. Il n'est malheureusement pas possible, dans le cadre de la présente étude, de proposer une évaluation complète et actualisée des effets du changement climatique sur la santé en termes de morbidité.
11. Comme indiqué à la section 1.3, les coûts additionnels de santé ne sont pas directement retranchés du PIB, mais sont représentés comme une dépense obligatoire pour les ménages et les pouvoirs publics, qui se répercute indirectement sur le PIB.
12. Il existe parfois de vastes différences entre les ensembles régionaux du modèle. Par exemple, dans les pays de l'UE membres de l'OCDE, les pertes de productivité sont essentiellement concentrées dans les pays méditerranéens.

Références

AIE (2015), *World Energy Outlook Special Report on Energy and Climate Change*, AIE, Paris.

AIE (2014), *World Energy Outlook*, AIE, Paris.

AIE (2013), *Redrawing the energy climate map*, AIE, Paris.

Agrawala, S. et al. (2011), « Plan or React? Analysis of adaptation costs and benefits using Integrated Assessment Models », *Climate Change Economics*, vol. 2, n° 3, pp. 175-208.

Agrawala, S. et S. Fankhauser (2008), « L'adaptation au changement climatique dans un contexte économique », dans Aspects économiques de l'adaptation au changement climatique : Coûts, bénéfices et instruments économiques, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/9789264046870-3-fr*.

Berrittella, M. et al. (2006), « A general equilibrium analysis of climate change impacts on tourism », *Tourism Management*, vol. 25, pp. 913-924.

Bigano, A. et al. (2008), « Economy-wide impacts of climate change: A joint analysis for sea level rise and tourism », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 13, n° 8, pp. 765-791.

Bigano, A., J.M. Hamilton et R.S.J. Tol (2007), « The Impact of Climate Change on Domestic and International Tourism: A Simulation Study », *Integrated Assessment Journal*, vol. 7, pp. 25-49.

Bosello, F. et R. Parrado, (2014), « Climate Change Impacts and Market Driven Adaptation: The Costs of Inaction Including Market Rigidities », FEEM Working Paper, n° 64.2014.

Bosello, F., F. Eboli et R. Pierfederici (2012), « Assessing the Economic Impacts of Climate Change. An Updated CGE Point of View », *FEEM Working Paper*, n° 2.2012.

Bosello, F., C. Carraro et E. De Cian (2010), « Climate Policy and the Optimal Balance between Mitigation, Adaptation and Unavoided Damage », *Climate Change Economics*, vol. 1, pp. 71-92.

Bosello, F., R. Roson et R.S.J. Tol (2006), « Economy wide estimates of the implications of climate change: Human health », *Ecological Economics*, vol. 58, pp. 579-591.

Braconier, H., G. Nicoletti et B. Westmore (2014), « Policy Challenges for the Next 50 Years », *Documents d'orientation du Département des affaires économiques de l'OCDE*, n° 9, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/5jz18gs5fckf-en*.

Brown, S. et al. (2011), « The Impacts and Economic Costs of Sea-Level Rise in Europe and the Costs and Benefits of Adaptation. Summary of Results from the EC RTD ClimateCost Project », in: P. Watkiss, (Ed.), The ClimateCost Project, *Final Report*, vol. 1, Europe, Institut pour l'environnement de Stockholm, Suède.

Chateau, J., R. Dellink et E. Lanzi (2014), « An Overview of the OECD ENV-Linkages Model: Version 3 », *Documents de travail de l'OCDE sur l'environnement*, n° 65, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/5jz2qck2b2vd-en*.

Cheung, W.W.L., V.W.Y. Lam, J.L. Sarmiento, K. Kearney, R. Watson, D. Zeller et D. Pauly (2010), « Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change », *Global Change Biology*, vol. 16, pp. 24-35.

Cheung, W.W.L., V.W.Y. Lam et D. Pauly (2008), « Dynamic bioclimate envelope model to predict climate-induced changes in distribution of marine fishes and invertebrates », in Cheung, W.W.L., V.W.Y. Lam et D. Pauly (dir. pub.), « Modelling Present and Climate-Shifted Distributions of Marine Fishes and Invertebrates », *Fisheries Centre Research Reports*, vol. 16, n° 3, pp. 5-50, Université de Colombie britannique, Vancouver.

Chima, R.I., C.A. Goodman et A. Mills (2003), « The economic impact of malaria in Africa: A critical review of the evidence », *Health Policy*, vol. 63, pp. 17-36.

Ciscar. J.C. et al. (2014), « Climate impacts in Europe. The JRC PESETA II project », *JRC Scientific and Policy Reports*, n° EUR 26586EN, Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg.

Ciscar, J.C. et al. (2011), « Physical and economic consequences of climate change in Europe », Proceedings of the National Academy of Science (PNAS), vol. 108, pp. 2678-2683.

De Bruin, K.C. de, R.B. Dellink et R.S.J. Tol (2009a), « AD-DICE: an implementation of adaptation in the DICE model », *Climatic Change*, vol. 95, pp. 63-81.

De Bruin, K., R. Dellink et S. Agrawala (2009b), « Economic Aspects of Adaptation to Climate Change: Integrated Assessment Modelling of Adaptation Costs and Benefits », *Documents de travail de l'OCDE sur l'environnement*, n° 6, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/225282538105*.

Dell, M., B.F. Jones et B.A. Olken (2013), « What do we learn from the weather? The new climate-economy literature », *Document de travail du NBER* (National Bureau of Economic Research), n° 19578, NBER, Cambridge, Massachusetts.

Dell, M., B.F. Jones and B.A. Olken (2009), « Temperature and income: Reconciling new cross-sectional and panel estimates », *American Economic Review*, vol. 99(2), pp. 198-204.

Dellink, R. et al. (2014), « Consequences of Climate Change Damages for Economic Growth: A Dynamic Quantitative Assessment », *Documents de travail du Département des affaires économiques de l'OCDE*, n° 1135, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/5jz2bxb8kmf3-en*.

Eboli, F., R. Parrado et R. Roson (2010), « Climate-change feedback on economic growth: Explorations with a dynamic general equilibrium model », *Environment and Development Economics*, vol. 15, pp. 515-533.

EPA (2015), « Ecosystems: Climate impacts on ecosystems », article en ligne, United States Environmental Protection Agency (Agence pour la protection de l'environnement des États-Unis), *www.epa.gov/climatechange/impacts-adaptation/ecosystems.html* (24 mars 2015).

Garnaut, R. (2011), *The Garnaut review 2011: Australia in the global response to climate change*, Cambridge University Press.

Garnaut, R. (2008), *The Garnaut Climate Change Review: Final Report*, Cambridge University Press.

GIEC (2014a), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Part A: Global and Sectoral Aspects, Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et L.L.White (dir. pub.)], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis, 1132 pp.

GIEC (2014b): *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Contribution du Groupe de travail III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler,

I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel et J.C. Minx (dir. pub.)], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis.

GIEC (2013), *Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques, Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (dir. pub.)], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis, 1535 pp.

Graff Zivin, J. et M. Neidell (2014), « Temperature and the Allocation of Time: Implications for Climate Change », *Journal of Labor Economics*, n° 32, pp. 1-26.

Hoogenboom, G. et al. (2012), « Decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT) version 4.5 », CD-ROM, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.

Hsiang, S.M. et A.S. Jina (2014), « The causal effect of environmental catastrophe on long-run economic growth », *NBER Workshop Paper*, n° 20352.

Ignaciuk, A. (2015), « Adapting Agriculture to Climate Change: A Role for Public Policies », *OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers*, n° 85, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/5js08hwvfnr4-en*.

Ignaciuk, A. and D. Mason-D'Croz (2014), « Modelling Adaptation to Climate Change in Agriculture », *OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers*, n° 70, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/5jxrcljnbxq-en*.

Jones, J.W. et al. (2003), « DSSAT Cropping System Model », *European Journal of Agronomy*, vol. 18, pp. 235-265.

Kjellstrom T. et al. (2009), « The direct impact of climate change on regional labor productivity », *Archives of Environmental Occupation and Health*, hiver, vol. 64, n° 4, pp. 217-27.

Link, P.M. et R.S.J. Tol (2004), « Possible economic impacts of a shutdown of the thermohaline circulation: An application of FUND », *Portuguese Economic Journal*, vol. 3, pp. 99-114.

Madec, G. et M. Imbard (1996), « A global ocean mesh to overcome the north pole singularity », *Climate Dynamics*, vol. 12, p. 381-388.

Martens, W.J.M. (1998), « Health impacts of climate change and ozone depletion: An ecoepidemiologic modelling approach », *Environmental Health Perspectives*, vol. 106, n° 1, pp. 241-251.

Martens, W.J.M., T.H. Jetten et D.A. Focks (1997), « Sensitivity of malaria, schistosomiasis and dengue to global warming », *Climatic Change*, vol. 35, pp. 145-156.

Martens, W.J.M., T.H. Jetten, J. Rotmans et L.W. Niessen (1995), « Climate change and vector-borne diseases: A global modelling perspective », *Global Environmental Change*, vol. 5, n° 3, pp. 195-209.

Martin, P.H. et M.G. Lefebvre (1995), « Malaria and Climate: Sensitivity of Malaria Potential Transmission to Climate », *Ambio*, vol. 24, n° 4, pp. 200-207.

Meinshausen, M., S.C.B. Raper et T.M.L. Wigley (2011), « Emulating coupled atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6: Part I – Model Description and Calibration », *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 11, pp. 1417-1456.

Mendelsohn, R., K. Emanuel, S. Chonabayashi et L. Bakkensen (2012), « The Impact of Climate Change on Global Tropical Cyclone Damage », *Nature Climate Change*, n° 2, pp. 205-209.

Morita, T., M. Kainuma, H. Harasawa, K. Kai et Y. Matsuoka (1994), « An Estimation of Climatic Change Effects on Malaria », *Document de travail*, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba.

Murray, C.J.L. et A.D. Lopez (1996), *Global Health Statistics*, Harvard School of Public Health, Cambridge.

Nakicenovic, N. et R. Swart (dir. pub.) (2000), *Special report on Emissions Scenarios, A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis.

Nelson, G.C. et al. (2014), « Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, n° 9, pp. 3274-3279.

Nordhaus, W.D. (2012), « Integrated Economic and Climate Modeling, », in: P. Dixon and D. Jorgenson (dir. pub.), *Handbook of Computable General Equilibrium Modeling*, Elsevier.

Nordhaus, W.D. (2010), « Economic aspects of global warming in a post-Copenhagen environment », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, n° 26, pp. 11721-11726.

Nordhaus, W.D. (2007), *A question of balance*, Yale University Press, New Haven, États-Unis.

Nordhaus, W.D. (1994), *Managing the Global Commons: The Economics of the Greenhouse Effect*, MIT Press, Cambridge, MA.

Nordhaus W.D. et J. Boyer (2000), *Warming the World, Economic Models of Global Warming*, The MIT Press, Cambridge, MA.

OCDE (2015), *Climate change risks and adaptation: Linking policy and economics*, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/9789264234611-en*.

OCDE (2014a), *Perspectives économiques de l'OCDE*, vol. 2014, n° 1, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/eco_outlook-v2014-1-fr*.

OCDE (2014b), *Changement climatique, eau et agriculture : Vers des systèmes résilients*, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/ 10.1787/9789264235076-fr*.

OCDE (2012), *Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2050 : Les conséquences de l'inaction*, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/env_outlook-2012-fr*.

OMS (2014), *Quantitative Risk Assessment of the Effects of Climate Change on Selected causes of Death, 2030s and 2050s*, Organisation mondiale de la santé, Genève.

OMS (2012), *Atlas de la santé et du climat*, Organisation mondiale de la santé and Organisation météorologique mondiale, Genève.

Parson, E.A. et K. Fisher-Vanden (1997), « Integrated Assessment Models of Global Climate Change », *Annual Review of Energy and Environment*, n° 22, pp. 589-628.

Rosegrant, M.W. et the IMPACT Development Team (2012), « International model for policy analysis of agricultural commodities and trade (IMPACT): Model Description », Institut international de recherche sur les politiques alimentaires (IFPRI), Washington, DC (2), *www.ifpri.org/sites/default/files/publications/impactwater2012.pdf*.

Rosenzweig, C. et al. (2013), « Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison », *Proceedings of the National Academy of Sciences* (PNAS), vol. 111, n° 9, pp. 3268-3273.

Roson, R. et D. van der Mensbrugghe (2012), « Climate change and economic growth: impacts and interactions », *International Journal of Sustainable Economy*, vol. 4, pp. 270-285.

Somanathan, E., R. Smanathan, A. Sudarshan et M. Tewari (2014), « The impacts of temperature on productivity and labor supply: Evidence from Indian manufacturing », *Indian Statistical Institute Discussion Paper*, vol. 2014, n° 10, Delhi.

Steininger, K.W. et al. (2015), *Economic Evaluation of Climate Change Impacts: Development of a Cross-Sectoral Framework and Results for Austria*, Springer International Publishing, Suisse.

Stern, N. (2007), *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge et New York: Cambridge University Press.

Sue Wing, I. et E. Lanzi (2014), « Integrated assessment of climate change impacts: Conceptual frameworks, modelling approaches and research needs », *Documents de travail de l'OCDE sur l'environnement*, n° 66, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/5jz2qcjsrvzx-en*.

Sue Wing, I. et K. Fisher-Vanden. (2013), « Confronting the Challenge of Integrated Assessment of Climate Adaptation: A Conceptual Framework », *Climatic Change*, vol. 117, n° 3, pp. 497-514.

Tol, R.S.J. (2005), « Emission abatement versus development as strategies to reduce vulnerability to climate change: An application of FUND », *Environment and Development Economics*, vol. 10, n° 5, pp. 615-629.

Tol, R.S.J. (2002), « New Estimates of the Damage Costs of Climate Change, Part I: Benchmark Estimates », *Environmental and Resource Economics*, vol. 21, n° 1, pp. 47-73.

Tol, R.S.J. et H. Dowlatabadi (2001), « Vector-borne diseases, climate change, and economic growth », *Integrated Assessment*, vol.2, pp. 173-181.

US Interagency Working Group on Social Cost of Carbon (2013), « Technical update of the social cost of carbon for regulatory impact analysis – under executive order 12866 », *Technical Support Document*.

US Interagency Working Group on Social Cost of Carbon (2010), « Social cost of carbon for regulatory impact analysis – under executive order 12866 », *Technical Support Document*.

Vafeidis, A.T., R.J. Nicholls, L. McFadden, R.S.J. Tol, J. Hinkel, T. Spencer, P.S. Grashoff, G. Boot et R.J.T. Klein (2008), « A new global coastal database for impact and vulnerability analysis to sea level rise », *Journal of Coastal Research*, vol. 24, n° 4, pp. 917-924.

Van Vuuren, D.P., K. Riahi, R. Moss, J. Edmonds, A. Thomson, N. Nakicenovic, T. Kram, F. Berkhout, R. Swart, A. Janetos, S.K. Rose et N. Arnell (2012), « A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities », *Global Environmental Change*, vol. 22, n° 1, pp. 21-35.

Von Lampe, M. et al. (2014), « Why do global long-term scenarios for agriculture differ? An overview of the AgMIP Global Economic Model Intercomparison », *Agricultural Economics*, vol. 45, n° 1, pp. 3-20.

Chapitre 2

Dommages du changement climatique imputables aux impacts considérés à l'horizon 2060

Ce chapitre décrit tout d'abord succinctement les principales projections des tendances socio-économiques à venir, indépendamment du changement climatique ou des politiques mises en œuvre dans ce domaine. Il présente ensuite les résultats de l'évaluation chiffrée des coûts économiques du changement climatique jusqu'en 2060, sur la base du modèle ENV-Linkages. La présente évaluation des dommages imputables au changement climatique s'intéresse plus particulièrement aux impacts marchands et aux répercussions macroéconomiques, mais ce chapitre examine également les conséquences qui en découlent pour les différentes régions, pour la structure sectorielle des différentes économies et pour les échanges internationaux.

Le modèle ENV-Linkages peut être utilisé pour combiner l'évaluation d'un certain nombre d'impacts du changement climatique et de leurs incidences sur différents moteurs de croissance économique au sein d'un cadre analytique unique et cohérent, tel que celui présenté au chapitre 1. Ce cadre est appliqué pour évaluer les conséquences prévisionnelles de ces impacts du changement climatique sur les différents éléments de l'économie, dont un indicateur majeur, le produit intérieur brut (PIB). À partir de l'évaluation des effets qui peuvent être intégrés dans la modélisation, il est possible d'établir des projections jusqu'en 2060, sur la manière dont les économies régionales peuvent évoluer dans le contexte climatique actuel (« sans dommages ») et lorsque les dommages liés au changement climatique sont pris en considération.

2.1. Projection de référence sans dommages

L'analyse des projections de coûts à long terme du changement climatique repose sur une projection de référence. Cette projection de référence s'appuie sur plusieurs hypothèses : absence de nouvelles politiques climatiques, poursuite des politiques en cours dans d'autres domaines économiques (dont celui de l'énergie) et évolution socio-économique plausible tenant compte des tendances en matière de démographie, d'urbanisation et de mondialisation[1]. Une projection de référence n'est pas une anticipation de ce qui va se produire, mais plutôt un scénario plausible décrivant de quelle manière et dans quelle mesure ces tendances dominantes se répercutent sur le développement économique futur, en l'absence de chocs imprévus. Une projection de référence type d'une « activité normale » doit inclure les dommages causés par le changement climatique, puisque ces dommages se produiront indépendamment de l'action gouvernementale et affecteront l'économie, quoi qu'il arrive. Toutefois, pour évaluer les coûts de l'inaction, il faut comparer le scénario de référence dans lequel des dommages climatiques se produisent à un scénario de référence hypothétique dans lequel aucun dommage dû au changement climatique ne se produit. Les hypothèses sur lesquelles repose la projection de référence sans dommages sont identiques à celles utilisées dans la projection de référence, mais excluent les conséquences économiques du changement climatique. Chateau et al. (2011) décrivent plus en détail cette procédure de calibrage du scénario de référence, encore que le calibrage numérique du modèle ait été actualisé depuis pour tenir compte de données plus récentes. Le scénario sans dommages est une projection similaire au scénario standard SSP2 (Van Vuuren et al., 2014), avec toutefois des déterminants socio-économiques révisés pour la croissance démographique et économique. Quoique purement hypothétique, cette projection de référence sans dommages, que l'on peut qualifier de « naïve », fournit un point de référence adapté à l'analyse. Elle se différencie de la projection de base dans laquelle les conséquences du changement climatique affectent l'économie, tandis que toutes les autres hypothèses demeurent inchangées.

2.1.1. Activité macroéconomique et croissance

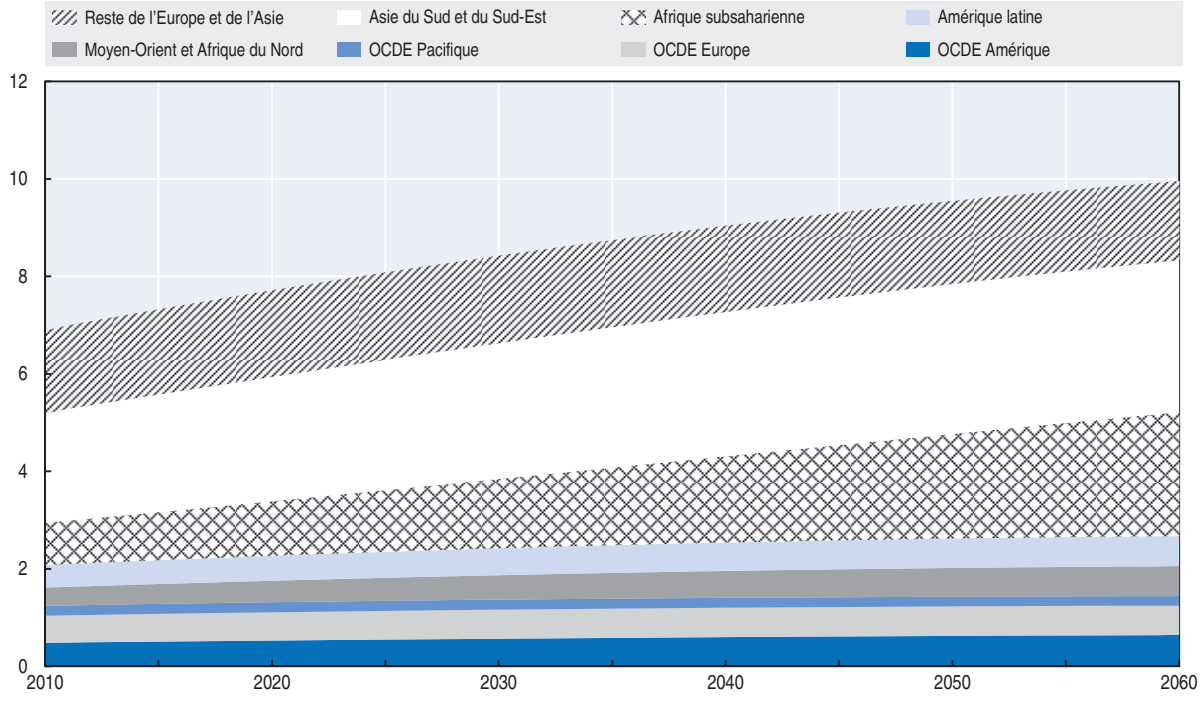
Les tendances démographiques jouent un rôle majeur dans la détermination de la croissance économique à long terme. Les projections détaillées des mouvements de

population observés en fonction du sexe, de l'âge et du niveau d'éducation déterminent les niveaux d'emploi et le capital humain futurs qui stimulent la productivité du travail. Alors que la population et l'emploi sont corrélés, les tendances régionales varient en fonction des modifications des taux de participation par groupes d'âge spécifiques (surtout dans la catégorie des personnes âgées de plus de 65 ans) et des taux de chômage, ainsi que des changements dans la structure par âge de la population (incluant le vieillissement).

Le graphique 2.1 présente la projection de référence sans dommages de la population régionale totale, à partir de la projection fondée sur la variante moyenne tirée de la base de données des Nations Unies *World Population Prospects* (ONU, 2013) et d'Eurostat (2013), pour les pays européens[2]. La population mondiale va passer d'environ 7 milliards de personnes en 2010 à près de 10 milliards en 2060, mais malgré cette forte augmentation, la croissance de la population d'ici le milieu du siècle devrait être considérablement inférieure à ce qu'elle est actuellement. Si cette tendance est réelle dans la plupart des régions du monde, la population de l'Afrique subsaharienne, quant à elle, ne cesse de croître de façon rapide.

Graphique 2.1. **Tendance démographique par région, projection de référence sans dommages**

Milliards d'individus



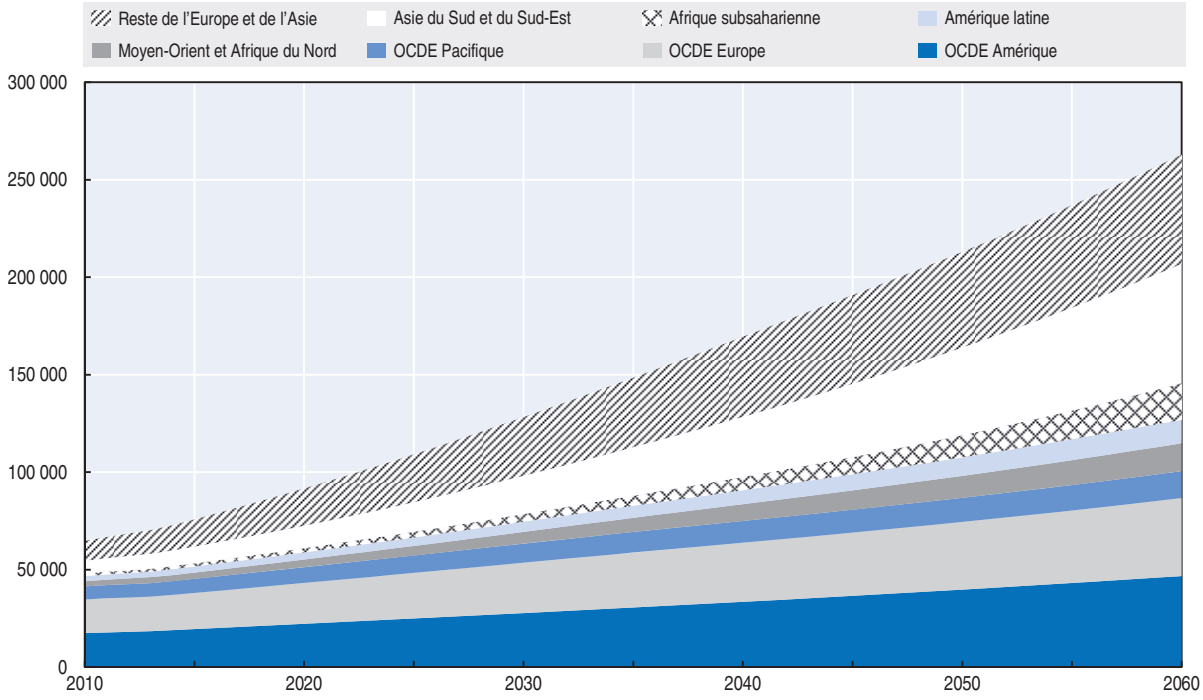
Source : Nations Unies (2013) utilisée dans le modèle ENV-Linkages.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399558

Les projections régionales du PIB indiquent que le ralentissement de la croissance de la population n'implique pas un ralentissement de l'activité économique. Alors que les taux de croissance économique à long terme diminuent progressivement, le graphique 2.2 montre que le niveau du PIB dans la référence sans dommages devrait augmenter plus que linéairement au fil du temps. La plus forte croissance s'observe en dehors de l'OCDE, en particulier en Asie et en Afrique, où l'on constate d'énormes possibilités de croissance économique. La part de la zone OCDE dans l'économie mondiale devrait tomber de 64 % en 2010 à 38 % en 2060. Ces projections sont parfaitement conformes aux Perspectives

Graphique 2.2. **Évolution du PIB réel, projection de référence sans dommages**

Milliards USD, taux de change PPA 2005



Source : OCDE (2014) pour les pays de l'OCDE et modèle ENV-Linkages pour les pays non membres de l'OCDE.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399562

économiques de l'OCDE (OCDE, 2014), elles intègrent les principaux effets de la récente crise financière tels qu'ils ont été observés jusqu'en 2013 et concordent avec le scénario central du rapport OCDE@100 relatif aux scénarios à long terme (Braconier et al. 2014).

En dehors de l'offre de main-d'œuvre, la croissance du PIB dépend également des modifications du capital produit par l'homme et de l'utilisation des ressources foncières. Dans tous les cas, la croissance du PIB s'explique par la combinaison de facteurs tels que l'augmentation de l'offre de facteurs de production, les variations dans la répartition des ressources au sein de l'économie dans son ensemble et les améliorations de la productivité de l'utilisation des ressources (la transformation efficace des intrants dans la production des extrants). Le tableau 2.1 montre les taux moyens de croissance du PIB pour la décennie actuelle (2010-20), à moyen terme (2020-40) et à long terme (2040-60).

Dans la plupart des pays, la croissance à court terme est principalement stimulée par une variété de facteurs qui sont fonction des caractéristiques de la conjoncture économique. Ces projections à court terme sont fondées sur les prévisions officielles de l'OCDE (2014a) et du FMI (2014). À plus long terme, on observe une tendance progressive de la croissance vers un plus grand équilibre, où la productivité du travail acquiert une importance équivalente à l'augmentation de l'offre de capital, en tant que moteur de croissance économique.

Le tableau illustre les principales tendances en matière de développement économique pour les décennies à venir, à savoir, une croissance continue, plus lente au sein des pays de l'OCDE que dans les pays non membres (à quelques exceptions près), une baisse des taux de croissance dans les économies émergentes et une croissance relativement forte en Afrique et dans la plupart des autres pays en développement.

Tableau 2.1. **Croissance économique par région au cours de périodes sélectionnées**
Moyenne annuelle des taux de croissance du PIB — variation en pourcentage

	2010-20	2020-40	2040-60
OCDE Amérique			
Canada	2.2	2.0	1.9
Chili	4.7	2.4	1.4
Mexique	3.6	3.4	2.5
États-Unis	2.4	1.9	1.5
OCDE Europe			
UE4 gr. pays	1.5	1.6	1.3
UE OCDE autre	1.9	2.0	1.3
OCDE autre	3.6	2.6	1.7
OCDE Pacifique			
Aus. et Nvelle.Z.	3.2	2.6	2.1
Japon	0.9	1.0	1.1
Corée	4.0	2.3	0.6
OCDE	2.2	1.9	1.5

	2010-20	2020-40	2040-60
Reste de l'Europe et de l'Asie			
Chine	7.6	4.2	1.6
UE non-OCDE	2.2	2.5	1.7
Russie	3.6	2.1	0.9
Région caspienne	6.3	4.8	2.6
Europe autre	2.4	3.3	2.0
Amérique latine			
Brésil	3.3	3.0	1.8
Am. latine autre	3.6	3.7	3.1
Moyen-Orient et Afrique du Nord			
Moyen-Orient	3.4	3.7	2.3
Afrique du Nord	3.9	4.9	3.2
Asie du Sud et du Sud-Est			
ANASE 9	4.8	4.2	3.1
Inde	6.6	5.8	3.6
Indonésie	6.1	4.6	3.3
Asie autre	4.2	4.2	3.7
Afrique subsaharienne			
Afrique du Sud	4.9	4.2	1.9
Afrique autre	5.9	6.5	6.0
Monde	3.5	3.1	2.2

Source : OCDE (2014) pour les pays de l'OCDE et modèle ENV-Linkages pour les pays non membres de l'OCDE.
StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399859

2.1.2. Mutations structurelles de l'économie

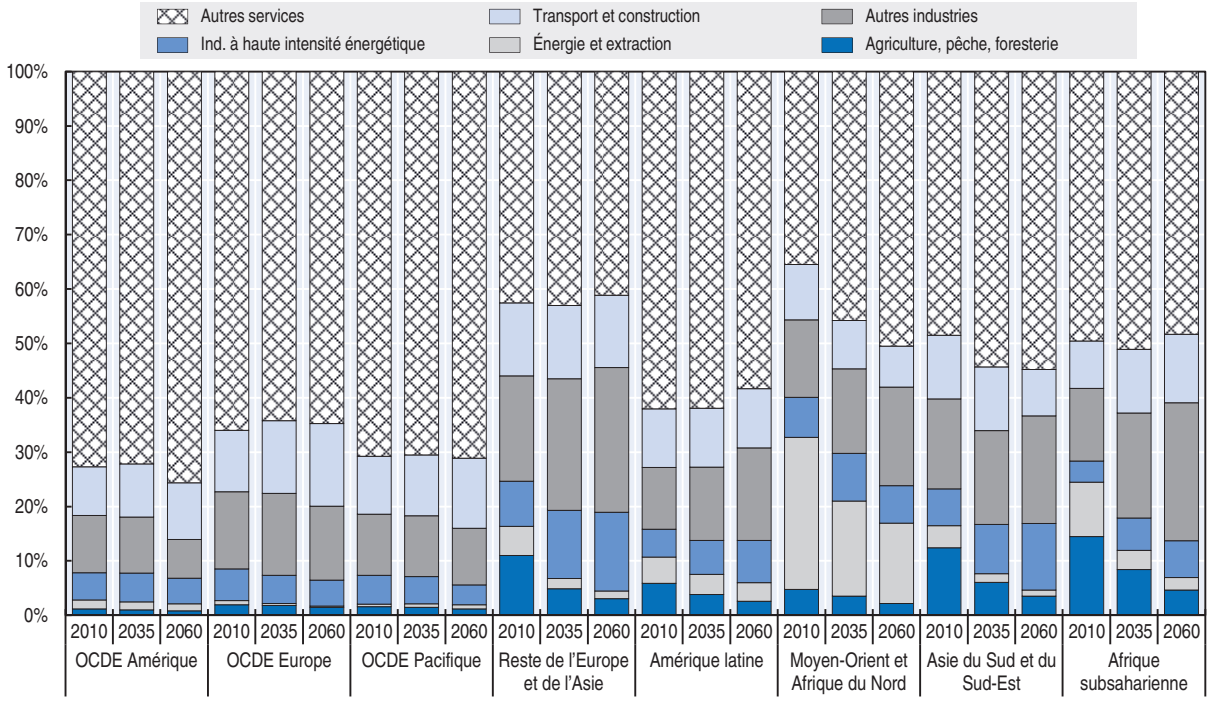
Une bonne compréhension de l'économie de demain ne se limite pas à l'observation des phénomènes macro-économiques. Pour ne citer que quelques exemples, les projections de hausse de la productivité varient selon les secteurs, la hausse des revenus implique une modification de la demande de divers produits, les préférences des consommateurs vont également se modifier et la structure des échanges internationaux peut progressivement s'adapter pour stabiliser les balances commerciales.

Le graphique 2.3 montre l'évolution des économies de l'OCDE par secteur, le secteur des services représentant plus de la moitié du PIB (valeur ajoutée) qui sera créé dans des économies. En règle générale, la part respective de chaque secteur de l'économie tend à demeurer relativement stable, pourtant il est évident que de nombreux changements fondamentaux au niveau sous-sectoriel ne sont pas reflétés ici. Les principaux pays exportateurs de pétrole du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord devraient progressivement diversifier leurs économies qui reposeront donc moins sur les ressources énergétiques. Dans les pays en développement, la tendance au déclin de l'importance de l'agriculture devrait continuer à s'accentuer. Compte tenu des taux de croissance élevés de nombre de ces pays, cela ne signifie pas une baisse absolue de la production agricole, mais plutôt un processus d'industrialisation et, dans de nombreux cas, une forte augmentation dans le secteur des services.

Les projections énergétiques à l'horizon 2035 sont calibrées pour s'aligner sur le scénario « politiques actuelles » des Perspectives énergétiques mondiales de l'Agence internationale de l'énergie (AIE, 2014) et ont été extrapolées pour s'adapter aux données macroéconomiques de référence. Dans les économies à forte croissance, telles la Chine, l'Inde et l'Indonésie, la nécessité de soutenir la croissance économique grâce à une énergie

Graphique 2.3. **Composition sectorielle du PIB par région, projection de référence sans dommages**

Pourcentage du PIB



Source : Modèle ENV-Linkages.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399578

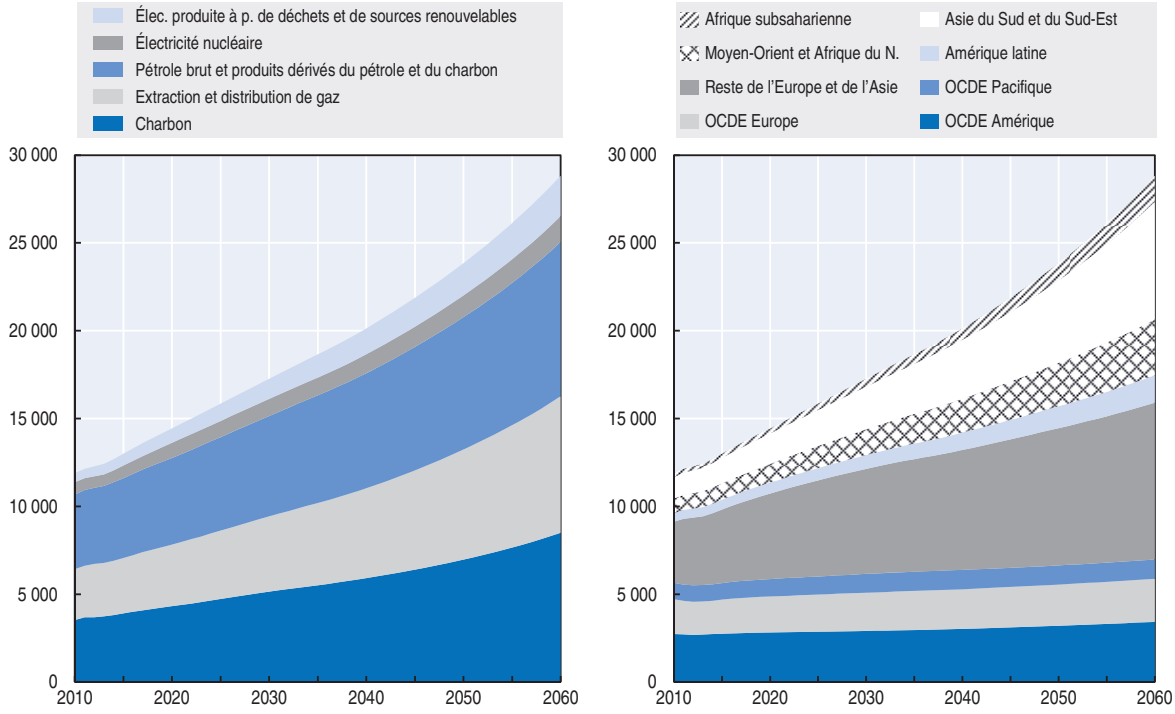
bon marché entraîne une hausse de la consommation de charbon, qui en l'absence de tarification du carbone constitue une ressource abondante et bon marché. Dans les régions de l'OCDE, toutefois, la consommation énergétique devrait basculer vers une consommation accrue de gaz, notamment aux États-Unis. Par ailleurs, les améliorations de l'efficacité énergétique dominent et impliquent une dissociation relative entre consommation énergétique et croissance économique. Les effets sur la production d'énergie par combustible et par région sont présentés dans le graphique 2.4.

2.1.3. Augmentation des émissions de gaz à effet de serre et de la température

Le graphique 2.5 illustre la façon dont les activités économiques de référence conduisent à une augmentation constante des émissions à l'échelle régionale et mondiale. Les émissions anthropiques mondiales de gaz à effet de serre (GES) (hors émissions liées à l'utilisation des terres, au changement d'affectation des terres et à la foresterie, qui sont traitées de façon exogène) devraient passer d'environ 45 gigatonnes (Gt) d'équivalent CO_2 en 2010, à environ 95 Gt d'équivalent CO_2 en 2060. Le dioxyde de carbone (CO_2) devrait rester le principal gaz à effet de serre. L'accroissement rapide des émissions concorde avec les principales projections démographiques indiquant une augmentation de la population, une intensification de l'activité économique et une plus grande consommation de combustibles fossiles. Malgré un ralentissement de la croissance de la population et du PIB, le basculement de l'importance économique en faveur des économies émergentes et des économies en développement et – en l'absence de nouvelles politiques climatiques – l'utilisation toujours plus intensive de combustibles fossiles conduisent à une forte augmentation des émissions

Graphique 2.4. **Production d'énergie primaire, projection de référence sans dommages**

Millions de tonnes équivalent pétrole



Source : Modèle ENV-Linkages à partir des données de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) (2014).

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399582

de GES. Le volume des émissions s'accélère avec l'augmentation de la consommation de charbon (comme expliqué dans la section précédente). On observe cependant un découplage relatif : les émissions progressent plus lentement que la production.

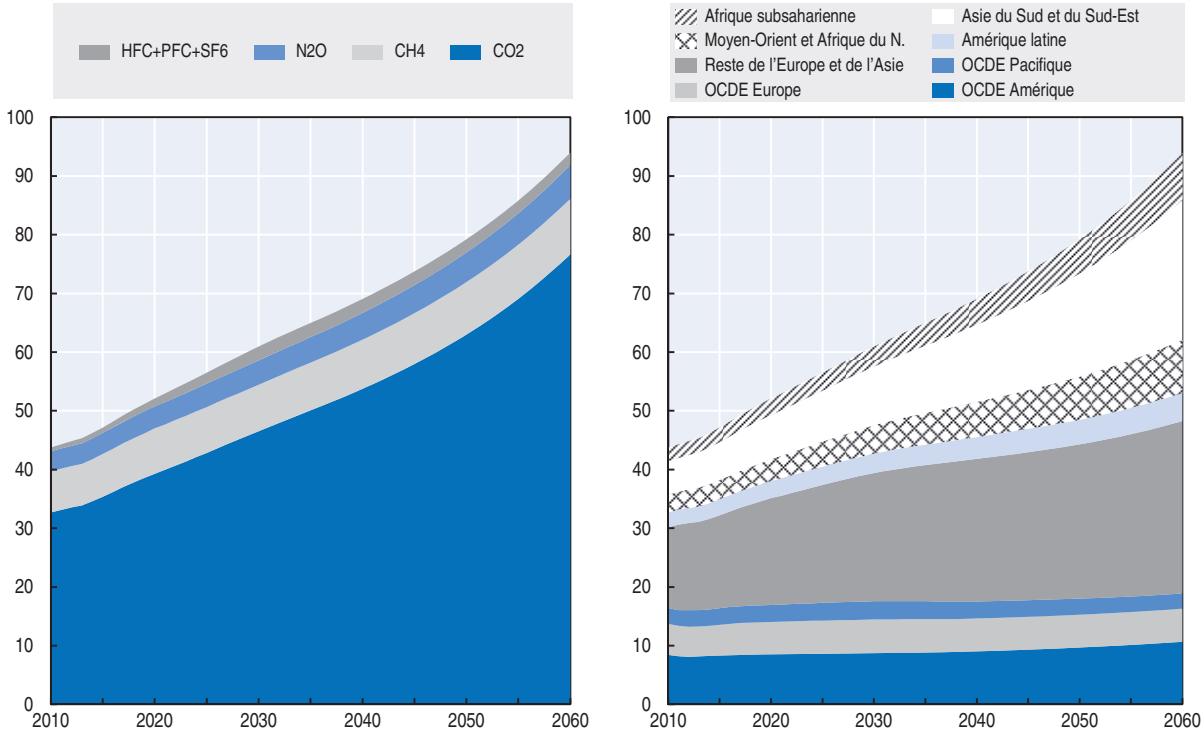
L'augmentation rapide des émissions de GES accélère le changement climatique. Bien que le système climatique soit très complexe et que la hausse des concentrations de carbone déclenche une série de processus biophysiques (GIEC, 2014a), c'est sur les conséquences économiques du changement climatique que porte le présent rapport. Par conséquent, seules les principales étapes de la relation entre l'activité économique et le changement climatique sont résumées : les concentrations mondiales de CO_2 et de l'ensemble des GES en équivalent CO_2 (graphique 2.6), le forçage radiatif (autrement dit les variations du rayonnement de la terre dues aux concentrations accrues de GES) provenant de sources anthropiques (graphique 2.6) et l'accroissement des températures moyennes mondiales par rapport aux niveaux préindustriels (graphique 2.7). Entre 2010 et 2060, les concentrations de CO_2 dans l'atmosphère sont passées de 390 parties par million (ppm) à 590 ppm. Ces niveaux de concentration, auxquels s'ajoute le forçage imputable à d'autres GES et aérosols, conduisent à une augmentation du forçage radiatif total provenant de sources anthropiques, qui passe d'un peu plus de 2 à près de 5 watts par mètre carré (W/m^2).

L'évolution des températures induite par ces concentrations de carbone et par le forçage radiatif est entachée d'un degré élevé d'incertitude.

La sensibilité climatique à l'équilibre (SCE) est la variation à l'équilibre du système climatique, c'est-à-dire l'augmentation à long terme de la température moyenne à la surface du globe suite au doublement des concentrations de carbone, et elle est souvent

Graphique 2.5. **Évolution des émissions de gaz à effet de serre, projection de référence sans dommages**

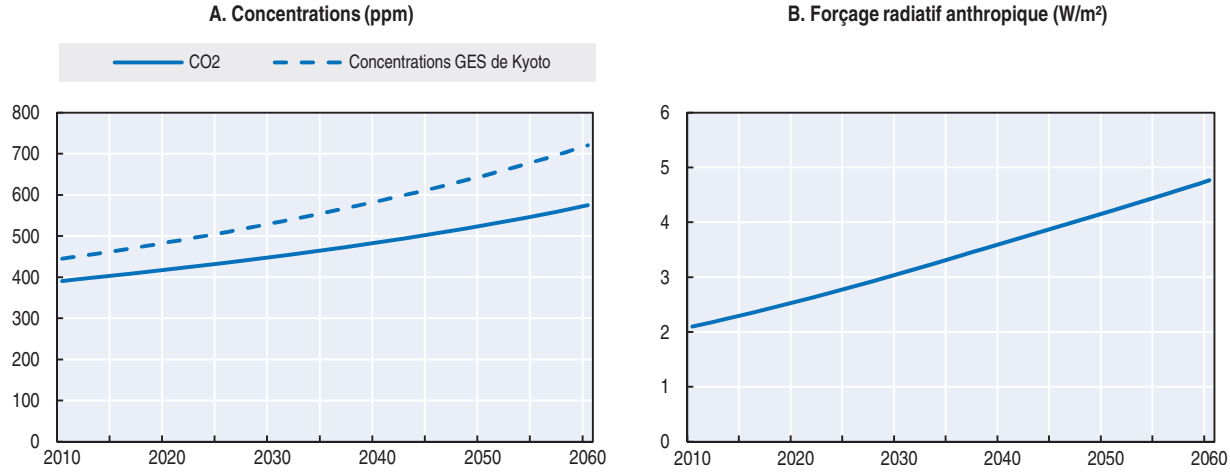
Gigatonnes d'équivalent CO_2



Source : Modèle ENV-Linkages.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399593

Graphique 2.6. **Indicateurs climatiques clés, projection de référence sans dommages**



Source : Modèle ENV-Linkages et modèle MAGICC6.4 (Meinshausen et al. 2011).

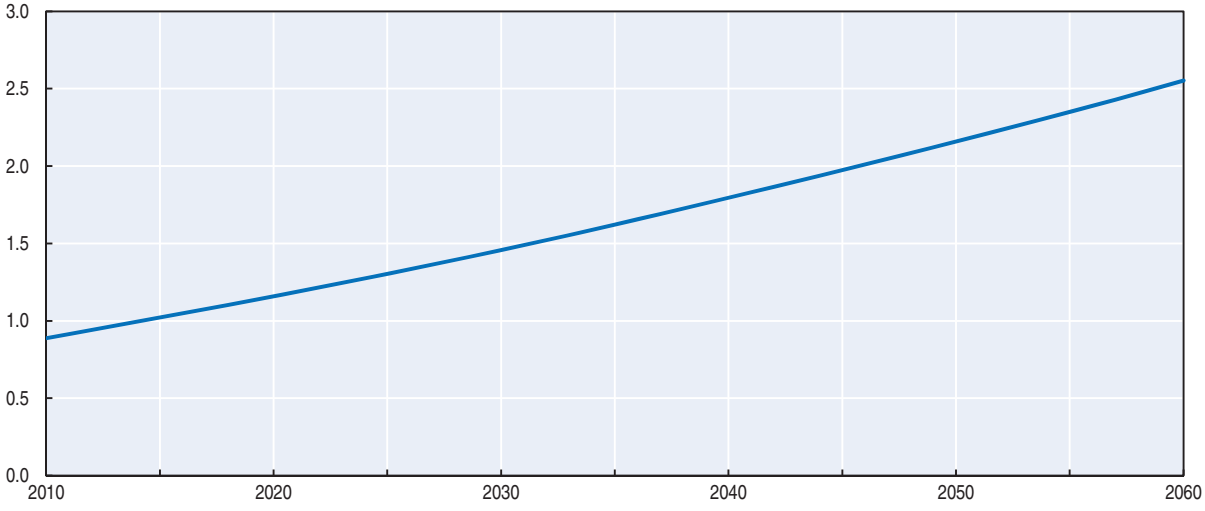
StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399600

utilisée pour représenter de manière simplifiée les principales incertitudes entourant le système climatique. Selon le GIEC (2013), « la sensibilité du climat à l'équilibre détermine le réchauffement qui doit se produire en réponse à la stabilisation de la composition de l'atmosphère sur plusieurs siècles ».

Il existe différentes façons d'estimer les valeurs de la SCE, les plus usuelles étant l'utilisation de modèles climatiques instrumentaux, ou les observations paléoclimatiques. La projection centrale utilise une valeur de sensibilité climatique à l'équilibre de 3 °C, même si le GIEC n'a pas spécifié de valeur médiane. La sensibilité climatique peut fluctuer entre 1.5 °C et 4.5 °C dans la fourchette d'incertitude probable, et entre 1 °C et 6 °C dans la fourchette d'incertitude plus large, ce qui cadre avec les intervalles d'incertitude indiqués dans le cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (Rogelj et al. 2012 ; GIEC, 2013). La projection centrale suppose des hausses de température de plus de 2.5 °C en 2060, comme l'illustre le graphique 2.7. Cette augmentation de la température mondiale en 2060 est affectée par l'incertitude qui entoure la sensibilité climatique à l'équilibre ; la fourchette probable se situe entre 1.6 et 3.6 °C, tandis que la fourchette la plus large va de 1.1 à 4.3 °C.

Graphique 2.7. **Augmentation moyenne de la température mondiale, projection de référence sans dommages**

Degrés Celsius au-dessus des niveaux préindustriels



Source : Modèle ENV-Linkages et modèle MAGICC6.4 (Meinshausen et al. 2011).

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399617

Les effets régionaux du changement climatique quantifiés dans cette étude (voir le chapitre 1) sont fondés sur des projections plus détaillées des variations régionales des températures et des précipitations. Des incertitudes quant aux tendances régionales du changement climatique existent même pour une SCE donnée et sont encore plus importantes que celles qui concernent les modifications de la température moyenne mondiale, mais elles ne peuvent pas être intégralement prises en compte dans la simulation des dommages économiques.

Une analyse de robustesse plus élaborée, faisant varier le modèle climatique sous-jacent et fondée sur des résultats tirés d'un éventail de modèles pour le système climatique, les rendements agricoles et l'hydrologie, est laissée à la recherche future. Le projet ISI-MIP (Schellnhuber et al. 2014) fournit un premier aperçu des possibilités de recourir à un exercice de comparaison fondé sur une combinaison de modèles pour clarifier différentes incertitudes.

2.2. Projections régionales et macroéconomiques centrales des dommages causés par certains effets du changement climatique

2.2.1. Conséquences macroéconomiques

Les répercussions régionales du changement climatique présentées dans la section 1.4 se font sentir dans les économies de tous les pays du monde, mais les disparités régionales sont importantes. Les incidences s'accentuent au fil du temps, mais elles sont déjà mesurables dans les décennies à venir, ce qui suggère que les conséquences du changement climatique ne sont pas simplement un problème appartenant à un avenir lointain[3].

Plus important peut-être, les émissions rejetées d'ici à 2060 entraîneront une dégradation du profil de risque auxquels le monde devra faire face : pérennisation d'infrastructures à fortes émissions, poursuite des dommages pendant un siècle ou plus, et risque accru de perturbations de grande ampleur (« catastrophes ») (voir le chapitre 1). D'autres impacts exclus de l'analyse mais qui pourraient être très lourds de conséquences économiques sont examinés au chapitre 3. Ces éléments constituent des sources supplémentaires d'incertitude et, s'il est possible que certains secteurs puissent en tirer profit dans certaines régions, en fin de compte les coûts de l'inaction présentés dans ce chapitre sous-estiment probablement le coût total des effets du changement climatique (voir le chapitre 3 et GIEC, 2014a).

Comme le montre le graphique 2.8A, les régions les plus vulnérables sur le plan économique, pour les impacts considérés dans le modèle EGC, se situent en Afrique et en Asie, avec des pertes de PIB en 2060 de 3.3 % pour le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord, 3.7 % pour l'Asie du Sud et l'Asie du Sud-Est, et 3.8 % pour l'Afrique subsaharienne. Il s'agit, dans une large mesure, de pays relativement pauvres et fortement peuplés qui n'ont pas les capacités suffisantes pour faire face à des effets néfastes importants. Jusqu'en 2040, les répercussions sur ces trois régions sont très similaires, mais au cours de la dernière décennie, on commence à observer des différences, particulièrement en Asie du Sud et en Asie du Sud-Est où les dommages augmentent rapidement.

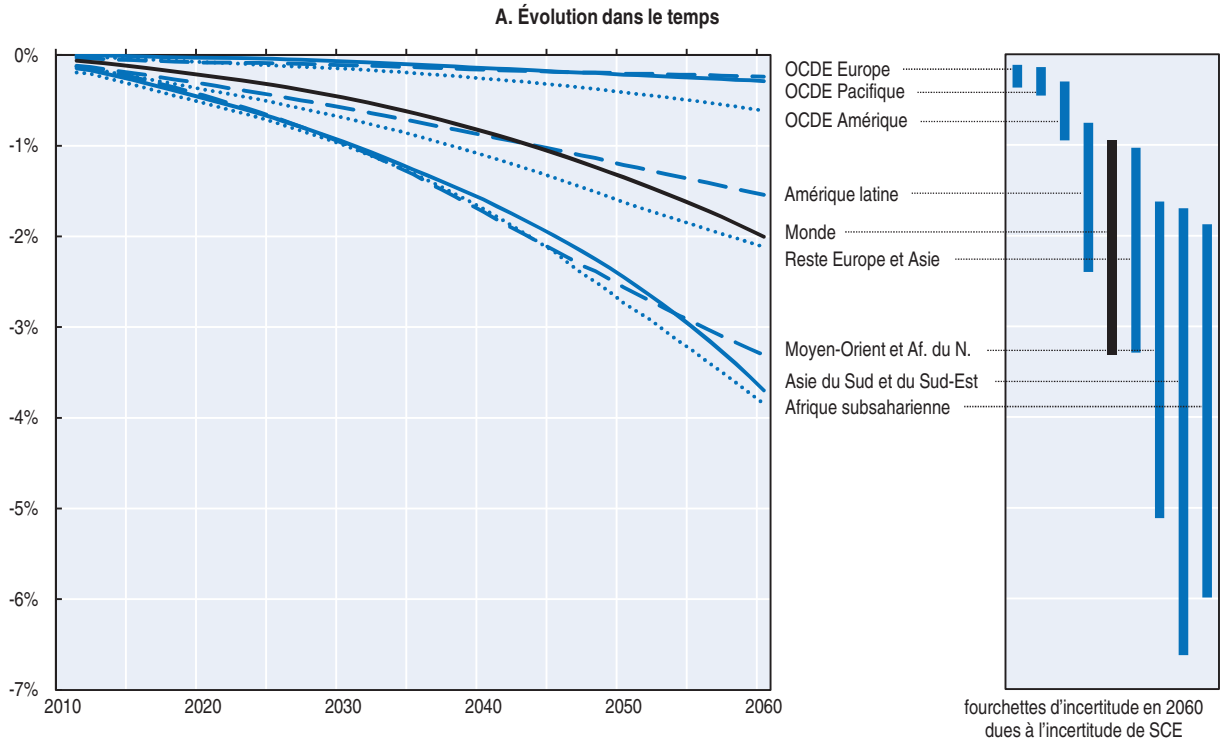
Les impacts en Amérique latine (-1.5 % en 2060) et dans le reste de l'Europe et de l'Asie (qui comprend la Chine et la Russie ; perte de PIB de 2.1 % d'ici à 2060) sont assez comparables à la perte moyenne de PIB à l'échelle mondiale, qui se chiffre à 2.0 %. Les économies des pays de l'OCDE sont, dans l'ensemble, nettement moins touchées, avec des pertes représentant en 2060 -0.2%, -0.3% et -0.6% pour l'OCDE Europe, l'OCDE Pacifique et l'OCDE Amérique, respectivement, ce qui s'explique essentiellement par le fait que nombre de ces pays bénéficient de climats tempérés.

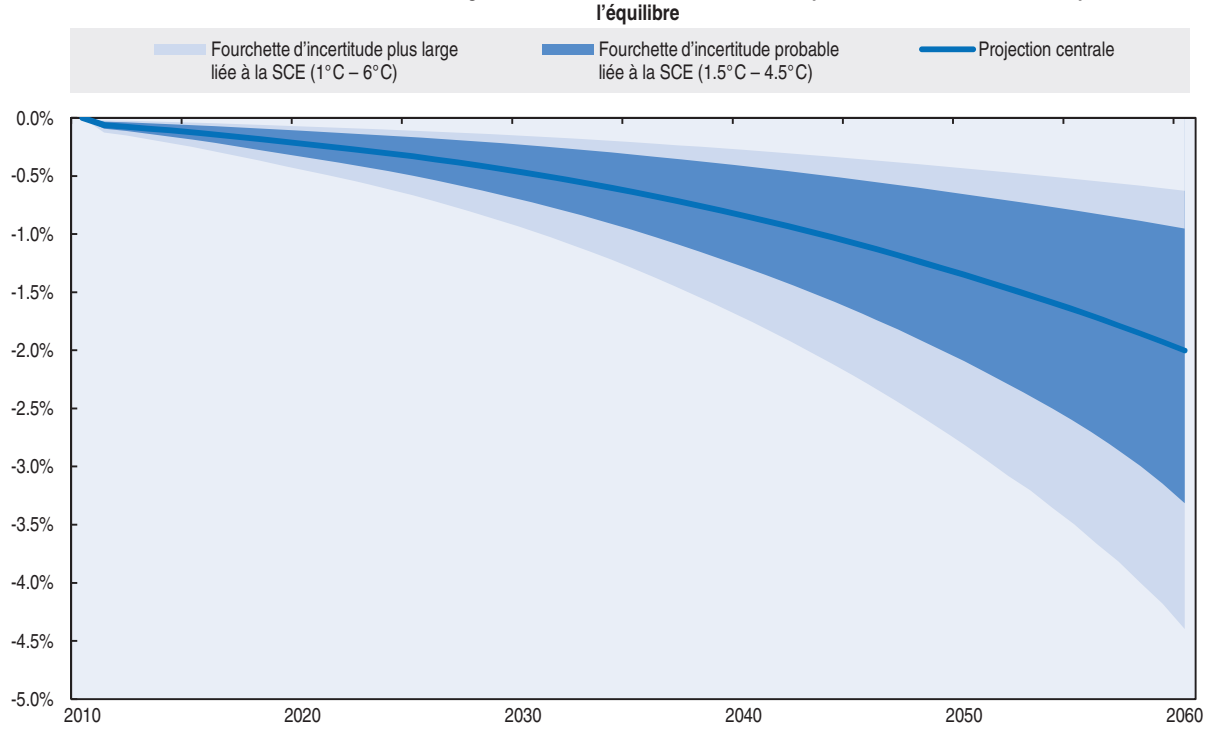
Les chiffres présentés sont bien entendu des projections centrales et le graphique 2.8A montre également les marges d'incertitude associées à ces projections régionales du fait de l'incertitude qui entoure la sensibilité climatique à l'équilibre. Il existe aussi d'autres sources d'incertitude et les projections régionales ont généralement tendance à être beaucoup plus incertaines.

À ce niveau d'agrégation, toutes les régions sont touchées par le changement climatique. Les dommages devraient également augmenter plus vite que le PIB mondial. Il convient cependant de mettre en regard ces projections et la croissance du PIB dans la projection de référence sans dommages : jusqu'en 2060, les projections indiquent que le changement climatique aura tendance à ralentir la croissance économique (voir aussi la section 2.2.3) sans toutefois la stopper complètement. En outre, certaines des conséquences majeures sont observées dans des régions dont le taux de croissance est relativement élevé en l'absence de changement climatique (comparer le graphique 2.8 au tableau 2.1). Par

Graphique 2.8. **Dommages régionaux résultant des impacts climatiques considérés, projection centrale**

Variation en pourcentage du PIB régional par rapport á la projection de référence sans dommages





Source : Modèle ENV-Linkages.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399623

conséquent, l'une des conséquences principales du changement climatique – tout au moins dans cette simulation – est qu'il ralentit, sans l'arrêter, le rythme auquel les économies non membres de l'OCDE rattrapent les niveaux de revenu des pays membres de l'OCDE.

Les divers impacts climatiques présentant des profils temporels différents, le profil temporel des variations du PIB diffère également d'une région à l'autre. Dans les régions les plus vulnérables, les dommages progressent de façon non linéaire dans le temps (et avec le changement climatique). Cette non-linéarité des dommages régionaux et mondiaux dans le temps résulte de la combinaison de plusieurs mécanismes clés. Premièrement, les effets négatifs augmentent plus que proportionnellement à la hausse des températures régionales. Même si la projection de hausse moyenne de la température mondiale est plus ou moins linéaire (voir le graphique 2.7), la gravité des impacts biophysiques augmente plus rapidement. Ceci vaut notamment pour les pertes de rendement dans l'agriculture. Dans ce secteur – en particulier dans les zones tempérées – des hausses de température modérées n'affectent pas les rendements (elles peuvent même leur être bénéfiques), mais au-delà d'un certain seuil, elles provoquent une accélération des pertes de rendement. Deuxièmement, la non-linéarité résulte des possibilités limitées de l'économie de s'adapter aux changements en matière d'approvisionnement et de productivité des facteurs. Lorsque les changements sont minimes, les redéploiements au sein d'un même secteur ou d'une même région et entre régions différentes sont relativement faciles à opérer, mais quand les chocs sont plus importants, les coûts de redéploiement augmentent considérablement. Troisièmement, les pertes sont plus marquées dans les régions où les projections indiquent de forts taux de croissance, et qui d'année en année représentent une plus large part du PIB mondial ; cette évolution modifie le poids des différentes régions dans la moyenne mondiale, d'où la non-linéarité des dommages mondiaux. Quatrièmement, certains des impacts simulés ici affectent directement le taux de croissance de l'économie et pas uniquement le niveau du PIB. Cela vaut surtout pour ceux qui impliquent une destruction du stock de capital, tels que les dommages côtiers, qui ont des effets permanents sur l'économie. Bien qu'en 2060 tous ces mécanismes restent assez modestes, ils se conjuguent en une tendance clairement non linéaire, et donnent à penser que les dommages après 2060 pourraient augmenter de plus en plus vite.

Les projections économiques basées sur les incidences du changement climatique sont toutefois incertaines. Les bandes par régions situées sur le côté droit du graphique 2.8 (A et B) montrent un élément de l'incertitude (liée à la sensibilité climatique à l'équilibre) qui pèse sur ces projections. La projection centrale, qui conduit à des pertes de PIB augmentant progressivement pour atteindre 2 % en 2060, représente la projection la plus plausible calculée à partir des données disponibles pour le sous-ensemble d'impacts étudiés. Ces projections sont entourées de grandes marges d'incertitude relatives au système économique et climatique, à l'évaluation des impacts climatiques et à la façon dont ceux-ci se répercutent sur l'économie. Comme on l'a vu plus haut, elles ne représentent pas non plus l'intégralité des coûts économiques du changement climatique, car elles ne tiennent pas compte de tous les impacts marchands et excluent la plupart des éléments des impacts non marchands. Le graphique 2.8B fait apparaître une large marge d'incertitude correspondant au degré de sensibilité à l'équilibre du système climatique par rapport à l'accumulation de carbone (SCE). En 2060, les pertes annuelles de PIB pour la fourchette probable de SCE se situent entre 1.0 % et 3.3 %, mais on ne peut exclure la possibilité que ces pertes globales résultant des impacts pris en compte dans le modèle se situent dans une fourchette plus large allant de 0.6 % à pas moins de 4.4 %. Étant donné

que cette approximation des conséquences de l'incertitude relatives au système climatique est probablement moins fiable au niveau sectoriel, les fourchettes d'incertitude de la SCE ne sont présentées que pour les résultats macroéconomiques. Les incertitudes au niveau régional seront examinées plus en détail ci-dessous.

Faute de données fiables, ces calculs reposent sur un certain nombre d'hypothèses formulées pour l'occasion, en particulier celle selon laquelle l'échelle des impacts climatiques est proportionnelle à la valeur du paramètre de sensibilité climatique à l'équilibre, Si les dommages augmentent plus que proportionnellement à ce paramètre, les pertes de PIB potentielles seront supérieures à celles indiquées dans le graphique 2.8. Les fourchettes d'incertitude mentionnées dans l'ensemble de ce document portent uniquement sur cette incertitude particulière, qui est toutefois importante. L'encadré 2.1 récapitule les incertitudes présentes aux différentes étapes ; les chapitres 3 et 4 proposent une réflexion plus générale sur les incertitudes.

Encadré 2.1. **Principales incertitudes entachant les projections des dommages**

Des incertitudes peuvent apparaître à toutes les étapes du processus de calcul des dommages imputables au changement climatique (voir le graphique 1.1 pour une représentation simplifiée de ces étapes). Les principales incertitudes interviennent notamment dans :

1. les projections des déterminants socio-économiques de la croissance économique ;
2. les projections relatives au mix énergétique utilisé pour produire l'énergie ;
3. les projections relatives à l'intensité d'émission des autres sources (émissions générées par le changement d'affectation des terres, par exemple) ;
4. les projections concernant le système climatique qui lient les émissions aux variations de température, y compris la SCE ;
5. les projections concernant les tendances régionales du changement climatique ;
6. les projections relatives aux effets du changement climatique sur certaines catégories d'impact ;
7. les projections des conséquences économiques de ces impacts, y compris l'attribution d'une valeur aux impacts non marchands.

Il n'entre pas dans le cadre du présent rapport de quantifier chacune de ces incertitudes lesquelles, de surcroît, ne sont pas indépendantes les unes des autres. Les rapports du GIEC étudient dans le détail toutes ces incertitudes mais ne se prononcent pas véritablement sur le type d'incertitudes le plus important. Dans sa réflexion sur le coût social du carbone (CSC), cependant, le GIEC constate que les estimations peuvent aller du simple à plus du double selon les hypothèses concernant les futures conditions démographiques, et être multipliées par trois environ si l'on tient compte des incertitudes et par au moins quatre selon le taux d'actualisation ou les fonctions de dommage considérées (GIEC, 2014a). En dépit de l'importance des incertitudes, les données scientifiques indiquent on ne peut plus clairement que le climat est en train de changer sous l'effet des émissions de GES. Les incertitudes renvoient par conséquent à l'ampleur des impacts et des variations régionales/locales, et non à la réalité du changement climatique.

Wilby et Dessai (2010) offrent une analyse conceptuelle éclairante de l'incertitude dans le contexte de l'adaptation. Heal et Millner (2013) examinent les diverses sources d'incertitude

Encadré 2.1. **Principales incertitudes entachant les projections des dommages** *(suite)*

concernant l'économie du changement climatique, et soulignent que de nombreuses incertitudes sont incompressibles et qu'à des échelles spatiales plus fines, elles « explosent ». Anthoff et Tol (2013) évaluent les incertitudes en procédant à une vaste décomposition analytique à l'aide du modèle FUND. Watkiss et Hunt (2012) combinent par paires les scénarios socio-économiques, les résultats de modèles climatiques régionaux, les fonctions de mortalité liée à la température, les hypothèses concernant l'acclimatation et les unités de mesure pour projeter les impacts économiques du changement climatique sur la santé humaine. Des projets de comparaison multi-modèles à grande échelle, tels que le projet ISI-MIP (Schellnhuber et al., 2014) apportent d'autres informations sur l'ampleur des diverses incertitudes. Ainsi, Hinkel et al. (2014) appliquent la philosophie d'ISI-MIP en utilisant plusieurs simulations climatiques et une analyse de sensibilité très complète des dommages causés par les inondations côtières et des coûts d'adaptation dus à l'élévation du niveau de la mer (sans évaluer toutefois les conséquences macroéconomiques).

Une série d'autres travaux vise, non pas à comparer les incertitudes aux différentes étapes, mais plutôt à comprendre comment les incertitudes affectent le coût social du carbone (CSC). Otto et al. (2013), par exemple, étudient comment les propriétés des différents systèmes climatiques conditionnent le CSC. Tol (2002 ; 2012) utilise des techniques économétriques pour effectuer une méta-analyse quantitative de la documentation afin d'évaluer les principales estimations et incertitudes concernant le CSC. EPRI (2014) propose une étude détaillée des valeurs du CSC utilisées par les responsables des politiques réglementaires aux États-Unis pour évaluer s'il est correctement tenu compte des incertitudes dans les estimations existantes.

Dans le présent rapport, l'analyse de sensibilité sur la SCE tente de rendre compte, au moins partiellement, des incertitudes à l'étape 4. Certaines autres incertitudes, aux étapes 5-7, sont illustrées au cas par cas dans les chapitres 2 et 3 en présentant les résultats de différents modèles climatiques, et en faisant varier, par exemple, le modèle de cultures et l'hypothèse de fertilisation par le CO2 pour les impacts agricoles.

L'un des aspects les plus utiles du point de vue de l'action publique est de savoir si les incertitudes économiques (étape 1) sont plus importantes que celles concernant le système et les impacts climatiques (étapes 4-6). Si les premières sont plus importantes, cela signifie que les projections qui indiqueront des dommages élevés risquent d'être également celles dans lesquelles les revenus seront élevés. Dans ce cas, un planificateur ayant une aversion pour le risque ne devrait pas chercher à empêcher de tels scénarios, mais plutôt appliquer un taux d'actualisation relativement élevé (Gollier, 2007, 2012 ; Nordhaus, 2013 ; Dietz et al., 2015) ; en effet, de fortes incertitudes économiques impliquent d'importants avantages potentiels générés par les mesures d'atténuation, et l'application de taux d'actualisation élevés. Si toutefois les incertitudes aux étapes ultérieures dominent, le taux d'actualisation devra être plus faible et des mesures plus ambitieuses devront être prises immédiatement pour éviter des conséquences potentiellement très graves (faibles revenus, dommages importants). Naturellement, les risques d'événements climatiques majeurs et les incertitudes concernant les évolutions climatiques et l'évaluation des impacts qui ne sont pas liés aux incertitudes économiques justifient une prime de risque.

Nonobstant les mises en garde sur les incertitudes qui les entourent et leur caractère incomplet, les projections cadrent avec les travaux publiés sur les dommages économiques quantifiés. Dans son tout dernier rapport, le Groupe de travail II du Groupe d'experts

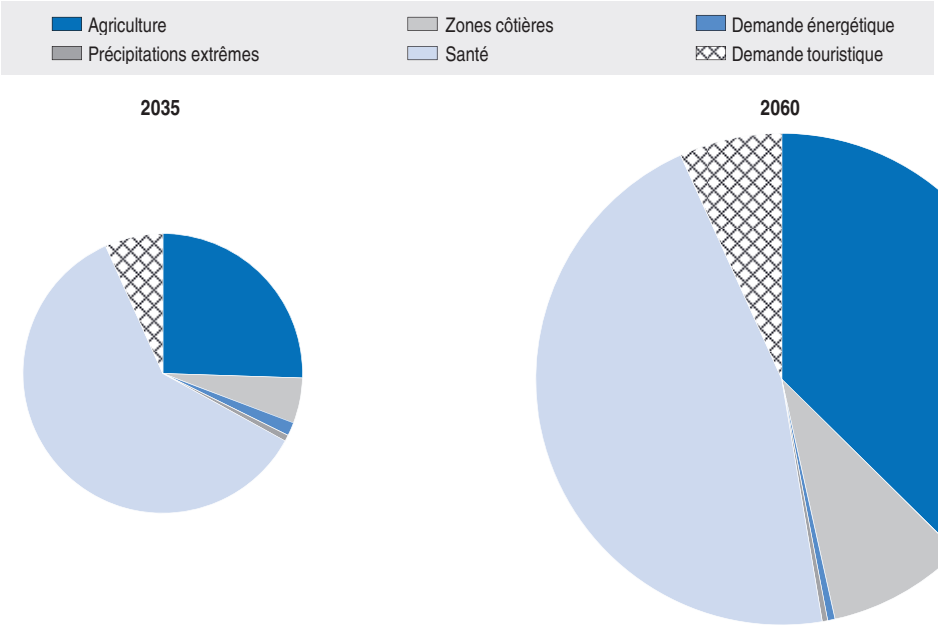
intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2014a) a passé en revue les publications sur la question et conclu (chapitre 1) qu'en cas d'élévation de la température de 2.5 °C, les pertes économiques à l'échelle du globe pourraient représenter entre 0.2 % et 2.0 % du revenu (degré moyen d'évidence, concordance moyenne) (sans référence à une date spécifique). Dans la projection centrale du modèle ENV-Linkages, ce seuil est atteint juste avant 2060. Étant donné le large éventail d'impacts pris en compte dans cette analyse, il n'est pas surprenant que les pertes de PIB projetées ici se situent dans la fourchette haute établie par le GIEC. Malgré d'importantes différences entre l'approche de modélisation et le calibrage adoptés ici et ceux des précédentes études économiques des dommages climatiques (surtout en ce qui concerne le calibrage des impacts et la spécification de la réponse économique par des effets de substitution nationaux et internationaux), on observe des schémas similaires dans les travaux de Nordhaus (2007 ; 2011), Eboli et al. (2010), Bosello et al. (2012), Roson et Van der Mensbrugghe (2012), Bosello et Parrado (2014) et Ciscar et al. (2014), par exemple. Selon ces études, les impacts à l'échelle mondiale augmentent plus que proportionnellement aux températures (et cette tendance s'accentue au fil du temps) et aboutissent à des diminutions du PIB de plusieurs points de pourcentage à la fin du siècle. Les conséquences les plus marquées devraient se produire dans les pays émergents et dans les pays en développement, surtout en Asie du Sud et du Sud-Est et en Afrique, alors que les pays situés à une latitude élevée dans l'hémisphère nord, en particulier la Russie, pourraient tirer quelque avantage économique du changement climatique. Les études qui se concentrent sur une région ou un impact en particulier tendent à révéler des effets préjudiciables plus importants sur l'économie locale, mais elles ne tiennent pas compte, par nature, des processus d'ajustement endogènes qui se mettent en place au sein des économies, pas plus que des variations des courants d'échanges internationaux.

Par rapport à l'analyse préliminaire exposée dans Dellink et al. (2014), les dommages présentés ici sont plus importants. Alors que l'analyse préliminaire avait projeté des pertes globales de PIB mondial de 0.7 % à 2.5 %, le présent rapport fait état de pertes qui pourraient aller de 1.0 % à 3.3 % en 2060. Deux types de changements affectent ce résultat modifié. Premièrement, un nombre important d'impacts climatiques ont été ajoutés à l'analyse, dont le stress thermique au travail et certains aspects des précipitations extrêmes. Tous ces éléments ont des conséquences négatives pour la majorité des pays. Deuxièmement, les impacts sur les services écosystémiques, qui renvoient davantage à l'évaluation du consentement à payer qu'à celle d'impacts marchands, ont été retirés de la modélisation et inclus dans le chapitre 3 dans une évaluation distincte. Il en a été décidé ainsi pour mieux rendre compte de la nature des projections de perte de biodiversité et de services écosystémiques, qui se basent sur une évaluation du consentement à payer plutôt que des dommages marchands. De plus, la révision du modèle pour y inclure huit secteurs de production agricole au lieu d'un et la modification de la source de données pour les impacts sur le rendement des cultures impliquent des changements dans la façon dont les économies font face aux pertes de rendement.

Les conséquences économiques du changement climatique varient selon les différents impacts considérés dans les travaux de modélisation, les incidences sur la santé et l'agriculture (si l'on exclut l'effet fertilisant du CO_2) contribuant plus que les autres au ralentissement de la croissance économique. Le graphique 2.9 montre que parmi les incidences mesurées dans l'analyse, ce sont les impacts sanitaires qui prédominent au cours de la décennie actuelle. Les pertes de productivité de la main-d'œuvre résultant du stress thermique au travail dominent, même si les chiffres ne tiennent pas compte de la

Graphique 2.9. **Imputation des dommages aux impacts climatiques considérés, projection centrale**

Variation en pourcentage du PIB par rapport à la projection de référence sans dommages



Source : Modèle ENV-Linkages ; le tableau 1.1 au chapitre 1 indique quels impacts sont modélisés dans chaque catégorie.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399632

diminution du bien-être social liée aux décès prématurés (voir le chapitre 3). En 2060, les impacts sanitaires débouchent sur une perte de PIB de 0.9 % dans la projection centrale. Cette prédominance des pertes de productivité de la main-d'œuvre imputable au stress thermique au travail est également relevée dans Roson et Van der Mensbrugghe (2012) et Ciscar et al. (2014), alors que les études qui montrent une prédominance des impacts agricoles ont tendance à exclure les effets de stress thermique (par exemple Bosello et al. 2012 ; Bosello et Parrado, 2014).

Au fil du temps, l'agriculture apparaît comme une deuxième catégorie majeure d'impacts (du moins si l'on exclut l'effet fertilisant du CO_2, comme dans la projection centrale) : entre 2040 et 2060, les dommages sanitaires font moins que doubler, tandis que les dommages causés à l'agriculture triplent. D'ici à 2060, les dommages à l'agriculture (pêche comprise) représentent une perte de PIB de 0.8 %. Bien que la part de l'agriculture dans le PIB demeure modeste dans la plupart des régions, les répercussions sur le rendement devraient s'avérer assez importantes (voir Rosenzweig et al. 2013). Cette projection des dommages agricoles fait l'objet d'une analyse de sensibilité dans la section 2.2.5, faisant varier les hypothèses qui sous-tendent les impacts s'agissant du modèle de culture utilisé pour projeter les chocs sur les rendements, du modèle climatique utilisé pour projeter les tendances régionales du changement climatique et, surtout, de l'effet de fertilisation du CO_2. Dans la mesure où la sécurité alimentaire mondiale augmente sensiblement dans la projection de référence sans dommages, il se peut que dans l'ensemble, la sécurité alimentaire ne soit pas être trop menacée si la structure des échanges reste suffisamment souple pour s'adapter aux variations de la productivité de chaque région, mais il n'entre pas dans le cadre de ce rapport d'étudier dans le détail les questions de sécurité alimentaire.

En ce qui concerne les zones côtières et la demande touristique, les dommages économiques, pour les impacts considérés dans le modèle EGC, sont plus faibles et représentent respectivement 0.2 % et 0.1 % de perte de PIB. Soulignons que ces chiffres ne correspondent pas à l'ensemble des coûts économiques de ces secteurs, comme on le verra dans le prochain chapitre. En particulier pour les zones côtières, les impacts se feront probablement sentir plus fortement au cours des décennies ultérieures ; entre 2040 et 2060, l'aggravation des dommages aux zones côtières devient même supérieure à l'aggravation des dommages causés à l'agriculture. Les dommages mondiaux imputables à l'énergie sont très faibles car l'augmentation des besoins de refroidissement étant compensée en partie par la diminution des besoins de chauffage. Enfin, les projections des conséquences économiques des événements extrêmes (ouragans) sont négligeables à l'échelle mondiale, ce qui s'explique au moins en partie par le fait que les dommages causés par les inondations ne sont pas pris en compte dans l'évaluation quantitative ; en outre, les dommages causés par le stress thermique sur les êtres humains, qui sont significatifs, sont intégrés dans la catégorie des incidences sur la santé, tandis que les conséquences du stress thermique sur les cultures sont intégrées dans la catégorie des impacts sur l'agriculture.

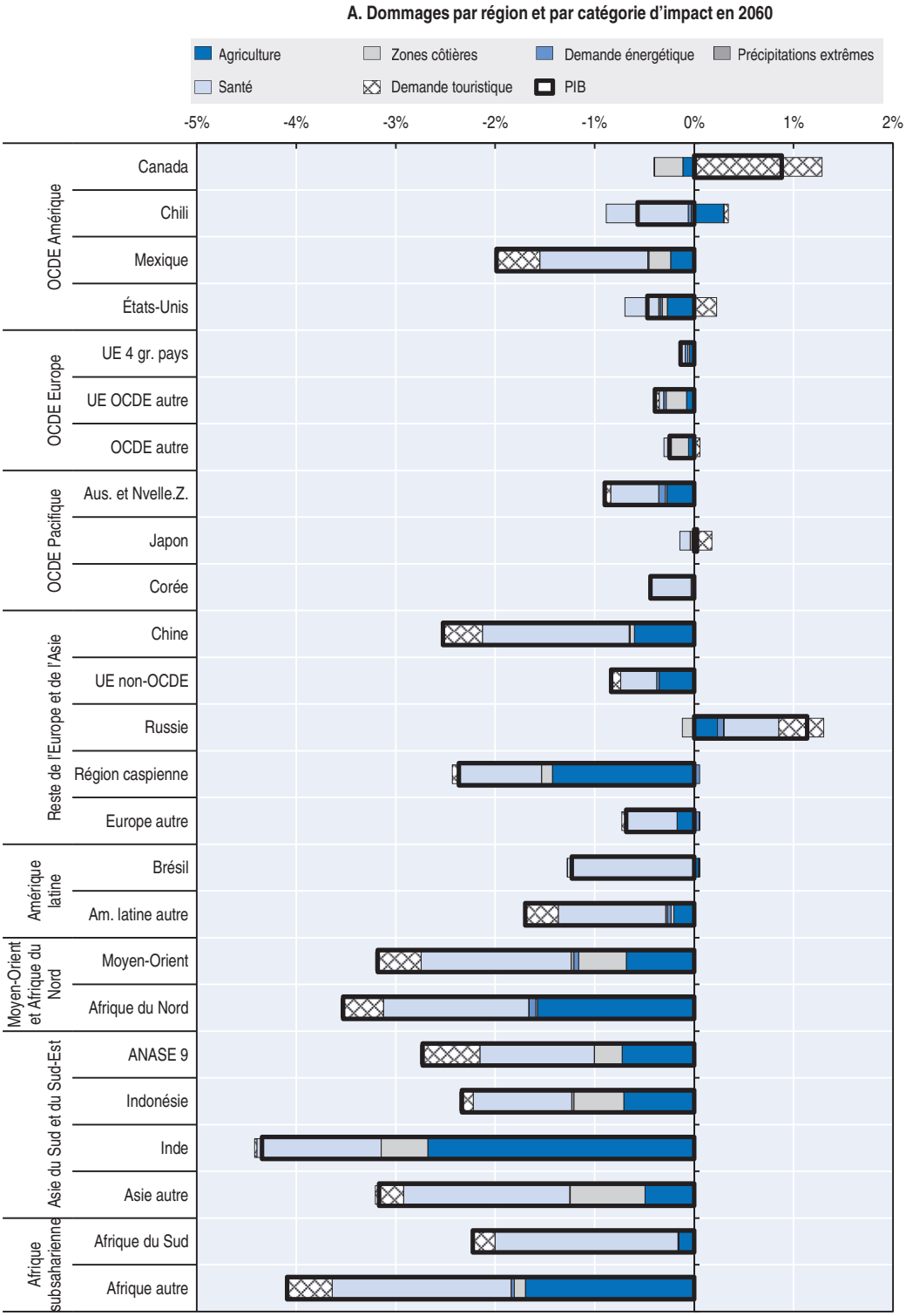
2.2.2. Conséquences régionales

Étant donné que les impacts du changement climatique varient largement selon les régions, et que les économies reposent sur des structures économiques différentes, une analyse régionale plus détaillée peut permettre de mieux voir à quel endroit les conséquences économiques des impacts du changement climatique considérés sont les plus importantes. Bien que les incertitudes entourant les modifications du système climatique soient plus grandes à l'échelle régionale qu'à l'échelle mondiale, l'analyse peut être étendue au niveau des 25 régions du modèle ENV-Linkages. Le graphique 2.10A montre que le changement climatique a des effets sensiblement différents au niveau des ensembles régionaux macro-économiques du modèle. Sur les 25 régions présentées dans le graphique 2.10A, le changement climatique a des conséquences négatives pour 22 régions représentant actuellement 94 % de l'économie mondiale et 97 % de la population mondiale[4], et toutes les régions sont touchées par au moins certaines de ces conséquences négatives.

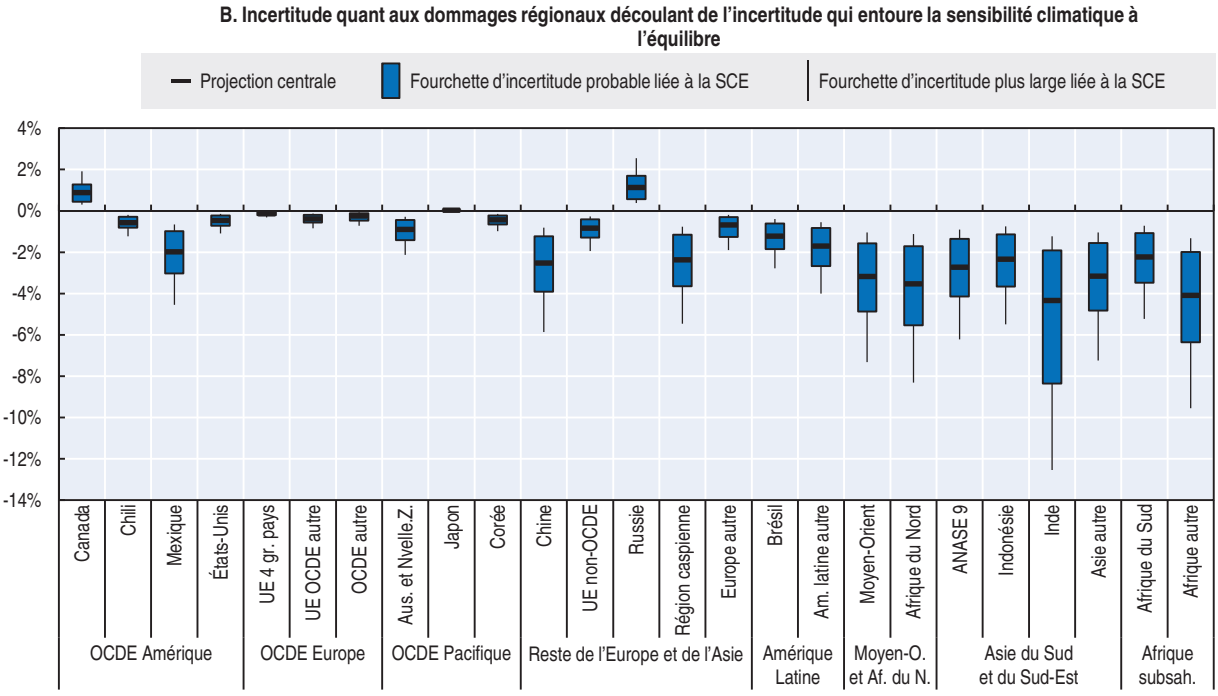
Pour la plupart des pays et des régions, les conséquences économiques du changement climatique seront clairement négatives. Conformément aux résultats pour l'ensemble du globe, les impacts sur la santé et sur l'agriculture apparaissent en général comme les plus importants dans les analyses sur modèle, encore qu'en 2060 de nombreux pays vulnérables souffriront également des effets de l'élévation du niveau de la mer sur leurs zones côtières, et il est probable que les conséquences de cette catégorie d'impacts particulière deviennent encore plus prononcées après 2060. Les impacts régionaux sur la demande touristique varient encore davantage selon les régions que les autres impacts : certains pays en retirent des avantages, tandis que d'autres subissent des pertes importantes. Ces disparités sont en partie dues à la nature des incidences biophysiques, notamment à leur dépendance aux changements climatiques régionaux, mais également aux liens commerciaux entre les pays. À titre d'exemple, certaines grandes cultures font l'objet d'un commerce important et des variations de productivité peuvent impliquer des modifications relativement importantes dans la structure des échanges et par conséquent dans les modes de production. Dans la plupart des régions, une grande partie des dommages concerne le secteur agricole. Ce constat est, toutefois, largement tributaire des hypothèses initiales retenues pour la

Graphique 2.10. **Dommages résultant des impacts climatiques considérés, projection centrale**

Variation en pourcentage du PIB en 2060 par rapport à la projection de référence sans dommages



Graphique 2.10. **Dommages résultant des impacts climatiques considérés, projection centrale** *(suite)*



Note : relative au graphique A : Les rectangles noirs indiquent l'impact total sur le PIB (projection centrale).
Source : Modèle ENV-Linkages.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399644

projection des impacts du changement climatique sur l'agriculture, qui sont entourées de grandes incertitudes. La section 2.2.5 explore cette question à l'aide d'une analyse de sensibilité des impacts du changement climatique sur agriculture.

Les régions les plus gravement touchées sont l'Inde, l'Afrique subsaharienne (à l'exclusion de l'Afrique du Sud), les pays du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord et les autres économies en développement d'Asie. En Inde, les pertes agricoles sont particulièrement marquées (avec d'importantes baisses de la valeur ajoutée créée dans tous les secteurs de culture), mais les impacts sur la demande énergétique et touristique sont à peine perceptibles. Bien que la plupart des études insistent sur les conséquences négatives de la hausse de la demande de refroidissement (Akpinar-Ferrand et Singh, 2010 ; Mima et al., 2011), les projections montrent que le recul des dépenses de chauffage compense largement ce phénomène, surtout dans les économies émergentes où le scénario de référence (des Perspectives énergétiques mondiales de l'AIE) projette une forte augmentation de la demande d'énergie pour le chauffage conjuguée à une tendance au renforcement de l'électrification des systèmes de chauffage. L'encadré 2.2 montre que d'un point de vue qualitatif, les projections de très faibles dommages liés à l'énergie sont assez robustes, comparées à celles qui utilisent un autre modèle énergétique pour calculer les variations de la demande par vecteur (sans modifier cependant les hypothèses de référence concernant l'évolution de la demande énergétique en l'absence de changement climatique). En Afrique subsaharienne, les impacts considérables du changement climatique sur l'agriculture s'ajoutent aux pertes de productivité causées par le stress thermique, à l'augmentation de la consommation d'énergie pour le refroidissement et à un accroissement des recettes touristiques plus faible qu'en

Encadré 2.2. **Sensibilité aux impacts sur l'agriculture**

Dans plusieurs études réalisées précédemment, des projections des impacts du changement climatique sur la demande énergétique ont été effectuées à l'aide du modèle POLES (Criqui, 2001 ; Criqui et al., 2009), également utilisé dans le cadre du projet de l'UE ClimateCost (Mima et al., 2011). POLES est un modèle ascendant d'équilibre partiel du système énergétique mondial. Comme le modèle WEM de l'AIE utilisé dans la projection centrale, il détermine la demande et l'offre futures de charbon, de pétrole, de gaz naturel et d'électricité en fonction des tendances exogènes et des impacts climatiques à travers leurs effets sur le nombre de jours nécessitant du chauffage ou de la climatisation (degrés-jours de chauffage et de refroidissement). Les impacts projetés du changement climatique, sur la base du scénario SRES A1B (similaire au scénario de référence de CIRCLE), diffèrent sensiblement entre les deux modèles, surtout parce que leurs hypothèses concernant les tendances dans le scénario de référence « pas de changement climatique » ne sont pas les mêmes. En particulier, dans les projections de POLES les impacts des variations du chauffage sur la demande d'électricité sont bien plus faibles, et la demande d'électricité augmente dans la plupart des régions. Conformément aux projections WEM, la demande de combustibles fossiles varie relativement peu.

Le tableau 2.2 montre comment, selon les simulations avec ENV-Linkages, ces différentes hypothèses affectent la variation du PIB dans les différentes régions, en excluant les autres catégories d'impacts climatiques, c'est-à-dire en ne considérant que les impacts des variations de la demande énergétique. Il ressort clairement du tableau qu'en dépit de différences importantes dans les impacts sous-jacents, selon les projections, les conséquences macroéconomiques sont relativement faibles (conclusion que partagent Mima et al., 2011), les effets les plus marqués étant observés au Moyen-Orient. Les deux modèles ne s'accordent pas sur les impacts en Asie du Sud et du Sud-Est : dans les projections de l'AIE, l'impact le plus important est la baisse de la demande de chauffage (qui augmente rapidement dans le scénario de référence) alors que selon les projections POLES, c'est l'accroissement de la demande de refroidissement. L'AIE (2013) souligne que les impacts sur l'offre d'énergie pourraient aboutir à des dommages macroéconomiques plus importants.

Tableau 2.2. **Influence des différentes hypothèses sur les impacts énergétiques**

Variation en pourcentage du PIB en 2060 par rapport à la projection de référence sans dommages

	2035		2060	
	Projection centrale %	Projection Poles %	Projection centrale %	Projection Poles %
OCDE Amérique	-0.01	0.00	-0.02	0.01
OCDE Europe	-0.02	0.00	-0.02	-0.01
OCDE Pacifique	-0.01	0.00	-0.03	0.00
Reste de l'Europe et de l'Asie	-0.05	-0.02	-0.06	-0.09
Amérique latine	-0.01	0.00	-0.02	0.00
Moyen-Orient et Afrique du Nord	-0.01	0.01	-0.03	0.01
Asie du Sud et du Sud-Est	0.00	-0.01	0.01	-0.03
Afrique subsaharienne	0.00	0.01	0.01	0.00
Monde	-0.01	0.00	-0.01	-0.01

Source: Modèle ENV-Linkages basé sur les projections AIE et Poles.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399860

l'absence de changement climatique pour expliquer les importantes pertes de PIB. Au Moyen-Orient et en Afrique du Nord, ces catégories revêtent également de l'importance, mais sont complétées par les impacts considérables de l'élévation du niveau de la mer sur les zones côtières. En effet, ces zones jouent généralement un rôle beaucoup plus grand en Asie que dans les économies d'autres continents, puisque les populations et le capital ont tendance à y être davantage concentrés sur le littoral.

D'ici à 2060, dans les 25 agrégats régionaux considérés, le Canada et la Russie sont les deux seules économies pour lesquelles changement climatique devrait avoir un impact net positif, au moins en ce qui concerne les effets pris en compte dans le modèle. Logiquement, des avantages nets pourraient aussi être attendus pour d'autres pays exposés aux mêmes conditions climatiques, mais ceux-ci sont dissimulés dans des groupements régionaux plus larges ; par exemple, la région Autres UE OCDE regroupe des pays scandinaves et méditerranéens, et les impacts de certains pays risquent d'être assez éloignés de la moyenne de ce groupe. Cela ne signifie évidemment pas que ces pays ne souffrent pas des effets du changement climatique, mais plutôt que les conséquences monétaires positives des impacts couverts par le modèle l'emportent sur les conséquences négatives et que les principaux impacts nets dans cette région sont non monétaires, comme nous le verrons au chapitre 3. En ce qui concerne le Canada, les projections indiquent que le principal avantage provient d'effets favorables sur le tourisme. En ce qui concerne la Russie, les avantages sont plus diversifiés et touchent également les secteurs de l'agriculture, de l'énergie et de la santé. Le changement climatique peut également procurer des avantages de moindre importance dans d'autres régions du monde, par exemple au Chili dans le secteur agricole (où des incidences positives sur les fruits et légumes l'emportent sur les effets négatifs sur le blé).

La modélisation suggère également que certains pays de l'Union européenne pourraient bénéficier de légères retombées économiques nettes positives sur la santé (ces pays combinent pertes relativement faibles de productivité du travail et effets légèrement positifs sur les dépenses de santé et sur la maladie) de sorte que, dans l'ensemble, le PIB des quatre grands pays de l'UE (considérés en tant que groupe et non individuellement) ne serait pas du tout affecté par les impacts du changement climatique considérés. L'étude plus détaillée Peseta II (*Projection of Economic impacts of climate changes*), consacrée aux impacts du climat en Europe par le Centre commun de recherche (CCR) de l'UE (Ciscar et al. 2014), révèle qu'il existe des disparités considérables au sein même de l'Europe, où les conséquences négatives du stress thermique au travail se concentrent plus particulièrement dans les pays d'Europe méridionale. Dans la plupart des cas, les gains ne sont pas le reflet de conditions climatiques plus favorables, mais résultent plutôt d'une amélioration de la compétitivité de certains secteurs de ces économies vis-à-vis de leurs principaux concurrents. Ces implications commerciales des impacts du changement climatique sont étudiées plus en détail dans la section 2.2.4.

Dans la plupart des régions, les conséquences macroéconomiques des interactions entre les divers impacts sont minimes. La perte de PIB totale liée à ces interactions est très proche de la somme des pertes résultant de chaque impact pris individuellement. Ce résultat est logique, puisque les différents impacts affectent différents secteurs de l'économie et les dommages dans leur ensemble sont relativement mineurs, de sorte que les effets d'interaction sont marginaux. Dans les pays plus lourdement touchés, notamment en Inde, ces effets d'interaction sont non négligeables et la perte de PIB totale est inférieure à la somme des pertes individuelles correspondant aux différents impacts, ce qui indique que

lorsqu'ils s'attaquent à un ensemble d'impacts, les pays peuvent apporter des réponses plus élaborées que lorsqu'ils répondent à chaque impact pris individuellement.

Le graphique 2.10B présente les degrés d'incertitude associés aux différentes SCE. Les barres bleues indiquent les fluctuations possibles des dommages régionaux dans la fourchette probable (1.5°C-4.5°C), alors que les petites lignes noires font ressortir que les impacts peuvent être bien plus importants (ou faibles) lorsque la fourchette d'incertitude considérée est encore plus large (1°C-6°C). Le graphique montre clairement que, dans la projection centrale, les disparités régionales en matière de pertes de PIB sont relativement minimes comparées aux incertitudes liées aux différentes sensibilités climatiques, à l'intérieur d'une même région. Tout aussi important peut-être, l'analyse du modèle montre que même pour de faibles niveaux de sensibilité climatique, de nombreux pays souffriront d'importantes (quoique plus faibles) pertes de PIB. Au sein du groupe OCDE Amérique, les plus grandes incertitudes liées à la sensibilité climatique à l'équilibre sont celles qui pèsent sur le Mexique, avec des pertes pourrait dépasser 4 % en 2060 ; en revanche, pour les États-Unis, par exemple, les marges d'incertitude sont beaucoup plus étroites. Pour l'ensemble du groupe OCDE Amérique (non présenté dans le graphique), la fourchette probable des dommages se situe entre 0.3 % et 0.9 % du PIB. Pour l'OCDE Europe, où les incidences prévues sont moindres, la fourchette probable est également plus étroite, allant de 0.1 % à 0.4 % du PIB en 2060 pour l'ensemble du groupe. Pour les pays de l'OCDE des régions Asie et Pacifique, la fourchette probable est plus grande dans les pays membres de la région Pacifique que dans les pays membres asiatiques, ce qui conduit à une fourchette probable de 0.1 % à 0.5 % du PIB en 2060. Bien entendu, cela exclut d'autres incertitudes dont les caractéristiques pourraient être sensiblement différentes d'une région à l'autre (voir l'encadré 2.1).

Pour les régions hors OCDE, les variations sont souvent nettement plus grandes. Les pertes potentielles de PIB en Inde et en Afrique subsaharienne, lorsque la sensibilité climatique est plus élevée que dans la projection centrale, sont importantes et pourraient atteindre une valeur à deux chiffres pour les valeurs (très) élevées de la sensibilité climatique. En 2060, la fourchette probable est respectivement de 1.9 % à 8.4 % et de 2.0 % à 6.4 % du PIB pour l'Inde et pour l'Afrique subsaharienne. Ainsi, alors que les projections centrales pour chacune de ces deux régions sont assez similaires, les éventuelles conséquences négatives pour l'Inde devraient être sensiblement plus lourdes.

Bien que la plupart des pays les plus gravement touchés affichent actuellement un revenu par habitant inférieur à la moyenne, le scénario sans dommages aboutit également à des taux de croissance du revenu relativement élevés dans ces pays (voir la section 2.1). Par conséquent, même lorsque les impacts du changement climatique sont pris en compte, les projections indiquent une importante convergence des revenus dans le monde entier, au moins en pourcentage. Comme le montre le tableau 2.3, les niveaux de consommation par habitant en valeur absolue demeurent largement divergents, avec ou sans dommages climatiques. Dans la plupart des cas, les dommages climatiques n'affectent pas le classement des pays par niveau de consommation en 2060. Ces chiffres moyens par habitant masquent bien entendu les différences substantielles de degré des impacts entre les diverses catégories de ménages. Il serait notamment utile d'étudier plus avant dans quelle mesure les conséquences économiques du changement climatique frappent de façon disproportionnée certaines catégories de ménages. Par exemple, les projections indiquant que les prix des denrées alimentaires seront davantage affectés que les prix de la plupart des autres produits, il se peut que les impacts agricoles pèsent plus lourd sur les ménages pauvres qui sont consommateurs nets de produits alimentaires

Tableau 2.3. **Niveaux de consommation par habitant et par région, pour différentes périodes**

Milliers USD, taux de change PPP 2005

Les variations en pourcentage entre les deux projections sont indiquées entre parenthèses

	2010	2035		2060	
		Projection sans dommage	Projection centrale	Projection sans dommage	Projection centrale
OCDE Amérique	24.9	34.6	34.5 (-0.1%)	47.2	47.0 (-0.5%)
OCDE Europe	18.1	27.4	27.4 (-0.1%)	39.6	39.5 (-0.3%)
OCDE Pacifique	21.4	32.5	32.4 (-0.2%)	47.6	47.3 (-0.7%)
Reste de l'Europe et de l'Asie	1.5	6.3	6.3 (-1.0%)	10.5	10.2 (-2.8%)
Amérique latine	3.3	6.9	6.8 (-0.8%)	11.6	11.3 (-2.1%)
Moyen-Orient et Afrique du Nord	2.0	4.6	4.5 (-1.5%)	9.4	9.0 (-4.0%)
Asie du Sud et du Sud-Est	0.8	2.6	2.5 (-1.4%)	5.1	4.9 (-4.1%)
Afrique subsaharienne	0.6	1.3	1.3 (-1.4%)	2.4	2.3 (-4.6%)
Monde	**4.9**	**8.0**	**8.0 (-0.5%)**	**11.6**	**11.4 (-1.8%)**

Source : Modèle ENV-Linkages.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399877

dans certaines régions, alors que les taux de pauvreté pourraient diminuer dans d'autres régions où les ménages pauvres sont souvent producteurs nets de produits alimentaires, au moins dans un scénario de changement climatique modéré (Hertel et al., 2010).

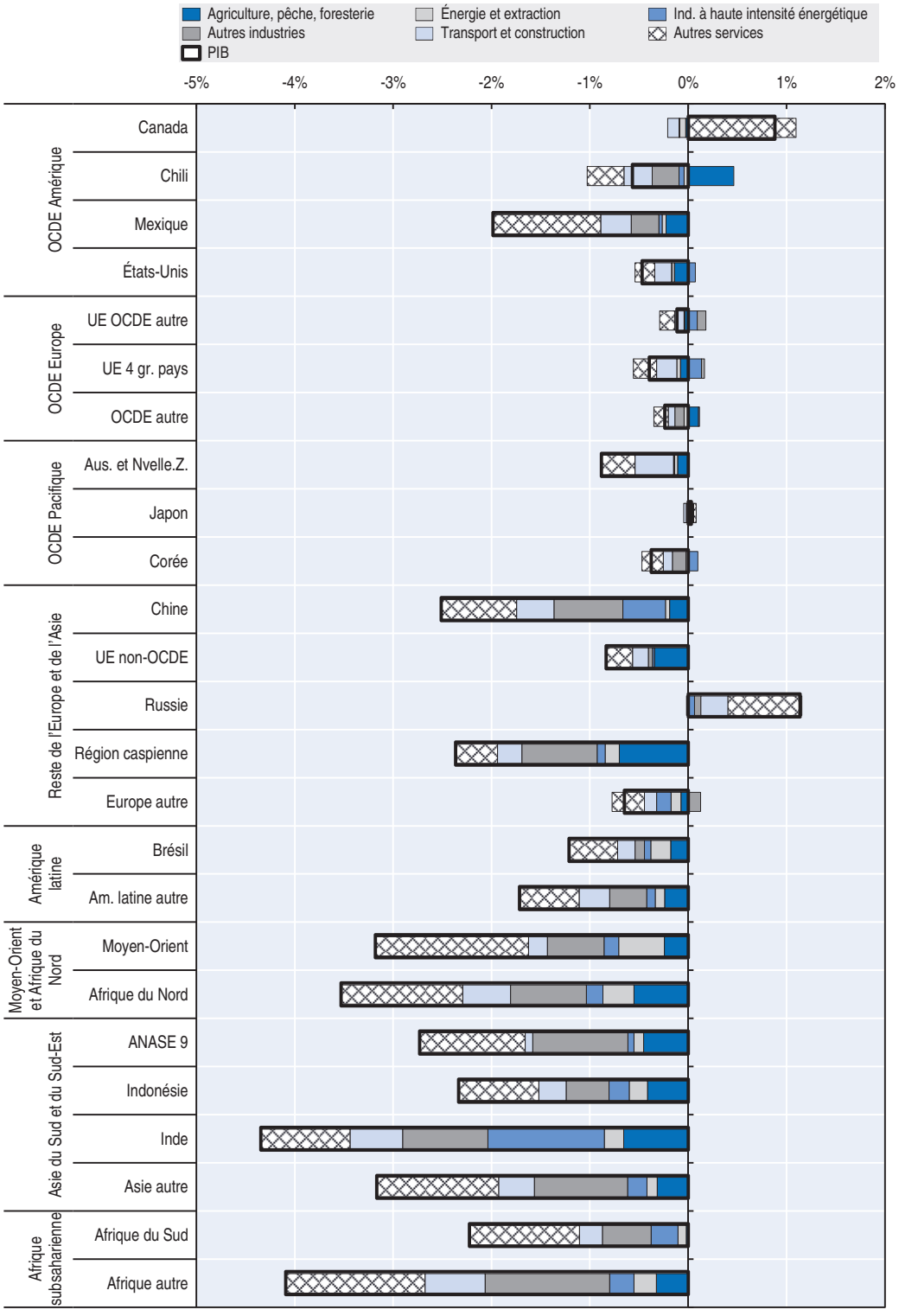
2.2.3. Conséquences pour la structure de l'économie

Les dommages climatiques influent sur la structure économique des différentes régions, puisque les différentes catégories d'impacts climatiques sont liées aux facteurs de production de certains secteurs. Ce phénomène se retrouve dans les variations des contributions sectorielles au PIB. Le graphique 2.11 illustre la variation de la valeur ajoutée des principaux secteurs agrégés, par région, en 2060. Certains secteurs sont directement touchés par des impacts climatiques précis (incidences sur la santé pour le secteur des services et sur la demande d'énergie pour les secteurs énergétiques, par exemple). Cependant, il existe aussi des effets indirects substantiels, tels que des variations de la production dans les secteurs industriels (à forte consommation d'énergie), dues aux multiples variations de prix qu'entraînent les impacts climatiques ou la destruction de capital consécutive à l'élévation du niveau de la mer, qui touche tous les secteurs par le biais des variations de productivité marginale du capital.

Étant donné la taille du secteur des services dans la plupart des économies, qui compte pour plus de 50 % du PIB mondial (actuellement et dans les décennies à venir) et davantage encore dans les pays de l'OCDE, il n'est pas étonnant que ce secteur soit également responsable d'une large part des variations du PIB dans la projection de référence sans dommages. Cela ne signifie pas que le secteur des services est le plus durement touché par le changement climatique – encore que les impacts considérés dans cette étude touchent effectivement ce secteur de manière directe – mais plutôt que les conséquences économiques du changement climatique sont disséminées dans l'ensemble des secteurs économiques. Aussi des études sectorielles traitant des conséquences du changement climatique sur un secteur ou un groupe de secteurs particuliers peuvent-elles permettre mettre en lumière les conséquences directes du changement climatique, mais elles ne rendront pas compte des fortes incidences indirectes qui résultent de la propagation des impacts à d'autres secteurs, à travers les marchés.

Graphique 2.11. **Composition sectorielle des dommages résultant des impacts climatiques considérés, projection centrale**

Variation en pourcentage du PIB en 2060 par rapport à la projection de référence sans dommages



Note : Les rectangles noirs représentent l'impact total sur le PIB (projection centrale).
Source : Modèle ENV-Linkages.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399659

Dans les pays les plus durement touchés par le changement climatique, la production et la valeur ajoutée de tous les secteurs diminuent. Dans ces cas, tous les grands secteurs économiques sont directement affectés et les pays ont moins de marge de manœuvre pour ajuster leurs structures économiques afin de compenser les pertes de production dans des secteurs particuliers. L'augmentation des coûts intérieurs liés aux dommages résultant du changement climatique implique une augmentation des termes de l'échange de ces pays, définie comme le rapport des prix à l'exportation aux prix à l'importation. Toutefois, comme le volume des exportations de ces pays diminue en raison du recul de la demande mondiale, les pays les plus vulnérables ne devraient pas augmenter leurs recettes d'exportation.

Les pays de l'OCDE Europe sont des cas typiques de pays où de très faibles conséquences macroéconomiques masquent un effet plus prononcé dans certains secteurs : les secteurs exposés au commerce international peuvent tirer profit de l'amélioration des échanges extérieurs, tandis que le secteur des services, plus protégé, souffre des impacts sur le tourisme intérieur et la santé, mais aussi de la diminution du capital disponible qu'entraînent les dommages côtiers.

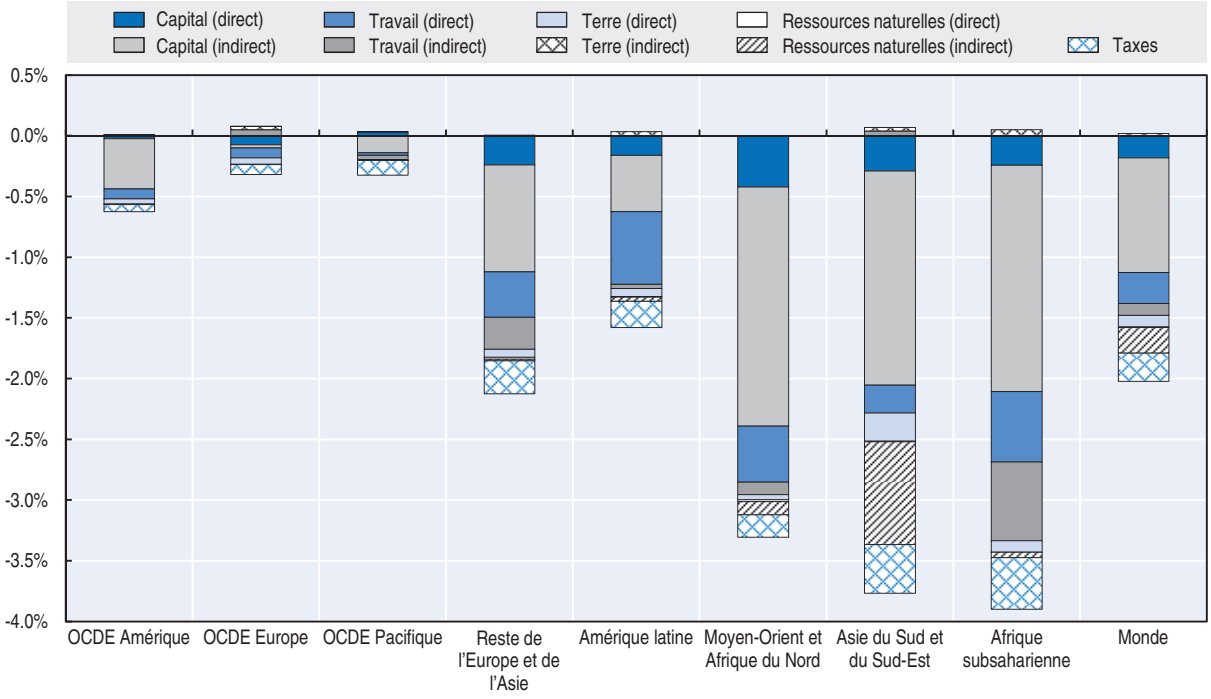
Malgré la contribution relativement faible du secteur agricole au PIB dans la plupart des pays, la contribution de l'agriculture à la perte globale de PIB est substantielle, car ce secteur devrait être sensiblement affecté par le changement climatique (selon les projections, la baisse de la valeur ajoutée agricole mondiale représente 9 % en 2060). La réponse économique endogène du modèle permet, par exemple, de limiter la réduction de la consommation alimentaire par une intensification de la production agricole et par l'affectation de plus grandes superficies à la production végétale. En outre, ces impacts sectoriels entraînent une redistribution des facteurs de production (et en particulier du capital) entre tous les secteurs. Les impacts indirects sur d'autres secteurs montrent que l'adaptation par le biais d'ajustements des échanges et de la production constitue un instrument efficace de réduction des coûts du changement climatique dans l'ensemble de l'économie. L'importance des échanges commerciaux comme voie d'ajustement est examinée à la section 2.2.4 ci-dessous.

Les effets sur le PIB peuvent aussi être attribués à des facteurs de production spécifiques. Comme on l'a vu au chapitre 1, les impacts climatiques affectent directement le travail, le capital, la terre et les ressources naturelles. En outre, les processus d'ajustement économique entraînent aussi des variations de la contribution des recettes fiscales au PIB, même si le changement climatique n'a pas d'effets directs sur les prélèvements fiscaux. Le graphique 2.12 montre la décomposition des pertes de PIB selon le facteur de production, les parties hachurées indiquant les variations directes de la valeur ajoutée d'un facteur de production. Ces effets directs ont été calculés en multipliant la variation en pourcentage de la productivité et de l'offre de ces facteurs de production selon les degrés d'utilisation de la référence sans dommages, c'est-à-dire avant tout effet d'adaptation endogène du marché. Les effets indirects (non hachurés dans le graphique 2.12) sont ensuite calculés comme la différence entre l'effet total et l'effet direct.

Dans le modèle, l'offre de travail est supposée fixe et celle de terres et de ressources naturelles est relativement rigide, de sorte que les effets directs se traduisent plus ou moins directement par des pertes de PIB, même si une réaffectation par secteur peut influer sur la contribution globale de ces facteurs au PIB. La situation en Asie du Sud et du Sud-Est constitue une exception, la réduction de la valeur ajoutée tirée des ressources naturelles étant attribuée au recul de la production dans certains secteurs dépendants de ces ressources, lui-même induit par les changements survenus dans les autres secteurs de l'économie.

Graphique 2.12. **Sources des dommages résultant des impacts climatiques considérés par facteur de production, projection centrale**

Variation en pourcentage du PIB en 2060 par rapport à la projection de référence sans dommages



Source : Modèle ENV-Linkages.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399660

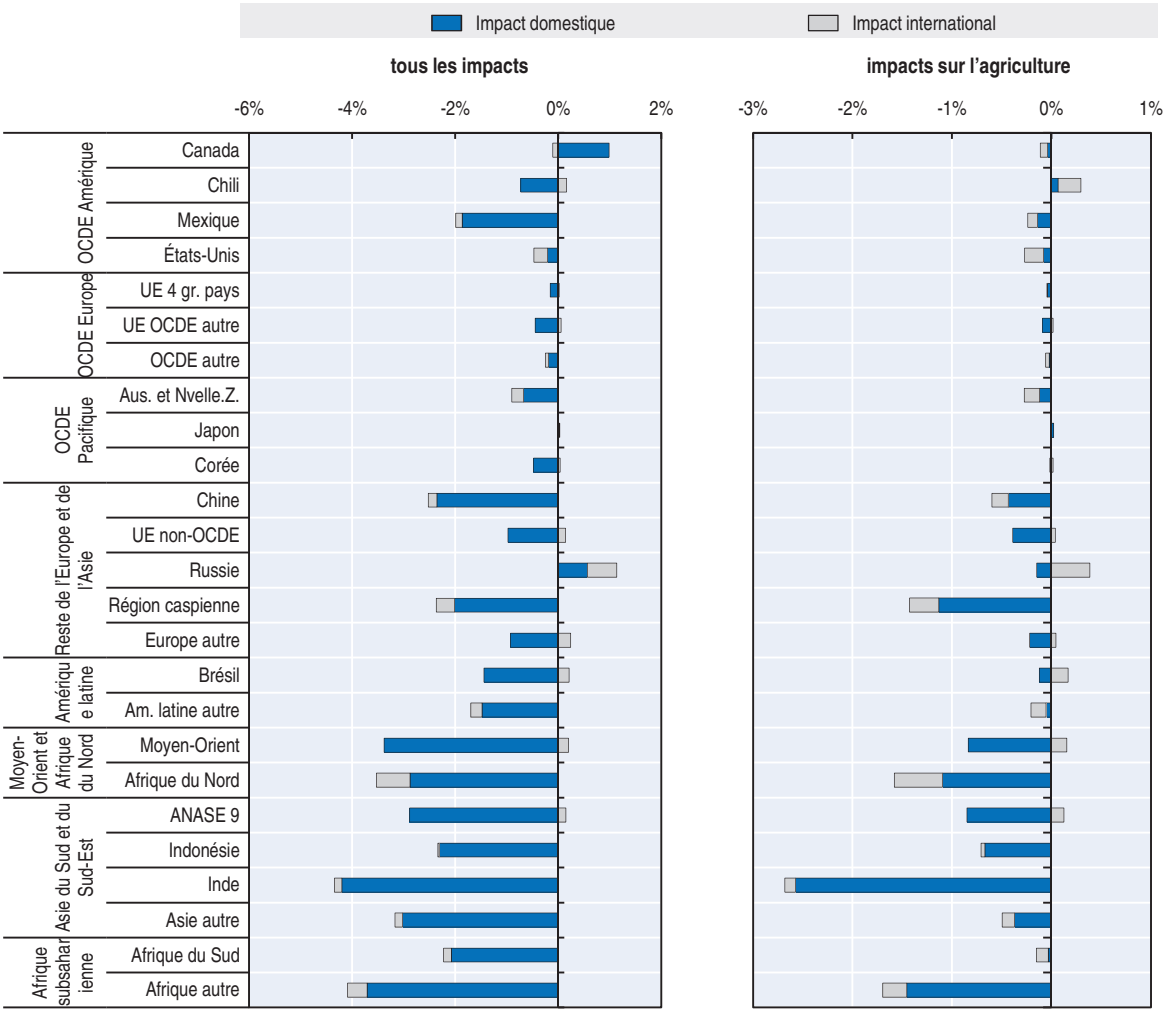
En ce qui concerne le capital, la situation n'est pas la même puisque l'offre est flexible à long terme, les consommateurs pouvant ajuster leurs modes d'épargne. On observe en conséquence un effet supplémentaire, puisque les variations des niveaux de revenu se répercutent sur l'épargne et donc sur l'accumulation future de capital. Ainsi, les impacts climatiques n'influent pas seulement sur le niveau du PIB, mais aussi sur le taux de croissance, par le biais d'une moindre accumulation de capital. Comme on peut le déduire du graphique 2.12, les pertes en capital sont nettement plus importantes que les pertes d'autres facteurs, ce qui peut être attribué à ces effets économiques indirects. Au niveau mondial, près de la moitié des 2 % de projection de perte de PIB peut être attribuée aux effets indirects sur le capital, ce qui peut être interprété comme des effets sur la croissance. En d'autres termes, pour 2060 les projections des conséquences économiques sur le niveau du PIB et sur la croissance du PIB sont d'importance similaire[5].

2.2.4. Conséquences pour le commerce international

Les économies ne fonctionnent pas de manière isolée et les impacts climatiques sur une région retentissent sur l'économie d'autres régions. Le graphique 2.13 montre à quel point les conséquences des ajustements des liens internationaux varient selon les régions. Le rôle des liens interrégionaux peut être analysé en comparant les impacts climatiques mondiaux à ceux obtenus en partant de l'hypothèse qu'une région est seule à subir ces incidences et en reproduisant cette analyse tour à tour pour chaque région (« impacts nationaux » dans le graphique 2.13). Dans la situation « unilatérale », les prix sur le marché mondial ne sont pas,

Graphique 2.13. **Dommages nationaux et mondiaux résultant des impacts climatiques considérés, projection centrale**

Variation en pourcentage du PIB en 2060 par rapport à la projection de référence sans dommages



Note : Les résultats figurant dans la partie droite du graphique indiquent l'effet produit sur le PIB total et pas uniquement la valeur ajoutée générée dans le secteur agricole.

Source : Modèle ENV-Linkages.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399677

ou guère, affectés et les impacts à l'échelle nationale l'emportent sur les effets indirects du fait de l'ajustement des courants d'échanges internationaux. À l'inverse, dans la situation multilatérale, les dommages climatiques toutes les régions influent sur les courants d'échanges internationaux. Si les impacts étaient identiques dans tous les pays, toutes les régions profiteraient du maintien de leur position concurrentielle internationale dans la situation où les dommages sont mondiaux. Parallèlement, elles souffriraient de la baisse de la demande d'exportations résultant du ralentissement économique des leurs partenaires commerciaux touchés par le changement climatique. Cela étant, l'hétérogénéité des impacts signifie que les positions concurrentielles relatives commencent à bouger, et si le changement climatique est favorable (ou moins défavorable) aux principaux partenaires commerciaux, alors que les dommages intérieurs sont (plus) défavorables, l'écart de compétitivité risque de se creuser encore sous l'effet des dommages « internationaux ».

Globalement, ces dommages « nationaux » et « internationaux » constituent le dommage total, qui correspond aux dommages présentés ci-dessus dans le graphique 2.10.

La partie gauche du graphique 2.13 illustre la répartition des dommages nationaux et internationaux pour tous les impacts pris dans leur ensemble (c'est-à-dire la projection centrale examinée ci-dessus), tandis que la partie droite montre les résultats lorsque seuls les dommages agricoles sont considérés. Lorsqu'on tient compte de l'ensemble des impacts, les effets sur le commerce international sont favorables pour certaines régions et défavorables pour d'autres. Au niveau mondial, les impacts internationaux sont relativement faibles, mais négatifs. D'une part, les dommages affectant d'autres régions auront des conséquences négatives pour l'économie nationale, notamment parce que les pays ne peuvent pas protéger leurs niveaux de consommation en augmentant les importations en provenance de régions non touchées. D'autre part, les pays sont mieux à même de maintenir leur position concurrentielle régionale lorsque d'autres régions sont aussi touchées, du moins lorsque leurs principaux partenaires commerciaux subissent les mêmes répercussions. Dans les simulations du modèle, le premier effet négatif domine.

Dans quelques pays, dont le Chili, le Brésil et les économies du Moyen-Orient et de l'ASEAN9, les forts impacts nationaux peuvent être en partie compensés par l'amélioration des relations commerciales. Il s'agit en général d'économies relativement ouvertes. En revanche, dans d'autres régions, notamment l'Inde et les pays africains, mais aussi par exemple les États-Unis, les effets sur le plan national sont encore aggravés par une perte de compétitivité par rapport aux principaux partenaires commerciaux. Cela conduit, par ricochet, à ralentir encore l'économie et l'investissement et, par conséquent, abaisser le niveau du PIB de ces pays. Effectivement, les économies plus fermées doivent absorber une plus grande partie du choc sur le marché intérieur.

On observe surtout un gain de compétitivité dans certains des pays les moins touchés, lorsque leurs principaux partenaires commerciaux, dont les grandes économies émergentes d'Afrique et d'Asie, subissent d'importantes pertes de productivité agricole. Le secteur agricole étant particulièrement exposé au commerce international, il n'est pas surprenant de constater que dans la partie droite du graphique 2.13 les incidences internationales sont relativement plus importantes puisque seules les incidences sur l'agriculture y sont prises en compte. Le graphique indique clairement que les avantages commerciaux simulés dans la projection centrale tenant compte de tous les impacts résultent pour la plupart des dommages agricoles subis par d'autres régions. Les incidences nationales ne doivent pas obligatoirement être exclusivement positives pour que le pays puisse tirer profit du commerce international, comme on peut le constater à l'examen des projections pour la Russie, le Brésil et l'ASEAN (9). En effet, les avantages commerciaux internationaux portent sur les positions concurrentielles relatives et non absolues. Pour les régions les plus durement touchées, l'effet est inverse : leurs dommages intérieurs sont aggravés par une diminution des recettes d'exportation.

2.2.5. Une analyse de sensibilité consacrée aux dommages agricoles

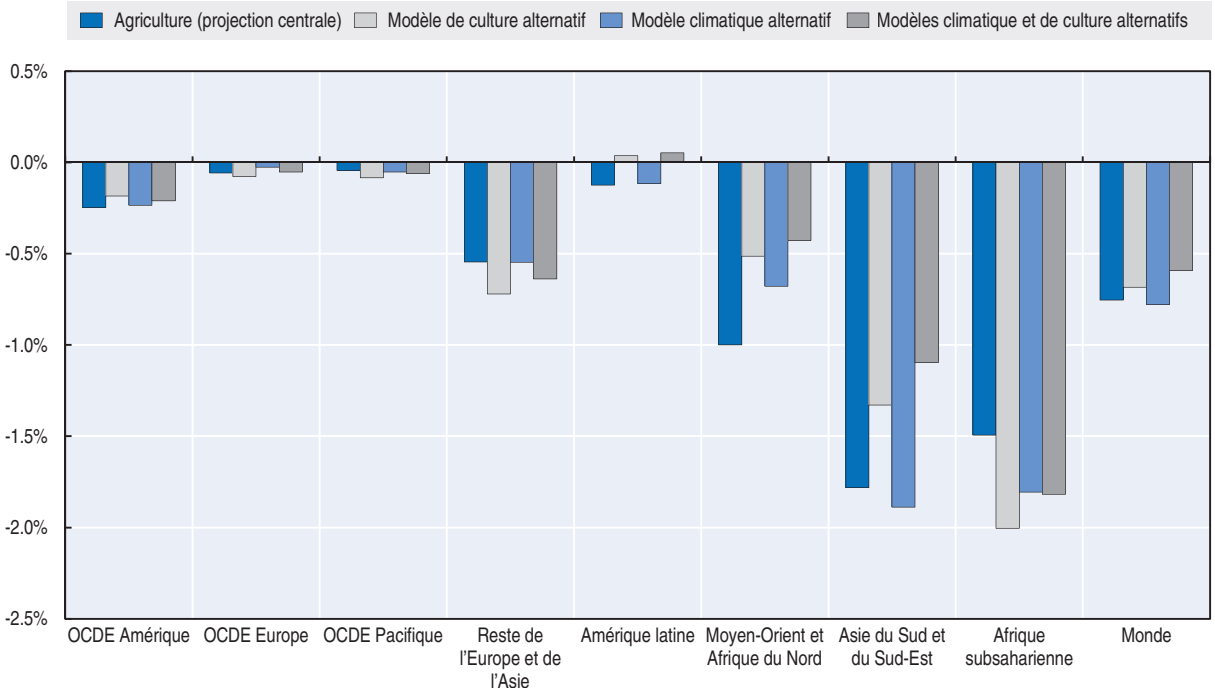
Les conséquences économiques des impacts sur l'agriculture décrites ci-dessus sont fondées sur des projections établies dans le cadre du projet AgMIP et ne tiennent pas compte des effets fertilisant du CO_2 (Nelson et al. 2014 ; Von Lampe et al. 2014 ; voir également le chapitre 1). Un scénario spécifique a été choisi pour la projection centrale, sur la base de projections du changement climatique à l'échelle régionale provenant du modèle HadGEM, et en utilisant le modèle de culture DSSAT pour identifier les incidences agronomiques. Le

projet AgMIP propose différentes options, tant pour la modélisation du système climatique (choix du modèle IPSL au lieu du modèle HadGEM) que pour le modèle de culture (LPJmL au lieu de DSSAT), qui servent ici à illustrer les incertitudes[6]. Pour réaliser l'analyse de sensibilité, cette section passe en revue différents scénarios, en variant le modèle de culture, le modèle climatique et l'hypothèse de fertilisation par le CO_2, ainsi que les combinaisons de ces paramètres. On étudie d'abord la sensibilité au modèle de culture et au modèle climatique, puis on superpose l'effet de fertilisation par le CO_2 pour évaluer la marge d'incertitude correspondant à ces options.

Le graphique 2.14 montre les projections pour quatre scénarios différents, en combinant entre eux les différents modèles climatiques et de culture, sans effet fertilisant du CO_2. Au niveau mondial, la projection centrale est assez proche des résultats obtenus à l'aide du modèle climatique IPSL et du modèle de culture DSSAT par défaut, qui indiquent des impacts négatifs légèrement plus marqués. Les dommages projetés sont plus faibles que si l'on utilise le modèle LPJmL, surtout s'il est couplé au modèle climatique (IPSL). Cependant les tendances climatiques régionales diffèrent également selon les scenarios, et ces résultats ne valent pas pour toutes les régions. Les quatre modèles projettent tous des dommages mondiaux allant de 0.6 % à 0.8 % du PIB mondial à l'horizon 2060.

Graphique 2.14. **Dommages agricoles régionaux dans les différents scénarios, sans fertilisation par le CO_2**

Variation en pourcentage du PIB en 2060 par rapport au scénario sans dommages



Source : Modèle ENV-Linkages.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399680

En dépit de disparités significatives relevées dans les projections régionales pour ces différents modèles (surtout dans les projections régionales du stress hydrique), l'influence sur les pertes de PIB au niveau des huit macrorégions est relativement limitée. En effet, le système agricole, par le biais des échanges, fonctionne à l'échelle mondiale, les pertes de rendement dans une région pouvant donc, dans une certaine mesure, être compensées par

l'augmentation de la production dans d'autres régions. L'impact sera peut-être sensible dans certaines régions, mais les conséquences pour le marché alimentaire mondial sont beaucoup plus fiables. Néanmoins, les différences observées sont suffisamment marquées pour suggérer qu'une approche multi-modèle comme celle qui a été adoptée dans le projet AgMIP peut fournir une vision plus fiable des conséquences du changement climatique.

Comme on l'a vu au chapitre 1, ces projections excluent l'effet de l'augmentation des concentrations de carbone sur la croissance végétale (c'est-à-dire effet fertilisant du CO_2, l'idée étant que la hausse des concentrations de CO_2 dans l'atmosphère fait augmenter la taille et le poids sec des cultures, les plantes consommation le CO_2 pour la photosynthèse). Bien que les données de Nelson et al. (2014) ne contiennent pas de projections sur cet effet, les informations sur le modèle de culture rapportées par Rosenzweig et al. (2013) et synthétisées dans l'outil Geoshare[7] peuvent être utilisées pour étudier la sensibilité de l'analyse économique à cet effet. S'agissant de la combinaison par défaut du modèle de culture DSSAT et du modèle climatique HadGEM, des projections de l'effet fertilisant du CO_2 ont été calculées pour le riz, le blé, le maïs et le soja. Pour la version combinant le modèle de culture LPJmL et le modèle climatique HadGEM, l'éventail de cultures est plus large et couvre le colza, le millet, la canne à sucre et la betterave sucrière. On ne dispose pas de projections sur les effets fertilisants du CO_2 pour les fruits et légumes (pommes de terre comprises) ni pour le secteur des fibres végétales (y compris le coton). Pour le modèle climatique alternatif IPSL, ces effets n'ont été projetés que pour les cultures non irriguées. Pour les données manquantes, on suppose qu'il n'y a pas d'effet de fertilisation par le CO_2, même si les études sur la question indiquent un effet assez marqué pour certaines cultures (en particulier les pommes de terre) qui ne sont pas considérés ici (Leakey, 2009).

Pour illustrer les données utilisées dans les simulations, le tableau 2.4 présente les chocs sur les rendements en 2050 pour la région de l'Afrique subsaharienne (hors Afrique du Sud). On constate que les impacts du changement climatique sur les rendements varient sensiblement d'une culture à l'autre, et que le choix du modèle peut même changer le signe de l'effet produit, comme dans le cas de la canne à sucre et de la betterave sucrière. Le tableau montre aussi que l'effet fertilisant du CO_2 est assez important et positif et qu'il peut limiter certaines des conséquences négatives du changement climatique pour l'agriculture.

Tableau 2.4. **Impacts du changement climatique sur les rendements en Afrique subsaharienne**

Variation en pourcentage des rendements en 2050 par rapport au climat actuel

	Projection centrale		Modèle de culture alternatif		Modèle climatique alternatif		Modèles climatique et de culture alternatifs	
	Sans effet CO_2	Avec effet CO_2	Sans effet CO_2	Avec effet CO_2	Sans effet CO_2	Avec effet CO_2	Sans effet CO_2	Avec effet CO_2
Riz	-23	15	-23	7	-18	-4	-15	-1
Blé	-18	-4	-21	-5	-29	-12	-23	-5
Autres céréales	-12	-9	-16	-12	-21	-15	-20	-13
Fruits et légumes	-25	n.d.[1]	-28	n.d.[1]	-22	n.d.[1]	-16	n.d.[1]
Canne et betterave à sucre	14	n.d.[1]	12	13	-21	n.d.[1]	-20	n.d.[1]
Oléagineux	-31	7	-34	1	-23	8	-19	12
Fibres végétales	-31	n.d.[1]	-31	n.d.[1]	-24	n.d.[1]	-19	n.d.[1]

1. Indique qu'aucune projection de l'effet fertilisant du CO_2 n'est disponible pour ces cultures, et que les simulations portent sur les variations de rendement en l'absence d'effet de fertilisation.

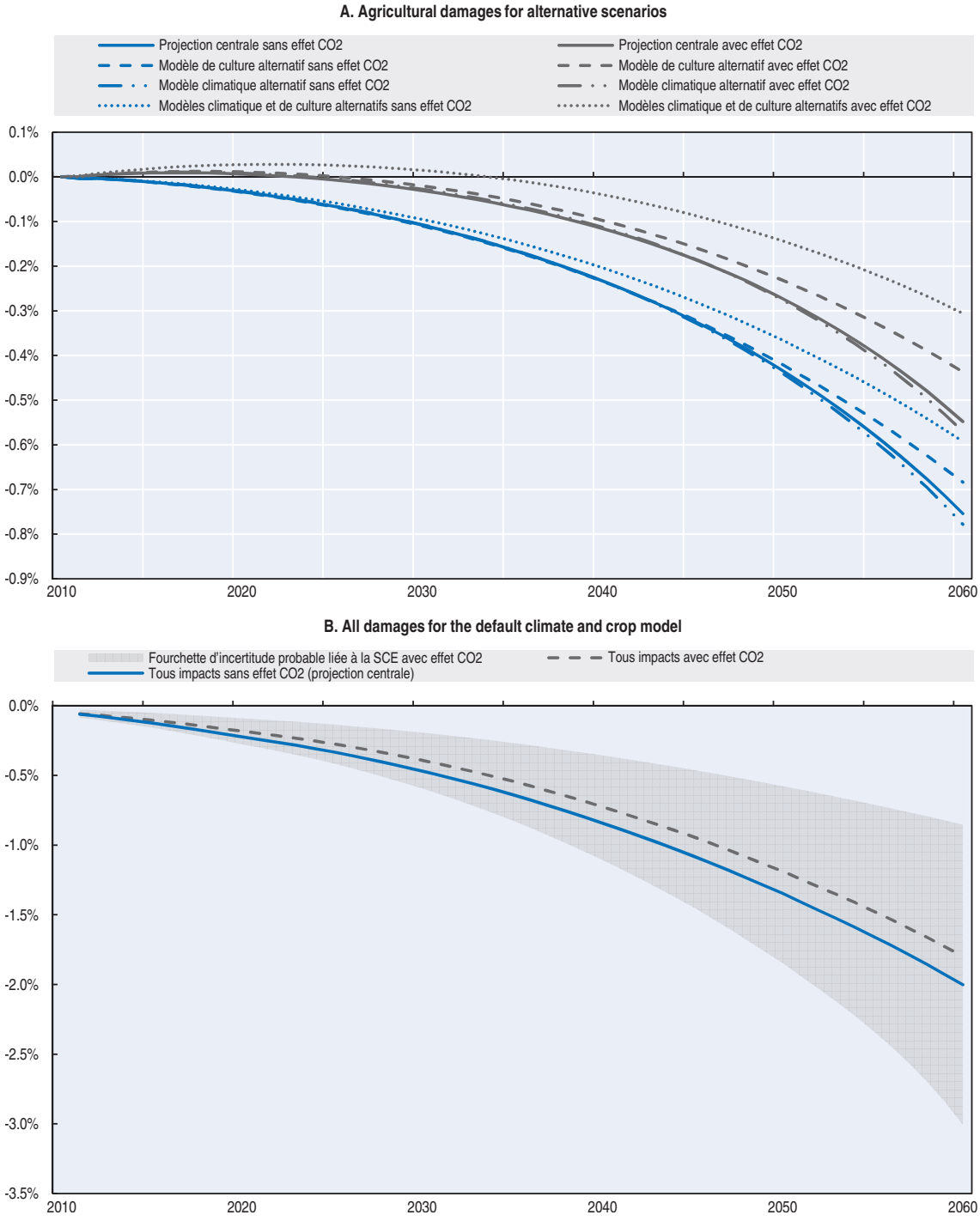
Source : Modèle ENV-Linkages basé sur les projections du projet AgMIP (Von Lampe et al., 2014).

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399887

Le graphique 2.15A illustre l'évolution dans le temps des dommages agricoles mondiaux (simulés isolément, c'est-à-dire en dehors des autres impacts climatiques) pour les huit différentes combinaisons des deux modèles de culture, des deux modèles

Graphique 2.15. **Dommages mondiaux dans les différents scénarios d'impacts sur l'agriculture (effet fertilisant du CO_2 compris)**

Variation en pourcentage du PIB par rapport au scénario sans dommages



Source : Modèle ENV-Linkages.

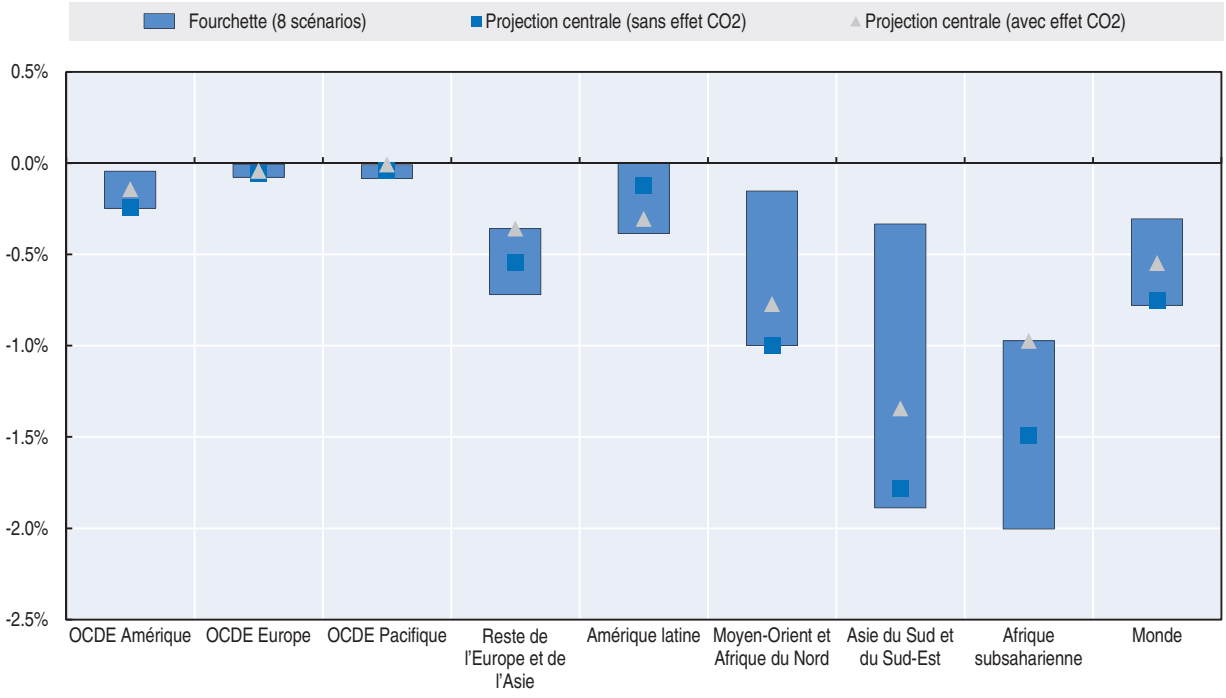
StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399694

climatiques et des deux options concernant l'effet fertilisant du CO_2. Si l'on utilise les modèles climatique et de culture de la projection centrale, l'effet de fertilisation par le CO_2 représente 0.2 point de pourcentage du PIB à l'horizon 2060, ce qui signifie que les dommages agricoles représentent un peu moins de 0.6 % du PIB au lieu d'un peu moins de 0.8 %. Les simulations avec les modèles climatique et de culture alternatifs indiquent un gain analogue (entre 0.2 et 0.3 point de pourcentage, respectivement) lorsque l'effet fertilisant est pris en compte. La réduction des dommages agricoles se traduit aussi par un recul des dommages correspondant à tous les impacts pris globalement, comme on le voit avec le graphique 2.15B. La fourchette d'incertitude probable de la SCE passe de 1.0 %-3.3 % à 0.9 %-3.0 %. Les variations exprimées en points de pourcentage correspondent grosso modo à celles des dommages agricoles, ce qui indique que les effets d'interaction avec les conséquences économiques des autres catégories d'impacts sont limités.

Enfin, le graphique 2.16 fait ressortir les différences régionales : pour certaines régions, en particulier l'OCDE Europe et l'OCDE Pacifique, la fourchette des projections des quatre combinaisons de modèles dans les scénarios avec et sans effet de fertilisation par le CO_2 est très étroite et les impacts projetés dans tous les scénarios sont mineurs. Dans les autres régions, la fourchette est bien plus large. Les gains produits par l'effet fertilisant du CO_2 sont relativement importants dans les régions d'Afrique ; l'ajout de cet effet dans la projection centrale ramène les dommages agricoles en Afrique subsaharienne de 1.5 % à 1 % du PIB. En Amérique latine, l'effet de fertilisation par le CO_2 est aussi bénéfique pour le rendement des cultures, mais un effet pervers apparaît dans tous les scénarios : la baisse des rendements, plus modérée dans les autres régions, réduit les avantages commerciaux

Graphique 2.16. **Fourchette des dommages agricoles régionaux dans les différents scénarios (effet fertilisant du CO_2 compris)**

Variation en pourcentage du PIB en 2060 par rapport au scénario sans dommages



Source : Modèle ENV-Linkages.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399701

dont bénéficie le Brésil, ce qui a des effets négatifs sur son PIB. Dans la projection centrale, les avantages commerciaux internationaux sont plus importants que les effets négatifs sur les rendements nationaux (voir le graphique 2.13) ; dans les scénarios qui tiennent compte de l'effet fertilisant du CO_2, ces avantages internationaux disparaissent, ce qui fait que les impacts agricoles ont un effet global négatif net sur le PIB en Amérique latine.

Le graphique 2.16 montre aussi que la projection centrale ne doit pas être confondue avec une projection médiane des différents scénarios. Pour les régions OCDE Amérique et Moyen-Orient et Afrique du Nord, la projection centrale se situe à la limite inférieure de la fourchette des scénarios, et celle du Monde est aussi proche de la limite inférieure (ce qui apparaît également dans le graphique 2.15).

Notes

1. Plus précisément, les mesures dont la mise en œuvre n'est pas encore complète ou demande encore des efforts, ne sont pas prises en compte dans le scénario de référence. Cette hypothèse sert uniquement de point de référence pour l'évaluation des coûts de l'inaction et des avantages de l'action publique, et n'exprime pas une opinion sur l'état actuel des politiques climatiques.
2. Les scénarios SSP contiennent différentes projections concernant la population (Lutz et KC, 2015) ; par exemple, dans le scénario moyen SSP2, l'effet de l'éducation des femmes sur la fertilité est plus marqué qu'ici, ce qui se traduit par une population moins nombreuse d'ici la fin du siècle. L'utilisation d'autres projections démographiques pourrait sensiblement modifier l'analyse chiffrée présentée dans ce chapitre.
3. Des travaux empiriques commencent à paraître sur les impacts climatiques déjà observés (Dell et al., 2009 ; 2013). Si les projections à long terme présentées ici ne permettent pas de faire écho à ces travaux de façon appropriée, les simulations de modélisation montrent effectivement de légers effets en retour sur la croissance économique pour la décennie en cours.
4. Ceci ne représente qu'une approximation grossière du nombre de victimes du changement climatique, car, dans les pays où les incidences sont globalement bénéfiques, un grand nombre de personnes n'en sont pas moins touchées, soit directement, par des incidences sur la santé, soit indirectement, du fait de transformations de l'économie nationale. De la même façon, on trouvera dans toutes les régions des personnes relativement peu touchées ou susceptibles de tirer profit du changement climatique.
5. Les effets du changement climatique sur le taux de croissance sont examinés plus en détail à la section 3.1.3.
6. Pour produire une évaluation robuste complète des incertitudes entachant les conséquences du changement climatique pour l'agriculture, il faudrait utiliser un éventail plus large de modèles et d'hypothèses.
7. Voir : *https://mygeohub.org/groups/geoshare*.

Références

AIE (2014), *World Energy Outlook 2014*, AIE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/weo-2014-en*.

AIE (2013), *Redrawing the energy climate map*, IEA, Paris.

Akpinar-Ferrand, E. et A. Singh (2010), « Modeling increased demand of energy for air conditioners and consequent CO2 emissions to minimize health risks due to climate change in India », *Environmental Science and Policy*, vol. 13(8), pp. 702-712.

Anthoff, D. et R. Tol (2013), « The uncertainty about the social cost of carbon: a decomposition analysis using FUND », *Climatic Change* 117(3), pp. 515-530.

Bosello, F. et R. Parrado, (2014), « Climate Change Impacts and Market Driven Adaptation: The Costs of Inaction Including Market Rigidities », *Document de travail de la FEEM*, n° 64.

Bosello, F., F. Eboli et R. Pierfederici (2012), « Assessing the Economic Impacts of Climate Change. An Updated CGE Point of View », *Document de travail de la FEEM,* n° 2.

Braconier, H., G. Nicoletti et B. Westmore (2014), « Policy Challenges for the Next 50 Years », *Documents d'orientation du Département des affaires économiques de l'OCDE*, n° 9, Éditions OCDE, Paris.

Chateau, J., C. Rebolledo et R. Dellink (2011), « An Economic Projection to 2050: The OECD "ENV-Linkages" Model Baseline », *Documents de travail de l'OCDE sur l'environnement*, n° 41, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/5kg0ndkjvfhf-en*.

Ciscar, J.C. et al. (2014), « Climate impacts in Europe. The JRC PESETA II project », *JRC Scientific and Policy Reports*, n° EUR 26586EN, Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg.

Criqui, P. (2001), « POLES: Prospective outlook on long-term energy systems », *Institut d'Economie et de Politique de l'Energie*, n° 9.

Criqui, P., S. Mima et P. Menanteau (2009), « Trajectories of new energy technologies in carbon constraint cases with the POLES Model », *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, n° 6 (2009) 212004.

Dell, M., B.F. Jones et B.A. Olken (2013), « What do we learn from the weather? The new climate-economy literature », *Document de travail du NBER* (National Bureau of Economic Research), n° 19578, NBER, Cambridge, Massachusetts.

Dell, M., B.F. Jones et B.A. Olken (2009), « Temperature and income: Reconciling new cross-sectional and panel estimates », *American Economic Review*, vol. 99, n° 2, pp. 198-204.

Dellink, R. et al. (2014), « Consequences of Climate Change Damages for Economic Growth: A Dynamic Quantitative Assessment », *Documents de travail du Département des affaires économiques de l'OCDE*, n° 1135, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/5jz2bxb8kmf3-en*.

Dietz, S., C. Gollier et L. Kessler (2015), « The climate beta », *Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment Working Paper* 190, Londres.

Eboli, F., R. Parrado et R. Roson (2010), « Climate-change feedback on economic growth: Explorations with a dynamic general equilibrium model », *Environment and Development Economics*, vol. 15, pp. 515-533.

Electric Power Research Institute (EPRI) (2014), « Understanding the social cost of carbon: a technical assessment », *Rapport EPRI* n° 3002004657, Palo Alto.

FMI (2014), *World Economic Outlook*, Washington, DC.

GIEC (2014a), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.* Part A: Global and Sectoral Aspects, Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et L.L.White (dir. pub.)], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis, 1132 pp.

GIEC (2014b): *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Contribution du Groupe de travail III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel et J.C. Minx (dir. pub.)], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis.

GIEC (2013), *Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (dir. pub.)], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis, 1535 pp.

Gollier, C. (2012), *Pricing the planet's future: The economics of discounting in an uncertain world*, Princeton University Press.

Gollier, C. (2007), « Comment intégrer le risque dans le calcul économique? », *Revue d'économie politique*, vol. 117(2), pp.209-223.

Heal, G. et A. Millner (2013), « Uncertainty and decision in climate change economics », *NBER Working Paper* No. 18929; également publié dans *Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment Working Paper* 108, Londres.

Hertel, T.W., M.B. Burke et D.B. Lobell (2010), « The poverty implications of climate-induced crop yield changes by 2030 », *Global Environmental Change*, vol. 20, pp. 577-585.

Hinkel, J. et al. (2014), « Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise », *PNAS*, vol. 111(9), pp. 3292-3297, *http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1222469111*.

Leakey, A.D.B. (2009), « Rising atmospheric carbon dioxide concentration and the future of C4 crops for food and fuel », *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 276(1666), pp. 2333-2343.

Meinshausen, M., S.C.B. Raper et T.M.L. Wigley (2011), « Emulating coupled atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6: Part I – Model Description and Calibration », *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 11, pp. 1417-1456.

Mima S., P. Criqui et P. Watkiss (2011), « The Impacts and Economic Costs of Climate Change on Energy in Europe. Summary of Results from the EC RTD ClimateCost Project. »; in: P. Watkiss (dir. pub.), *The ClimateCost Project. Final Report. Volume 1: Europe*. Publié par le Stockholm Environment Institute, Suède, *www.climatecost.eu*.

Nations Unies (2013), *World Population Prospects: The 2012 Revision*, Département des affaires économiques et sociales.

Nelson, G.C. et al. (2014), « Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, n° 9, pp. 3274-3279.

Nordhaus, W.D. (2013), *The climate casino: Risk, uncertainty, and economics for a warming world*, Yale University Press, New Haven.

Nordhaus, W.D. (2011), *Estimates of the social cost of carbon: Background and results from the RICE-2011 model*, New Haven, Connecticut, Cowles Foundation for Research in Economics, Université Yale, New Haven.

Nordhaus, W.D. (2007), *A question of balance*, Yale University Press, New Haven, États-Unis.

OCDE (2014), *Perspectives économiques de l'OCDE*, vol. 2014, n° 1, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/eco_outlook-v2014-1-fr*.

Otto, A. et al. (2013), « Climate system properties determining the social cost of carbon », *Environmental Research Letters*, vol. 8(2), *http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024032*.

Rogelj, J., M. Meinshausen et R. Knutti (2012), « Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates », *Nature Climate Change*, vol. 2, pp. 248-253.

Rosenzweig, C. et al. (2013), « Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison », *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, vol. 111, n° 9, pp. 3268-3273.

Roson, R. et D. van der Mensbrugghe (2012), « Climate change and economic growth: Impacts and interactions », *International Journal of Sustainable Economy,* vol. 4, pp. 270-285.

Schellnhuber, H.J., K. Frieler et P. Kabat (2013), « The elephant, the blind, and the ISI-MIP », *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, vol. 111, n° 9, pp. 3225-3227.

Tol, R.S.J. (2012), « On the uncertainty about the total economic impact of climate change », *Environmental and Resource Economics* 53, pp. 97-116.

Tol, R.S.J. (2002), « New Estimates of the Damage Costs of Climate Change, Part I: Benchmark Estimates », *Environmental and Resource Economics*, Vol. 21 (1), pp. 47-73.

Van Vuuren, D.P., E. Kriegler, B.C. O'Neill, K.L. Ebi, K. Riahi, T.R. Carter, J. Edmonds, S. Hallegatte, T. Kram, R. Mathur, H. Winkler (2014), « A new scenario framework for climate change research: scenario matrix architecture », *Climatic Change*, vol. 122, pp. 373-386.

Von Lampe, M. et al. (2014), « Why do global long-term scenarios for agriculture differ? An overview of the AgMIP Global Economic Model Intercomparison », *Agricultural Economics*, vol. 45(1), pp. 3-20.

Watkiss, P., et A. Hunt (2012), « Projection of economic impacts of climate change in sectors of Europe based on bottom up analysis: Human health », *Climatic Change*, vol. 112, pp. 101-126.

Wilby, R.L. et S. Dessai (2010), « Robust adaptation to climate change », *Weather*, vol. 65(7), pp. 180-185, *http://dx.doi.org/10.1002/wea.543*.

Chapitre 3

Vue d'ensemble du changement climatique*

Le présent chapitre, qui n'a pas vocation à être exhaustif, donne un aperçu des principales conséquences de l'inaction qui ne sont pas passées en revue au chapitre 2. Il débute par une analyse fondée sur le modèle d'évaluation intégrée AD-DICE mettant en lumière les implications à long terme du changement climatique. Il présente ensuite un certain nombre d'exemples importants d'effets marchands et non marchands qui ne sont pas inclus dans cette analyse à l'aide du modèle ENV-Linkages. Parmi eux se distinguent les conséquences prévues des inondations en milieu urbain et les coûts engendrés par les décès prématurés imputables au stress thermique.

* Ce document et toute carte qu'il peut comprendre sont sans préjudice par rapport au statut de souveraineté de tout territoire, à la limitation des frontières et limites internationales, et par rapport au nom de tout territoire, ville ou région.

Les résultats chiffrés présentés au chapitre 2 révèlent l'ampleur des coûts des impacts sélectionnés du changement climatique pour l'économie en l'absence de nouvelles mesures visant à contrer les risques de changement climatique. Cependant, le simple examen des effets sur le produit intérieur brut (PIB) révélés par le modèle ENV-Linkages ne permettra pas de représenter dans leur globalité les conséquences économiques et sociales d'une hausse de la température moyenne mondiale, de l'élévation du niveau de la mer et d'autres facteurs de changement climatique. Une évaluation plus adéquate des coûts du changement climatique nécessite en effet de tenir compte d'au moins deux autres aspects : i) les conséquences économiques à long terme des impacts climatiques au-delà de 2060, y compris celles résultant des émissions produites avant cette date, et ii) les répercussions majeures du changement climatique qui ne peuvent pas être prises en compte par les projections d'évolution du PIB du modèle d'équilibre général. L'intégration de ces facteurs à l'évaluation des coûts de l'inaction est également fondamentale pour déterminer convenablement les avantages d'une intervention gouvernementale dans le domaine du changement climatique.

3.1. Les coûts de l'inaction au-delà de 2060

Les gaz à effet de serre (GES) émis d'ici à 2060 n'affecteront pas seulement le climat et l'économie jusqu'à cette date, mais auront également des répercussions importantes au cours des décennies, voire des siècles, qui suivront. Par conséquent, le fait de projeter uniquement les conséquences sur le PIB avant 2060 aboutirait à sous-estimer la valeur actualisée nette des répercussions du changement climatique car les impacts à long terme – dus à l'inertie du système climatique – ne seraient pas pris en compte. Le modèle AD-DICE2013 (de Bruin, 2014) est utilisé pour étudier les conséquences à long terme du changement climatique à l'aide de simulations simplifiées.

Dans cette section, le scénario de la projection centrale est tout d'abord prolongé jusqu'à 2100 pour mettre en évidence la manière dont les dommages climatiques devraient s'accroître avec le temps : il s'agit du scénario *Dommages pleins et entiers*[1]. Contrairement aux analyses de Nordhaus fondées sur le modèle DICE (voir par exemple Nordhaus, 2012), ces projections adoptent les coefficients d'actualisation recommandés par le Trésor britannique (2003) et limitent l'adaptation aux mesures prises sous l'impulsion du marché (voir la section 4.2 et l'annexe I pour de plus amples informations à ce sujet). En raison de cette différence, les dommages projetés dans cette section sont supérieurs à ceux projetés dans le cadre de la spécification standard du modèle RICE ; l'annexe I donne un aperçu des différences entre AD-DICE et le modèle original DICE. En outre, comme on l'a vu au chapitre 2, le niveau de dommages dans AD-DICE jusqu'en 2060 a été calibré en fonction de la projection centrale du modèle ENV-Linkages. C'est pourquoi ces projections à long terme tiennent compte du même sous-ensemble d'impacts, mais de façon plus stylisée.

Dans un deuxième temps, les projections du scénario *Processus verrouillé en 2060* montrent comment 50 années d'inaction affecteront les conséquences futures estimées du

changement climatique sur le PIB. L'absence de mesures visant à réduire les émissions avant 2060 aura des conséquences sur les niveaux de PIB au fil du temps en raison du changement climatique amorcé au cours de la période précédant 2060. Les dommages liés à l'inaction avant 2060 se poursuivront après cette date. Dans le scénario *Processus verrouillé en 2060*, ce phénomène est modélisé en fixant les émissions au niveau du *statu quo* jusqu'en 2060. Passée cette date, la production économique est dissociée des émissions (et les émissions sont fixées à zéro). Ce scénario hypothétique peut donner une idée du niveau irréversible et inévitable de changement climatique vers lequel le monde s'achemine à l'horizon 2060 si aucune politique supplémentaire d'adaptation ou d'atténuation n'est adoptée d'ici là.

Troisièmement, on recourt à une spécification des dommages différente, qui accorde plus d'importance aux risques extrêmes de dommages climatiques, c'est-à-dire à la possibilité qu'un changement climatique très marqué puisse avoir des conséquences économiques bien plus importantes que ce qui avait été prévu à l'aide de la fonction de dommage progressive habituellement utilisée dans le modèle AD-DICE (Weitzman, 2012). Les conséquences à long terme d'un changement climatique impliquant une hausse de la température mondiale supérieure à 4 degrés étant méconnues, cette spécification différente apporte de nouveaux éléments sur les risques liés à une sous-estimation des impacts qu'auraient ces niveaux de changement climatique sans précédent.

Enfin, une analyse est réalisée à l'aide d'un scénario simplifié afin de mettre en lumière une distinction importante, à savoir si les dommages imputables au climat affectent uniquement le niveau de production économique ou s'ils se répercutent essentiellement sur le taux de croissance économique. Dans le second cas, les conséquences à long terme pourraient être beaucoup plus graves, avec une croissance économique plus faible à l'avenir.

3.1.1. Conséquences à long terme d'une action tardive

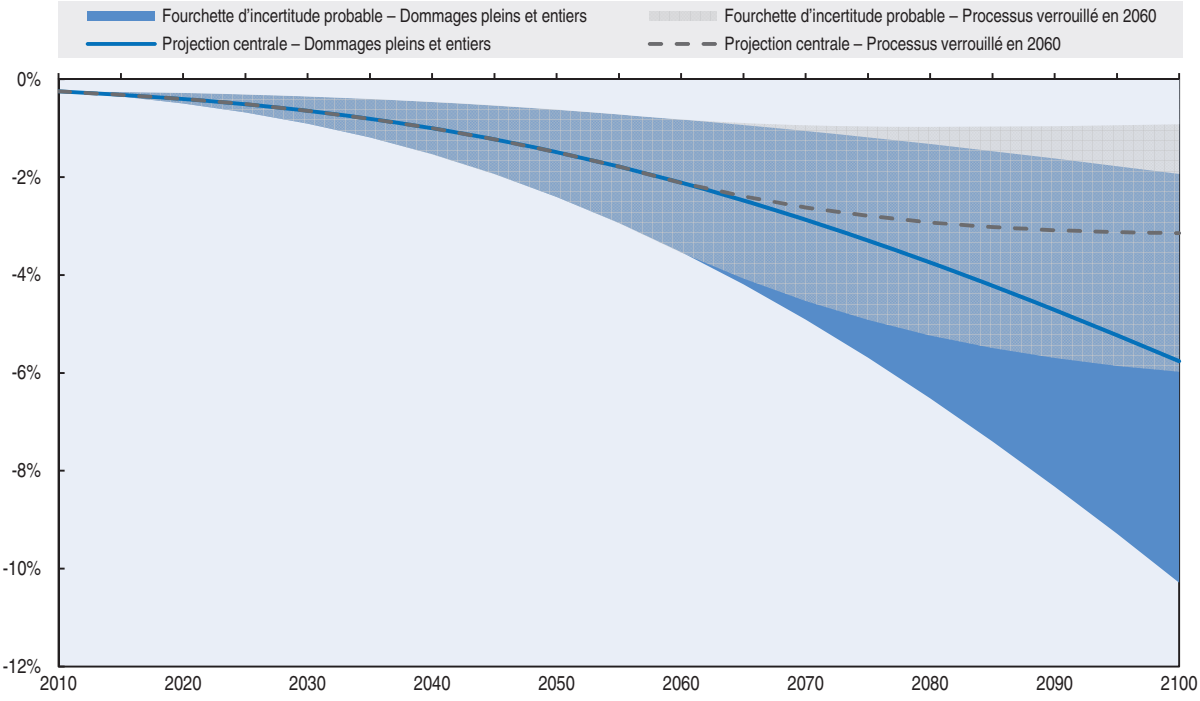
Par construction, la projection centrale du modèle AD-DICE entraîne des pertes mondiales de PIB d'ici à 2060 qui sont conformes à celles prévues dans le modèle ENV-Linkages (et qui représentent le même sous-ensemble d'impacts que celui présenté dans le chapitre 1). Si les émissions continuent d'augmenter après 2060, l'effet négatif sur le PIB se poursuivra et les projections centrales des pertes de PIB représenteront alors 5.8 % du PIB d'ici à la fin du XXIe siècle, d'après le modèle AD-DICE (graphique 2.15). Comme dans les calculs ENV-Linkages, ces projections sont explicitement liées à l'incertitude concernant le paramètre de sensibilité climatique à l'équilibre (SCE), mais sont entachées par ailleurs d'autres incertitudes (voir l'encadré 2.1). D'ici à la fin du XXIe siècle, les pertes de PIB pour la fourchette d'incertitude probable de 1.5 °C à 4.5 °C devraient être comprises entre 2 % et 10 % (pour une fourchette plus large de valeurs de la SCE comprises entre 1 °C et 6 °C, les pertes de PIB vont de 1 % à 15 %). Toujours selon le modèle AD-DICE, la température moyenne planétaire devrait enregistrer une hausse comprise entre 2.4 et 5.5 °C d'ici à 2100 pour la fourchette probable. Le modèle AD-DICE entrevoit des dommages plus importants à l'échelle mondiale que les projections correspondant au scénario de politiques inchangées présentées par les différentes versions du modèle DICE (Nordhaus, 2007, 2012), et que les résultats du modèle AD-DICE présentés dans Dellink et al. (2015). Bien que le recalibrage du modèle AD-DICE, afin de correspondre au scénario de référence de CIRCLE, puisse n'avoir qu'un effet mineur sur les résultats par rapport à DICE (de Bruin, 2014), la plus grande différence entre AD-DICE et DICE/RICE découle en majeure partie de l'hypothèse de la projection centrale d'AD-DICE, selon laquelle les possibilités d'adaptation ne sont pas toutes

mises en œuvre en l'absence de nouvelles politiques climatiques (voir la section 4.2.1 et l'annexe I). Dellink et al. (2014) utilise une version légèrement plus ancienne du modèle AD-RICE, qui ne tient pas compte des dommages imputables à l'élévation du niveau de la mer, d'où des impacts plus faibles sur le PIB, et définissent l'adaptation totale comme étant sa projection centrale.

Par construction, le scénario *Processus verrouillé en 2060* fixe les émissions aux niveaux prévus dans le scénario de politiques inchangées jusqu'en 2060, après quoi les émissions sont ramenées à zéro. Le graphique 3.1, qui compare le scénario *Dommages pleins et entiers* et le scénario *Processus verrouillé en 2060*, montre qu'une part non négligeable de ces impacts sont déjà rendus inéluctables par les émissions qui se produiront jusqu'en 2060. En particulier, les dommages imputables à l'élévation du niveau de la mer ne sont que très peu sensibles à la variation du rythme des émissions. Même si les émissions nettes de GES tombaient à zéro après 2060, les dommages climatiques et leurs conséquences sur le PIB (avec une perte de 2 % environ en 2060) continueraient de s'accentuer pendant au moins un siècle en raison de l'inertie du système climatique (les pertes se stabilisant par la suite à 3 % vers la fin du siècle)[2]. Ce constat va dans le sens des conclusions d'un document du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2013), qui insiste sur le fait que « [l]es températures en surface resteront à peu près constantes, mais à des niveaux élevés pendant plusieurs siècles après la fin complète des émissions anthropiques de CO_2 » (GIEC, 2013, p. 26). Même si la sensibilité climatique à l'équilibre est faible (1.5 °C), des pertes annuelles de PIB d'au moins 1 % seront inévitables pendant plus d'un siècle après 2060.

Graphique 3.1. **Dommages résultant des impacts climatiques considérés à très long terme, projection centrale**

Variation en pourcentage par rapport la référence sans dommages



Source : Modèle AD-DICE.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399719

Dans le cas d'une forte sensibilité climatique, qui se traduirait par une hausse des températures de 4.5 °C ou 6 °C, ces pertes annuelles s'élèveront à 6 % et plus de 9 %, respectivement, à l'horizon 2100. Cette affirmation s'applique également aux impacts climatiques qui surviendront avant 2060 : en effet, toute émission survenant aujourd'hui ou à l'avenir engendre toute une série de répercussions et conduit à une augmentation des dommages imputables au climat pendant au moins un siècle. Par conséquent, certains dommages sont d'ores et déjà observables du fait des émissions passées. Dans le modèle AD-DICE, ces émissions progressent peu à peu pour s'établir à 0.6 % du PIB (dans le cas de l'estimation centrale fondée sur la sensibilité climatique à l'équilibre), bien que le modèle ne soit pas suffisamment affiné (et il n'est pas prévu pour l'être) pour estimer précisément les niveaux de dommage actuels.

3.1.2. Une autre fonction de dommage marquée par une non-linéarité plus forte

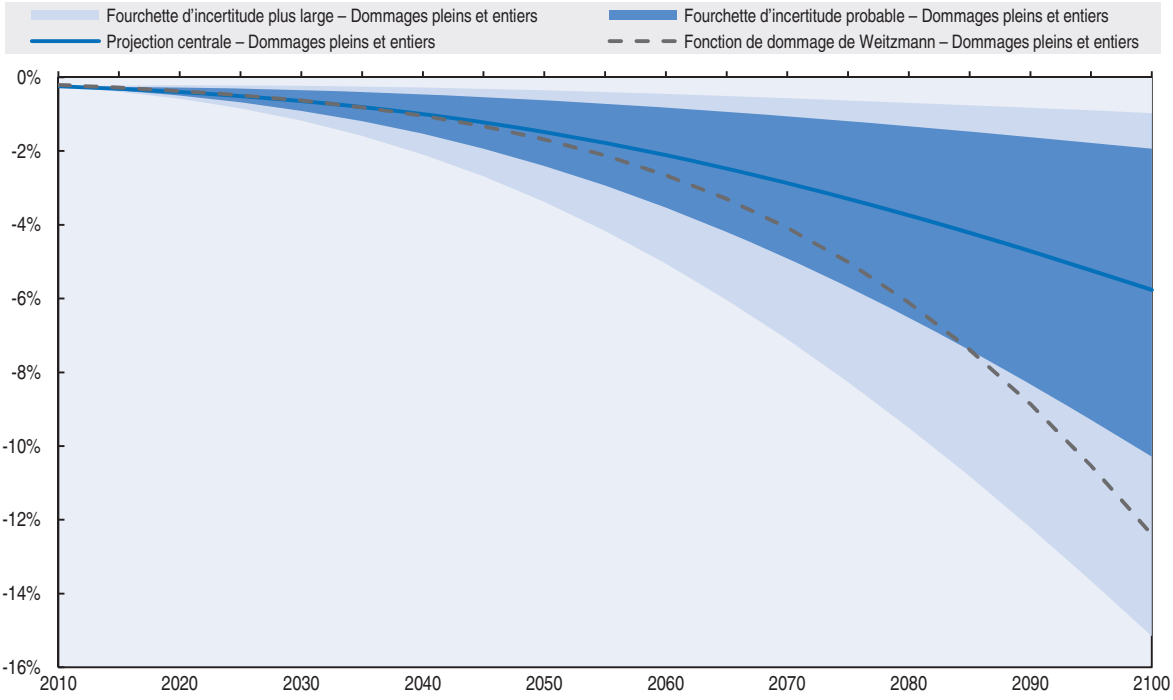
Les conséquences à long terme sur le PIB dépendent de façon critique de la forme de la fonction de dommage. Cependant, comme le souligne le Groupe de travail III du GIEC (2014b), plus les hausses de température sont importantes, moins les projections des dommages sont fiables. Le modèle AD-DICE utilise une fonction quadratique type, comme le propose Nordhaus, mais Weitzman (2009, 2012, 2013) soutient que cette fonction sous-estime les possibilités d'aboutir à une situation dont la probabilité serait faible mais les impacts élevés (queue de distribution épaisse). À l'instar de Weitzman (2012), on étalonne pour le modèle AD-DICE une autre fonction de dommage marquée par une non-linéarité beaucoup plus forte, dans laquelle des hausses de températures atteignant 2 °C conduisent à des niveaux de conséquences semblables à ceux obtenus dans la spécification standard, mais où des augmentations de températures importantes débouchent sur des réductions bien plus spectaculaires du PIB (on introduit pour ce faire un terme de puissance plus élevé dans les dommages dus à l'élévation des températures, conformément à la méthode de Weitzman, 2012). Comme indiqué au graphique 3.2, les conséquences à long terme de cette autre spécification sont spectaculaires dans le scénario central du statu quo, où la diminution du PIB passe à deux chiffres avant la fin du XXI^{e} siècle. Il convient de noter que, dans le scénario *Processus verrouillé en 2060*, qui utilise la fonction de dommage de Weitzman, les pertes durant les dernières décennies du XXI^{e} siècle sont nettement supérieures à celles de la spécification de base avec la fonction de dommage initiale du modèle AD-DICE (5 %, contre 3 % ; cet écart n'est pas représenté dans le graphique 3.2).

3.1.3. Dommages imputables au changement climatique exerçant une influence directe sur les taux de croissance économique

De nouvelles publications affirment que les modèles d'évaluation intégrée devraient, au moins en partie, faire peser directement les dommages climatiques sur le taux de croissance économique plutôt que sur le niveau de PIB, comme le font les modèles DICE (Nordhaus, 2012), AD-RICE et d'autres modèles semblables (voir l'encadré 3.1). L'idée de base est que faute de mesures d'atténuation, le changement climatique risque de perturber les « moteurs de la croissance » (comme l'accumulation de capital et le progrès technologique). Par exemple, selon Dell et al. (2012), des données empiriques montrent que les chocs de température influent sur le taux de croissance économique dans les pays en développement. Felbermayr et Gröschl (2014) constatent de même que les catastrophes naturelles ont des effets persistants, et Hsiang et Jina (2014) font la même constatation pour les tempêtes en particulier. Ces remarques valent surtout pour les pays en

Graphique 3.2. **Dommages résultant des impacts climatiques considérés à très long terme, autre fonction de dommage**

Variation en pourcentage par rapport la référence sans dommages



Source : Modèle AD-DICE.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399727

Encadré 3.1. **Des publications commencent à s'intéresser aux effets des dommages climatiques sur la croissance économique**

Pindyck (2012), Stern (2013) et Dietz et Stern (2015) formulent une hypothèse essentielle selon laquelle les impacts climatiques tels qu'ils sont appliqués au niveau de PIB dans le modèle DICE (et AD-DICE) devraient influencer, au moins partiellement, le taux de croissance de la PTF. D'un point de vue technique, cette hypothèse n'est toutefois valable que lorsque les impacts sont estimés indépendamment du PIB. Si les effets à reproduire dans le modèle d'évaluation intégrée sont présentés sous la forme d'un flux de pertes macroéconomiques annuelles résultant d'un ensemble de facteurs, ces flux annuels devraient être recalibrés lorsqu'ils s'appliquent aux taux de croissance, de manière à reproduire l'ensemble des impacts (exogènes) en pourcentage du PIB. Dans ce cas précis, le non-recalibrage des paramètres liés aux facteurs de production induirait une double comptabilisation, car les dommages qui résulteront des impacts actuels sont déjà pris en compte dans les pertes à venir. Le recalibrage nécessite que la formulation des dommages affectant la croissance, plutôt que le niveau de revenus, n'ait aucune influence sur les projections futures mais modifie uniquement la forme fonctionnelle des impacts. Les fonctions de dommage agrégées stylisées semblables à celles utilisées par les modèles DICE et AD-DICE ne permettent pas de déterminer dans quelle mesure les dommages doivent être ou non recalibrés lorsqu'ils sont appliqués aux taux de croissance.

Stern (2013) et Dietz et Stern (2015) cherchent également à savoir si les dommages climatiques influent sur l'accumulation de capital. L'étude d'impact détaillée figurant dans le modèle ENV-Linkages intègre les deux types d'effets : d'une part, les effets jouant sur les

Encadré 3.1. **Des publications commencent à s'intéresser aux effets des dommages climatiques sur la croissance économique** *(suite)*

taux de croissance (comme l'élévation du niveau de la mer et les dommages causés par les ouragans aux stocks de capital) et, d'autre part, les effets ayant une influence sur les niveaux de production (tels que les impacts sur le rendement des cultures agricoles).

Moore et Diaz (2015) vont plus loin et calibrent l'impact du changement climatique sur la croissance en fonction d'observations empiriques selon lesquelles une hausse des températures régionales est traditionnellement corrélée négativement avec les taux de croissance économiques, tout au moins dans les pays pauvres (Dell et al., 2012). Moore et Diaz (2015) reprennent ces estimations qu'ils appliquent aux projections relatives à la croissance économique. En premier lieu, les projections de référence les plus crédibles, dont les leurs, montrent que les pays actuellement pauvres devraient enregistrer des taux de croissance futurs supérieurs à ceux constatés les pays riches (techniquement parlant, les dommages et le niveau de revenu sont corrélés négativement). Il s'agit de l'hypothèse de convergence conditionnelle, qui caractérise notamment les projections économiques de l'OCDE et sous-tend le scénario de référence du modèle CIRCLE (voir le chapitre 2). Les dommages peuvent ralentir le processus de convergence (en influant plus fortement sur les taux de croissance dans les pays en développement), ou entraver le développement d'une autre façon de sorte que la convergence sera plus lente qu'en l'absence de changement climatique. Mais le changement climatique devra avoir de très fortes répercussions pour que la croissance empêche toute convergence. Par ailleurs, si l'effet de convergence domine les dommages imputables au climat, il se pourrait alors que les taux de croissance économique futurs soient corrélés positivement et non pas négativement aux niveaux de température régionaux. Dans un second temps, si l'on se fie aux niveaux de revenus traditionnellement observés, presque tous les pays devraient être riches d'ici la fin du siècle (l'étude de Moore et Diaz révèle également que les niveaux de revenus des pays pauvres dépassent largement la moyenne mondiale actuelle). En outre, Dell et al. (2012) montrent que la hausse des températures n'a pas de répercussions significatives sur la croissance des pays à revenu élevé, ce qui porte à croire que les impacts sur la croissance subis par les pays actuellement pauvres pourraient diminuer au fil du temps.

L'inclusion des coûts d'adaptation dans la fonction de dommage, ce qui est habituellement le cas dans le modèle DICE (contrairement au modèle AD-DICE), vient également compliquer le tableau. En effet, les impacts des inondations dues à l'élévation du niveau de la mer se manifestent en grande partie par la destruction de capital, mais dans le contexte d'une combinaison d'impacts et de mesures d'adaptation à moindre coût (comme dans le modèle DICE) on observe que dans la plupart des régions, la majeure partie des coûts correspondent en réalité à des investissements dans des systèmes de défense contre la mer. Or il s'agit de dépenses de consommation qui rivalisent avec d'autres investissements mais n'ont pas d'incidence directe sur le stock de capital. En principe, seule une partie des impacts résiduels doit affecter directement le stock de capital existant.

développement, pour lesquels seuls une augmentation rapide du stock de capital et un progrès technologique rapide permettront de rattraper les pays développés en termes de niveaux de revenu. Ces effets sur la croissance peuvent découler d'une modification de la vitesse du progrès technologique ou de la destruction des stocks de capital. L'hypothèse selon laquelle les dommages climatiques affectent le progrès technologique (et plus particulièrement la productivité totale des facteurs – PTF) repose sur le fait que les technologies d'aujourd'hui sont axées sur le contexte climatique actuel et pourront ne pas

fonctionner aussi bien dans les conditions climatiques futures (Dietz et Stern, 2015). De la même manière, les dommages climatiques auront une influence sur le stock de capital car ils se manifesteront, du moins en partie, par des destructions de terres ou de bâtiments, notamment. Sue Wing et Lanzi (2014), ainsi que les chapitres 1 et 2 du présent document, mettent en évidence les mécanismes des dommages subis par le stock de capital.

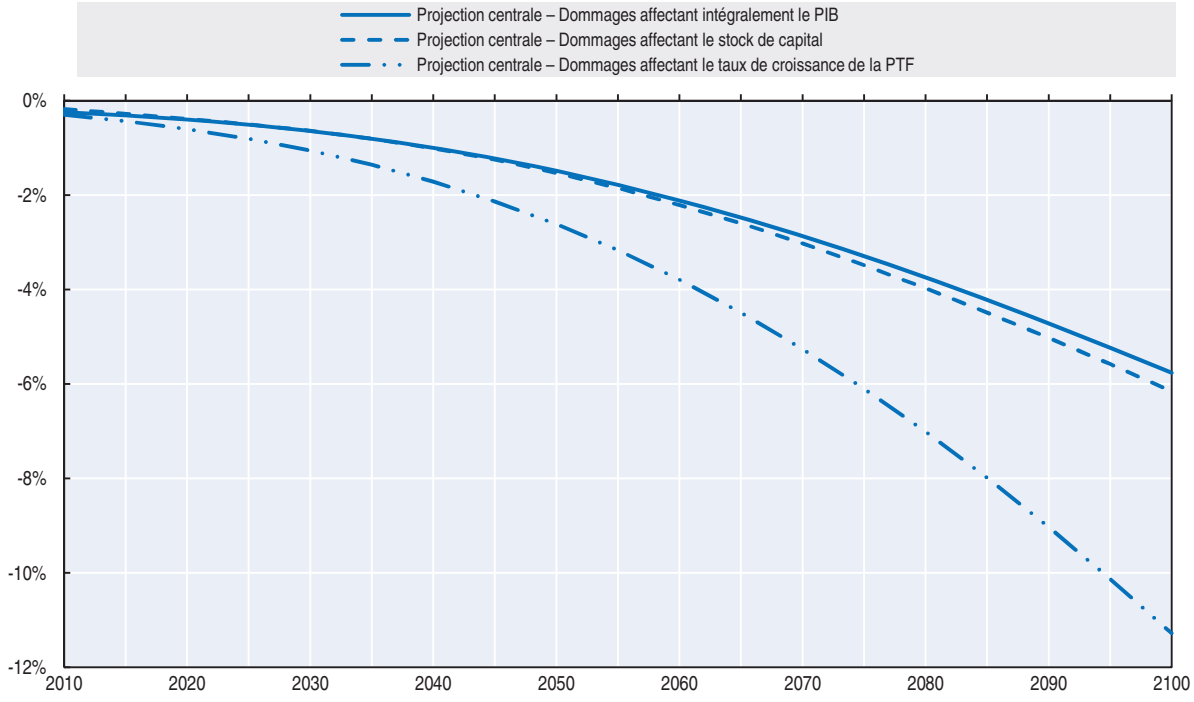
Le modèle AD-DICE est l'unique outil capable de donner plus d'informations sur tous ces éléments et de déterminer à quel point il importe de rapprocher directement les dommages de la croissance dans l'évaluation des mesures. De ce fait, on réalise deux simulations supplémentaires dans lesquelles les dommages résiduels (hors coûts d'adaptation) sont réaffectés aux moteurs de la croissance. S'agissant de la première simulation, 30 % des dommages résiduels sont réaffectés au stock de capital. Ce partage à hauteur de 30 % est conforme aux hypothèses de Dietz et Stern (2015), et aux observations du précédent chapitre selon lesquelles, d'ici à 2060, près de la moitié des pertes de PIB seront imputables à un ralentissement de l'accumulation de capital. Dans la seconde simulation, 30 % des dommages résiduels (hors coûts d'adaptation) pèsent sur le taux de croissance de la PTF, toujours d'après Ditez et Stern (2015). Dans les deux cas de figure, les 70 % de dommages résiduels restants, ainsi que la totalité des coûts d'adaptation, sont réaffectés au PIB.

Les résultats de ces simulations sont présentés au graphique 3.3. Les deux spécifications possibles conduisent à une augmentation des dommages projetés au fil du temps, et l'écart entre les différentes spécifications se creuse peu à peu. Cependant, les effets constatés ne sont pas spectaculaires et, même si les effets sur la croissance se font sentir immédiatement à partir de 2010, pour les dommages subis par le stock de capital, la différence est à peine visible jusqu'au milieu du siècle. S'agissant de la spécification relative aux dommages au stock de capital, le facteur essentiel permettant de limiter les dommages dans le temps n'est autre que l'accroissement du taux d'épargne. En effet, ce taux rend compte de la baisse du stock de capital et par conséquent de sa hausse de productivité marginale. Le modèle définit automatiquement l'arbitrage optimal afin de maximiser la valeur actuelle nette d'utilité. L'ajustement des comportements relatifs à l'épargne et à l'investissement constitue une mesure d'adaptation puissante, qui permet de neutraliser en grande partie les effets des dommages climatiques sur le capital ou la croissance de la PTF. En effet, les ménages disposent d'un outil dont ils peuvent user pour transformer les dommages sur la croissance en dommages affectant leur niveau de consommation : ainsi, en épargnant davantage, ils sacrifient une petite partie de leur consommation à court terme afin de compenser la baisse du stock de capital à venir et conserver ainsi un taux plus élevé de croissance du PIB. L'effet des dommages au stock de capital sur les niveaux de consommation (qui n'est pas montré au graphique 3.3) est très semblable à l'effet sur le PIB ; seule une spécification assortie de taux d'épargne fixes donnera des projections dans lesquelles l'effet des dommages sur le stock de capital est sensiblement différent.

Le fait de placer une partie des dommages sur la PTF a un impact supérieur sur les PIB mondiaux, du même ordre de grandeur qu'une SCE élevée ou que la spécification de la fonction de dommage de Weitzman. Cela n'altère donc en rien l'aperçu qualitatif de l'exercice de modélisation. En outre, il est difficile d'imaginer qu'une grande partie des dommages climatiques pourraient épargner le capital ou la production mais affecter plutôt le progrès technologique. En effet, la destruction du capital archaïque pourrait stimuler l'innovation et potentiellement accroître l'efficience des économies. Aucune des catégories d'impacts répertoriées dans l'évaluation qualitative détaillée présentée au chapitre 2 n'est directement liée au taux de croissance de la PTF, alors que certaines d'entre elles influent sur les niveaux de PTF.

Graphique 3.3. **Dommages résultant des impacts climatiques considérés à très long terme, autres effets possibles sur la croissance**

Variation en pourcentage par rapport la référence sans dommages



Source : Modèle AD-DICE.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399739

Les deux autres spécifications possibles figurent dans la fourchette d'incertitude présentée pour la projection centrale dans les graphiques 3.1 et 3.2. En théorie, il peut donc être important de savoir si les dommages climatiques auront des répercussions uniquement sur les niveaux de PIB ou également sur la croissance économique, mais cela n'est pas fondamental pour l'analyse. Si les analyses simplifiées reposant sur des hypothèses audacieuses permettent de mieux comprendre les mécanismes en jeu, elles doivent être complétées par une approche nuancée, qui consiste à examiner comment les différents impacts climatiques influencent les divers moteurs de la croissance, comme l'indique le chapitre 2 avec le modèle ENV-Linkages, afin que l'élaboration des politiques repose sur des informations fiables.

3.2. Autres conséquences du changement climatique : mortalité, inondations et points de basculement

L'analyse menée à l'aide du modèle ENV-Linkages vise à prendre en compte les impacts marchands les plus importants du changement climatique. Ce travail ne peut cependant pas être exhaustif, pour plusieurs raisons. Premièrement, certaines catégories d'impacts climatiques sont insuffisamment documentées ou connues pour que l'on puisse les intégrer de manière fiable au modèle ENV-Linkages. Deuxièmement, le modèle ENV-Linkages mesure l'activité économique sur la base de la production. Sa capacité à quantifier les conséquences du changement climatique, et notamment celles qui ne sont pas directement liées aux marchés, est donc limitée.

Les *impacts non marchands* du changement climatique désignent les conséquences qui affectent les activités humaines et non humaines pour lesquelles il n'existe aucun marché (GIEC, 2014a), comme la biodiversité et la culture, ainsi que les modifications du bien-être dont le PIB ne rend pas pleinement compte, telles que les coûts liés aux décès prématurés, à la douleur ou à la souffrance.

Dans l'ensemble, les impacts non marchands du changement climatique seront probablement nombreux, bien que les analyses quantitatives approfondies dont on dispose ne suffisent pas pour tirer des conclusions solides à ce sujet. Le rapport Stern (Stern, 2007), l'une des rares publications à rendre compte de ces impacts, estime que les dommages non marchands imputables au changement climatique devraient atteindre près de 6 % du PIB dans un scénario de réchauffement de 7.4 °C. Par manque d'estimations fiables, le dernier Rapport d'évaluation du GIEC ne cite pas de chiffres quant à l'ampleur des impacts non marchands (GIEC, 2014a).

Étant donné que les indicateurs basés sur la production, tels que le PIB, ne permettent pas de mesurer convenablement les impacts non marchands, d'autres indicateurs plus larges commencent à se substituer à ces outils (encadré 3.2).

Encadré 3.2. **Au-delà du PIB : les effets du changement climatique sur le bien-être**

Il a été largement démontré que le PIB n'est pas très performant pour mesurer la prospérité et, *a fortiori*, le bien-être économique. Des problématiques telles que les inégalités, la santé et la qualité de l'environnement ne sont que quelques-uns des importants facteurs touchant directement la population qui ne sont pas bien, voire pas du tout, pris en compte par le PIB. Stiglitz et al. (2010) abordent cette question de manière très complète et l'Indicateur du vivre mieux de l'OCDE (OCDE, 2011) représente un exemple d'avancée intéressante dans ce domaine.

Le changement climatique aura de nombreuses répercussions que le PIB ne pourra pas appréhender convenablement. Par exemple, la mortalité précoce a des conséquences négatives en termes d'espérance de vie et l'estimation du coût social des jours de maladie est plus complète lorsqu'elle tient compte de la perte de bien-être et pas uniquement de la productivité du travail. En outre, les variations de PIB ne permettent pas de saisir le coût social véritable de la perte de patrimoine culturel, par exemple. Il semble donc opportun d'adopter une méthodologie qui ne se limite pas à mesurer les conséquences du changement climatique à l'aide d'un indicateur économique très spécifique comme le PIB, mais qui recoure également à des indicateurs permettant de révéler les conséquences plus larges en termes de bien-être. Les responsables des initiatives visant à élaborer ces indicateurs de remplacement utilisent souvent l'expression « au-delà du PIB » pour décrire leur approche (OCDE, 2011 ; CE, 2009a ; 2009b ; Costanza et al., 2009 ; PNUD, 1990, 2014).

Bien que cette approche soit intéressante et pertinente d'un point de vue théorique, deux raisons empêchent son adoption dans le cadre du présent rapport. En premier lieu, les exigences à satisfaire en matière de données pour une évaluation plus complète du bien-être social sont énormes et, bien souvent, il n'existe pas de données robustes, comme le révèle l'ensemble de ce chapitre. Dans un second temps, le PIB demeure un outil central pour évaluer la prospérité des sociétés. En outre, il permet d'influencer la prise de décision à tous les niveaux, en permettant aux responsables de l'élaboration des politiques de se focaliser sur les impacts et les coûts plutôt que sur les indicateurs et la méthodologie. En

Encadré 3.2. **Au-delà du PIB : les effets du changement climatique sur le bien-être** *(suite)*

résumé, tout un chacun sait ce qu'est le PIB et presque tout le monde a au moins vaguement conscience des limites de cet instrument.

L'une des manières de combler cette lacune pourrait consister à élargir la définition du bien-être tel qu'il est mesuré dans le présent cadre de modélisation économique et à présenter les résultats sous la forme de coûts pour le bien-être, parallèlement aux pertes de PIB. Par exemple, une approximation des coûts de désutilité de la morbidité et de la mortalité en termes de bien-être pourrait être intégrée à l'évaluation analytique. Des publications comme celle de Ciscar et al. (2014) reprennent cette démarche adoptée par Mayeres and Van Regemorter (2008). Il deviendrait ainsi possible d'étudier les conséquences pour le bien-être sous l'angle de l'aversion des risques en calculant une prime de risque correspondant à la méconnaissance des conséquences du changement climatique (Markandya et al., 2015). Une telle analyse est loin d'être simple et devra faire l'objet de travaux de recherche futurs.

Cette section vise à compléter l'analyse sur modèle à l'aide de quelques exemples relatifs à d'autres impacts climatiques pertinents, tirés des publications sur le sujet portant sur des conséquences marchandes ou non marchandes. Chaque catégorie d'impacts présentée au chapitre 1 sera illustrée par un ou deux exemples, sans toutefois chercher l'exhaustivité[3]. Si possible, des informations quantitatives fondées sur des projections des modèles ou des appréciations directes seront fournies. Cet exposé entend sensibiliser le lecteur à ces effets possibles et, le cas échéant, donner des informations utiles pour intégrer certains de ces impacts au modèle ENV-Linkages. Bien que cette étude ne comporte pas d'analyse quantitative en bonne et due forme des impacts climatiques sur le bien-être en général, les décideurs devront élargir leurs perspectives pour évaluer des propositions de mesures particulières en ne prenant pas uniquement en compte les conséquences purement économiques présentées dans ce rapport pour comparer les coûts et avantages des mesures envisagées.

3.2.1. Agriculture

La majorité des publications, y compris l'analyse quantitative contenue dans le présent rapport, repose sur des indicateurs centrés sur l'évolution du rendement des cultures afin d'estimer les coûts du changement climatique dans le domaine de l'agriculture (GIEC, 2014a). Cependant, le changement climatique se répercutera également sur d'autres aspects de l'agriculture, liés ou non à la production, tels que l'élevage, les pâturages et les parcours ou l'aquaculture (OCDE, 2001 ; OCDE, 2014a).

Le changement climatique aura probablement des répercussions importantes sur l'*élevage*, qui constitue une part importante du secteur agricole et des ressources alimentaires des pays membres et non membres de l'OCDE. Bien que les effets du changement climatique sur le bétail soient bien moins étudiés que ceux affectant le rendement des cultures, la majeure partie des publications sur ce thème relèvent que le changement climatique a des effets néfastes, par le biais du stress thermique et hydrique, notamment, sur la croissance des animaux, leur santé et les produits de base que l'on en tire, comme les produits laitiers (GIEC, 2014a). Les études proposant un tour d'horizon complet des impacts du changement climatique sur l'élevage sont toutefois insuffisamment nombreuses (GIEC, 2014a). Le stress thermique, qui devrait augmenter sous l'effet du changement climatique (voir ci-dessous),

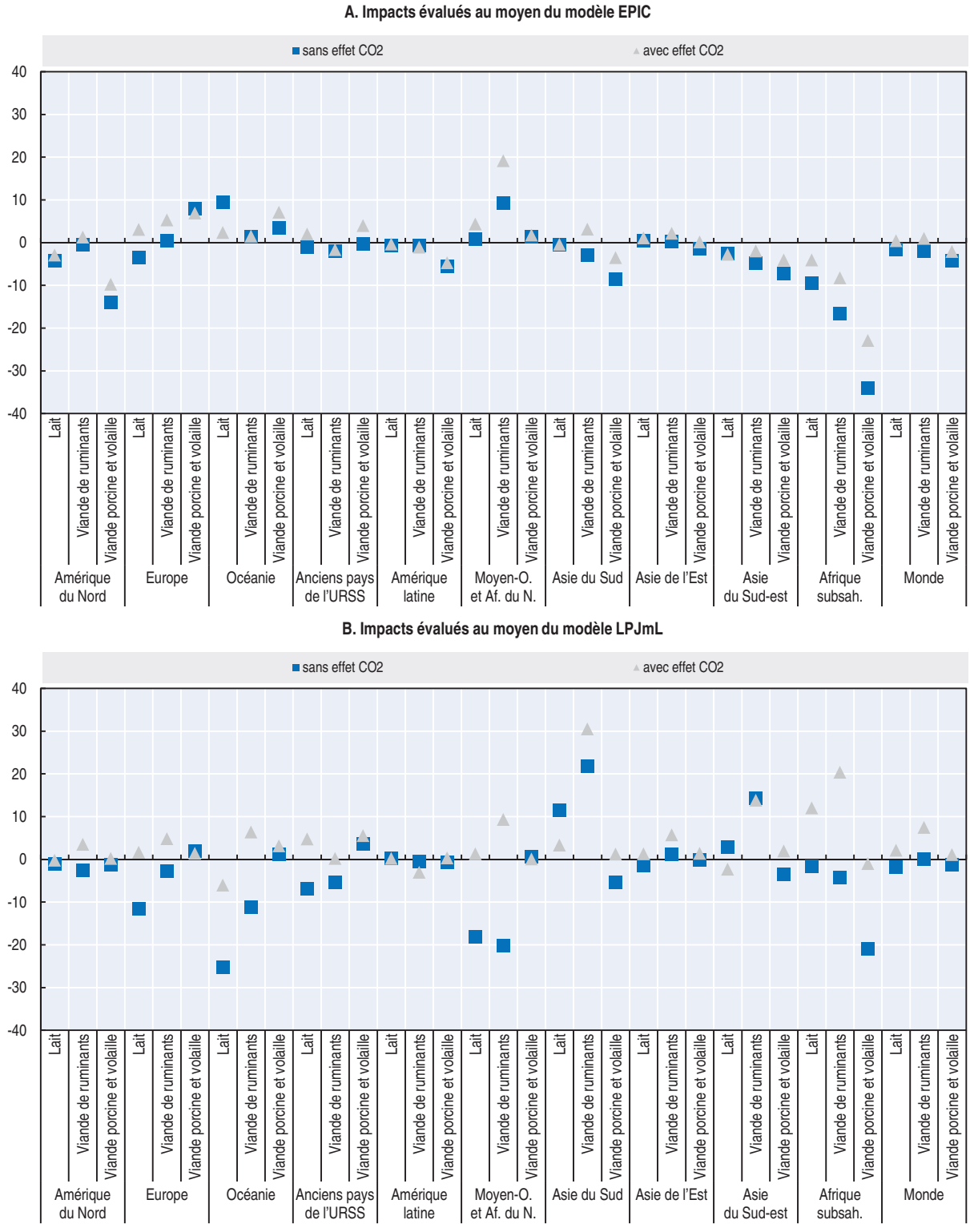
peut avoir des conséquences importantes sur la mortalité du bétail. En outre, la modification des régimes pluviométriques et les besoins accrus en eau du bétail et d'autres animaux domestiques pour faire face à la hausse des températures constitueront une difficulté supplémentaire. Une étude de Wall et al. (2010), par exemple, montre qu'au Royaume-Uni, le stress thermique dû au changement climatique peut entraîner une hausse de la mortalité ainsi que des pertes économiques au niveau de la production laitière, qui avoisineraient 40 millions GBP par an dans les années 2080 dans un scénario d'émissions de GES moyennes à élevées. Aux États-Unis, plusieurs États ont signalé plus de 5 000 décès d'animaux imputables à des vagues de chaleurs survenues par le passé (USGCRP, 2009). Une moindre exposition au froid résultant de températures moyennes plus élevées pourrait avoir des effets bénéfiques sur l'élevage, mais les publications ne se sont pas encore penchées sérieusement sur cette question et les estimations chiffrées font grandement défaut dans ce domaine. De plus, le changement climatique pourrait faire augmenter le nombre de cas nouveaux de maladies au sein des cheptels, et notamment des maladies à transmission vectorielle étroitement liées aux conditions climatiques (GIEC, 2014a). Si les experts sont persuadés que le changement climatique va favoriser la propagation des maladies, peu d'éléments viennent démontrer cette relation. D'autres études semblent indiquer que le changement climatique aura une incidence positive ou des effets non mesurables sur l'élevage dans certaines régions. Graux et al. (2011), par exemple, ne parviennent pas à cerner les répercussions du changement climatique sur la production laitière future en France. Les grandes exploitations commerciales qui appuient largement leur activité sur l'élevage seront peut-être plus sensibles aux changements de température que les petites exploitations pouvant plus facilement modifier leur processus de production ou le type d'animaux qu'elles élèvent, comme le montrent Seo et Mendelsohn (2008) pour l'Afrique.

Les *pâturages et parcours*, qui recouvrent différentes catégories de terres destinées à accueillir des animaux (prairies, brousse, savane, déserts chauds et froids, toundra), devraient réagir positivement ou négativement au changement climatique selon les régions. Les impacts sur les prairies devraient être semblables à ceux affectant le rendement des cultures. En outre, l'effet fertilisant du CO_2 pourrait stimuler la croissance végétale, permettant aux plantes de récupérer plus vite après une période de stress hydrique, et contribuer à réduire la mortalité végétale (GIEC, 2014a).

Très peu d'études rassemblent et quantifient les différentes voies par lesquelles le changement climatique se répercute simultanément sur les pâturages et le bétail. Havlík et al. (2015) proposent l'analyse la plus innovante à ce jour, en s'intéressant à la fois aux impacts sur la productivité des prairies et sur le rendement des cultures et en ne tenant pas compte des effets directs liés au stress thermique et aux maladies[4]. Leur analyse utilise le Modèle de gestion de la biosphère mondiale (Global Biosphere Management Model – GLOBIOM) et suit le scénario climatique Profil représentatif d'évolution de concentration (RCP) 8.5. Leurs projections montrent que l'impact du changement climatique sur la production animale sera assez semblable à celui constaté au niveau des cultures. Toutefois, les prairies devraient être plus sensibles aux bienfaits de ce phénomène et plus résilientes face à ses répercussions négatives que le rendement des cultures, ce qui devrait entraîner une augmentation de la part des ruminants dans les systèmes de pâturage. Ces auteurs concluent par ailleurs que les incertitudes les plus vives concernent le modèle de culture utilisé et l'intensité supposée de l'effet fertilisant du CO_2, d'où la présentation de différents scénarios. Enfin, ils soulignent que les impacts sur les prairies et les terres cultivées se présentent de manière très semblable. Le graphique 3.4, qui s'inspire des travaux de

Graphique 3.4. **Effets du changement climatique sur la production animale en 2050**

Pourcentage d'évolution par rapport au scénario climatique actuel



Note : EPIC et LPJmL sont les modèles de cultures sur lesquels repose l'analyse.
Source : Havlík et al. (2015), graphique 8.

Havlík et al. (2015), synthétise quelques-uns des principaux effets quantitatifs pour les scénarios incluant ou non les effets fertilisants du CO_2.

Tout comme les données d'observation relatives aux impacts du changement climatique dans le secteur de l'élevage, on dispose de peu d'informations sur les effets du réchauffement et d'autres facteurs climatiques dans le domaine de l'*aquaculture*. D'après Pickering et al. (2011), le changement climatique sera probablement bénéfique pour l'aquaculture en eau douce, à l'exception des activités pratiquées dans les zones côtières. Pour l'heure, aucune étude économique approfondie ne s'est intéressée aux conséquences du changement climatique sur l'évolution de la productivité du secteur aquacole.

3.2.2. Zones côtières

Outre les impacts sur le capital physique et les terres qui ont été quantifiés et examinés dans ce rapport, l'élévation du niveau de la mer peut avoir d'autres impacts marchands (par exemple, intrusion d'eau salée affectant l'agriculture et l'approvisionnement en eau) et des conséquences sur les biens non marchands ainsi que les services fournis par les zones côtières. Ces répercussions peuvent résulter de l'augmentation progressive du niveau moyen des mers, mais aussi de la modification de leur niveau maximal, et notamment des ondes de tempête. Si la surexploitation des nappes souterraines provoque un affaissement des sols, la hausse du niveau des mers entraînera aussi des dommages plus importants dans les zones urbaines. Ces biens non marchands ont néanmoins une valeur élevée, ce qui n'a rien d'étonnant car plus de 2.5 milliards de personnes vivent dans des régions côtières. Au-delà des valeurs d'existence pures et simples, tout un éventail d'activités de loisirs et d'autres services écosystémiques sont assurés par les milieux côtiers, notamment par des habitats essentiels comme les mangroves et les récifs coralliens. La ville lagunaire de Venise, en Italie, qui abrite un patrimoine culturel et architectural indéniable, est confrontée à bon nombre de ces problématiques.

L'élévation du niveau de la mer devrait avoir des conséquences non marchandes importantes sur les habitats naturels et le relief des zones côtières, comme les plages et les lagons. En ce qui concerne les plages du sud de la Californie, Pendleton et al. (2009) estiment que la baisse de la rente du consommateur causée par une inondation permanente consécutive à l'élévation du niveau de la mer d'un mètre atteindra 63 millions USD par an en moyenne et 37 millions USD les années de fortes tempêtes. Il est cependant extrêmement difficile de déterminer l'ampleur des coûts liés au changement climatique étant donné que la disparition de terres peut aboutir à une réorganisation des différentes utilisations des sols, y compris à l'intérieur des terres.

L'élévation du niveau des mers pourrait aussi être à l'origine de la disparition d'États-nations entiers ainsi que de leur culture. Des pays insulaires de faible altitude tels que les Maldives, Kiribati, les Palaos et les Tuvalu risquent très fortement d'être submergés. Ainsi, le point culminant des Tuvalu se trouve à cinq mètres d'altitude seulement, et la plupart des îles de cet archipel affichent une altitude inférieure à un mètre. Le phénomène des inondations annuelles, déjà monnaie courante au Bangladesh, devrait également s'accentuer sous l'effet du changement climatique. En dehors de quelques études de cas, les informations relatives à l'ampleur de ces impacts restent très limitées. De même, les connaissances relatives aux capacités d'adaptation des sociétés à l'élévation du niveau de la mer demeurent insuffisantes. Comme pour les impacts non marchands en général, il est extrêmement compliqué de quantifier les dommages causés à la culture et à d'autres aspects de la vie humaine n'ayant pas de prix. La disparition complète d'îles entières n'est

pas un effet marginal sur l'économie locale, et il faudra donc d'autres outils que les outils classiques pour en évaluer les conséquences économiques. Néanmoins, le fait que des sociétés entières se retrouvent privées de terres aurait au niveau local des conséquences économiques et sociales gigantesques.

3.2.3. Événements météorologiques extrêmes

Il est possible de rendre compte dans un cadre de modélisation d'une partie des principales conséquences des événements météorologiques extrêmes, puisqu'elles affecteront le capital physique, les ressources naturelles (comme les terres) et le travail. Toutefois, ces événements ont également de nombreuses répercussions liées aux activités économiques qui sont difficiles à intégrer dans un cadre de modélisation (notamment les perturbations locales des réseaux d'électricité et de transport, par exemple), et d'autres qui ne sont aucunement liées à des activités économiques, comme l'anxiété, l'inconfort, la douleur et la souffrance, ou une hausse de la mortalité. Or il est difficile de quantifier ces effets de désutilité. Si des données fiables relatives aux effets de désutilité des événements météorologiques existaient, il serait alors possible d'utiliser des méthodes d'évaluation pour apprécier leur importance d'un point de vue économique (cf. la section suivante consacrée à la santé).

Pour l'heure, il n'existe pas de données fiables à l'échelle mondiale concernant les impacts du changement climatique sur les *crues* fluviales. Des modèles de simulation des risques de crues permettent de calculer des indicateurs tels que les superficies et la population exposées à un risque d'inondation. La transposition de ces indicateurs en facteurs directement liés à l'activité économique ne va pas de soi. En principe, les inondations ont deux effets économiques essentiels. Premièrement, l'activité économique est largement perturbée aux alentours de la zone inondée. Pendant une à plusieurs semaines, les usines ferment, la population est contrainte de travailler depuis d'autres lieux (d'où une baisse de productivité), etc. En second lieu, les inondations endommagent durablement les infrastructures et les bâtiments, qu'il faut alors réparer ou reconstruire. Le meilleur moyen d'évaluer les conséquences pour l'activité économique consiste à examiner d'abord la superficie et la population concernées par les inondations, puis à se pencher plus précisément sur le patrimoine et les dommages urbains (pour ces derniers, on recueillera des informations sur les risques et l'exposition aux inondations, auxquels viendra s'ajouter la notion de vulnérabilité). Bien entendu, les inondations peuvent aussi avoir d'autres répercussions sociales, par exemple sur la santé mentale (Stanke et al., 2012).

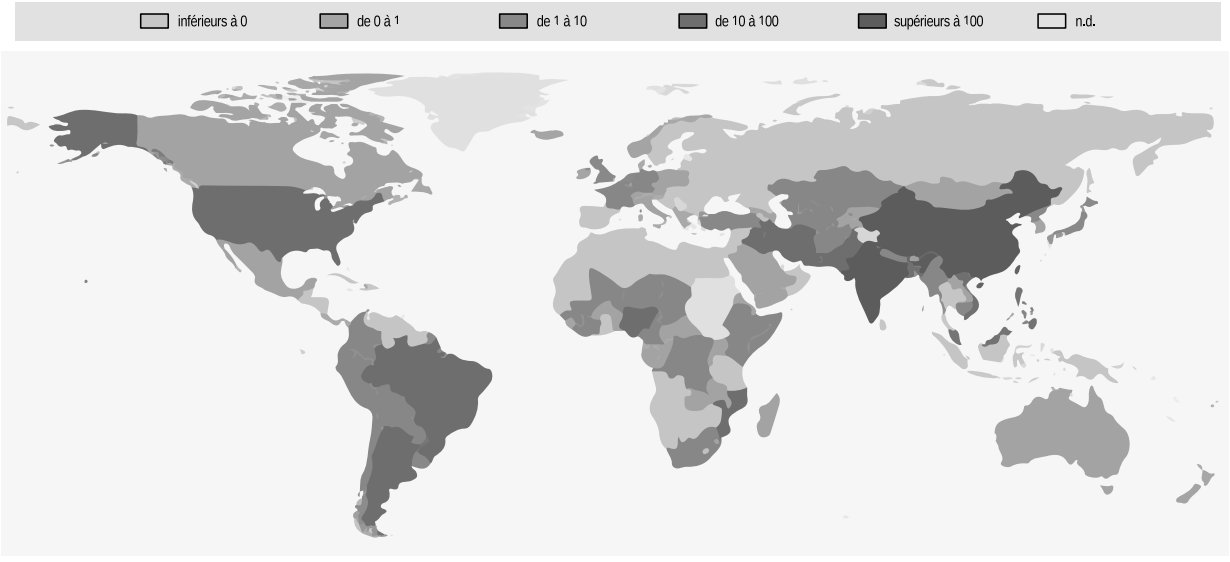
On peut utiliser le modèle GLOFRIS (Ward et al., 2013, 2014), ou plus précisément l'ensemble de modèles dont GLOFRIS fait partie, pour comparer les projections de risques d'inondations futures en présence ou en l'absence d'un changement climatique (Winsemius et Ward, 2015) et définir quels seront les dommages supplémentaires imputables au changement climatique. Le recours au cadre d'analyse mis au point par Ward et al. (2013), permet d'estimer les dommages supplémentaires causés par les inondations en milieu urbain, elles-mêmes liées au changement climatique. Tout d'abord, le modèle en cascade met en relation le volume de précipitation journalier projeté et la température, déterminée au demi-degré près, avec les volumes de crue journaliers, puis avec les volumes de crue annuels maximaux. Un modèle d'inondation est ensuite relié à un modèle d'impact afin de déterminer comment la hauteur des inondations à l'échelle locale peut prédire leur impact. L'exécution du modèle en cascade à deux reprises, une première fois avec les conditions climatiques actuelles et une seconde fois avec les modifications imputables au changement

climatique (d'après la projection du scénario RCP 8.5 et le modèle climatique HAdGEM) permet d'estimer le coût différentiel ou le surcoût du changement climatique en ce qui concerne les conséquences des inondations.

Le graphique 3.5 présente les dommages imputables aux inondations projetés pour 2080. Les données ont été rassemblées de manière à classer les pays par niveau, afin de faciliter la comparaison avec l'évaluation économique des autres impacts climatiques. L'Inde et la Chine sont, de loin, les deux pays pour lesquels les projections des dommages urbains imputables aux inondations sont les plus élevées. La hausse considérable des biens urbains exposés aux crues constitue le principal facteur à l'origine de ce résultat. Dans ces pays, l'ampleur des risques d'inondation est telle que les dommages supplémentaires imputables au changement climatique sont également considérables. Le Bangladesh figure également parmi les pays les plus concernés, mais le rôle du changement climatique est ici bien plus important. À l'inverse, des pays tels que l'Indonésie, la Russie, la Thaïlande et les principaux États riverains du Nil sont confrontés à des risques d'inondation relativement élevés, mais on estime que les dommages supplémentaires liés au changement climatique seront négatifs. S'agissant des pays de l'OCDE, les dommages liés aux inondations urbaines provoquées par le changement climatique seront limitées à moins de 50 milliards USD d'ici à 2080. Cela ne signifie pas qu'au total, ces dommages, provoqués ou non par le changement climatique, seront très inférieurs à ceux constatés dans les pays hors zone OCDE. Par exemple, la totalité des dommages constatés d'ici à 2080 atteindra 171 milliards USD aux États-Unis, 58 milliards USD au Mexique, 20 milliards USD en Allemagne et 17 milliards USD aux Pays-Bas. Dans ces pays, cependant, la composante climatique de ces dommages sera nettement plus faible que dans les pays non membres de l'OCDE.

Graphique 3.5. **Dommages urbains résultant des inondations imputables au changement climatique, d'ici à 2080**

Milliards USD, parités de pouvoir d'achat constantes de 2005



Note : Cette carte est à vocation illustrative et ne préjuge pas du statut de ou de la souveraineté sur un territoire couvert par cette carte. Source des frontières administratives : les offices statistiques nationaux et les Couches d'Unités Administratives Mondiales de la FAO (GAUL).
Source : Calculs effectués pour cette analyse d'après Winsemius et Ward (2015).

Étant donné l'importance des régimes pluviométriques régionaux projetés pour ces simulations et les grandes incertitudes qui les entourent, ces résultats s'appliquent uniquement au modèle climatique HadGEM. Le tableau 3.1 fait en effet ressortir des différences notables lorsqu'on recourt à d'autres modèles climatiques pour réaliser ces projections. Par exemple, seules les projections du modèle HadGEM mettent en avant une réduction des dommages urbains liés aux inondations en Indonésie ; à l'opposé, les autres modèles montrent tous une hausse des dommages dans ce pays. Du côté des pays de l'OCDE, les incertitudes les plus fortes concernent les projections relatives au Mexique. Néanmoins, des tendances semblables semblent de se dégager des différents modèles. Ainsi, les

Tableau 3.1. **Dommages urbains potentiels résultant des inondations imputables au changement climatique, par région**

Milliards USD, parités de pouvoir d'achat constantes de 2005

	HadGEM			GFDL	IPSL	MIROC	NorESM
	2010	2030	2080	2080			
OCDE Amérique							
Canada	0.0	0.5	0.0	1.5	-3.6	1.9	0.8
Chili	0.0	0.3	2.0	-3.4	-3.1	-3.4	-0.4
Mexique	0.0	-0.5	0.7	66.3	-49.7	-15.6	-29.9
États-Unis	0.0	2.3	19.4	10.2	16.6	5.4	3.5
OCDE Europe							
UE 4 gr. pays	0.0	1.9	11.2	0.8	3.9	4.8	2.2
UE OCDE autre	0.0	1.6	8.8	1.6	5.8	4.6	2.6
OCDE autre	0.0	-0.2	1.5	-6.2	-5.2	-4.5	0.1
OCDE Pacifique							
Aus. et Nvelle.Z.	0.0	-0.3	1.3	-4.2	1.4	1.2	0.4
Japon	0.0	0.6	3.4	2.6	1.2	0.9	1.5
Corée	0.0	0.2	0.9	1.1	0.4	2.0	0.7
OCDE	0.0	6.2	49.2	70.3	-32.1	-2.8	-18.5
Reste de l'Europe et de l'Asie							
Chine	0.0	48.0	427.9	343.0	88.8	102.5	184.4
UE non-OCDE	0.0	-0.8	-3.6	-1.7	-2.3	4.4	0.7
Russie	0.0	-5.4	-32.6	-7.6	-7.8	-4.7	-44.8
Région caspienne	0.0	1.9	17.6	2.6	-4.6	2.9	-6.4
Europe autre	0.0	-2.6	-13.5	-7.9	-6.8	2.1	-12.6
Amérique latine							
Brésil	0.0	0.9	12.6	6.7	98.1	-15.1	-40.3
Am. latine autre	0.0	-0.7	15.2	-10.5	10.5	-16.6	-26.9
Moyen-Orient et Afrique du Nord							
Moyen-Orient	0.0	-0.3	39.8	-60.9	-32.2	-34.2	9.4
Afrique du Nord	0.0	-2.5	-44.9	128.0	243.2	47.2	25.0
Asie du Sud et du Sud-Est							
ANASE 9	0.0	-0.7	65.1	185.2	139.1	57.9	196.1
Inde	0.0	51.5	1 094.9	432.7	718.3	362.2	207.8
Indonésie	0.0	-2.7	-29.0	5.2	152.8	11.2	38.4
Asie autre	0.0	2.4	184.0	153.9	148.9	117.8	114.1
Afrique subsaharienne							
Afrique du Sud	0.0	0.1	3.3	4.8	2.2	-2.0	-1.4
Afrique autre	0.0	3.1	59.3	85.6	178.4	225.1	76.1
Monde	0.0	98.4	1 845.3	1 329.4	1 694.3	857.9	701.2

Note : HadGEM, GFDC, IPSL, MIROC et NorESM sont des modèles climatiques particuliers utilisés pour projeter des régimes de précipitations et de températures (voir Winsemius et Ward, 2015, pour plus d'informations à ce sujet).
Source : Calculs effectués pour cette analyse d'après Winsemius et Ward (2015).

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399893

principaux dommages urbains liés aux inondations induites par le changement climatique sont constatés en Asie d'une façon générale, et en Inde en particulier, tandis que ces mêmes dommages reculent en Russie. Les scénarios climatiques tirés du modèle HadGEM révèlent que le coût des dommages urbains mondiaux imputables aux inondations devrait être compris entre 700 et 1 800 milliards USD d'ici à 2080.

L'exploitation de ces données est complexe, car ces dernières reflètent des dommages *possibles*, et ne comportent aucune variable d'ajustement permettant de gérer des risques d'inondation accrus. Par conséquent, les chiffres présentés ici doivent être interprétés avec prudence, car ils surestiment les dommages urbains à moindre coût causés par les crues fluviales. Cela dit, les dommages urbains ne constituent qu'une partie des dommages provoqués par les inondations, et les perturbations à l'échelle locale ne sont pas prises en compte ici. Or ces dernières peuvent avoir de graves conséquences pour les communautés locales, tout en ayant un effet macroéconomique relativement faible (dans le cas des ouragans, par exemple).

3.2.4. Santé

La modélisation des impacts sur la santé à l'aide d'ENV-Linkages rend compte des variations de productivité du travail causées par le stress thermique. Cependant, elle ne prend pas en considération les décès prématurés liés à la chaleur (notamment aux canicules) ni les effets sur la santé liés au froid. Les conséquences non sanitaires du stress thermique, comme les perturbations dans les transports, ne sont pas non plus examinées ici.

Les travaux de recherche consacrés aux répercussions du changement climatique sur la morbidité liée au froid demeurent rares et peu concluants. Selon le GIEC (2014a), la diminution des épisodes de froid intense pourrait se traduire par une réduction modeste de la morbidité liée au froid dans certaines régions, mais le degré de confiance associé à ce résultat est faible.

Les données empiriques concernant l'ampleur des avantages liés à l'évolution du nombre de décès prématurés sous l'effet de la diminution des épisodes de froid extrême sont également contrastées. D'après Bosello et al. (2006) ainsi que Watkiss et Hunt (2012), le nombre de décès prématurés évités et les avantages en termes de bien-être qui découlent d'une baisse de la mortalité hivernale sous l'effet du changement climatique pourraient l'emporter sur les effets préjudiciables de la chaleur sur la mortalité dans certaines régions. Les projections établies par Bosello et al. (2005) indiquent que dans l'Union européenne, aux États-Unis, dans les pays d'Europe de l'Est et de l'ex-Union soviétique, au Japon, dans d'autres pays de l'Annexe 1 (tels que définis dans la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques), en Chine et en Inde, la diminution des décès liés au froid imputables aux maladies cardiovasculaires ferait plus que contrebalancer la surmortalité due aux maladies liées à la chaleur et autres pathologies induites par le changement climatique en 2050. À l'échelle mondiale, ces auteurs prévoient que le changement climatique pourrait entraîner 849 252 décès de moins que dans le scénario de référence d'ici au milieu du siècle. De même, Watkiss et Hunt (2012) constatent que la baisse de la mortalité hivernale dans l'Union européenne sous l'effet du changement climatique est plus forte que la hausse de la mortalité estivale dans la plupart de leurs projections, aussi bien à court et moyen termes (2011-40) qu'à long terme (2071-2100). Watkiss et Hunt (2012) font cependant état des incertitudes liées à l'omission des effets d'îlot de chaleur urbain et des épisodes extrêmes, suggérant qu'il ne serait sans doute pas entièrement justifié de comparer directement la mortalité liée à la chaleur et la mortalité liée au froid.

D'autres études, publiées notamment par Kinney et al. (2012) et par Ebi et Mills (2013), contestent l'idée que les effets bénéfiques sur la mortalité hivernale l'emporteront sur les effets négatifs de l'augmentation de la mortalité liée à la chaleur. Le GIEC (2014a) cite également les communications de Wilkinson et al. (2007) et les études régionales de Doyon et al. (2008) et de Huang et al. (2012) pour conclure que l'augmentation de la mortalité liée à la chaleur d'ici au milieu du siècle l'emportera sur les gains résultant de la diminution des périodes de froid dans les zones tempérées et surtout dans les zones tropicales, où les populations nombreuses des pays en développement n'ont guère les moyens de s'adapter (GIEC, 2014a). S'appuyant sur les données empiriques du passé provenant du Royaume-Uni, Staddon et al. (2014) soulignent que dans les zones tempérées, la corrélation établie dans de nombreux travaux publiés entre des températures basses en l'hiver et une surmortalité hivernale est faible. Ils suggèrent que les maladies grippales – dont les corrélations positives avec le changement climatique restent à prouver – sont les principaux facteurs de décès liés au froid. Dans le même ordre d'idées, Honda et Ono (2009), à partir de données du Japon, font valoir que les risques liés au froid ne sont peut-être pas améliorés par la hausse des températures moyennes.

Les coûts économiques de la mortalité liée à la chaleur ne pouvant pas être pris en compte dans ce modèle, ils ont été estimés séparément ; aucune évaluation n'a été faite des conséquences des décès liés au froid. Au Japon, les chercheurs de l'Institut national des études environnementales (NIES) et de l'Université de Tsukuba ont calculé le nombre de décès prématurés imputables à la mortalité liée à la chaleur, et aux vagues de chaleur, notamment. Afin de produire des résultats conformes aux autres projections, ils ont eu recours au scénario climatique RCP 8.5 et au modèle HadGEM, élaboré par le Centre Hadley. En se basant sur les projections des températures futures, le NIES a mis au point un indice de chaleur ainsi qu'un indicateur de risque relatif en fonction des températures. Le nombre de décès prématurés supplémentaires causés par le stress thermique a ensuite été déterminé à l'aide du coefficient de risque, des niveaux de mortalité de référence et d'une grille de températures journalières (Takahashi et al., 2007 ; Honda et al., 2014)[5].

Le tableau 3.2 présente les résultats de cette analyse pour les régions du modèle ENV-Linkages. La Chine et l'Inde, pays très peuplés, figurent parmi les régions comptant le plus de décès prématurés. Des régions telles que l'Union européenne et les États-Unis comptent également de nombreux décès prématurés, car le vieillissement de la population gonfle la taille des populations vulnérables à risque. Dans le monde, le nombre de victimes du stress thermique, qui est inférieur à 150 000 chaque année dans le contexte climatique actuel, pourrait selon les projections dépasser un million dans les années 2050 et avoisiner 3 millions dans les années 2080. Ces résultats ne tiennent cependant pas compte de l'acclimatation naturelle possible, susceptible de réduire le nombre de décès. À mesure que les températures régionales continuent de croître, le nombre de jours consécutifs de stress thermique augmente et les périodes de chaleur s'allongent. En l'absence de mesures supplémentaires, cette situation conduit à un accroissement disproportionné des décès prématurés. Des investissements d'adaptation visant à améliorer la climatisation ou développer les systèmes d'alerte précoce et les campagnes d'information ciblant les populations à haut risque permettraient d'abaisser de victimes de manière particulièrement efficace.

Le nombre de décès prématurés constitue, en soi, un indicateur de l'impact du changement climatique sur la société. Toutefois, les économistes ont aussi mis au point des techniques afin de déterminer les coûts économiques liés à l'évolution du risque de

Tableau 3.2. **Mortalité due au stress thermique selon les régions**

Milliers de personnes

		Conditions climatiques actuelles	2030	2050	2080
OCDE Amérique	Canada	1	3	8	19
	Chile	0	1	1	3
	Mexique	1	7	12	25
	États-Unis	11	27	63	137
OCDE Europe	UE 4 gr. pays	11	31	66	131
	UE OCDE autre	8	22	44	75
	OCDE autre	1	5	13	25
OCDE Pacifique	Aus. et Nvelle.Z.	1	2	3	7
	Japon	3	7	10	16
	Corée	1	3	6	13
Reste de l'Europe et de l'Asie	Chine	27	88	161	282
	UE non-OCDE	2	5	8	13
	Russie	12	20	28	40
	Région caspienne	2	8	21	42
	Europe autre	5	11	16	21
Amérique latine	Brésil	2	8	23	58
	Am. latine autre	2	9	24	100
Moyen-Orient et Afrique du Nord	Moyen-Orient	2	10	38	109
	Afrique du Nord	2	8	22	47
Asie du Sud et du Sud-Est	ANASE 9	2	16	39	103
	Inde	25	55	139	369
	Indonésie	1	6	23	82
	Asie autre	10	24	78	245
Afrique subsaharienne	Afrique du Sud	2	3	4	12
	Afrique autre	11	47	177	907
Monde		145	426	1 023	2 875

Source : Calculs du NIES et de l'Université de Tsukuba.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399908

mortalité. Leur connaissance permet aux décideurs de mieux évaluer les effets positifs des mesures supposées réduire le nombre de décès prématurés. Deux indicateurs sont répandus dans ce domaine : la valeur d'une vie statistique (VVS) et la valeur d'une année de vie (VAV). Tous deux reposent sur le principe du consentement de la société à payer pour tirer parti d'une baisse du risque de mortalité. Tandis que la notion de VVS est fondée sur la prévention d'une mort statistique de façon globale, la VAV permet de rendre compte de la variabilité de l'espérance de vie résiduelle (Steininger et al., 2015). Ainsi, la VVS implique une valeur fixe quel que soit l'âge, alors que l'emploi de la VAV suppose d'attribuer aux personnes une valeur qui diminue avec l'âge. La VVS a été largement employée dans les précédents travaux de l'OCDE, car elle permet d'évaluer les décès sur le plan statistique, pour ensuite calculer les coûts économiques de problématiques environnementales telles que la pollution atmosphérique (OCDE, 2012b et 2014b).

Le fait que les économistes et les décideurs accordent une valeur variable aux modifications des risques de mortalité en fonction des pays ou des régions est sujet à controverse. Cette approche transparaît dans diverses études qui tentaient d'estimer la VVS dans différents pays, comme le montre une méta-analyse de l'OCDE (2012b). La VVS est ainsi comprise entre 2 660 USD et 20 millions USD (en USD constants de 2005), les valeurs les plus hautes correspondant aux pays à revenu élevé. De plus, les estimations

varient au sein des pays ; aux États-Unis, par exemple, la VVS va de 200 000 USD à 9.4 millions USD (OCDE, 2012b).

Malgré ces défauts, l'indicateur de VVS peut s'avérer utile pour indiquer le coût potentiel des décès prématurés. Il est ainsi largement employé dans le contexte de la pollution de l'air (voir notamment OCDE, 2014b), mais peut être facilement utilisé pour étudier d'autres facteurs de décès prématuré, bien que des problèmes de contexte et de transférabilité puissent se poser, même si les calculs sont réalisés à l'aide d'études génériques fondées sur le consentement des répondants à payer pour réduire la probabilité de décès prématurés. L'encadré 3.3 revient plus en détail sur la méthodologie de la VVS.

Encadré 3.3. **La valeur d'une vie statistique**

Les risques de mortalité – au niveau de la société dans son ensemble – peuvent être évalués grâce à la « valeur d'une vie statistique » (VVS). La VVS est dérivée de l'évaluation agrégée du consentement à payer (CAP) des individus pour obtenir une réduction marginale du risque de décès prématuré. L'OCDE (2012b) analyse les travaux empiriques sur le consentement à payer (CAP) et décrit la méthode utilisée pour calculer la VVS à partir de cette enquête. Cette dernière révèle un CAP moyen de 30 USD pour ramener le risque annuel de décès du fait de la pollution atmosphérique de 3 pour 100 000 à 2 pour 100 000, ce qui signifie qu'une personne consent à payer 30 USD pour ramener le risque de décès prématuré à 1 pour 100 000. Comme le souligne l'OCDE (2012b), la VVS n'est pas la valeur de la vie d'une personne déterminée, mais la somme des valeurs attribuées par chaque individu à une petite modification du risque de mortalité. Par conséquent, le coût économique de l'impact étudié – ici, le changement climatique – est égal à l'estimation de la VVS multipliée par le nombre de décès prématurés.

Grâce à une méta-analyse rigoureuse d'études consacrées à la VVS (OCDE, 2012b), un ensemble d'estimations de la VVS recommandées par l'OCDE est disponible pour les pays membres et les pays du G20 non membres de l'OCDE. En USD de 2005, les estimations recommandées pour les pays de l'OCDE sont comprises entre 1.5 million USD et 4.5 millions USD, avec une valeur de référence recommandée de 3 millions USD.

La méthodologie suivie pour déterminer la VVS dans OCDE (2012b) a été utilisée pour calculer les coûts économiques relatifs au nombre de décès prématurés imputables au stress thermique, déterminé par le NIES et l'Université de Tsukuba pour les régions du modèle ENV-Linkages de l'OCDE (voir le tableau 3.3). Dans le contexte climatique actuel, le coût total pour les pays de l'OCDE avoisine 75 milliards USD, en dollars de 2010, et devrait se chiffrer à plus de 230 milliards USD en 2030, près de 490 milliards USD en 2050 et plus de 1 000 milliards USD en 2080. En 2080, les coûts les plus élevés devraient être supportés par l'Amérique du Nord et les pays de l'UE, et plus particulièrement les États-Unis et les quatre grands pays de l'UE. Notons que ces valeurs seraient nettement plus faibles si l'on utilisait la VAV.

3.2.5. Écosystèmes

Les écosystèmes rendent une multitude de services à la société et aux individus, de manière directe (marchande) ou indirecte (non marchande) (TEEB, 2014). Bien qu'il soit difficile (voire contestable, aux yeux de certains) de rendre compte de l'ensemble des avantages potentiels des services écosystémiques, le fait de les ignorer conduit probablement

Tableau 3.3. **Coûts économiques des décès prématurés imputables au stress thermique dans les pays de l'OCDE, calculés au moyen de la VVS**

Milliards USD de 2010

Pays de l'OCDE	Conditions climatiques actuelles	2030	2050	2080
Canada	3.0	9.9	23.4	55.6
Chili	0.3	1.5	3.5	7.5
Mexique	4.0	20.3	35.6	74.3
États-Unis	1.8	7.5	27.4	132.5
Quatre grands pays de l'UE	33.8	92.3	197.2	392.3
Autres pays de l'UE membres de l'OCDE	16.6	49.6	104.4	182.7
Autres pays de l'OCDE	3.8	16.0	39.4	75.2
Australie et Nouvelle-Zélande	1.8	5.7	9.0	20.3
Japon	7.7	21.8	30.3	49.4
Corée	1.8	7.5	17.0	38.7
Total des pays membres de l'OCDE	***74.7***	***232.2***	***487.1***	***1 028.5***

Source : Calculs effectués pour cette analyse à partir du nombre de décès prématurés communiqué par le NIES et l'Université de Tsukuba, et des valeurs de la VVS tirées de OCDE (2012b).

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399912

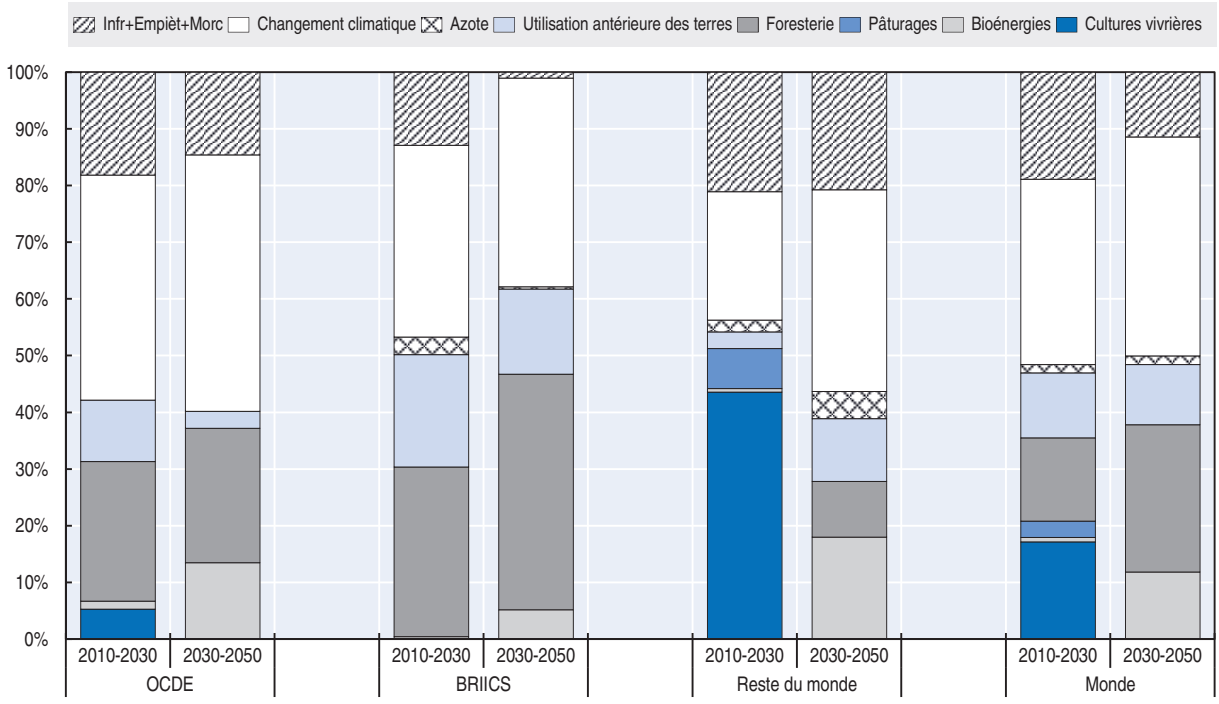
à sous-estimer largement les coûts des dommages aux écosystèmes imputables au changement climatique. Beaucoup des services rendus ne sont pas activement utilisés à des fins économiques, mais sont appréciés pour d'autres raisons.

Le fait de négliger les valeurs de non-usage peut entraîner des estimations biaisées, surtout lorsqu'il s'agit d'apprécier la valeur de la *biodiversité* pour la société, qui peut être définie comme la « variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie » (ONU, 1992). Rares sont les études approfondies qui évaluent les coûts des pertes de biodiversité imputables au changement climatique pour la collectivité à l'échelle mondiale. Selon le scénario de référence des *Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2050*, le changement climatique, qui constitue le principal facteur d'évolution, sera responsable d'un recul supplémentaire d'environ 40 % de l'abondance moyenne des espèces terrestres entre 2010 et 2050 (graphique 3.6, tiré de OCDE, 2012a). Le changement climatique représente donc le principal facteur de perte de biodiversité, ses effets étant supérieurs à ceux associés aux cultures vivrières, aux bioénergies, aux pâturages, à l'exploitation forestière, aux utilisations antérieures des terres, à l'azote, ainsi qu'au développement des infrastructures, à l'empiètement et au morcellement des habitats (y compris l'urbanisation).

De manière plus générale, la projection de la valeur des *pertes de biodiversité et de services écosystémiques* vise à indiquer la modification de la valeur de la biodiversité et des services écosystémiques imputable au changement climatique. Les écosystèmes n'ont généralement pas de valeur marchande, et il est difficile de leur en imputer une. Dans un cadre de modélisation en équilibre général calculable, le recours des secteurs économiques à leurs services est de surcroît mal compris. Conformément à Bosello et al. (2012), l'évaluation économique des services écosystémiques est donc basée sur une approche modifiée du consentement à payer (CAP). L'hypothèse de départ est que ces services sont en grande partie non commercialisés et non directement commercialisables. Il n'est donc possible d'exprimer leur valeur que sur la base des préférences. C'est pourquoi on utilise le consentement à payer pour éviter une perte de services écosystémiques donnée afin

Graphique 3.6. **Le changement climatique accentue la pression sur la biodiversité**

Effets de différents facteurs de pression sur l'abondance moyenne des espèces terrestres



Source : Modèle IMAGE, d'après OCDE (2012a).

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399749

d'estimer la valeur qui sera perdue si les écosystèmes ne sont pas protégés. C'est cette méthodologie qui est employée pour le modèle MERGE de l'Université Stanford (Manne et al., 1995). Dans ce contexte, et comme l'expliquent plus en détail Warren et al. (2006), on établit une formule qui met en relation le CAP et l'augmentation de la température, à partir de l'hypothèse (audacieuse) selon laquelle des dépenses de 0.62 % du PIB dans l'UE (données d'Eurostat) protègeraient contre un réchauffement de 2 °C. Une fonction logistique sert ensuite à calculer le CAP pour différents pays à différentes périodes en fonction des trajectoires d'évolution du PIB (pour la projection de référence sans dommage). Il est posé implicitement (et audacieusement) en hypothèse que ce qui a été effectivement dépensé est assez proche du consentement à payer, et suffisant, dans l'ensemble, pour préserver les écosystèmes et leurs services dans un monde où les températures augmentent modérément. Bien entendu, cela n'apporte que des informations indirectes sur la valeur économique des dommages liés à la perte de services écosystémiques ; cette évaluation ne permet pas de déterminer l'impact qu'aura (ou qu'a déjà) la perte de biodiversité et de services écosystémiques sur des secteurs particuliers.

Comme le montre le tableau 3.4, à l'horizon 2060, les régions affichant le consentement à payer le plus fort, qui est de l'ordre de 1 % du PIB dans le scénario RCP8.5, sont les grands pays comme le Japon, la Corée, les États-Unis, le Canada, le Mexique, l'Afrique du Sud ainsi que de nombreux pays européens. Le CAP est plus faible (entre 0.3 % et 0.7 % du PIB) au Chili et dans le reste de l'Amérique latine, en Chine, en Russie, au Moyen-Orient et dans des pays de l'UE membres de l'OCDE. D'autres régions affichent un CAP extrêmement faible, en particulier le groupe des pays d'Afrique subsaharienne. Cette répartition des valeurs du CAP n'est guère surprenante car on suppose que le

Tableau 3.4. **Consentement à payer pour la conservation des services écosystémiques, par région**

Pourcentage du PIB en 2060

		RCP6.0	RCP8.5
OCDE Amérique	Canada	0.5	1.1
	Chili	0.3	0.6
	Mexique	0.4	0.9
	États-Unis	0.5	1.1
OCDE Europe	UE 4 gr. pays	0.5	1.1
	UE OCDE autre	0.5	1.1
	OCDE autre	0.5	1.1
OCDE Pacifique	Aus. et Nvelle.Z.	0.5	1.1
	Japon	0.5	1.1
	Corée	0.5	1.1
Reste de l'Europe et de l'Asie	Chine	0.2	0.5
	UE non-OCDE	0.3	0.7
	Russie	0.2	0.4
	Région caspienne	0.1	0.1
	Europe autre	0.1	0.2
Amérique latine	Brésil	0.1	0.2
	Am. latine autre	0.1	0.3
Moyen-Orient et Afrique du Nord	Moyen-Orient	0.1	0.3
	Afrique du Nord	0.1	0.1
Asie du Sud et du Sud-Est	ANASE 9	0.1	0.1
	Indonésie	0.0	0.1
	Inde	0.0	0.1
	Asie autre	0.0	0.1
Afrique subsaharienne	Afrique du Sud	0.4	0.8
	Afrique autre	0.0	0.0

Source : Calculs effectués pour cette analyse d'après Warren et al. (2006).

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399925

consentement à payer pour des services écosystémiques est directement lié au revenu moyen. Il est donc naturel que le consentement à payer pour des services écosystémiques soit plus élevé dans les pays riches comme les États-Unis ou le Canada et qu'il soit pratiquement nul dans d'autres pays du monde comme les pays d'Afrique continentale. Pour le scénario RCP6.0, la hausse des températures jusqu'en 2060 est plus faible, d'où une pression moins marquée sur les écosystèmes et, par conséquent, des valeurs moins élevées.

Outre les impacts non marchands, quelques autres activités marchandes qui dépendent des écosystèmes souffriront probablement beaucoup du changement climatique. L'*exploitation forestière* en est un exemple. Selon le scénario de référence des *Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2050*, la superficie des forêts de production à l'échelle mondiale (forêts gérées pour produire du bois d'œuvre, de la pâte à papier et du bois de chauffe) augmentera de près de 60 % entre 2010 et 2050 pour atteindre 15 millions de km^2 au total (OCDE, 2012a). À l'opposé, la superficie des forêts primaires (non gérées) devrait continuer de reculer. La modification de la productivité des forêts repose sur tout un éventail de facteurs, comme la localisation, les espèces d'arbres, les disponibilités en eau et les effets fertilisants du CO_2. Une adaptation réussie induira une hausse de la productivité des forêts de plantation pour la majorité des producteurs. Les bienfaits seront toutefois variables selon les latitudes et les régions. Ainsi, seules les

plantations situées à des latitudes basses à moyennes devraient profiter du changement climatique, tandis que les producteurs implantés à des latitudes moyennes à élevées souffriront d'une baisse des prix (GIEC, 2014a). À l'échelle mondiale, les avantages liés aux changements physiques imputables au changement climatique dans le secteur de l'exploitation forestière devraient être supérieurs aux coûts (Kirilenko et Sejo, 2007 ; GIEC, 2014a). Cependant, aucune évaluation économique n'a été effectuée dans le cadre de ces études pour estimer l'ampleur des répercussions marchandes du changement climatique dans le secteur forestier.

3.2.6. Stress hydrique

La pression sur les ressources en eau douce induite par la hausse des températures, la modification des régimes pluviométriques et d'autres facteurs climatiques devrait avoir des répercussions économiques sur les activités gourmandes en eau, comme l'irrigation dans le secteur agricole ou le refroidissement dans le secteur de l'énergie. Ces effets négatifs affecteront plus probablement de nombreuses régions subtropicales sèches. Dans d'autres régions, les ressources en eau disponibles ne seront sans doute pas affectées, voire augmenteront. Certes, les secteurs fortement consommateurs d'eau seront les plus directement touchés, mais les ménages et les communes ressentiront les effets de ce phénomène au niveau de la disponibilité et de la qualité de l'eau potable (OCDE, 2013, 2014a ; GIEC, 2014a), encore que les répercussions du stress hydrique sur les différents secteurs de l'économie soient fortement influencées par les règles d'allocation de l'eau (OCDE, 2015).

De nombreux travaux traitent de l'impact du changement climatique sur les ressources mondiales en eau (Schewe et al., 2013 ; Hejazi et al., 2014 ; Fung, et al., 2011 ; Alcamo, 2007 ; Arnell, 2004), mais les publications s'intéressant aux conséquences économiques de ces impacts ne sont pas encore aussi fréquentes. Quelques études ont cherché à déterminer le niveau probable de dommages à l'échelle mondiale ainsi que pour certaines régions ; d'autres ont chiffré les effets néfastes du changement climatique sur certaines formes d'utilisation (comme l'irrigation), ou ont opté pour une approche plus globale, en évaluant les coûts d'une multitude de formes de consommation. La majorité d'entre elles font apparaître que le changement climatique engendrera des coûts considérables (GIEC, 2014a). La plupart des études sont axées sur les conséquences du stress hydrique pour le rendement des cultures, qui sont déjà prises en compte dans la catégorie des dommages agricoles. Les études portant sur des effets non liés aux usages agricoles de l'eau sont beaucoup plus rares.

Les travaux empiriques mettent aussi en évidence le coût accru de la baisse des disponibilités en eau sous l'effet du changement climatique en ce qui concerne la fourniture d'électricité. Dans un contexte de hausse des températures, l'efficacité, la production et la fiabilité des centrales thermiques, par exemple, devraient être affectées par la baisse du volume d'eau disponible et l'augmentation de sa température – deux facteurs essentiels au bon refroidissement de la plupart des centrales existantes (les autres techniques existantes, comme le refroidissement sec, consomment généralement plus d'électricité et nécessitent des coûts d'investissement supérieurs ; de même, l'implantation de centrales sur des sites permettant un approvisionnement en eau garanti, par exemple à proximité de la mer, tend à accroître le coût de l'acheminement de l'électricité vers les usagers). En outre, le changement climatique pourrait engendrer une augmentation considérable des coûts d'exploitation des centrales si les facteurs climatiques venaient à accentuer la rareté de l'eau. La Chine pourrait être particulièrement touchée par cette évolution, car la majeure partie de la puissance installée des centrales à charbon, actuelle et prévue, se situe dans des régions très exposées

au risque de stress hydrique. À l'inverse, l'Inde devrait subir des hausses de coûts bien moins importantes car les mines de charbon, les centrales électriques et la demande industrielle sont localisées dans des régions où les risques de pénurie d'eau sont faibles (AIE, 2015 ; WRI, 2014). Dans une étude de cas, Hurd et al. (2004) évaluent les coûts probables des impacts du changement climatique en termes de consommation d'eau pour la production d'énergie électrique aux États-Unis. Leurs projections indiquent des pertes d'environ 622 millions USD par an jusqu'en 2100, en raison des modifications relatives à l'eau utilisée pour refroidir les chambres de combustion des centrales thermiques au charbon, au gaz naturel ou fonctionnant grâce à d'autres types de combustibles. L'étude table sur un réchauffement de 2.5 °C par rapport aux niveaux de l'ère préindustrielle, et sur un recul des précipitations mensuelles moyennes de 10 %. La pénurie d'eau pourra également avoir des retentissements sur l'exploitation des centrales hydroélectriques (GIEC, 2014a).

Dans une étude récente, Henderson et al. (2013) se sont efforcés d'estimer les impacts économiques du changement climatique sur les ressources en eau aux États-Unis. Au-delà de l'irrigation et du refroidissement, les chercheurs se sont intéressés à plusieurs autres formes d'utilisation de l'eau. Si aucune nouvelle mesure n'est prise pour contrer le changement climatique, ils affirment que les dommages annuels se chiffreront à environ 2.1 milliards USD d'ici à 2050 et 4.2 milliards USD d'ici à 2100. Selon leurs projections, les impacts les plus importants concerneront les activités non liées à la consommation d'eau, comme la production d'hydro-électricité et les flux environnementaux ; l'agriculture et les autres activités fondées sur la consommation d'eau seront moins affectées par le changement climatique. De la même manière, Strzepek et al. (2014) considèrent que les conséquences négatives du changement climatique sur la fourniture d'eau et sur la gestion et la consommation des ressources en eau seront comprises entre 6.5 milliards USD et 15 milliards USD d'ici la fin du siècle aux États-Unis. Les résultats de leurs études à l'horizon 2050 sont plus contrastés, avec deux scénarios opposés, l'un suggérant que le changement climatique aura des effets positifs sur le bien-être et l'autre faisant apparaître des incidences négatives.

3.2.7. Sécurité humaine

Migrations humaines

Les flux, l'ampleur et les formes des migrations humaines, désignant « le changement permanent ou semi-permanent de lieu de résidence pendant au moins une année, qui implique de traverser une frontière administrative, mais pas nécessairement nationale » (Brown et Bean, 2005, référencé dans GIEC, 2014a), seront probablement soumis aux effets du changement climatique (GIEC, 2014a). Selon l'analyse de l'Organisation internationale pour les migrations (OIM), le changement climatique pourrait être à l'origine du déplacement de 200 à 250 millions de personnes, au sein de leur propre pays ou vers d'autres États, d'ici à 2050 (OIM, 2009 ; Shamsuddoha et Chowdhury, 2009). Toutefois, aucune estimation réalisée dans ce domaine n'est véritablement fiable et des auteurs tels que Tacoli (2009), Bettini (2013) et McAdam (2011), affirment qu'établir un lien strict entre changement climatique et migrations pose problème. Par ailleurs, l'effet du changement climatique sur les migrations peut être considéré sous deux angles : comme un déplacement forcé de populations dont les moyens de subsistance sont menacés, ou comme une stratégie d'adaptation puissante visant à limiter les conséquences potentielles des dérèglements climatiques sur le bien-être (Waldinger, 2015). Dans son cinquième Rapport d'évaluation, le GIEC ne cite aucune estimation mondiale sur les migrations liées au changement climatique, en dehors de

l'impact de l'élévation du niveau de la mer sur le déplacement des personnes. La Banque mondiale (2011, 2012a, 2012b) propose un examen complet des publications relatives à la prise en compte adéquate des coûts engendrés par les déplacements forcés, et fournit des lignes directrices générales pour procéder à leur évaluation.

Malgré les incertitudes entourant l'ampleur du phénomène, les chercheurs ont tenté d'étudier les relations possibles entre changement climatique et migrations. Pour cela, ils se sont notamment intéressés aux phénomènes météorologiques passés ainsi qu'à leurs répercussions sur les mouvements humains. Sur cette base, les projections figurant dans les publications montrent que l'augmentation de la fréquence et l'intensification de certains phénomènes météorologiques sous l'effet du changement climatique constitueront probablement le principal facteur de déplacement forcé des personnes à l'avenir (GIEC, 2014a). Par le passé, des phénomènes météorologiques extrêmes ont déjà contraint des personnes à quitter leur domicile ; l'augmentation de leur fréquence ou de leur intensité, du fait du changement climatique, viendrait aggraver le problème des déplacements. Toutefois, des perturbations locales et limitées dans le temps ne conduisent pas nécessairement à des migrations permanentes (OCDE, 2014c ; GIEC, 2014a ; Fussell et al., 2010). Une évolution progressive des conditions climatiques régionales peut aussi contribuer aux migrations, mais ce phénomène est pour l'heure insuffisamment documenté.

Cependant, l'impact économique des migrations imputables aux phénomènes météorologiques extrêmes ou au changement climatique progressif n'a été que très peu observé, en raison surtout de l'incertitude qui entoure la relation exacte entre le changement climatique et les migrations humaines. Jusqu'à présent, la plupart des études étaient centrées sur l'examen qualitatif des divers risques et raisons susceptibles de pousser des personnes à quitter leur lieu de résidence. Dans les travaux publiés, une distinction importante est opérée entre les migrations résultant du changement climatique et celles motivées par des raisons professionnelles, qui ont des conséquences économiques très différentes. En effet, les migrations ayant lieu pendant ou après une catastrophe climatique peuvent, en peu de temps, exercer une pression considérable sur les infrastructures et d'autres services de la région hôte. Elles peuvent aussi avoir des répercussions négatives sur les disponibilités de main d'œuvre de la région d'origine, surtout lorsqu'elles interviennent dans un contexte de grandes perturbations.

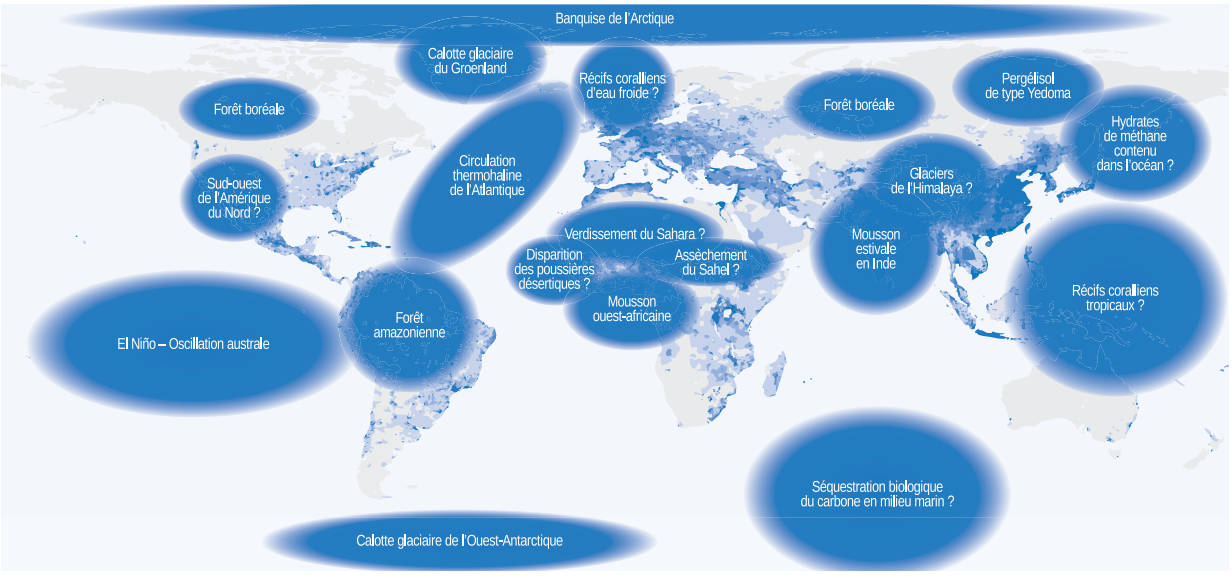
Conflits civils. S'il est vrai que les conflits violents peuvent avoir de multiples causes, la pauvreté et les chocs économiques n'en constituent pas moins des facteurs caractéristiques qui contribuent souvent à leur déclenchement ou leur intensification. Hsiang et al. (2013) ont cherché à identifier les mécanismes de la relation entre le changement climatique et les conflits civils en s'appuyant sur 60 études empiriques et quantitatives, et conclu que le changement climatique venait exacerber les causes des conflits. À l'inverse, d'autres études ne parviennent pas à saisir ce lien, ce qui a amené le GIEC à déclarer que peu d'éléments viennent étayer la relation supposée entre réchauffement climatique et conflits armés (GIEC, 2014a ; Gleditsch et Nordås, 2014 ; Buhaug et al., 2012). Par ailleurs, les scientifiques sont divisés quant à l'existence ou non d'un lien de cause à effet entre le changement climatique qui viendrait, selon certains, amplifier les rivalités au sujet de ressources naturelles telles que l'eau, et les guerres impliquant différents États (GIEC, 2014a). L'affirmation selon laquelle le changement climatique aura des conséquences négatives en termes de sécurité en dehors de tout conflit civil fait toutefois l'unanimité et a été largement démontrée (GIEC, 2014a).

3.2.8. Points de basculement

Divers phénomènes particuliers de grande ampleur, selon la terminologie du GIEC (2014a), ou points de basculement, d'après celle d'auteurs tels que Lenton et al. (2008), posent un risque systémique en ce qu'ils ont de graves conséquences au-delà de l'échelle des pays et sont susceptibles de peser lourdement sur l'économie mondiale. Kriegler et al. (2009) se fondent sur les avis d'experts du climat pour dégager un consensus sur le fait qu'il existe une probabilité non négligeable qu'au moins un événement majeur se produise, même à des niveaux relativement faibles de concentrations de carbone. La probabilité qu'un phénomène de ce type ait lieu avant 2060 est incertaine et vraisemblablement faible, à l'exception de la fonte de la banquise de l'Arctique, mais l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère dans les décennies à venir participe à accroître le risque de croiser des points de basculement irréversibles qui déclencheront ces événements catastrophiques.

Le graphique 3.7 donne un aperçu simplifié de quelques-uns des principaux risques d'atteindre des points de basculement de grande ampleur, d'après les informations de Lenton et al. (2008) actualisées en 2014. La probabilité de concrétisation de ces différents événements varie beaucoup, tout comme le temps susceptible de s'écouler avant que ces systèmes ne s'effondrent. Ces derniers ne sont toutefois pas indépendants les uns des autres. Dans certains cas, toutefois, ces événements peuvent se favoriser mutuellement, dans d'autres la concrétisation de l'un peut ralentir la progression des autres.

Graphique 3.7. **Points de basculement régionaux**



Source : Actualisation de Tim Lenton, d'après Lenton et al. (2008) ; carte de densité de population fournie par CIESIN et al. (2005).

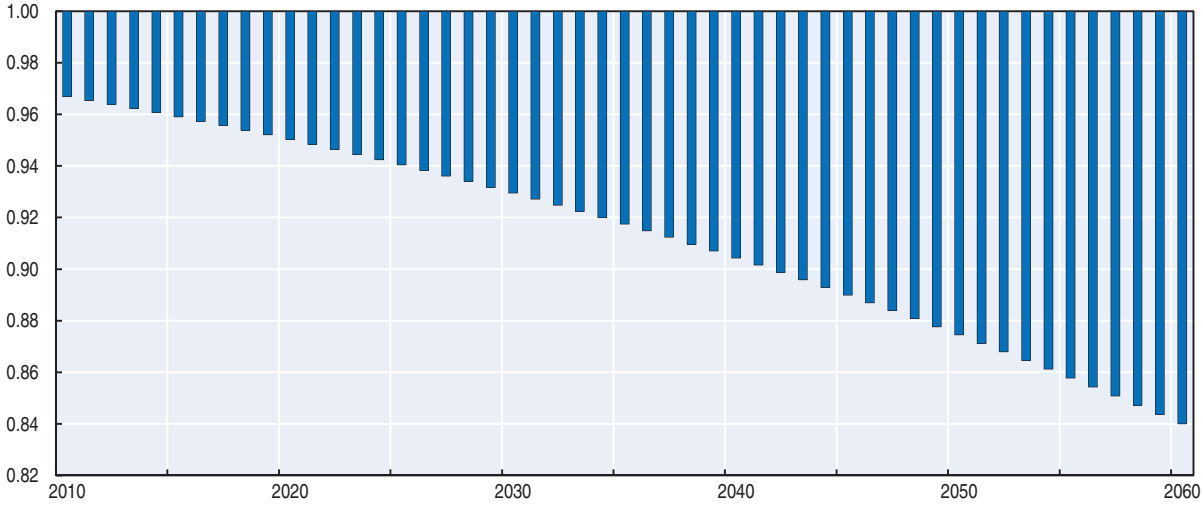
Les effets non linéaires provoqués par ces ruptures ou « points de basculement » sont extrêmement incertains, mais ces dérèglements produiraient un choc majeur tant sur le climat que sur le système économique, avec souvent d'importantes différences selon les régions. Les évaluations quantitatives des impacts du changement climatique font en grande partie abstraction des risques d'événements catastrophiques (Lenton et Ciscar, 2013). Or de nombreux auteurs ont affirmé que ces risques pourraient être bien plus importants que les transformations plus progressives évaluées dans l'analyse ci-dessus (comme Pindyck, 2013 ; Stern, 2013 ; et Weitzman, 2013).

Certaines études de modélisation appliquées adoptent une approche au cas par cas et font l'hypothèse d'une perte en pourcentage fixe et permanente du PIB régional ou mondial. Ainsi, Hope (2006) choisit 10 % du PIB pour l'Union européenne et des taux variables pour d'autres pays, la Chine étant associée au taux le plus faible, 2 %, et l'Inde au taux le plus élevé, 25 % ; Nordhaus (2007) adopte quant à lui un taux de 25 % du PIB, sans préciser de source. Bosello et al. (2014) optent eux aussi pour l'hypothèse d'une perte de 25 % du PIB en cas de catastrophe, mais ils partent du principe que ce taux remplace la fonction de dommage progressive. Selon leurs calculs, les dommages (et notamment la probabilité que la catastrophe se produise) devraient représenter entre 6 % et 14 % du PIB en 2100. La fonction de dommage associée à un terme de puissance élevé pour la température, telle que présentée par Weitzman (2012) et examinée ci-dessus dans le cadre des projections AD-DICE, peut aussi être considérée comme un moyen d'incorporer ces risques d'événements catastrophiques ; la différence de perte de PIB entre les fonctions de dommage de Nordhaus et de Weitzman s'élève à un peu plus de 10 % du PIB mondial. En effet, il existe peu d'éléments sur lesquels baser l'impact économique des risques d'événements catastrophiques. Autre difficulté, les outils de modélisation économique, y compris les modèles d'équilibre général calculable (EGC) comme ENV-Linkages, s'appuient sur une approche marginale : les modifications de comportement qu'entraînent les chocs de grande ampleur ne sont pas prises en compte par les fonctions lisses fondées sur l'élasticité qui sont utilisées dans les cadres de modélisation.

Si les coûts économiques futurs des événements catastrophiques sont difficiles à calculer, les risques qu'entraînent ces catastrophes peuvent être évalués par approximation au moyen d'une fonction de risque (Gjerde et al., 1999), c'est-à-dire de la probabilité qu'aucune catastrophe majeure ne se produise durant la période en cours étant donné qu'aucune ne s'est produite par le passé. On ne dispose pas d'informations suffisantes pour calibrer de façon robuste ce type de fonction de risque ; le recalibrage présenté ici correspond aux informations plus récentes fournies dans Kriegler et al. (2009), qui sont fondées sur des avis d'experts. Bosello et al. (2014) et Lontzek et al. (2015) suivent la même méthodologie. La fonction de risque, d'après les avis d'experts, fait apparaître que le risque qu'au moins un de ces événements catastrophiques soit irrémédiablement déclenché (mais peut-être pas totalement effectif) d'ici à 2060 pourrait atteindre 16 % dans la projection centrale. Autrement dit, la probabilité qu'aucun événement catastrophique ne survienne tombe à 84 % (graphique 3.8)[6]. Compte tenu des graves conséquences économiques de tels événements, cette probabilité peut s'interpréter comme une prime de risque ou une valeur d'option à associer aux émissions actuelles, représentant leurs implications potentielles à long terme. Un chiffrage sérieux de cette prime de risque par région devrait être l'une des priorités de recherche des économistes du climat. Cai et al. (2015) et Markandya et al. (2015) offrent à cet égard un excellent point de départ ; s'appuyant sur un modèle stochastique, les deux études montrent que les risques d'atteindre des points de basculement entraînent une augmentation sensible des avantages de l'action des pouvoirs publics. Markandya et al. (2015) mettent aussi en lumière le rôle déterminant du degré d'aversion au risque, faisant valoir qu'un fort degré d'aversion au risque pourrait se traduire par une prime de risque d'environ 100 % sur le coût social du carbone, tandis qu'une approche neutre en termes de risque aboutit à une prime de risque d'environ 10%. Ainsi, malgré leur caractère incertain, il est justifié d'engager des mesures d'atténuation ambitieuses pour réduire les risques d'atteindre des points de basculement et éviter de rendre le changement climatique inéluctable et irréversible.

Graphique 3.8. **Taux de risque d'un événement catastrophique**

Chances de ne pas déclencher d'événement catastrophique



Source : Calculs effectués pour cette analyse d'après Kriegler et al. (2009).

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399754

Notes

1. Étant donné qu'AD-DICE est un modèle prospectif, les niveaux actuels de PIB dépendent de niveaux de dommages futurs. En conséquence, les pertes de PIB sont calculées séparément pour chaque scénario en pourcentage du PIB. On pourrait aussi opter pour des taux d'épargne fixes, mais cela va à l'encontre de la philosophie du modèle, dont l'objectif est de déterminer des trajectoires au moindre coût.
2. En parallèle, l'élimination des gaz à durée de vie courte ayant un effet de refroidissement, comme les aérosols sulfatés, conduirait en réalité à un réchauffement temporaire de « quelques dizaines de degrés » (GIEC, 2013).
3. Le lecteur intéressé par ce sujet pourra trouver une analyse plus complète, mais souvent moins détaillée sur le plan quantitatif, des diverses conséquences du changement climatique sur l'activité économique et la société dans la contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 2014a).
4. La prise en compte des effets sur le rendement des cultures constitue une double comptabilisation des impacts agricoles présentés au chapitre 2, ce qui empêche de les intégrer directement dans le modèle ENV-Linkages.
5. Certaines publications étudient à quel point ces décès prématurés représentent un déplacement de la mortalité à court terme (effet dit « de récolte »), les décès imputables au stress thermique touchant parfois des personnes très âgées ou souffrant déjà d'un état pathologique grave, de sorte que la période de vie perdue est courte. Suivant l'exemple de Honda et al. (2014), ce phénomène est (grossièrement) pris en compte dans les calculs par l'introduction d'un terme de déphasage.
6. Du fait de l'inertie du système climatique, ce risque devrait demeurer inchangé pendant plus d'un siècle, même si les émissions tombaient à zéro immédiatement après 2060.

Références

Ahmed, M., C.K. Chong et H. Cesar (2005), *Economic Valuation and Policy Priorities for Sustainable Management of Coral Reefs*, Second Edition, WorldFish Center : Penang, Malaysie.

AIE (2015), *World Energy Outlook Special Report on Energy and Climate Change*, Agence internationale de l'énergie, Paris.

Alcamo, J., M. Flörke et M. Märker (2007), « Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes », *Hydrological Sciences Journal*, vol. 52, n° 2, pp. 247-275.

Arnell, N.W. (2004), « Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios », *Global Environmental Change*, vol. 14, n° 1, pp. 31-52.

Banque mondiale (2012a), *Guidelines for Assessing the Impacts and Costs of Forced Displacement*, Washington, DC.

Banque mondiale (2012b), « Assessing the Impacts and Costs of Forced Displacement. Volume I: A Mixed Methods Approach », *http://siteresources.worldbank.org/EXTSOCIALDEVELOPMENT/Resources/244362-1265299949041/6766328-1265299960363/ImpactCostStudy-VolumeI2.pdf*.

Banque mondiale (2011), « Study on impacts and costs of forced displacement. Volume II: State of the art literature review », *http://siteresources.worldbank.org/EXTSOCIALDEVELOPMENT/Resources/244362-1265299949041/6766328-1265299960363/VolumeIILiterature.pdf*.

Bettini, G. (2013), « Climate barbarians at the gate? A critique of apocalyptic narratives on 'climate refugees' », *Geoforum*, vol. 45, pp. 63-72.

Bosello, F., E. de Cian et L. Ferranna (2014), « Catastrophic risk, precautionary abatement, and adaptation transfers », *Document de travail de la FEEM*, n° 108.2014, Milan.

Bosello, F., R. Roson, R.S.J. Tol (2006), « Economy-wide estimates of the implications of climate change: Human health », *Ecological Economics*, vol. 58, pp. 579-591.

Brown, S. et F. Bean (2005), « International migration », in Poston, D.L. et M. Micklin (dir. pub.), *Handbook of Population*, Kluwer, Dordrecht, Pays-Bas, pp. 347-382.

Buhaug, H. et O.M. Theisen (2012), « On environmental change and armed conflict », in Scheffran, J., M. Brzoska, H.G. Brauch, P.M. Link et J. Schilling (dir. pub.), Climate Change, Human Security and Violent Conflict: Challenges for Societal Stability, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Allemagne, pp. 43-55.

Buhaug, H., N.P. Gleditsch et O.M. Teishn (2008), « Implications of climate change for armed conflict », document présenté lors de l'atelier international organisé par la Banque mondiale ayant pour thème « Les dimensions sociales du changement climatique », Washington, DC, 5-6 mars 2008, *http://siteresources.worldbank.org/INTRANETSOCIALDEVELOPMENT/Resources/SDCCWorkingPaper_Conflict.pdf*.

Cai, Y., K.L. Judd, T.M. Lenton, T.S. Lontzek et D. Narita (2015), « Environmental tipping points significantly affect the cost-benefit assessment of climate policie », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (PNAS), vol. 112, pp. 4606-4611.

CE (2009a), *Le PIB et au-delà : mesurer le progrès dans un monde en mutation, Communication de la Commission au Conseil et au Parlement européen*, COM(2009) 433 final.

CE (2009b), « Summary notes from the Beyond GDP conference », note récapitulative sur la conférence « Beyond GDP » organisée par la Commission européenne, le Parlement européen, le Club de Rome, l'OCDE et le WWF, Bruxelles, 19-20 novembre 2007, *http://ec.europa.eu/environment/beyond_gdp/proceedings/bgdp_proceedings_summary_notes.pdf*.

Center for International Earth Science Information Network – CIESIN – Columbia University, et Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT (2005), *Gridded Population of the World*, Version 3 (GPWv3): Population Density Grid (Population Density 2000) [Carte]. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Map and Applications Center (SEDAC), *http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/gpw-v3-population-density/maps/services* (27 août 2015).

Ciscar. J.C. et al. (2014), « Climate impacts in Europe. The JRC PESETA II project », *JRC Scientific and Policy Reports*, n° EUR 26586EN, Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg.

Costanza, R., M. Hart, S. Posner et J. Talberth (2009), « Beyond GDP: The need for new measures of progress », *The Pardee Papers*, n° 4, janvier, Boston University.

De Bruin, K.C. de (2014), « Calibration of the AD-RICE2012/AD-DICE2013 models », *CERE Working Paper*, vol. 2014, n° 3, Center for Environmental and Resource Economics, Umeå.

Dell, M., B.F. Jones et B.A. Olken (2012), « Temperature shocks and economic growth: Evidence from the last half century », *American Economic Journal: Macroeconomics*, vol. 4(3), pp. 66-95.

Dietz, S. et N. Stern (2015), « Endogenous growth, convexity of damages and climate risk: How Nordhaus' framework supports deep cuts in carbon emissions », *The Economic Journal*, à paraître ; disponible dans *Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment Working Paper* 159, Londres.

Doyon, B., D. Belanger et P. Gosselin (2008), « The potential impact of climate change on annual and seasonal mortality for three cities in Quebec, Canada », *International Journal of Health Geographics*, vol. 7(23).

Ebi, K.L. et D. Mills (2013), « Winter mortality in a warming climate: a reassessment », *WIREs Climate Change*, vol. 4, pp. 203-212.

Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (2005), *Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis*, World Resources Institute, Washington, DC.

Felbermayr, G. et J. Gröschl (2014), « Naturally negative: the growth effects of natural disasters », *Journal of Development Economics*, vol. 111, pp. 92-106.

Fung, F., A. Lopez et M. New (2011), « Water availability in +2°C and +4°C worlds », *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 369, pp. 99-116.

Fussell, E., N. Sastry et M. Vanlandingham (2010), « Race, socioeconomic status, and return migration to New Orleans after Hurricane Katrina », *Population and Environment*, vol. 31, n° 1-3, pp. 20-42.

GIEC (2014a), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Part A: Global and Sectoral Aspects, Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et L.L.White (dir. pub.)], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis, 1132 pp.

GIEC (2014b): *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Contribution du Groupe de travail III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel et J.C. Minx (dir. pub.)], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis.

GIEC (2013), *Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (dir. pub.)], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis, 1535 pp.

GIEC (1996), *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, Contribution du Groupe de travail I au deuxième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg et K. Maskell (dir. pub.)], Cambridge: Cambridge University Press.

Gjerde, J., S. Grepperud et S. Kverndokk (1999), « Optimal climate policy under the possibility of a catastrophe », *Resource and Energy Economics*, vol. 21, pp. 289-317.

Gleditsch, N.P. et R. Nordas (2014), « Conflicting messages? The IPCC on conflict and human security », *Political Geography*, vol. 43, pp. 82-90.

Government Office for Science (2011), « Migration and Global Environmental Change: Future Challenges and Opportunities », *Final Project Report*, Londres.

Graux, A.-I. et al. (2011), « Development of the pasture simulation model for assessing livestock production under climate change », *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 144, pp. 69-91.

Havlík, P.D. et al. (2015), « Global climate change, food supply and livestock production systems: A bioeconomic analysis », in Elbehri, A. (dir. pub.), Climate Change and Food Systems: Global Assessments and Implications for Food Security and Trade, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Rome.

Hejazi, M.I. et al. (2014), « Integrated assessment of global water scarcity over the 21st century under multiple climate change mitigation policies », *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 18, n° 8, pp. 2859-2883.

Henderson, J. et al. (2015), « Economic impacts of climate change on water resources in the coterminous United States », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 20, n° 1, pp. 135-157.

Honda, Y. et al. (2014), « Heat-related mortality risk model for climate change impact projection », *Environmental Health Prevention Medicine*, vol. 19, pp. 56-63.

Honda, Y. et M. Ono (2009), « Issues in health risk assessment of current and future heat extremes », *Global Health Action*, vol. 2, *http://dx.doi.org/10.3402/gha.v2i0.2043*.

Hope, C. (2006), « The marginal impact of CO_2 from PAGE2002: An integrated assessment model incorporating the IPCC's five reasons for concern », *The Integrated Assessment Journal*, vol. 6, n° 1, pp. 19-56.

Hsiang, S., M. Burke et E. Miguel (2013), « Quantifying the influence of climate on human conflict », *Science*, vol. 341, n° 6151.

Hsiang, S.M. et A.S. Jina (2014), « The causal effect of environmental catastrophe on long-run economic growth », *NBER Workshop Paper*, n° 20352.

Huang, C. et al. (2012), « The impact of temperature on years of life lost in Brisbane, Australia », *Nature Climate Change*, vol. 2(4), pp. 265-270.

Hurd. B.H. et al. (2004), « Climatic change and U.S. water resources: From modeled watershed impacts to national estimates », Journal of the American Water Resources Association, vol. 40, n° 1, pp. 129-148.

Kinney, P.L. et al. (2012), « La mortalité hivernale va-t-elle diminuer avec le changement climatique ? », *Bull Epidémiol Hebd*, vol. 12-13, pp. 148-151.

Kirilenko, A.P. et R.A. Sedjo (2007), « Climate change impacts on forestry », *Proceedings of the National Academy of Sciences* (PNAS), vol. 104, n° 50, pp. 19697-19702.

Kriegler, E. et al. (2009), « Imprecise probability assessment of tipping points in the climate system », *Proceedings of the National Academy of Science* (PNAS), vol. 106, n° 13, pp. 5041-5046.

Lenton, T. et al. (2008), « Tipping elements in the Earth's climate system », Proceedings of the National *Academy of Sciences* (PNAS), vol. 105, n° 6, pp. 1786-1793.

Lenton, T. et J.C. Ciscar (2013), « Integrating tipping points into climate impact assessments », *Climatic Change,* vol. 117, pp. 585-597.

Lontzek et al. (2015), « Stochastic Integrated Assessment of Climate Tipping Points Calls for Strict Climate Policy », *Nature Climate Change*, forthcoming.

Loomies, J.B. et D.S. White (1996), « Economic benefits of rare and endangered species: Summary and meta-analysis », *Ecological Economics*, n° 16, pp. 197-206.

Manne, A., R. Mendelsohn et R. Richels (1995), « MERGE – A model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies », *Energy Policy*, vol. 23(1), pp. 17-34.

Markandya, A., E. De Cian, F. Bosello, J. Polanco et L. Drouet (2015), « Building Uncertainty into the Adaptation Cost Estimation in Integrated Assessment Models », *BASE Project Working Paper*, BC3, Bilbao.

Mayeres, I. et D. Van Regemorter (2008), « Modelling the health related benefits of environmental policies and their feedback effects: A CGE analysis for the EU countries with GEM-E3 », *Energy Journal*, vol. 29, pp. 135-50.

McAdam, J. (2011), « Refusing refuge in the Pacific: deconstructing climate-induced displacement in international law », in Piguet, E., A. Pécoud et P.D. Guchtenreise (dir. pub.), Migration and Climate Change, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO), Cambridge University press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, États-Unis, pp. 102-137.

McLeman, R.A. (2014), « Climate and human migration – past experiences », Future Challenges, Cambridge: Cambridge University Press.

Moore, F.C. et D.B. Diaz (2015), « Temperature impacts on economic growth warrant stringent mitigation policy », *Nature Climate Change*, vol. 5, pp. 127-131.

Nordhaus, W.D. (2012), « Integrated Economic and Climate Modeling », in: P. Dixon et D. Jorgenson (dir. pub.), *Handbook of Computable General Equilibrium Modeling*, Elsevier.

Nordhaus, W.D. (2007), *A question of balance*, Yale University Press, New Haven, États-Unis.

OECD (2015a), *Water Resources Allocation: Sharing Risks and Opportunities*, OECD Studies on Water, OECD Publishing, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/9789264229631-en.*

OCDE (2015b), *Changement climatique, eau et agriculture : Vers des systèmes résilients*, Études de l'OCDE sur l'eau, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/9789264235076-fr.

OCDE (2014a), Le coût de la pollution de l'air : Impacts sanitaires du transport routier, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/9789264220522-fr*.

OCDE (2014b), « Perspectives on Global Development 2016: New Challenges and Opportunities for International Migration in a Shifting World », note conceptuelle rédigée pour une réunion d'experts tenue les 24 et 25 février 2015 à Paris.

OCDE (2014c), *L'eau et l'adaptation au changement climatique : Des politiques pour naviguer en eaux inconnues*, Études de l'OCDE sur l'eau, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/9789264200647-fr.*

OCDE (2012a), *Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2050 : Les conséquences de l'inaction*, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/env_outlook-2012-fr.*

OCDE (2012b), « Méta-analyse de la valeur de la vie statistique dans les études de préférences déclarées : autres questions relatives à la sensibilité des modèles et au transfert d'avantages», *Groupe de travail sur les politiques d'environnement nationales*, ENV/EPOC/WPNEP(2010)10/FINAL, OCDE, Paris.

OCDE (2011), *Comment va la vie ? 2013 : Mesurer le bien-être*, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/how_life-2013-fr.*

OCDE (2001), *Multifonctionnalité : Élaboration d'un cadre analytique*, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/9789264292178-fr*.

OIM (2009), *Migration, Environment and Climate Change: Assessing the Evidence*, [Laczko, F. et C. Aghazarm (dir. pub.)], Organisation internationale pour les migrations (OIM), Genève, Suisse.

OMS (2014), *Quantitative Risk Assessment of the Effects of Climate Change on Selected causes of Death, 2030s and 2050s*, Organisation mondiale de la santé, Genève.

Pendleton, L. et al. (2009), « Estimating the Potential Economic Impacts of Climate Change on Southern California Beaches », document préliminaire préparé pour la Commission de l'énergie de Californie (California Energy Commission) et l'Agence de protection de l'environnement de Californie (California Environmental Protection Agency), *www.energy.ca.gov/2009publications/CEC-500-2009-033/CEC-500-2009-033-D.PDF.*

Pickering, T.D. et al. (2011), « Vulnerability of aquaculture in the tropical Pacific to climate change », in Bell, J.D., J.E. Johnson et A.J. Hobday (dir. pub.), Vulnerability of Tropical Pacific Fisheries and Aquaculture to Climate Change, Secretariat of the Pacific Community, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, pp. 647-731.

Pindyck, R.S. (2013), « Climate change policy: what do the models tell us? », *Journal of Economic Literature*, vol. 51, n° 3, pp. 860-872.

Pindyck, R.S. (2012), « Uncertain outcomes and climate change policy », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 63, pp. 289-303.

PNUD (2014), Human Development Report, Sustaining Human Progress: Reducing Vulnerabilities and Building Resilience, Programme des Nations Unies pour le développement, Washington, DC, États-Unis.

PNUD (1990), Rapport sur le développement humain, Programme des Nations Unies pour le développement, Oxford University Press, New York/Oxford.

PNUE (2001), « Announcing the release of the World Atlas of Coral Reefs », communiqué de presse, United Nations Coral Reef Unit, Programme des Nations Unies pour l'environnement, *http://coral.unep.ch/atlaspr.htm* (consulté le 16 mars 2015).

Schewe, J. et al. (2013), « Multimodel assessment of water scarcity under climate change », *Proceedings of the National Academy of Sciences* (PNAS), vol. 111, n° 9, pp. 3245-3250.

Seo, S.N. and R. Mendelsohn (2008), « Animal husbandry in Africa: climate change impacts and adaptations », *African Journal of Agricultural and Resource Economics*, vol. 2, pp. 65-82.

Shamsuddoha, M. et R.K. Chowdhury (2009), « Climate Change Induced Forced Migrants: in need of dignified recognition under a new Protocol », Bangladesh: Campaign of Equity and Justice Working Group Bangladesh (Equitybd), *www.glogov.org/images/doc/equitybd.pdf%20* (10 mars 2015).

Shogren, J.F. (1997), « Economics and the Endangered Species Act », University of Michigan, *www.umich.edu/~esupdate/library/97.01-02/shogren.html%20* (18 mars 2015).

Staddon, P.L., H.E. Montgomery et M.H. Depledge (2014), « Climate warming will not decrease winter mortality », *Nature Climate Change*, vol. 4 (mars 2014), pp. 190-194.

Stanke C., V. Murray, R. Amlôt, J. Nurse et R. Williams (2012), « The Effects of Flooding on Mental Health: Outcomes and Recommendations from a Review of the Literature », PLOS Currents Disasters, 2012 May 30, Ed. 1, *http://dx.doi.org/10.1371/4f9f1fa9c3cae.*

Steininger, K.W. et al. (2015), *Economic Evaluation of Climate Change Impacts: Development of a Cross-Sectoral Framework and Results for Austria*, Springer International Publishing, Suisse.

Stern, N. (2013), « The structure of economic modelling of the potential impacts of climate change: grafting gross underestimation of risk onto already narrow science models », *Journal of Economic Literature*, vol. 51, n° 3, pp. 838-859.

Stern, N. (2007), *Stern Review: The Economics of Climate Change*, Cambridge: Cambridge University Press.

Stiglitz, J.E., A. Sen et J.-P. Fitoussi (2010), « Rapport de la Commission sur la mesure des performances économiques et du progrès social », disponible à l'adresse : *www.stiglitz-sen-fitoussi.fr/fr/index.htm*.

Strzepek, K. et al. (2014), « Benefits of greenhouse gas mitigation on the supply, management, and use of water resources in the United States », *Climatic Change*, novembre 2014.

Sue Wing, I. et E. Lanzi (2014), « Integrated assessment of climate change impacts: Conceptual frameworks, modelling approaches and research needs », *Documents de travail de l'OCDE sur l'environnement*, n° 66, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/5jz2qcjsrvzx-en*.

Tacoli, C. (2009), « Crisis or adaption? Migration and climate change in a context of high mobility », *Environment and Urbanization*, vol. 21, n° 2, pp. 513-525.

Takahashi, K., Y. Honda et S. Emori (2007), « Assessing mortality risk from heat stress due to global warming », *Journal of Risk Research*, vol. 10, n° 3, pp. 339-354.

TEEB (2014), « Ecosystem Services », article en ligne, The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB), *www.teebweb.org/resources/ecosystem-services/* (consulté le 15 mars 2015).

UK Treasury (2003), *The Green Book: Appraisal and evaluation in central government*, Londres.

USGCRP (2009), *Global Climate Change Impacts in the United States*, United States Global Change Research Program (Karl, T.R., J.M. Melillo et T.C. Peterson [dir. pub.]), Cambridge University Press, New York, NY, États-Unis.

Waldinger, M. (2015), « The effects of climate change on internal and international migration: Implications for developing countries », *Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment Working Paper* n° 12, London School of Economics, London.

Wall, E., A. Wreford, K. Topp et D. Moran (2010), « Biological and economic consequences heat stress due to a changing climate on UK livestock », *Advances in Animal Biosciences*, vol. 1, n° 1, pp. 53.

Ward, P.J. et al. (2014), « Strong influence of El Niño Southern Oscillation on flood risk around the world », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, n° 44, pp. 15659-15664.

Ward, P.J. et al. (2013), « Assessing flood risk at the global scale: model set up, results, and sensitivity », *Environmental Research Letters*, vol. 8, n° 044019.

Warren, R., C. Hope, M. Mastrandrea, R.S.J. Tol, W.N. Adger et I. Lorenzoni (2006), « Spotlighting impacts functions in integrated assessment », *Tyndall Centre Working Papers*, n° 91, Tyndall Centre for Climate Change Research.

Watkiss, P. et A. Hunt (2012), « Projection of economic impacts of climate change in sectors of Europe based on bottom up analysis: Human health », *Climatic Change*, vol. 112, pp. 101-126.

Weitzman, M.L. (2013), « Tail-hedge discounting and the social cost of carbon », *Journal of Economic Literature*, vol. 51, n° 3, pp. 873-882.

Weitzman, M.L. (2012), « GHG targets as insurance against catastrophic climate damages », *Journal of Public Economic Theory*, vol. 14, n° 2, pp. 221-244.

Weitzman, M.L. (2009), « On modeling and interpreting the economics of catastrophic climate change », *The Review of Economics and Statistics*, vol. 91, n° 1, pp. 1-19.

Wilkinson, P. et al. (2007), « A global perspective on energy: health effects and injustices », *Lancet*, Vol. 370(9591), pp. 965-978.

Winsemius, H.C. et P.J. Ward (2015), « Projections of future urban damages from floods », communication personnelle.

WRI (2014), « Aqueduct Water Risk Atlas », World Resources Institute, *www.wri.org/our-work/project/aqueduct/aqueduct-atlas*.

Chapitre 4

Avantages des politiques publiques

Le présent chapitre s'interroge tout d'abord sur la façon dont les responsables des politiques publiques peuvent agir face au changement climatique, même avec une connaissance nécessairement partielle des dommages futurs et des autres conséquences possibles. Puis il met en évidence, à l'aide de projections stylisées obtenues avec le modèle AD-RICE, les avantages probables de la mise en œuvre de politiques d'adaptation et d'atténuation au niveau mondial, ainsi que les arbitrages à opérer et les synergies à exploiter entre ces deux types de politiques. Enfin, il conclut sur une évaluation des dommages que les mesures d'atténuation permettraient d'éviter selon le modèle ENV-Linkages, et une comparaison de la répartition sectorielle des dommages et des coûts d'atténuation.

Compte tenu des pertes de produit intérieur brut (PIB) dans presque toutes les régions et des nombreuses autres conséquences importantes du changement climatique, exposées en détail dans les chapitres précédents, l'action des pouvoirs publics est impérative. La mise en place, d'une part, de politiques ambitieuses d'atténuation visant à réduire les émissions à l'origine du changement climatique et, d'autre part, de politiques d'adaptation destinées à gérer au mieux les effets résiduels devrait nous permettre d'éviter les conséquences les plus graves et de réduire substantiellement les dommages climatiques. En rapportant les avantages de ces politiques publiques à leurs coûts, il est possible d'évaluer le niveau optimal d'intervention des pouvoirs publics.

Ce rapport, qui ne prétend pas à l'exhaustivité des rapports du GIEC, ne vise pas non plus à trancher définitivement la question des politiques optimales en matière de changement climatique. Plus modestement, il a pour objectif, tout en reconnaissant la complexité du cadre nécessaire à une évaluation adéquate et le manque de données quantitatives fiables concernant certains aspects essentiels, de déterminer, dans le cadre de la modélisation présentée au chapitre 1, la façon dont les politiques d'adaptation et d'atténuation peuvent réduire les coûts de l'inaction présentés aux chapitres 2 et 2. Il entend également apporter quelques éclairages sur les éventuels blocages sectoriels, c'est-à-dire les secteurs spécifiques qui pourraient être particulièrement affectés par le changement climatique, ainsi que par des politiques d'atténuation. L'analyse coûts-avantages détaillée des conséquences régionales et sectorielles de chaque politique fera l'objet d'une étude ultérieure.

4.1. Élaboration des politiques dans un contexte d'incertitude concernant l'intertemporalité

Les projections présentées aux chapitres 2 et 3 sont entachées de fortes incertitudes. Par exemple, les spécifications alternatives des dommages fondées sur les suggestions de Weitzman, telles que présentées au graphique 3.2, se trouvent très à l'extérieur de la fourchette d'incertitude de la projection centrale découlant d'hypothèses différentes concernant le paramètre de sensibilité climatique. Ceci souligne le fait que les fourchettes d'incertitude mentionnées dans le présent document ne rendent compte que d'une source d'incertitude en particulier, certes importante : la réponse du climat à l'équilibre à un doublement des concentrations de carbone (sensibilité climatique). Il conviendrait de prendre en considération d'autres incertitudes, concernant notamment les conséquences d'événements catastrophiques et les déterminants socio-économiques de la croissance. Cependant, comme ces incertitudes sont difficilement chiffrables, elles sont omises des fourchettes d'incertitude présentées dans ce rapport.

La seule projection centrale des dommages climatiques mondiaux ne suffit pas à donner une image fidèle des liens existant entre évolution du climat et croissance économique. Une exploration plus approfondie des incertitudes pourrait inclure : i) la formulation de scénarios différents pour les projections de référence, qui tiennent compte de l'incertitude qui entoure certains facteurs clés tels que la démographie, la tendance à long terme de la croissance

économique et la disponibilité des ressources naturelles ; ii) l'étude plus approfondie du rôle de l'adaptation comme moyen de limiter les incidences dommageables et de favoriser les incidences bénéfiques ; iii) la comparaison de diverses représentations du système climatique, soit en utilisant différents modèles climatiques sous-jacents (comme le suggèrent, par exemple, Warszawski et al., 2014), ce qui contribuerait aussi à donner plus d'informations sur les profils régionaux du changement climatique, soit – au minimum – en faisant varier la sensibilité climatique, comme le fait de manière schématique le présent rapport. Par conséquent, ce rapport doit être considéré comme l'évaluation d'une projection possible des conséquences économiques du changement climatique. Une évaluation complète plus solide supposerait la comparaison de différents modèles et études, et nécessiterait d'importants investissements de recherche.

Les politiques visant à réduire les coûts des dommages climatiques doivent être conçues pour faire face aux incertitudes (voir l'encadré 4.1)[1]. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2014a) laisse entendre que « les avantages sociaux qui peuvent être retirés des investissements dans les mesures d'atténuation tendent à augmenter lorsque l'incertitude concernant les facteurs qui rattachent les émissions de gaz à effet de serre (GES) aux incidences du changement climatique est prise en compte (degré de confiance moyen) ».

Encadré 4.1. **Élaboration des politiques dans un contexte de risque et d'incertitude**

L'élaboration de politiques rigoureuses dans un contexte de risque et d'incertitude constitue un pan majeur de l'activité de l'OCDE, qui réaffirme régulièrement qu'« on ne gère bien que ce que l'on mesure ». S'inspirant de travaux antérieurs sur les chocs mondiaux (OCDE, 2010), l'OCDE (2014d) formule une recommandation sur la gouvernance des risques majeurs, suggérant aux pays qu'ils « définissent et promeuvent une approche holistique, multialéas et transfrontières de la gouvernance des risques au niveau national comme fondement d'une meilleure résilience et réactivité du pays ». Cette démarche suppose notamment l'adoption d'une approche globale des risques majeurs, ainsi qu'une préparation, une sensibilisation et un développement de capacités évolutives de gestion de crise, et doit être entreprise de manière transparente et responsable. L'application à des domaines d'action spécifiques, tels que la sécurité de l'eau (OCDE, 2013), met l'accent sur l'utilisation d'approches fondées sur les risques et met en avant les facteurs clés de succès que sont la connaissance, la délimitation et la gestion du risque (OCDE, 2013). L'approche fondée sur le risque est également mise en exergue dans les travaux de l'OCDE sur l'adaptation au changement climatique (OCDE, 2015c).

L'OCDE (2011) souligne également que les décideurs peuvent (et doivent) faire face à des dangers jusqu'alors inconnus pour lesquels on ne possède ni données, ni modèles de probabilité et d'impacts :

La gestion de l'inconnu inconnu peut paraître un exercice hasardeux, mais il existe plusieurs concepts stratégiques que les gestionnaires du risque peuvent utiliser. Généralement, ils consistent dans la combinaison de deux techniques :

1. concevoir ou renforcer les systèmes complexes de manière à ce qu'ils soient plus robustes, plus redondants ou plus diversifiés, selon les besoins ;
2. améliorer la résilience des sociétés aux événements inconnus en s'appuyant sur l'expérience d'événements extrêmes de nature ou d'échelle comparable. (OCDE, 2011).

Encadré 4.1. **Élaboration des politiques dans un contexte de risque et d'incertitude** *(suite)*

L'élaboration des politiques dans un contexte d'incertitude demande plus qu'une simple préparation aux risques qui pèsent sur le système économique. Elle nécessite également de concevoir des cadres d'action flexibles pouvant s'adapter à de nouvelles informations et d'identifier des possibilités d'action « sans regrets » qui favorisent la croissance économique, indépendamment de l'état futur de l'économie et de l'environnement. L'élaboration de politiques solides repose également sur des avantages et coûts (incertains) qui sont difficiles à appréhender dans l'analyse coûts-avantages et qui peuvent, dans certaines circonstances, être associés au principe de précaution. À titre d'exemple, les valeurs d'option et les primes de risque peuvent être utilisées dans l'analyse coûts-avantages pour sélectionner des politiques qui réduisent l'incertitude plutôt que d'autres dont les résultats sont plus aléatoires. Ce type d'examen des cadres d'action robustes possibles a notamment lieu dans le contexte de l'élaboration des règles de répartition de l'eau (OCDE, 2015a).

Dans leur rapport, Braconier et al. (2014) soulignent également la nécessité d'intégrer les menaces systémiques à long terme au cœur du dispositif d'aide à la prise de décision des gouvernements. Ce rapport et la présente analyse font partie intégrante de la stratégie globale de l'OCDE relative aux Nouvelles approches face aux défis économiques (NAEC) (OCDE, 2015b), qui rappelle combien il faut envisager les incertitudes et les risques possibles de manière ouverte, et élargir l'utilisation d'analyses de scénarios pour appuyer l'élaboration des politiques.

L'identification de politiques d'atténuation et d'adaptation qui seraient adaptées aux dommages climatiques résiduels suppose également une vision à long terme. Ces politiques climatiques, bien qu'elles aient un coût à court terme, offrent des contreparties non négligeables. Premièrement, les politiques qui permettent une réduction des émissions à court terme génèrent un flux d'avantages futurs, en minimisant les incidences climatiques, tandis que les politiques d'adaptation contribuent à réduire les incidences climatiques dommageables qui se font déjà sentir. Deuxièmement, la mise en œuvre de ces politiques s'accompagne d'importants co-avantages dont il est possible de bénéficier immédiatement. Comme nous le soulignons au chapitre 3, les risques d'inondation, les coûts sociaux liés aux décès prématurés et les risques accrus de phénomènes de grande ampleur ont une importance particulière. L'amélioration de la santé grâce à la moindre pollution de l'air constitue l'un de ces co-avantages dépassant le domaine climatique (voir à titre d'exemple Nemet et al., 2010 ; Bollen et Brink, 2014). Ces co-avantages connexes, bien que potentiellement très importants, n'ont pas pu être intégrés à l'évaluation chiffrée fournie dans ce rapport[2].

4.2. Arbitrages économiques entre adaptation, atténuation et dommages climatiques

Comme il a été expliqué au chapitre 1, on ne peut pas utiliser le modèle ENV-Linkages pour établir une projection dans le temps de la combinaison entre adaptation, atténuation et dommages la plus efficace. Par conséquent, la stratégie consiste ici à utiliser le modèle simplifié d'évaluation intégrée AD-DICE, centré sur ces aspects intertemporels, pour fournir des indications sur les coûts et avantages des politiques climatiques. Le modèle AD-DICE a pour double intérêt de permettre une évaluation des politiques d'atténuation et des politiques d'adaptation, et un examen de leurs interactions (de Bruin et al., 2009a, 2011).

Les politiques d'adaptation sont essentielles pour maintenir aussi bas que possible les coûts du changement climatique. L'État peut intervenir directement, en cas de besoin, par exemple pour de grands projets d'infrastructure, ou indirectement, en facilitant les mesures d'adaptation prises par les acteurs privés, par exemple pour surmonter les barrières à l'information et les questions d'aléa moral. Dans la section 4.2.1, on utilise le modèle AD-DICE pour étudier des scénarios simplifiés de politique d'adaptation et, plus spécifiquement, voir comment différents degrés d'adaptation se répercutent sur les coûts des incidences du changement climatique et sur les coûts de mise en œuvre des mesures d'adaptation. Compte tenu de la grande variété de mesures d'adaptation possibles et du fait que la plupart d'entre elles sont prises à l'échelle locale, ces scénarios d'adaptation sont nécessairement simplifiés et se concentrent sur deux scénarios spécifiques, à savoir une « adaptation optimale » et une « non-adaptation ».

Quelle que soit l'efficacité de l'adaptation, des politiques d'atténuation sont nécessaires pour limiter le changement climatique et ainsi éviter une grande partie des dommages, notamment à long terme, circonscrire les risques et éviter d'atteindre les seuils critiques. Éviter les conséquences à long terme des émissions nécessite de mettre en œuvre des mesures immédiates. Cependant, on ne peut justifier ces mesures d'atténuation sur la seule base du profil des dommages au cours du temps. Idéalement, ces mesures devraient être fondées sur le cycle complet des futurs dommages (marchands) évités grâce à la baisse des émissions actuelles, avec une prime pour la gestion des risques de dommages non marchands, d'événements catastrophiques et de franchissement irréversible des seuils critiques. Dans la section 4.2.2, on utilise le modèle AD-DICE pour identifier les trajectoires d'atténuation les moins coûteuses en maximisant la valeur actuelle nette de la trajectoire complète des dommages évités, compte tenu des coûts de réduction des émissions. Enfin, la section 4.2.3 est consacrée à une analyse des interactions entre les politiques d'adaptation et les politiques d'atténuation. L'intertemporalité, un aspect central des politiques climatiques, requiert l'utilisation d'un taux d'actualisation pour comparer les incidences sur le PIB et les dommages évités sur l'ensemble de la période. Cette section présente donc également une analyse de sensibilité des hypothèses relatives aux taux d'actualisation.

Le modèle AD-DICE ne prévoit pas d'options spécifiques d'atténuation ou d'adaptation. Au contraire, il regroupe ces options sous la forme de fonctions générales pour calculer les coûts et les avantages de la réduction des émissions (atténuation) ou des dommages résiduels (adaptation) : de fait, cela suppose une taxation du carbone à l'échelle de l'économie, à titre de politique d'atténuation, et des stocks d'adaptation, à titre de politique d'adaptation. Au départ, une faible réduction des émissions et des dommages génère des gains relativement importants à des coûts relativement bas. Mais, à mesure que les politiques deviennent plus contraignantes, les coûts marginaux augmentent, tandis que les gains marginaux s'amenuisent. On évalue un niveau de politique « optimal » en comparant ces coûts et gains marginaux. Le niveau optimal est atteint quand les émissions et les dommages ont suffisamment diminué pour que les coûts marginaux deviennent égaux aux gains marginaux. Au-delà, aucun renforcement supplémentaire des politiques ne débouche sur une amélioration supplémentaire du bien-être social. À ce stade, il est entendu implicitement que toutes les options à « moindre coût », c'est-à-dire les options qui conduisent à des gains nets de bien-être social, ont été adoptées, au contraire des options plus coûteuses. Dans cette évaluation des coûts et des gains marginaux, on tient compte de l'ensemble de la trajectoire de consommation pour maximiser la valeur actuelle nette de l'utilité.

4.2.1. Avantages d'une politique d'adaptation

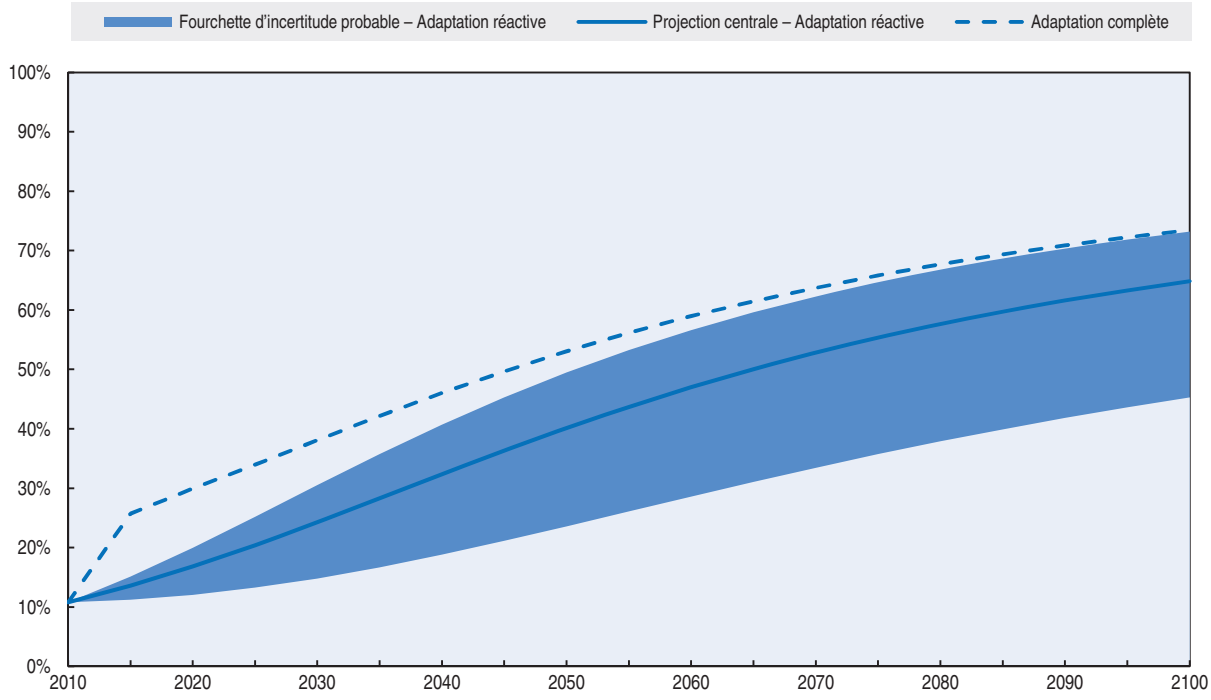
Le modèle AD-DICE, adapté du modèle DICE (Nordhaus et Boyer 2000, Nordhaus 2012), est le plus ancien des rares modèles d'évaluation intégrée (MEI) qui évaluent explicitement l'adaptation comme une variable de politique macroéconomique[3]. Il peut donc servir à étudier dans quelle mesure les dommages causés par le changement climatique sont neutralisés par différents types de politiques d'adaptation (voir Agrawala et al., 2011). Dans le modèle AD-DICE, l'adaptation peut prendre deux formes : la forme de stocks ou la forme de flux. Les stocks d'adaptation renvoient aux mesures d'adaptation qui nécessitent des investissements préalables pour constituer un capital d'adaptation. Ils réduisent les dommages à venir liés au changement climatique. Les flux d'adaptation renvoient aux mesures d'adaptation qui ne nécessitent pas d'investissements préalables, et dont les bénéfices sont recueillis presque instantanément. L'implication des pouvoirs publics peut faciliter l'application efficace de cette forme d'adaptation (par exemple en aidant à surmonter les obstacles à la connaissance), mais elle n'est pas nécessaire à sa mise en œuvre.

Les publications dans ce domaine font état de nombreuses restrictions à l'adaptation : en l'absence de politiques gouvernementales appropriées, il est peu probable que l'adaptation atteigne le niveau optimal requis pour la société (PNUE 2014). Si l'on part du principe que toutes les options d'adaptation sont facilement accessibles aux entreprises et aux ménages et qu'elles seront mises en œuvre sans intervention publique, on obtient des estimations des dommages résiduels inférieures au niveau réel probable de ces derniers, en particulier en l'absence de politiques d'adaptation ciblées. En principe, la projection centrale devrait inclure toutes les formes d'adaptation mues par les forces du marché, alors que les actions qui nécessitent une intervention publique devraient être exclues. Le modèle AD-DICE n'opère pas cette distinction, mais, de manière (nécessairement très) approximative et conformément aux travaux de de Bruin (2014) et du PNUE (2014), il considère les stocks d'adaptation comme publics, donc non axés sur le marché, ce qui veut dire que le succès de leur mise en œuvre nécessite une coordination des pouvoirs publics. Au contraire, les flux d'adaptation sont supposés relever du secteur privé et être déterminés par le marché. Ces hypothèses sont en accord avec les modalités de calibrage des stocks et des flux d'adaptation dans le modèle AD-DICE (de Bruin, 2014). Ainsi, la projection centrale décrit une situation « sans politiques d'adaptation » : les flux d'adaptation sont pris en compte, mais pas les investissements dans les stocks d'adaptation. Cette approximation concorde avec les évaluations antérieures de l'impératif d'une action publique en faveur de l'adaptation (par exemple, Agrawala et al., 2011).

Dans le scénario de l'« adaptation totale », on part de l'hypothèse que les niveaux d'adaptation sont choisis pour minimiser les coûts (il y a « adaptation optimale », c'est-à-dire qu'on cherche non pas à éviter tous les dommages possibles, mais à mettre en œuvre tous les stocks et flux d'adaptation les moins coûteux). Comme le montre le graphique 4.1, le niveau d'adaptation le moins coûteux – mesuré comme le pourcentage de dommages potentiels (dommages bruts) évités, sur une période donnée, grâce aux mesures d'adaptation passées et actuelles – augmente au fil du temps[4]. Les niveaux d'adaptation augmentent beaucoup plus rapidement lorsqu'ils incluent des investissements dans les stocks d'adaptation (en plus des seuls flux d'adaptation retenus en hypothèse dans la projection centrale), ce qui montre bien que les deux formes d'adaptation sont importantes pour limiter les dommages, et qu'il est rentable d'investir immédiatement dans les stocks.

Graphique 4.1. **Pourcentage des dommages résultant des impacts climatiques considérés neutralisés par l'adaptation**

Pourcentage de réduction des dommages (bruts) potentiels



Source : Modèle AD-DICE.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399764

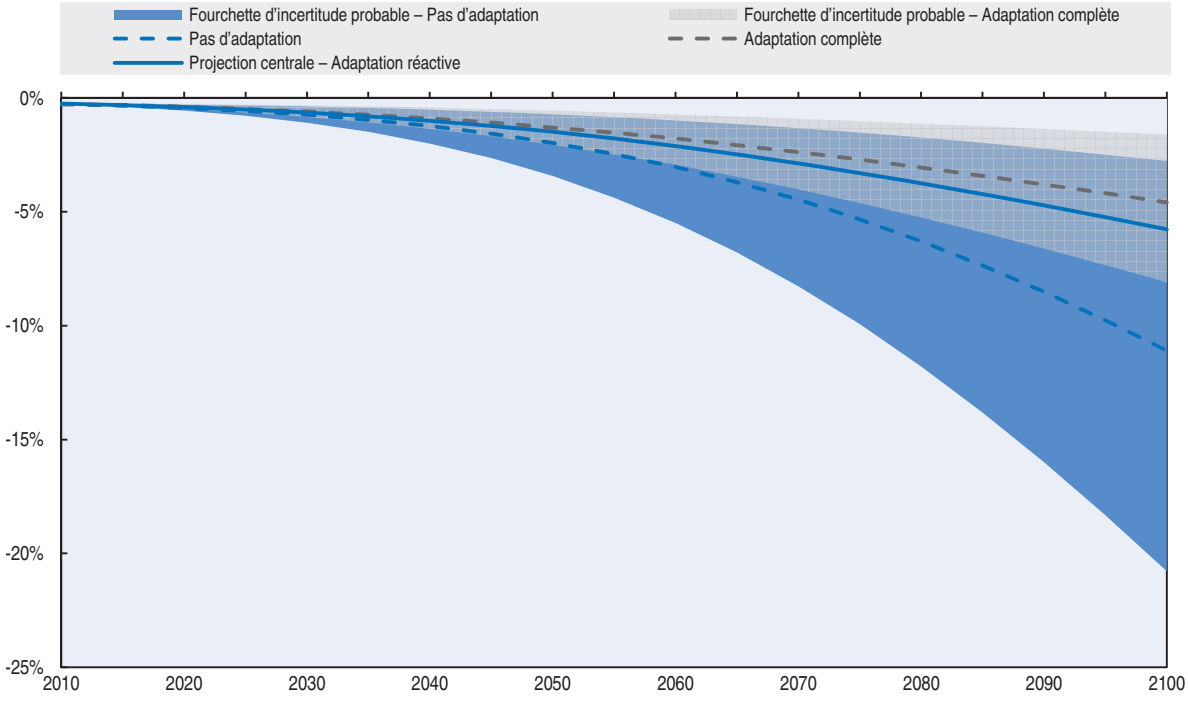
Dans le scenario hypothétique de la « non-adaptation », il n'y a ni investissement dans les stocks d'adaptation, ni flux d'adaptation. Dans ce cas extrême, les régions déterminent leurs niveaux optimaux d'atténuation et de consommation en fonction des dommages climatiques bruts, sans possibilité de réduire ces dommages par le biais de l'adaptation. Ainsi, le stock d'adaptation existant permet, à court terme, d'éviter une petite quantité de dommages, mais il se déprécie rapidement. Les flux d'adaptation étant également exclus de ce scénario, le niveau d'adaptation diminue jusqu'à zéro. Ce scénario est étudié non pour son réalisme, mais parce qu'il montre l'ampleur potentielle des dommages lorsqu'il existe des obstacles sérieux aux mesures d'adaptation par le marché.

En l'absence de mesures d'atténuation (c'est-à-dire dans la projection centrale telle qu'elle est présentée au chapitre 3), les dommages augmentent plus que proportionnellement pour atteindre près de 6 % du PIB en 2100 (avec une fourchette d'incertitude probable de la sensibilité climatique à l'équilibre située entre 2 % et 10 %). Rappelons à nouveau qu'on évoque ici une source d'incertitude seulement, alors que beaucoup d'autres entachent les projections (voir le chapitre 2).

L'absence totale d'adaptation aux impacts climatiques tend à augmenter les dommages, en particulier à plus long terme (avec des dommages dans la projection centrale s'élevant à 11 % du PIB annuel d'ici la fin du siècle), comme illustré sur le graphique 4.2. La fourchette d'incertitude des impacts sur le PIB (en raison de l'incertitude relative à la sensibilité climatique à l'équilibre seulement) est aussi sensiblement plus importante en l'absence d'adaptation. Quand on combine l'hypothèse de la non-adaptation avec une sensibilité

Graphique 4.2. **Dommages résultant des impacts climatiques considérés dans différents scénarios d'adaptation**

Variation en pourcentage par rapport à la projection de référence sans dommages



Source : Modèle AD-DICE.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399775

climatique élevée (fourchette probable), on obtient la projection d'une limite supérieure des impacts potentiels sur le PIB, qui atteint une valeur à deux chiffres bien avant la fin du siècle[5]. Bien que l'hypothèse de la non-adaptation soit extrême (face aux conséquences du changement climatique, les ménages et les entreprises adapteront leur comportement, même en l'absence de politiques publiques), elle montre qu'il est essentiel de faciliter les mesures d'adaptation par le marché, et de ne pas les entraver.

Le scenario de l'« adaptation totale » comprend les mesures d'adaptation à moindre coût, qu'il s'agisse de mesures proactives (stocks) ou réactives (flux). Lorsqu'on prend en compte non seulement les mesures réactives ayant la forme de flux (comme dans la projection centrale), mais aussi les mesures de type stocks, les dommages continuent d'augmenter au cours du temps, ce qui montre que l'adaptation ne peut supprimer tous les impacts climatiques. Cependant, les fourchettes d'incertitude révèlent clairement que l'adaptation est un instrument performant pour éviter les dommages climatiques progressifs les plus graves (mais pas les événements catastrophiques) et limiter considérablement les risques (même si les avantages de l'adaptation sont en eux-mêmes également incertains). Les avantages des politiques d'adaptation représentent, à eux seuls, plus d'un point de pourcentage du PIB d'ici la fin du siècle (et les bénéfices correspondants de l'adaptation mise en œuvre par le marché et par les pouvoirs publics s'élèvent à plus de six points de pourcentage du PIB). Bien sûr, les incertitudes qui entourent ces bénéfices sont les mêmes que celles qui entourent les coûts de l'inaction.

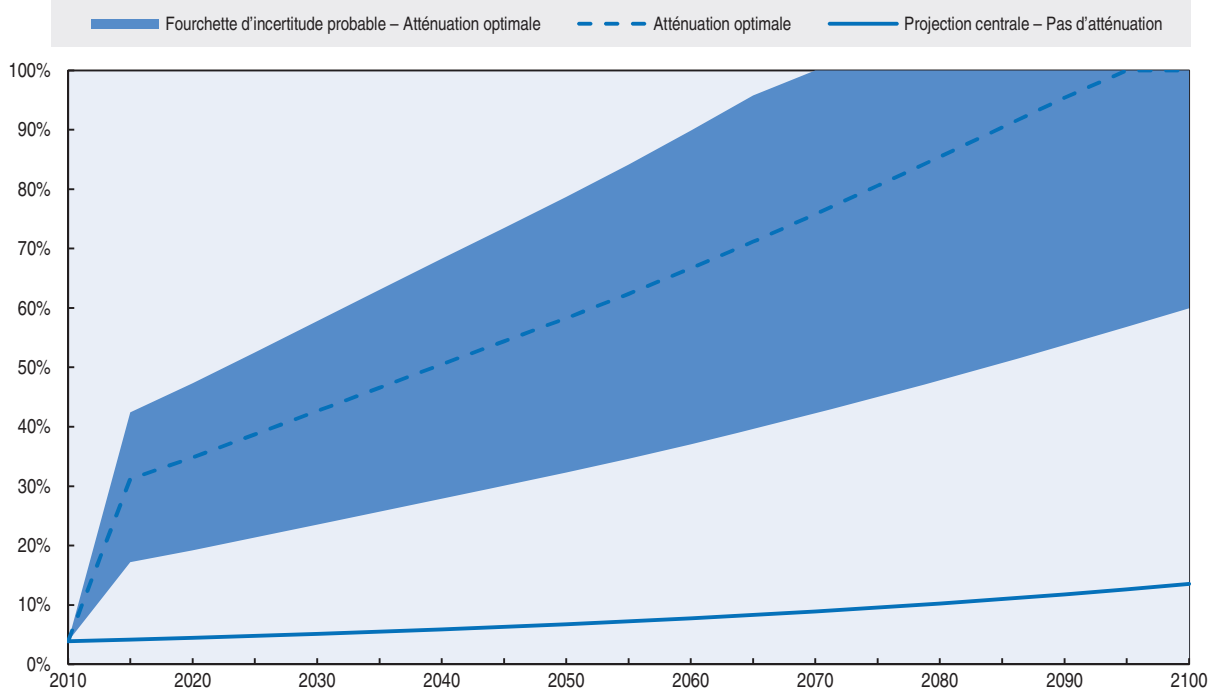
4.2.2. *Avantages d'une politique d'atténuation*

Le niveau optimal de réduction des émissions est atteint quand les coûts marginaux d'une unité supplémentaire de réduction des émissions sont égaux au flux actualisé des dommages supplémentaires évités, autrement dit les bénéfices marginaux d'une unité de réduction des émissions. Par conséquent, ces projections dépendent essentiellement du taux d'actualisation utilisé dans l'analyse. Les graphiques présentés ici sont basés sur les taux d'actualisation proposés par le Trésor britannique (2003). La section 4.2.4 ci-après examine les coefficients d'actualisation qui en découlent et propose une comparaison avec d'autres hypothèses. Bien que diverses trajectoires puissent être envisagées pour atteindre un objectif climatique à long terme, telles qu'un scénario de stabilisation à 450 ppm, il est préférable de commencer immédiatement à réduire les émissions, malgré des niveaux de dommages relativement faibles, pour profiter des options de réduction bon marché qui existent et éviter ultérieurement d'avoir à augmenter très vite les niveaux d'atténuation (voir OCDE, 2012)[6]. Il importe de garder à l'esprit que ces trajectoires d'atténuation reposent uniquement sur les avantages pris en compte dans le modèle, donc excluent une prime de risque due aux phénomènes particuliers de grande ampleur (section 3.2.8) et les co-avantages liés à l'amélioration de la qualité de l'air.

Le graphique 4.3 illustre, dans un scenario à moindre coût (« atténuation optimale »), l'évolution au cours du temps des taux de réduction des émissions, c'est-à-dire du pourcentage de réduction des émissions en dessous de la projection de référence sans dommages, quand on suppose l'existence de flux d'adaptation. Même en l'absence de (nouvelles) politiques d'atténuation, les émissions diminuent quelque peu, à cause de

Graphique 4.3. **Taux de réduction des émissions mondiales dans le scénario d'atténuation à moindre coût**

Pourcentage de la projection de référence sans dommages



Source : Modèle AD-DICE.

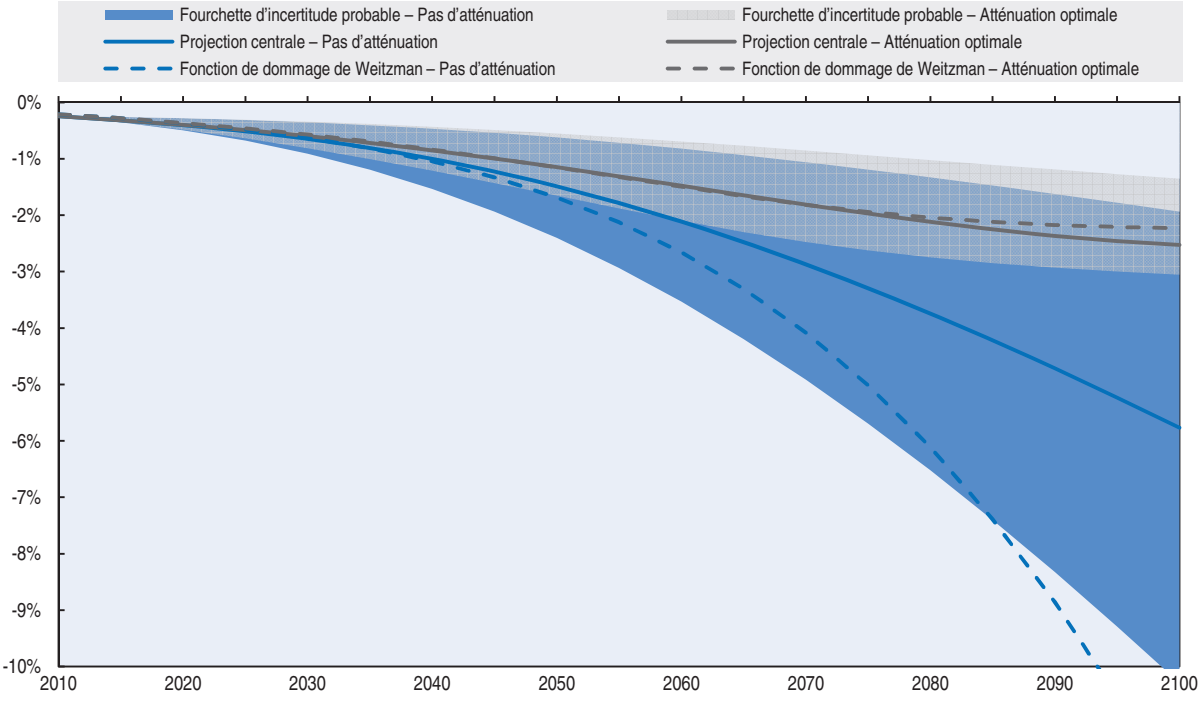
StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399788

l'épuisement des combustibles fossiles et grâce aux politiques d'atténuation déjà mises en œuvre dans le monde : sous l'effet cumulé de ces facteurs, la réduction atteint environ 10 % des émissions, un pourcentage qui augmente lentement au cours du temps avec la disparition progressive des combustibles fossiles. La trajectoire d'atténuation à moindre coût projetée par le modèle AD-DICE prévoit un saut immédiat du taux de réduction, puis sa progression régulière. Contrairement à ce que l'on observe dans le scénario sans action publique, les émissions sont immédiatement ramenées en deçà de leurs niveaux de 2010. Plus la sensibilité climatique à l'équilibre est faible, moins la réduction des émissions produit d'avantages, donc plus les taux de réduction sont faibles et plus il est possible d'adapter le calendrier de réduction des émissions dans la trajectoire d'émission à moindre coût.

Les efforts d'atténuation réduisent les impacts du changement climatique, mais ne les éliminent pas complètement. Il est trop coûteux de chercher à prévenir tous les dommages climatiques au-delà des niveaux actuels (et les émissions qui ont eu lieu par le passé ont déjà imposé des dommages à la société ; voir le chapitre 3). Le graphique 4.4 montre comment les efforts d'atténuation à moindre coût (ou optimaux) permettent une réduction des dommages équivalente à environ 2.5 % du PIB. Ainsi, les avantages des mesures d'atténuation augmentent rapidement au fil du temps, jusqu'à dépasser 3 points de pourcentage du PIB à la fin du siècle.

Graphique 4.4. **Dommages résultant des impacts climatiques considérés dans différents scénarios d'atténuation**

Variation en pourcentage par rapport à la projection de référence sans dommages



Source : Modèle AD-DICE.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399794

La fourchette d'incertitude probable du niveau de dommages, qui reflète la sensibilité climatique à l'équilibre, devient également beaucoup plus étroite. Les concentrations de carbone étant plus faibles dans le scénario d'atténuation, la fourchette correspondante

pour les hausses de température diminue plus que proportionnellement, conduisant à une réduction plus que proportionnelle des dommages. De ce fait, en 2100, la fourchette d'incertitude probable des dommages pour la politique d'atténuation à moindre coût est de 1 % à 3 %, alors qu'elle est de 2 % à 10 % dans le scénario de la « non-atténuation ».

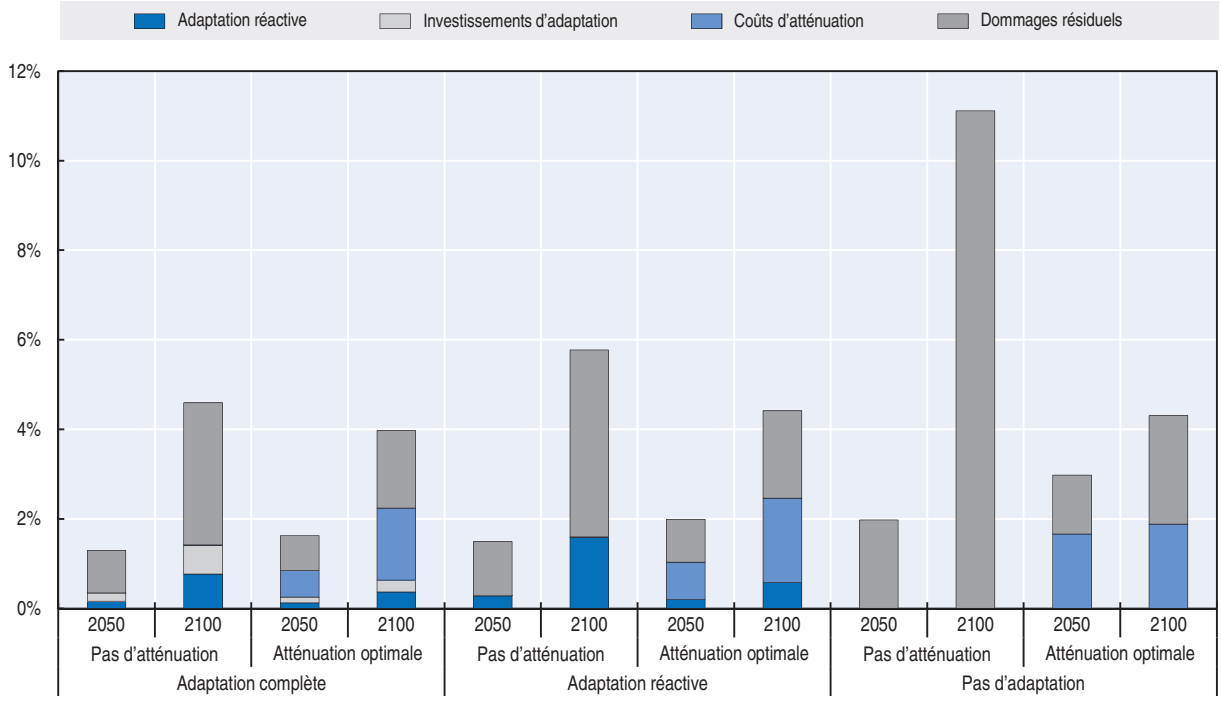
La fonction de dommage de Weitzman (Weitzman, 2012) entraîne une baisse des dommages due à l'atténuation plus forte que celle de la projection centrale (comparer la ligne en pointillés et la ligne continue dans le graphique 4.4). En effet, les fonctions de dommage de Nordhaus et de Weitzman diffèrent principalement quand l'élévation de la température dépasse les 2 à 3 degrés. Quand la hausse de la température reste inférieure à 2 degrés, les deux fonctions sont, par construction, très proches. De fait, dans les scénarios d'atténuation à moindre coût où les hausses de température demeurent plus faibles, les deux fonctions restent voisines[7]. Cependant, avec la spécification de Weitzman, le coût climatique total correspondant est élevé car les coûts d'atténuation sont plus élevés tout au long du siècle.

4.2.3. *Interactions entre les politiques d'atténuation et les politiques d'adaptation*

La section 4.2.1 a mis en évidence le fait qu'en l'absence de mesures d'atténuation, les mesures d'adaptation jouent un rôle important dans la limitation des dommages climatiques. Le graphique 4.5, qui présente les différents coûts d'atténuation et d'adaptation ainsi que les dommages prévus pour le milieu et la fin du siècle, montre que le rôle de l'adaptation est beaucoup moins important lorsque les dommages sont limités par des mesures d'atténuation à moindre coût. L'adaptation et l'atténuation sont deux

Graphique 4.5. **Composition des coûts résultant des impacts climatiques considérés dans différents scénarios d'adaptation et d'atténuation**

Pourcentage du PIB dans la projection de référence sans dommages



Source : Modèle AD-DICE.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399801

instruments efficaces de limitation des dommages climatiques, surtout quand l'un d'eux fait défaut. Toutefois, en ce qui concerne la minimisation des coûts, ces deux politiques se substituent partiellement l'une à l'autre[8]. L'ensemble de mesures à moindre coût sera composé des deux types de mesures, mais le graphique 4.5 montre clairement que l'adaptation ne peut pas se substituer parfaitement à l'atténuation. Lorsqu'on applique uniquement des politiques d'adaptation (scénario « adaptation totale – non-atténuation »), les dommages sont sensiblement plus importants que lorsqu'on applique uniquement des politiques d'atténuation (scénario « non-adaptation – atténuation optimale »), surtout dans la première moitié du siècle. À la fin du siècle, le total des coûts du changement climatique est à peu près équivalent lorsque des politiques d'atténuation optimales sont en place, indépendamment de l'existence de mesures d'adaptation. Mais même en présence d'une atténuation optimale, l'adaptation peut considérablement réduire les coûts du changement climatique au début du siècle : les coûts cumulés du changement climatique au cours du siècle (non représentés sur le graphique) sont 17 % plus élevés lorsqu'aucune mesure d'adaptation n'a été prise (et 66 % plus élevés si, en plus, l'adaptation induite par le marché est également indisponible).

4.2.4. Analyse de sensibilité du taux d'actualisation

La vitesse et le taux de réduction des émissions dépendent, notamment, de la valeur accordée aux dommages futurs. Avec des taux d'actualisation plus bas, on insiste relativement plus sur les coûts et les avantages futurs. De plus, comme les coûts de réduction des émissions viennent avant la plupart des avantages (les coûts conduisent désormais à un flux de futurs dommages évités), des taux plus bas supposent des politiques d'atténuation plus strictes à court terme. Par conséquent, le taux d'actualisation influe notablement sur la projection de la trajectoire d'atténuation à moindre coût.

La plupart des modèles économiques ont recours à la règle dite de Ramsey pour calculer le taux d'actualisation. Cette règle fait appel à un taux de préférence pure pour le présent (TPPP), à une élasticité intertemporelle de l'aversion aux inégalités de revenu et au taux de croissance du PIB (Ramsey, 1928 ; Nordhaus, 2007 ; Gollier, 2007). Dans les modèles DICE et RICE d'origine, le TPPP est de 1.5 % et l'élasticité est égale à 2 (Nordhaus, 2011) ; mais dans la dernière version du modèle DICE, Nordhaus (2012) a choisi une élasticité révisée de 1.45 (la valeur utilisée dans la présente analyse). Dans le rapport Stern, le TPPP choisi est de 0.1 % et l'élasticité est égale à 1 (Stern, 2007). Dans le scénario intermédiaire proposé par le Trésor britannique, le TPPP est de 1.5 % et l'élasticité est égale à 1 (UK Treasury, 2003). La valeur actuelle nette de l'action publique future est égale à la différence entre les avantages futurs et les coûts futurs, ces deux éléments étant actualisés à la période en cours, sur la base des taux d'actualisation propres à cette période. Trois indicateurs peuvent utilement nous renseigner sur l'influence du taux d'actualisation : i) le taux annuel d'actualisation au cours de la première décennie, ii) la valeur actualisée en 2010 de 100 USD en 2060, et iii) la part de l'horizon infini retenue après 50 ans. Le tableau 4.1 récapitule les valeurs de ces indicateurs pour chacune des hypothèses susmentionnées d'application de la règle de Ramsey (y compris la règle du modèle RICE2010, incluse même si elle n'est pas utilisée plus avant dans l'analyse).

En l'absence de politique d'atténuation, le taux d'actualisation n'a pas une influence majeure sur le niveau des dommages, exprimé en pourcentage du PIB. La seule différence tient à l'ajustement des investissements dans les stocks d'adaptation, mais cet effet est relativement minime. Cependant, l'effet sur la trajectoire à moindre coût est bien plus important, comme le montre le graphique 4.6. Fondamentalement, plus le taux d'actualisation est faible, plus les

Tableau 4.1. **Effets des différents taux d'actualisation**

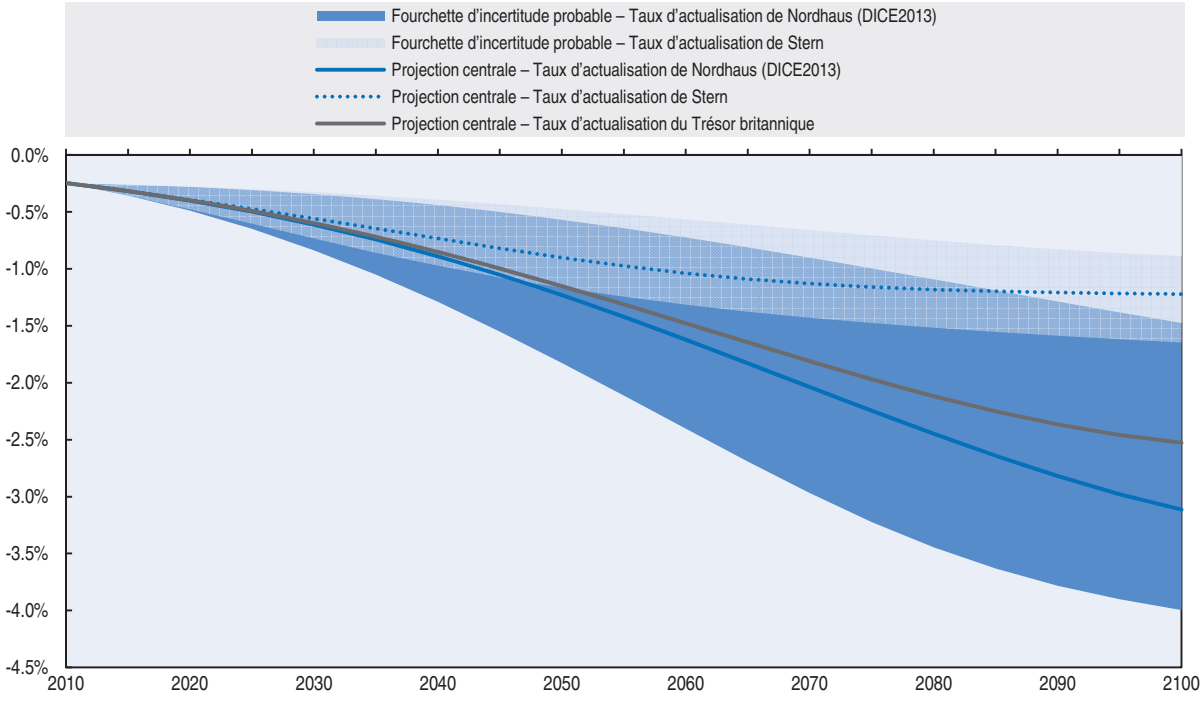
	Taux d'actualisation du Trésor britannique	Taux d'actualisation de Nordhaus DICE2013 (RICE2010)	Taux d'actualisation de Stern
Taux annuel d'actualisation – première décennie	4.2 %	5.2 % (6.6 %)	2.5 %
Valeur actualisée de 100 USD en 2060	16.7	10.7 (6.0)	34.1
Part de l'horizon infini retenue après 50 ans	79 %	86 % (92 %)	53 %

Source : Calculs effectués pour cette analyse au moyen du modèle AD-DICE.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399938

Graphique 4.6. **Dommages résultant des impacts climatiques considérés dans le scénario d'atténuation à moindre coût**

Variation en pourcentage par rapport à la projection de référence sans dommages



Source : Modèle AD-DICE.

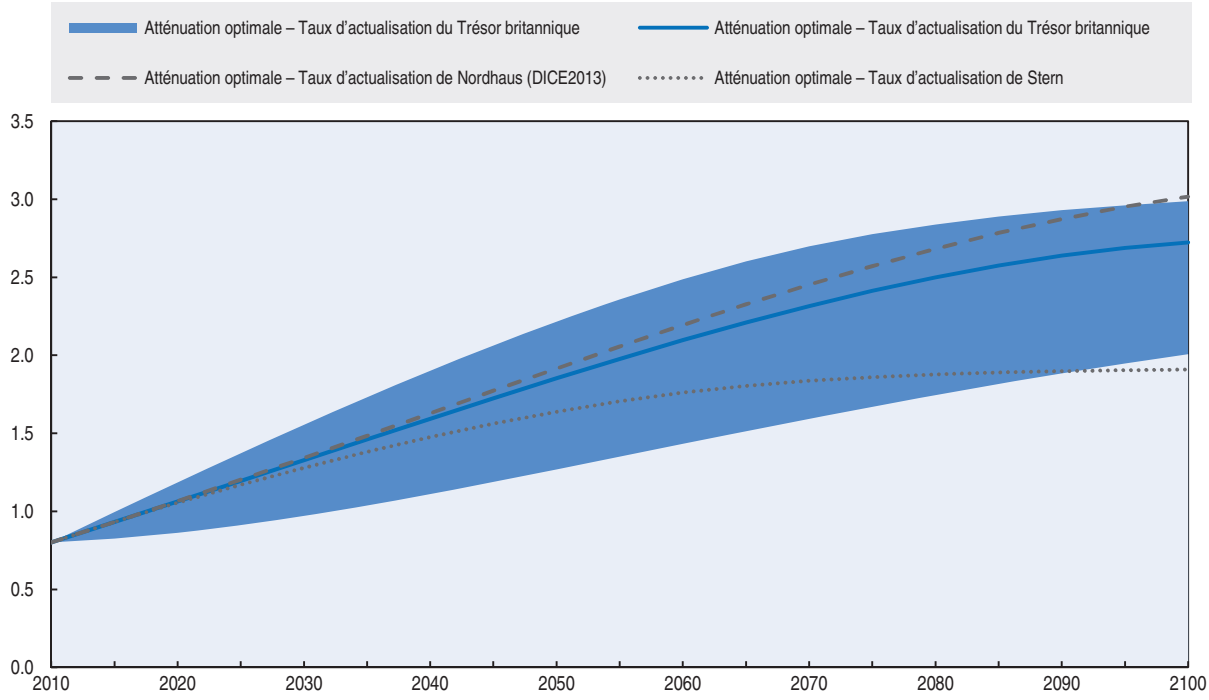
StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399817

niveaux de dommages à moindre coût sont bas. En effet, la valeur actualisée du flux futur de dommages évités est plus grande et l'atténuation devient plus rentable : les effets de cette dernière augmentent tandis que le changement climatique et ses dommages connexes diminuent. Le deuxième résultat qu'on observe est que la fourchette d'incertitude probable est plus étroite lorsque les taux d'actualisation appliqués sont plus bas. Le mécanisme est ici le même que pour le rétrécissement de la fourchette d'incertitude lorsqu'on passe d'une situation de non-atténuation à des niveaux d'atténuation à moindre coût.

Enfin, comme l'illustre le graphique 4.7, le taux d'actualisation, puisqu'il affecte la pondération des coûts et des avantages en fonction du temps, influe également sur l'augmentation de la température moyenne mondiale qui serait subie si l'atténuation à moindre coût était mise en œuvre. Avec le taux d'actualisation de Nordhaus, qui accorde un poids plus important aux coûts à court terme, il est optimal de laisser les températures augmenter jusqu'à 3 degrés au-dessus des niveaux de l'ère préindustrielle avant la fin du

Graphique 4.7. **Hausses de température avec atténuation optimale, en fonction de différents taux d'actualisation**

Degrés Celsius au-dessus des niveaux préindustriels



Source : Modèle AD-DICE.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399828

siècle. Avec le taux d'actualisation du Trésor britannique (comme dans la projection centrale), l'élévation de température, plus modeste, se maintient en dessous de 3 degrés. Enfin, avec le taux d'actualisation de Stern, elle est encore plus limitée, puisqu'elle reste inférieure à 2 degrés. Comme le montre le graphique, il ne s'agit que de probabilités que les températures se maintiennent à ces niveaux ; il existe un risque important que les températures soient plus élevées, si la sensibilité climatique à l'équilibre est plus élevée.

4.3. Conséquences régionales et sectorielles des mesures d'atténuation

Comme cela a été mentionné précédemment, le modèle ENV-Linkages n'est pas adapté à une analyse directe des coûts et avantages de différentes politiques climatiques. En revanche, il présente une meilleure capacité à simuler l'activité économique sectorielle et régionale et donne une vision plus détaillée des différentes catégories de dommages. En outre, avec ce modèle, on peut utiliser les politiques de tarification du carbone pour obtenir des indications sur les dommages évités grâce à la politique d'atténuation, autrement dit la variation du niveau de dommages qui résulte des politiques d'atténuation en cours et passées. Le modèle ENV-Linkages permet également de comparer les profils régionaux et sectoriels des coûts de l'atténuation et des coûts de l'inaction (dommages). En accord avec la projection centrale fournie par le modèle AD-RICE pour la politique d'atténuation optimale, on utilise le modèle ENV-Linkages pour simuler la trajectoire de réduction des émissions qui suit la trajectoire d'atténuation optimale dans la projection centrale obtenue avec le taux d'actualisation du Trésor britannique à la section 4.2.2. La politique est mise en œuvre dans le cadre d'un marché mondial du carbone hypothétique. Il s'agit essentiellement

d'un point de référence qui garantit que les options de réduction à moindre coût sont mises en œuvre dans le modèle, sans coûts supplémentaires associés à d'autres instruments spécifiques. Comme les coûts régionaux de l'atténuation dépendent fondamentalement de la manière dont les charges sont réparties (OCDE, 2012), il n'entre pas dans le cadre de la présente analyse d'effectuer une comparaison de la distribution régionale des coûts d'atténuation.

Cette section examine de manière plus approfondie, à l'aide des capacités d'analyse plus fines du modèle ENV-Linkages, la façon dont une telle politique simplifiée d'atténuation peut influer sur l'économie jusqu'en 2060. On ne possède malheureusement pas assez d'informations sur l'amplitude des différents impacts climatiques pour établir des projections avec les niveaux plus faibles de changement climatique qui pourraient résulter d'une politique d'atténuation plus stricte. Une analyse plus détaillée des avantages de mesures gouvernementales contraignantes nécessite beaucoup plus de données, notamment sur les impacts climatiques dans un scénario de type RCP2.6, avec changement climatique limité (équivalant à 2 degrés d'augmentation de la température moyenne mondiale). Il est donc impossible de produire une évaluation robuste des avantages d'un scénario d'atténuation contraignant comme celui qui est étudié ici. En première approximation, dans la présente analyse des dommages évités grâce à l'atténuation, on réduit les dommages par rapport à leur niveau de référence, en proportion de la différence entre les hausses de température prévues dans les deux scénarios. L'hypothèse utilisée pour l'occasion, conforme aux hypothèses concernant les incidences sur la santé formulées par exemple par Roson et Van der Mensbrugghe (2012), consiste à dire qu'en l'absence d'information sur le niveau de dommages dans le scénario RCP2.6, on réduit les dommages de manière à refléter le fait que seules les hausses de température au-dessus des niveaux de l'année 2000 provoquent des dommages. En ce qui concerne les impacts sur l'agriculture, et afin de tenir compte de leur non-linéarité, on décale le profil temporel des impacts de sorte qu'une hausse de température donnée provoque les mêmes chocs sur les rendements, quelle que soit la vitesse du changement climatique. Ainsi, les hausses de température plus lentes du scénario de l'atténuation ont pour conséquence de retarder les incidences sur les rendements. De fait, les dommages agricoles sont limités par la température, et non par le temps.

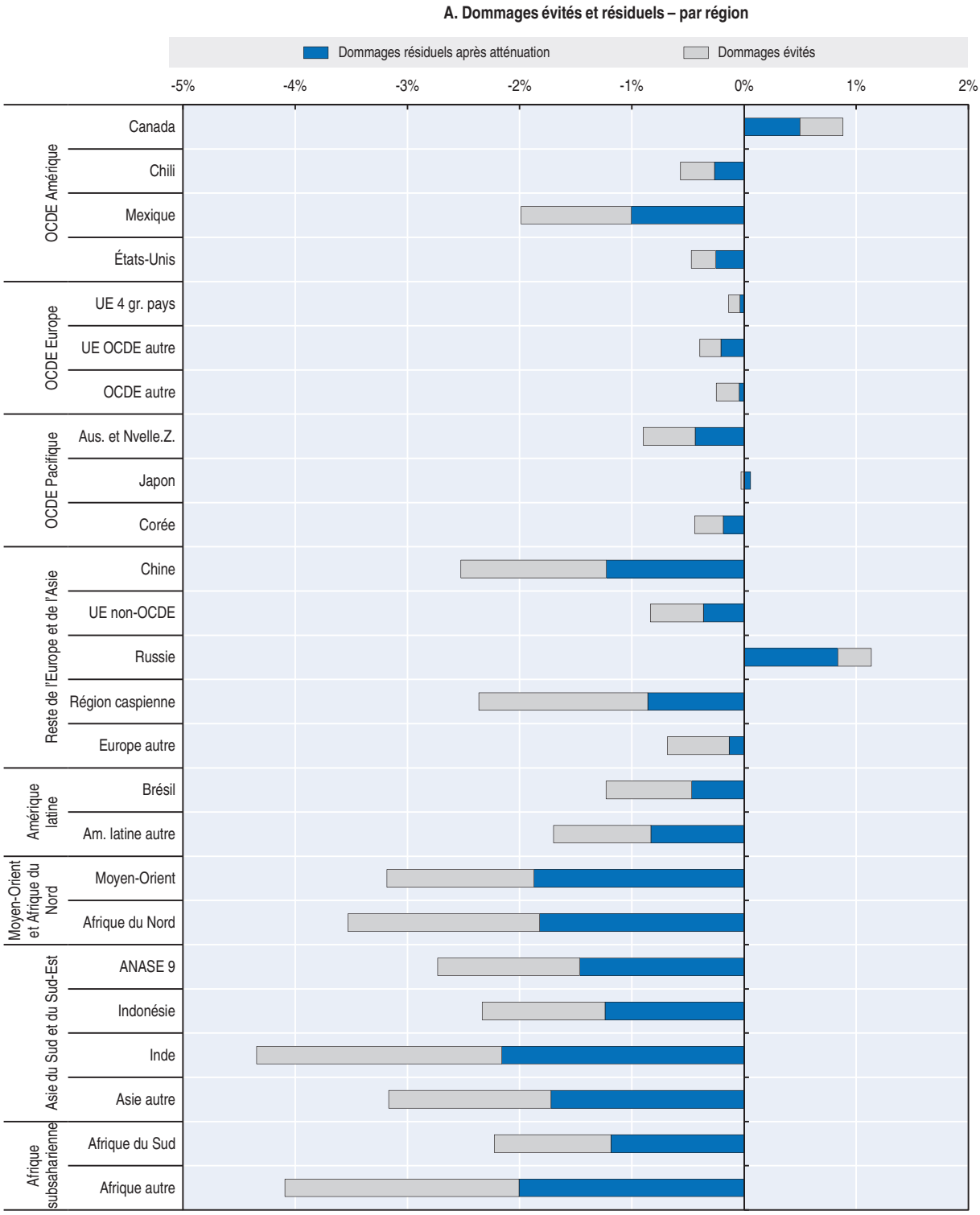
De nombreuses études mettent en avant des politiques spécifiques qui peuvent efficacement réduire les émissions à de faibles coûts. Les plus connues sont notamment le rapport *New Climate Economy* de la Commission mondiale sur l'économie et le climat (CMEC, 2014), le projet de l'OCDE *Aligner les politiques au service de la transition vers une économie bas carbone* (OCDE, 2015d) et le *WEO Special Report on Energy and Climate change* de l'AIE (AIE, 2015). De tels examens n'entrent pas dans le cadre du présent rapport, qui se limite à une évaluation des dommages évités grâce à l'atténuation, et à une comparaison de la distribution régionale et sectorielle des dommages évités et des coûts d'atténuation.

4.3.1. *Dommages, causés par les impacts climatiques considérés, évitables grâce à une politique d'atténuation*

Il a déjà été expliqué dans la section 4.2 que la mise en œuvre d'une politique rigoureuse d'atténuation pouvait réduire en grande partie, mais pas en totalité, les dommages potentiels du changement climatique. Plusieurs raisons expliquent que les dommages ne puissent pas être ramenés à zéro : les impacts climatiques considérés se manifestent déjà et, à partir d'un certain stade, les coûts d'une réduction supplémentaire des dommages sont plus élevés que les avantages supplémentaires retirés. Le graphique 4.8A montre dans

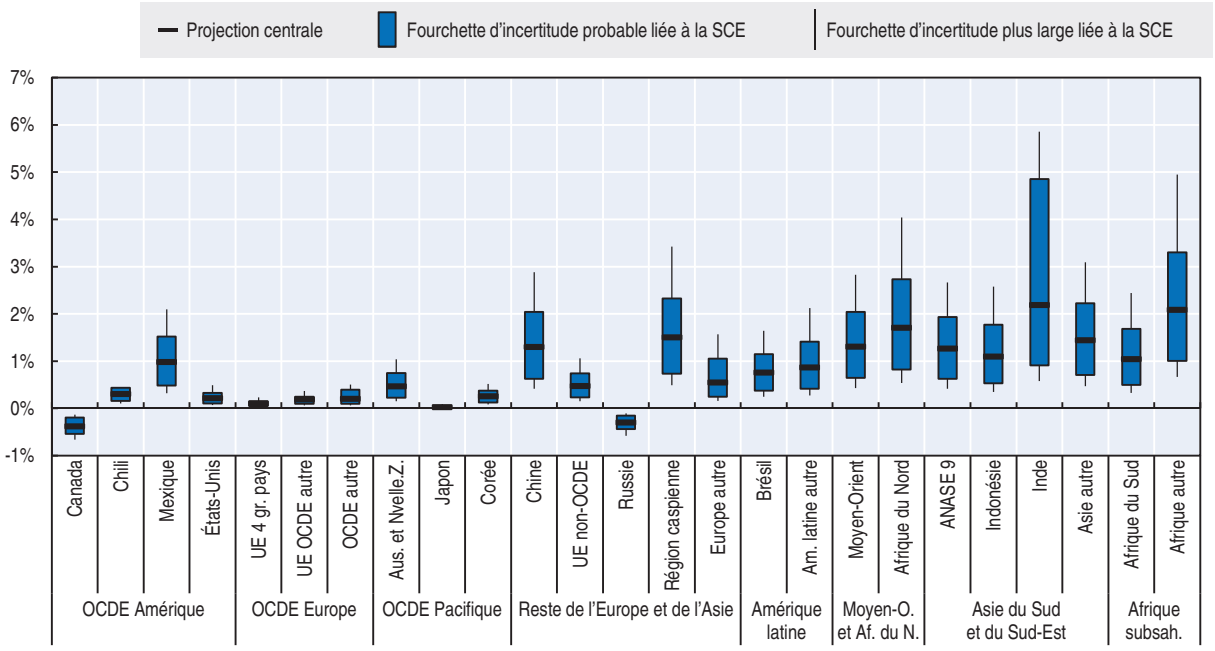
Graphique 4.8. **Dommages régionaux résultant des impacts climatiques considérés, avec et sans politique d'atténuation**

Variation en pourcentage du PIB en 2060 par rapport à la projection de référence sans dommages



Graphique 4.8. **Dommages régionaux résultant des impacts climatiques considérés, avec et sans politique d'atténuation** *(suite)*

B. Sensibilité des dommages évités à l'incertitude liée au climat – par région



Source : Modèle ENV-Linkages.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399838

quelle mesure les dommages régionaux prévus pour 2060, tels que présentés au chapitre 2 (voir le graphique 2.10), sont évités par le biais d'une tarification mondiale du carbone. À l'échelle de la planète, l'atténuation permet d'éviter environ la moitié de la perte de PIB due aux coûts de l'inaction (soit 1 % du PIB). Les dommages résiduels s'élèvent à 1 % du PIB. La politique d'atténuation peut également réduire les incertitudes qui entourent les pertes économiques, comme l'illustre le graphique 4.8B. L'incertitude qui entoure les dommages mondiaux résiduels est comprise entre 0.5 % et 1.6 % dans la fourchette probable de sensibilité climatique à l'équilibre et entre 0.3 % et 2.0 % dans la fourchette d'incertitude plus large (non représentée sur le graphique 4.8). Ainsi, l'épaisseur de la fourchette des dommages mondiaux passe de 2.3 % du PIB (la différence entre 1.0 % et 3.3 %) à 1.1 %, ce qui confirme que les mesures d'atténuation offrent un fort potentiel de réduction des risques de changement climatique grave : à la valeur de SCE très élevée de 6 degrés, l'atténuation ramène les dommages potentiellement causés au PIB de 4.4 % à 2.0 % au niveau mondial et, par exemple, de 10 % à 4.1 % en Inde.

Toutes les régions ne subissent pas les effets des politiques d'atténuation sur les dommages climatiques dans les mêmes proportions. La répartition entre les différentes catégories de dommages diffère selon les régions, et la lente accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère n'a pas le même impact sur toutes les catégories de dommages. Ainsi, même avec la politique ambitieuse d'atténuation simulée ici, le changement climatique aura des répercussions importantes sur les régions les plus vulnérables. S'agissant des régions les plus gravement touchées, les projections montrent que la politique d'atténuation réduit plus efficacement les dommages dans les régions où les

dommages agricoles sont les plus importants, telles que l'Inde. Néanmoins, dans la plupart des pays d'Afrique et d'Asie, les dommages demeurent bien supérieurs à 1 % du PIB.

Dans les pays de l'OCDE, où les coûts de l'inaction sont plus faibles (voir le graphique 2.10 au chapitre 2), les dommages évités sont logiquement moins importants aussi. On constate cependant quelques disparités frappantes au sein de ce groupe : aux États-Unis, par exemple, 46 % des dommages sont évités, tandis qu'au Chili, ce pourcentage s'élève à 54 %, malgré des gains plus faibles dans l'agriculture. Ces différences découlent principalement des hypothèses (ad hoc) qui déterminent dans quelle mesure les incidences sur la santé, l'énergie et le tourisme sont réduites en présence de politiques d'atténuation. En ce qui concerne plus particulièrement le tourisme, les informations dont on dispose sont insuffisantes pour réaliser une évaluation fiable. Le changement climatique continue de générer des avantages nets au Canada et en Russie, mais à un niveau moindre en cas de politique d'atténuation contraignante (et à l'exclusion de l'effet indirect que les variations de la demande d'énergie induites par l'atténuation pourraient avoir sur les exportations de combustibles). Encore une fois, l'hypothèse ad hoc concernant l'influence du niveau de changement climatique sur la baisse des impacts touristiques joue un rôle central dans ce résultat.

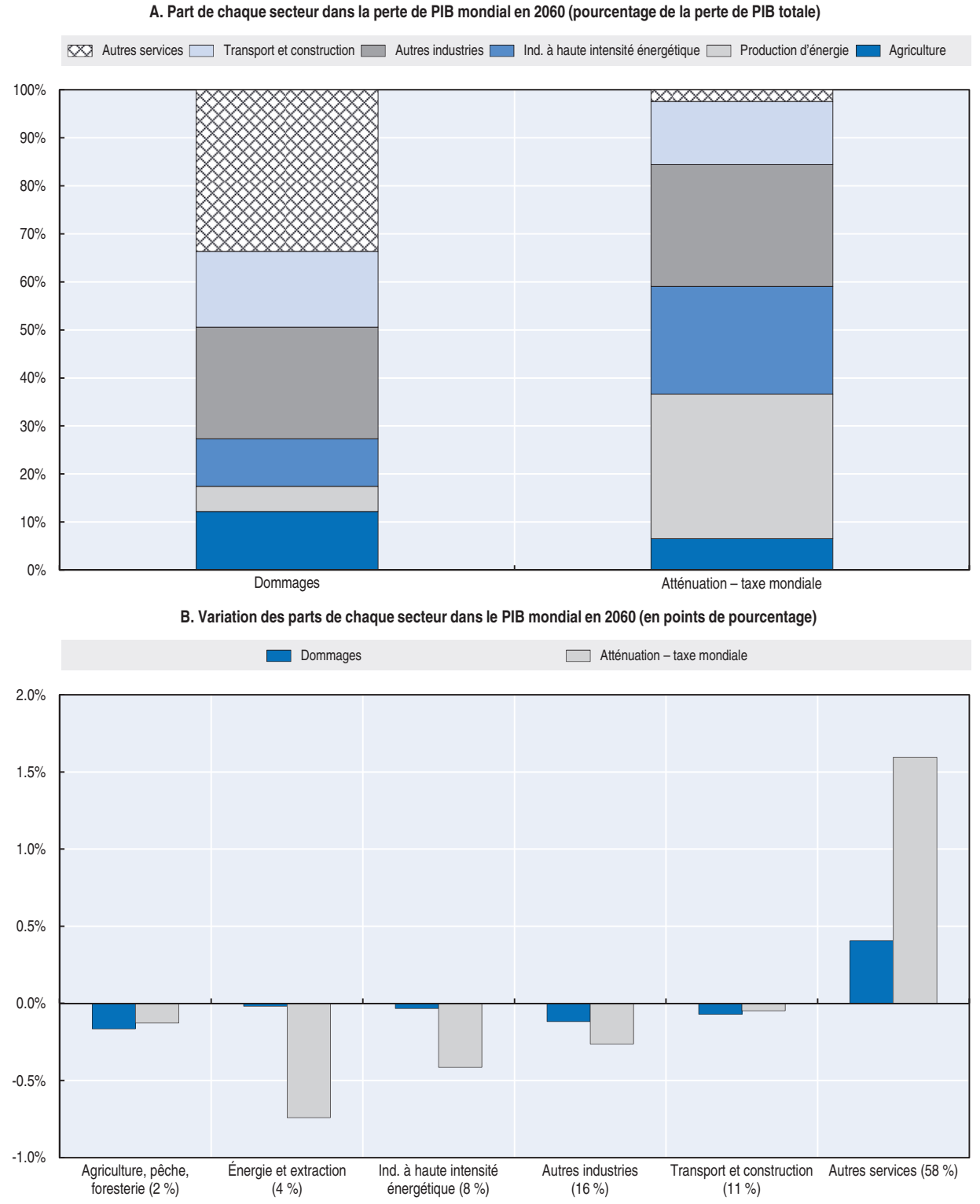
Le graphique 4.8B montre l'incertitude qui entoure les dommages régionaux évités. Celle-ci est à comparer aux incertitudes associées aux coûts de l'inaction, qui ont été présentées au graphique 2.10B du chapitre 2 : une sensibilité climatique élevée implique des coûts de l'inaction élevés, mais également des réductions importantes de dommages par le biais de l'atténuation. En Inde, les dommages évités peuvent atteindre jusqu'à 4.9 % du PIB, mais seulement si les dommages de la projection sans atténuation représentent 8.4 % du PIB. En résumé, les incertitudes qui entourent les dommages évités et celles qui entourent les dommages résiduels se comportent de la même façon. Toutefois, en général, le pourcentage de dommages évités grâce à l'atténuation augmente avec la sensibilité climatique. En effet, les impacts les plus graves ont les plus grandes conséquences sur le PIB, ce qui signifie que la limitation du changement climatique a des effets marginaux plus importants.

4.3.2. Conséquences des politiques d'atténuation en termes de redistribution sectorielle

Afin de comparer les impacts des dommages climatiques et d'une politique ambitieuse d'atténuation sur la structure sectorielle de l'économie mondiale, on établit la répartition sectorielle de la perte de PIB mondial en 2060, illustrée au graphique 4.9A. Le graphique 4.9B présente la variation associée projetée de la part des différents secteurs dans le PIB mondial, les pourcentages obtenus avec la projection de référence sans dommages étant indiqués en regard des légendes de l'axe des abscisses. Comme les parts initiales sont exprimées en pourcentage, leur variation est mesurée en points de pourcentage. À titre d'exemple, comme le montre le graphique 4.9, une augmentation de 2 points de pourcentage de la part du secteur des services dans le PIB mondial quand on prend en compte les dommages climatiques indique que la part de ce secteur devrait passer de 58 % à 60 %.

Il a déjà été souligné au chapitre 2 que les dommages climatiques ont tendance à se propager dans l'ensemble de l'économie et à toucher tous les secteurs. Le graphique 4.9A montre clairement que tous les secteurs contribuent à la perte de PIB, que celle-ci soit imputable aux dommages climatiques ou à la politique d'atténuation. Mais la répartition sectorielle présente de grandes disparités, encore plus visibles à travers les variations des parts de chaque secteur dans le PIB total, illustrées au graphique 4.9B.

Graphique 4.9. **Variations structurelles de l'économie mondiale dues aux dommages résultant des impacts climatiques considérés et aux politiques d'atténuation**



Source : Modèle ENV-Linkages.

StatLink http://dx.doi.org/10.1787/888933399844

Le secteur de l'agriculture subit les effets négatifs aussi bien des dommages climatiques que des efforts d'atténuation. Bien que sa part dans le PIB mondial reste relativement modeste (projection à 2 % en 2060), la baisse de cette part est importante. Comme cela a été expliqué dans le chapitre 2, les impacts directs sur l'agriculture sont conséquents, et les pertes de PIB sont relativement élevées dans les régions où l'agriculture constitue une partie non négligeable de l'économie. S'agissant de la politique d'atténuation, les émissions considérables de méthane et d'hémioxyde d'azote, combinées aux émissions de CO_2 dues à la combustion de combustibles, impliquent qu'une tarification du carbone appliquée à l'ensemble de l'économie fait augmenter substantiellement les coûts dans ce secteur. Comme dans d'autres secteurs, la disponibilité de technologies bas carbone, prise en compte dans la modélisation, limite ces coûts, qui seraient beaucoup plus élevés avec les technologies actuelles. La politique d'atténuation réduira toutefois les dommages à l'agriculture, c'est pourquoi il est toujours dans l'intérêt de ce secteur de veiller à la réduction des émissions mondiales de GES. Ces résultats indiquent également combien ce secteur est tributaire du climat, du fait de sa dépendance aux conditions météorologiques et sa contribution aux émissions de GES, et donc au changement climatique.

Les simulations montrent un effet relativement faible des dommages climatiques (en l'absence de politique d'atténuation) sur les secteurs de l'énergie et de l'extraction. Ces résultats peuvent être biaisés dans une certaine mesure par le fait qu'on n'inclut pas de dommages directement subis par l'approvisionnement en énergie (parce qu'on manque de données concernant les effets des impacts climatiques sur les diverses technologies d'approvisionnement en énergie). Néanmoins, il est évident que les activités de production d'énergie et d'extraction, fortement émettrices de GES, seront touchées par la politique d'atténuation. Mais cette baisse globale cache des évolutions plus nuancées : tandis que la baisse devrait être très forte pour les producteurs de combustibles fossiles, les technologies énergétiques moins polluantes, y compris de production d'électricité d'origine renouvelable, pourraient augmenter considérablement leurs activités de production. Dans l'ensemble, cependant, le déclin de la demande mondiale d'énergie, en réponse à la taxe carbone, conduit à une contraction du secteur de l'énergie.

Les secteurs industriels se trouvent dans une situation analogue : alors que les dommages directs qu'ils devraient subir sont limités, les conséquences indirectes font baisser leur activité économique, dans une mesure qui reste faible en comparaison de la baisse prévue avec les politiques d'atténuation. Cela vaut en particulier pour les industries à forte intensité énergétique, où la tarification du carbone suppose une augmentation substantielle des coûts et une contraction de la production.

S'agissant des secteurs du transport et de la construction, les résultats des projections sont davantage comparables à ceux de l'agriculture, bien qu'ils soient moins prononcés. Les dommages climatiques et la taxe carbone auront un impact négatif sur ces secteurs, mais les changements les plus marqués se retrouvent au niveau sectoriel inférieur. En ce qui concerne les dommages, la construction est plus touchée que le transport, notamment en raison des pertes de productivité du travail liées au stress thermique. En ce qui concerne la politique d'atténuation, le secteur de la construction propre est moins touché que le secteur du transport.

Les services se trouvent dans la situation inverse de celle des secteurs de l'énergie et des secteurs industriels : ils peuvent tirer profit de la politique d'atténuation puisqu'ils

sont moins polluants. Comme indiqué au chapitre 2, les dommages directs et indirects causés aux secteurs des services sont conséquents. Le graphique 4.9A confirme ce point. Toutefois, comme le secteur des services occupe une place beaucoup plus importante que les autres secteurs, sa part relative peut augmenter, comme le montre le graphique 4.9B. En d'autres termes, il est *relativement* moins touché que les autres secteurs. En outre, comme les régions où la part du secteur des services est la plus grande sont moins gravement affectées par les impacts climatiques, leur poids dans l'économie mondiale augmente (cet aspect n'est pas représenté au graphique 4.9), ce qui accentue encore l'augmentation de la part du secteur des services. Ainsi, la combinaison des dommages et de la politique d'atténuation entraîne une restructuration de l'économie vers plus de services. Toutefois, comme les politiques d'atténuation réduisent les dommages, les gains dans le secteur des services pourraient être plus faibles que lorsqu'on examine les politiques d'atténuation sans tenir compte des avantages de l'action publique.

L'effet relativement faible des dommages et de l'atténuation sur la structure globale de l'économie mondiale n'empêche pas des changements beaucoup plus profonds à l'échelle de chaque région ou de chaque secteur. À titre d'exemple, le scénario d'atténuation induit un changement dans la composition de la production énergétique des combustibles fossiles vers les énergies renouvelables. Ces changements restent toutefois mineurs comparativement à ceux intervenant dans la structure de l'économie d'ici à 2060 pour des raisons non liées au climat.

Notes

1. Sans oublier que les coûts et l'efficacité des politiques sont eux-mêmes également incertains.
2. La modélisation suppose implicitement une certaine amélioration de la lutte contre la pollution de l'air partout dans le monde dans la projection de référence sans dommages, ce qui a notamment un impact sur le calcul du forçage radiatif exogène dû aux agents de forçage à courte durée de vie.
3. Citons, à titre d'autre exemple, le modèle AD-WITCH, qui applique la méthodologie AD-DICE/AD-RICE au modèle WITCH (Agrawala et al., 2011).
4. Comme c'est habituellement le cas pour les modèles de prévision parfaite, la courbe augmente brusquement au départ, avec l'action publique menée pour neutraliser au mieux les futurs dommages. On le voit par exemple au graphique 4.1 : le stock d'adaptation s'accumule très vite en 2015, pour compenser son niveau de départ (fixe) sous-optimal.
5. Il faut cependant reconnaître que les modèles économiques ajustés, qui reposent sur le concept de réponses marginales aux chocs, ne permettent pas d'évaluer correctement l'état de l'économie dans des conditions aussi extrêmes.
6. On notera que le modèle AD-DICE ne prévoit pas le mécanisme selon lequel un effort d'atténuation précoce conduit à une baisse des coûts futurs par le biais de l'innovation induite. Bosetti et al. (2009) et Stern (2013), notamment, ont souligné l'influence de ce mécanisme et montré que les effets de l'innovation induite ont tendance à conduire à des niveaux plus élevés d'atténuation dans les premières périodes.
7. Comme les spécifications de l'adaptation et des dommages ne sont en fait pas identiques, même pour de faibles hausses de température, la spécification de Weitzman conduit même à des dommages quelque peu inférieurs à la fin du siècle. Ce résultat est dû au recalibrage de la fonction de dommage effectué pour qu'elle corresponde aux projections de dommages d'ENV-Linkages, lequel implique une action publique légèrement différente dans les deux spécifications, même pour de faibles hausses de température.
8. Comme l'arbitrage entre adaptation et atténuation dépend des effets intertemporels de chaque politique, des taux d'actualisation plus (ou moins) élevés donneront plus (ou moins) de poids à l'adaptation par rapport à l'atténuation dans le cas du dosage optimal.

Références

Agrawala, S. et al. (2011), « Plan or React? Analysis of adaptation costs and benefits using Integrated Assessment Models », *Climate Change Economics*, vol. 2, n° 3, pp. 175-208.

AIE (2015), *World Energy Outlook Special Report on Energy and Climate Change*, AIE, Paris.

Bollen, J. et C. Brink (2014), « Air pollution policy in Europe: Quantifying the interaction with greenhouse gases and climate change policies », *Energy Economics*, vol. 46, pp. 202-215.

Bosetti, V. et al. (2009), « Optimal energy investment and R&D strategies to stabilize atmospheric greenhouse gas concentrations », *Resource and Energy Economics*, vol. 31, pp. 123-137.

Braconier, H., G. Nicoletti et B. Westmore (2014), « Policy Challenges for the Next 50 Years », *Documents d'orientation du Département des affaires économiques de l'OCDE*, n° 9, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/5jz18gs5fckf-en*.

Commission mondiale sur l'économie et le climat (CMEC) (2014), *Better growth, better climate: The new climate economy report*, Washington, DC.

De Bruin, K.C. (2014), « Documentation and calibration of the AD-RICE 2012 model », *Document de travail du CERE*, n° 2014-3, Umeå.

De Bruin, K.C., R. Dellink et R.S.J. Tol (2009a), « AD-DICE: An implementation of adaptation in the DICE model », *Climatic Change*, vol. 95, pp. 63-81.

De Bruin, K.C., R. Dellink et S. Agrawala (2009b), « Economic Aspects of Adaptation to Climate Change: Integrated Assessment Modelling of Adaptation Costs and Benefits », *Documents de travail de l'OCDE sur l'environnement*, n° 6, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/225282538105*.

GIEC (2013), *Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques,* Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (dir. pub.)], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis, 1535 pp.

Gollier, C. (2007), « Comment intégrer le risque dans le calcul économique? », *Revue d'économie politique*, vol. 117, n° 2, pp. 209-223.

Nemet, G.F., T. Holloway et P. Meier (2010), « Implications of incorporating air-quality co-benefits into climate change policymaking », *Environmental Research Letters,* vol. 5, n° 1.

Nordhaus, W.D. (2012), « Integrated Economic and Climate Modeling », in: P. Dixon and D. Jorgenson (dir. pub.), *Handbook of Computable General Equilibrium Modeling,* Elsevier.

Nordhaus, W.D. (2011), *Estimates of the social cost of carbon: Background and results from the RICE-2011 model*, New Haven, Connecticut, Cowles Foundation for Research in Economics, Université Yale.

Nordhaus, W.D. (2007), *A question of balance*, Yale University Press, New Haven, États-Unis.

Nordhaus, W.D. (1994), *Managing the Global Commons: The Economics of the Greenhouse Effect,* MIT Press, Cambridge, MA.

OCDE (2015a), *Water Resources Allocation: Sharing Risks and Opportunities*, Études de l'OCDE sur l'eau, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/9789264229631-en*.

OCDE (2015b), « Projet de rapport de synthèse NAEC : Nouvelles approches face aux défis économiques », SG/NAEC(2015)1, Paris.

OCDE (2015c), *Climate Change Risks and Adaptation : Linking Policy and Economics*, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/9789264234611-en*.

OECD (2015d), *Aligning policies for the transition to a low-carbon economy*, OECD report, C(2015)50, Paris.

OCDE (2014), « Recommandation du Conseil sur la gouvernance des risques majeurs », C/MIN(2014)8, *www.oecd.org/fr/rcm/C-MIN(2014)8-FRE.pdf*.

OCDE (2013), *Water Security for Better Lives*, Études de l'OCDE sur l'eau, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/9789264202405-en*.

OCDE (2012), *Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2050 : Les conséquences de l'inaction*, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/env_outlook-2012-fr*.

OCDE (2011), *Future Global Shocks: Improving Risk Governance*, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/9789264114586-en*.

OCDE (2009), *Économie de la lutte contre le changement climatique : Politiques et options pour une action globale au-delà de 2012*, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/9789264073913-fr.*

PNUE (2014), *The Adaptation Gap Report 2014,* Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), Nairobi.

Ramsey, F.P. (1928), « A mathematical theory of savings », *The Economic Journal*, vol. 38, pp. 543-559.

Roson, R. et D. van der Mensbrugghe (2012), « Climate change and economic growth: impacts and interactions », *International Journal of Sustainable Economy*, vol. 4, pp. 270-285.

Stern, N. (2013), « The structure of economic modelling of the potential impacts of climate change: grafting gross underestimation of risk onto already narrow science models », *Journal of Economic Literature*, vol. 51, n° 3, pp. 838-859.

Stern, N. (2007), *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge et New York: Cambridge University Press.

UK Treasury (2003), *The Green Book: appraisal and evaluation in central government*, London.

Warszawski, L. et al. (2014), « The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): Project framework », *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, vol. 111, n° 9, pp. 3228-3232.

Weitzman, M.L. (2012), « GHG targets as insurance against catastrophic climate damages », *Journal of Public Economic Theory*, vol. 14, n° 2, pp. 221-244.

ANNEXE I

Description des outils de modélisation

Le cadre de modélisation économique : ENV-Linkages

Le modèle dynamique d'équilibre général calculable (EGC) établi par l'OCDE, ENV-Linkages, est l'instrument de base utilisé pour évaluer les conséquences économiques des impacts climatiques jusqu'en 2060. L'emploi d'un cadre EGC pour modéliser les impacts climatiques permet d'exploiter les informations sectorielles fournies par le modèle. En effet, contrairement aux modèles d'évaluation intégrée (MEI) agrégés dans lesquels les impacts monétisés sont soustraits du PIB, un cadre EGC modélise les différents types de dommages imputables au climat en les associant directement aux secteurs et activités économiques concernés.

ENV-Linkages est un modèle multisectoriel et multirégional qui établit un lien entre les activités économiques et les questions énergétiques et environnementales (pour une description, voir Chateau et al., 2014). Il est calibré pour la période 2013-60 avec les tendances macroéconomiques du scénario de référence des Perspectives économiques de l'OCDE (2014). Le modèle ENV-Linkages est le successeur du modèle GREEN de l'OCDE pour les études environnementales (Burniaux, et al. 1992).

Dans le modèle ENV-Linkages, on suppose que la production a lieu dans un contexte de minimisation des coûts, de marchés parfaits et de technologies à rendements d'échelle constants. On spécifie chaque technologie de production sous la forme d'une arborescence de fonctions de production à élasticité constante de substitution (ECS) emboîtées (voir le graphique A1.1). La structure de l'arborescence est analogue pour chaque production, mais le paramétrage des fonctions ECS peut différer selon les secteurs. Dans le cas des secteurs agricoles, l'emboîtement des fonctions de production comprend une étape de plus pour tenir compte de la substitution entre l'intensification (recours accru aux engrais, par exemple) et l'extensification (plus grande utilisation de la terre) de la production végétale, ou entre les productions animales intensive et extensive. Dans le cas de la production d'électricité, on suppose qu'un producteur représentatif maximise son profit en utilisant les différentes technologies de production disponibles et on modélise cette hypothèse par une spécification ECS associée à un degré élevé de substitution. Les technologies de production d'électricité avec d'autres sources que les combustibles fossiles ont une

Graphique A1.1. **Structure de production d'un secteur générique dans le modèle ENV-Linkages**



Note : Cette structure générique ne s'applique ni au secteur de l'énergie ni au secteur agricole.
Source : Modèle ENV-Linkages.

structure analogue à celle des autres secteurs, à ceci près que le niveau supérieur d'emboîtement associe, d'une part, une ressource propre à un secteur et, d'autre part, un sous-ensemble composé de tous les autres intrants. Cette spécification agit comme une contrainte de capacité sur la fourniture de ces technologies de production d'électricité.

Le modèle adopte une spécification de technologies *putty/semi-putty*, dans laquelle on suppose que les possibilités de substitution entre facteurs sont plus importantes avec le nouveau capital qu'avec l'ancien. À court terme, cela confère une inertie au système économique, avec peu de possibilités d'échapper aux intrants plus onéreux, mais à plus

longue échéance, cela implique un ajustement relativement lisse des quantités aux variations de prix. L'accumulation du capital est conforme au modèle de croissance néo-classique de Solow/Swan.

Le bloc énergie est particulièrement intéressant pour l'analyse des questions relatives au changement climatique. L'énergie est un composite des combustibles fossiles et de l'électricité. Les combustibles fossiles sont eux-mêmes un composite du charbon et du bloc « autres combustibles fossiles ». Au niveau d'emboîtement le plus bas, le composite « autres combustibles fossiles » comprend le pétrole brut, les produits pétroliers raffinés et le gaz naturel. On choisit une valeur des élasticités de substitution telle que le degré de substitution est plus élevé entre autres combustibles fossiles qu'avec l'électricité et le charbon.

La demande de consommation des ménages est le résultat d'un comportement de maximisation statique, formalisé par un « système linéaire de dépenses étendu ». Un consommateur représentatif de chaque région – qui considère les prix comme donnés – répartit de manière optimale son revenu disponible sur tout l'éventail des produits de consommation et d'épargne. L'épargne est considérée comme un bien ordinaire dans la fonction d'utilité et ne dépend donc pas de l'adoption d'un comportement prospectif par le consommateur. Dans chaque région, les administrations perçoivent différents types d'impôts pour financer les dépenses publiques. Dans l'hypothèse d'une épargne publique (ou d'un déficit public) fixe, le budget de l'État est équilibré par ajustement de l'impôt sur le revenu auquel les consommateurs sont assujettis. À chaque période, l'investissement, net de l'amortissement économique, est égal à la somme de l'épargne publique, de l'épargne des consommateurs et des flux nets de capitaux en provenance de l'étranger.

Les échanges internationaux se composent d'un ensemble de flux bilatéraux régionaux. Le modèle adopte la spécification d'Armington, en supposant que les produits nationaux et les produits importés ne sont pas parfaitement substituables. En outre, les produits importés de régions différentes sont aussi imparfaitement substituables. La répartition des échanges entre les partenaires est donc fonction des prix relatifs à l'équilibre.

L'équilibre du marché suppose que, d'une part, la production totale de tout bien ou service soit égale à la demande adressée aux producteurs locaux augmentée des exportations et que, d'autre part, la demande totale soit répartie entre les demandes (finale et intermédiaire) aux producteurs locaux et la demande d'importations.

Les émissions de dioxyde de carbone (CO_2) par combustion dépendent directement des différents combustibles utilisés dans la production. Les autres émissions de gaz à effet de serre sont liées à la production d'une manière semblable à celle décrite dans Hyman et al. (2002). Les sources suivantes d'émissions hors CO_2 sont prises en compte : i) émissions de méthane provenant de la culture du riz et de l'élevage (fermentation entérique et gestion des effluents) et émissions fugitives de méthane dues à l'extraction de charbon et de pétrole brut, au gaz naturel et aux services (décharges et eaux usées) ; ii) émissions d'hémioxyde d'azote provenant des cultures (engrais azotés), de l'élevage (gestion des effluents), des produits chimiques (procédés industriels sans combustion) et des services (décharges) ; et iii) émissions de gaz industriels (SF6, PFC et HFC) dues à l'industrie chimique (mousses, acide adipique, solvants) et à la production d'aluminium, de magnésium et de semi-conducteurs. Au fil du temps, toutefois, on constate un découplage relatif entre les émissions et l'activité économique sous-jacente grâce à des avancées techniques autonomes, ce qui implique que les émissions croissent moins vite que l'activité économique.

Il est possible de réduire les émissions de trois façons : i) en diminuant l'intensité des émissions dues à l'activité économique ; ii) en modifiant structurellement les secteurs concernés de manière à remplacer les intrants « sales » par des intrants plus propres ; et iii) en modifiant la structure économique afin de délaisser les secteurs à relativement forte intensité d'émissions au profit de secteurs plus propres. La première méthode, qui n'est pas applicable aux émissions dues à la combustion de combustibles fossiles, suppose des mesures de fin de cycle réduisant les émissions par unité de l'intrant considéré. La deuxième méthode consiste, par exemple, à substituer des énergies renouvelables aux combustibles fossiles dans la production d'électricité, ou à investir dans des machines plus économes en énergie (que l'on représente par une consommation de capital supérieure mais une consommation d'énergie inférieure dans la production). Enfin, la troisième méthode peut faire intervenir la substitution de services à la consommation de biens industriels gourmands en énergie. Dans le modèle, le choix entre ces trois méthodes est endogène et guidé par le prix des émissions.

Le modèle ENV-Linkages est totalement homogène du point de vue des prix, et seuls les prix relatifs comptent. Tous les prix sont exprimés relativement à l'unité de compte du système de prix arbitrairement choisi comme indice OCDE des prix à l'exportation pour les biens manufacturés. Chaque région dispose d'une balance des opérations courantes établie dans l'unité de compte. Dans le contexte de ce rapport, cette hypothèse a pour conséquence importante que les taux de change réels s'ajustent immédiatement pour compenser les éventuels effets sur la balance des opérations courantes lorsque les pays commencent à exporter ou à importer des permis d'émission.

Comme ENV-Linkages est un modèle récursif dynamique et n'intègre pas de comportement prospectif, il ne représente pas les variations des modes d'innovation induites par les prix. En revanche, il inclut le progrès technologique par le biais d'un ajustement annuel des différents paramètres de productivité, y compris, par exemple, l'amélioration autonome de l'efficacité énergétique et de la productivité du travail. En outre, vu que le choix des intrants est relativement plus flexible pour la production réalisée avec le nouveau capital, les technologies existantes peuvent se propager à d'autres entreprises. En conséquence, dans le cadre de modélisation EGC, les entreprises choisissent la combinaison d'intrants la moins coûteuse, compte tenu de l'état actuel de la technologie. La structure du capital ancien fait en sorte que cette flexibilité soit plus grande à long terme qu'à brève échéance.

Les tableaux A1.1 et A1.2 présentent les agrégats respectivement sectoriels et régionaux qui figurent dans la version du modèle utilisée pour ce rapport.

Le cadre de modélisation climatique : AD-DICE

Les résultats du modèle ENV-Linkages sont complétés par ceux de simulations stylisées effectuées avec le modèle AD-DICE, afin d'examiner les conséquences du changement climatique sur la croissance économique à plus long terme, c'est-à-dire au-delà de 2060[1].

Dans le modèle AD-DICE2013R, la production économique génère des émissions de GES, mais les émissions de CO_2 d'origine fossile sont les seules sources endogènes (comme on l'a vu au chapitre 2, le CO_2 est le gaz qui, de loin, contribue le plus au changement climatique). On pose comme hypothèse que la quantité d'émissions de CO_2 par unité de production diminue dans le temps sous l'effet du progrès technologique. Néanmoins, ces

Tableau A1.1. **Agrégats sectoriels du modèle ENV-Linkages**

Agriculture	Industries manufacturières
Riz paddy	Papier et produits en papier
Blé et méteil	Produits chimiques
Autres céréales	Minerais non métalliques
Légumes et fruits	Fer et acier
Canne à sucre et betterave sucrière	Métaux b.d.
Graines oléagineuses	Produits en métal fabriqués
Fibres végétales	Produits alimentaires
Autres cultures	Autres produits manufacturés
Élevage	Véhicules à moteur
Foresterie	Matériels électroniques
Pêche	Textiles
Ressources naturelles et énergie	Services
Charbon	Transports terrestres
Pétrole brut	Transports aériens, fluviaux et maritimes
Extraction et distribution de gaz	Bâtiment
Autres produits d'extraction	Commerce, autres services et logement
Produits du pétrole et du charbon	Autres services (administrations publiques)
Électricité (7 technologies)[1]	

1. Électricité produite au moyen de combustibles fossiles; électricité produite au moyen de combustibles renouvelables et de déchets; électricité nucléaire; électricité hydraulique et géothermique; électricité solaire et éolienne; électricité produite au moyen de charbon avec CSC; électricité produite au moyen de gaz avec CSC.

Source : Modèle ENV-Linkages.

Tableau A1.2. **Regroupements régionaux du modèle ENV-Linkages**

Grandes régions	Pays et régions inclus dans le modèle ENV-Linkages
OCDE Amérique	Canada Chili Mexique États-Unis
OCDE Europe	Quatre grands UE (Allemagne, France, Italie, Royaume-Uni) Autres UE OCDE (autres pays de l'UE membres de l'OCDE) Autres OCDE (Islande, Norvège, Suisse, Turquie, Israël)
OCDE Pacifique	Australie et Nouvelle-Zélande Corée Japon
Reste de l'Europe et de l'Asie	Chine UE non-OCDE (pays de l'UE non membres de l'OCDE) Russie Région caspienne Autre Europe (pays européens non membres de l'OCDE et non membres de l'UE)
Amérique latine	Brésil Autre Amérique latine (autres pays d'Amérique latine)
Moyen-Orient et Afrique du Nord	Moyen-Orient Afrique du Nord
Asie du Sud et du Sud-Est	ANASE 9 (autres pays de l'ANASE) Inde Indonésie Autre Asie (autres pays en développement d'Asie)
Afrique subsaharienne	Afrique du Sud Autre Afrique (autres pays d'Afrique)

Source : Modèle ENV-Linkages.

émissions de CO_2 accroissent le stock de CO_2 dans l'atmosphère, entraînant le changement climatique. Bien que ce dernier recouvre une multitude de phénomènes (modification des précipitations, changement de la variabilité météorologique, accroissement des

phénomènes météorologiques extrêmes, etc.), on le représente dans le modèle par des variations de la température atmosphérique. De manière générale, le changement climatique a différents impacts préjudiciables sur la société et sur l'économie. On modélise son impact sur le PIB sous la forme de la diminution en pourcentage de la production en fonction de la variation moyenne de la température atmosphérique par rapport à son niveau des années 1900. En investissant dans l'atténuation, on réduit les émissions de CO_2 par unité de production, moyennant un coût qui diminue au cours du temps sous l'effet du progrès technologique. En procédant à des ajustements économiques (c'est-à-dire, en investissant dans l'adaptation), toujours moyennant un coût, on réduit les dommages initiaux du changement climatique (dommages bruts) de sorte qu'il ne subsiste que des dommages résiduels.

Le modèle comprend une seule région représentant l'ensemble de la planète. On calibre le module économique et le module d'impact d'AD-DICE en agrégeant les spécifications régionales issues du modèle AD-RICE, qui divise le monde en 12 régions.

AD-DICE2013R est un modèle de croissance prédictif de type Ramsey, dans lequel l'utilité globale est maximisée (compte tenu des dotations) à l'horizon considéré. On l'applique à un horizon de 300 ans divisé en périodes de 5 ans. L'utilité est une fonction de la consommation par habitant qui diminue avec le temps et avec le revenu par habitant (la consommation des générations plus riches crée moins d'utilité que celle des générations plus pauvres). Le modèle trouve l'équilibre optimal entre les dépenses d'équipement, les investissements dans l'atténuation, les investissements dans l'adaptation, les coûts d'adaptation et la consommation pour maximiser l'utilité.

Par défaut, les estimations des dommages climatiques du modèle AD-DICE reproduisent les dommages nets du modèle DICE. Pour ce projet spécifique, on a calibré le modèle AD-DICE2013R pour qu'il corresponde au modèle DICE2013R puis on a recalibré les paramètres relatifs aux dommages et à l'adaptation de AD-DICE2013R pour qu'ils concordent avec l'évaluation des dommages d'ENV-Linkages. Le même sous-ensemble d'impacts climatiques est donc logiquement couvert. Le modèle AD-DICE utilise une fonction de dommage stylisée : on quantifie et on agrège les impacts de telle sorte que les hausses de température entraînent une baisse directe de la production, puis on soustrait directement les dommages du PIB. Une description plus détaillée des dommages ferait intervenir une fonction de production, avec les effets sur les intrants de la production et les effets directs de l'utilité. Les dommages causés par le changement climatique demeurent entachés d'un degré élevé d'incertitude, en particulier quand beaucoup d'impacts n'ont pas encore été recensés ou quantifiés. On peut considérer les dommages quantifiés dans ce modèle comme une limite inférieure aux dommages climatiques attendus, sachant que ces derniers pourraient être nettement plus élevés que ne l'indiquent les projections.

Le modèle AD-DICE inclut deux formes d'adaptation, à savoir l'adaptation anticipative et l'adaptation réactive. Cette distinction permet de décrire avec plus de précision les coûts et les avantages de différentes formes d'adaptation et, par conséquent, le total des coûts d'adaptation. L'adaptation réactive décrit des mesures d'adaptation qui peuvent être prises en réaction au changement climatique ou à des facteurs qui favorisent ce dernier. D'un coût relativement faible, elle est généralement le fait des particuliers. On peut citer, par exemple, l'emploi de climatiseurs ou le changement de la date de plantation des cultures. L'adaptation anticipative, en revanche, décrit des mesures d'adaptation qui exigent l'engagement d'investissements bien avant que les effets du changement climatique ne se

fassent sentir. Ce type d'adaptation exige généralement des investissements publics de grande envergure. On peut citer, à titre d'exemple, la recherche et le développement de nouveaux types de culture ou la construction d'un barrage pour l'irrigation.

Les dommages nets des modèles DICE2013R sont décomposés en coûts d'adaptation et dommages résiduels. Dans un premier temps, les dommages bruts (avant/sans adaptation) à la période *t* sont définis comme suit :

$$GD_t = \alpha_1 \cdot T_t + \alpha_2 \cdot T_t^{\alpha_3}$$

où α_1 et α_2 sont des paramètres de dommage positifs, α_3 est compris entre 1 et 4, et T représente l'augmentation de la température atmosphérique depuis 1900.

Les dommages bruts sont les dommages qui se produisent en l'absence de toute mesure d'adaptation. Ils sont par conséquent supérieurs aux dommages nets. Il est possible de les réduire en ayant recours à des mesures d'adaptation, ce que l'on exprime de la façon suivante :

$$RD_t = \frac{GD_t}{1 + P_t}$$

où P_t est le niveau total de protection (stock et flux) et RD_t représente les dommages résiduels. On choisit une telle fonction mathématique pour pouvoir exprimer le facteur de réduction des dommages bruts sous la forme d'un chiffre compris entre zéro et un. Lorsque le niveau total de protection est infini, tous les dommages bruts sont éliminés (les dommages résiduels sont égaux à zéro) ; inversement, lorsque le niveau total de protection est nul (aucune mesure de protection n'est prise), tous les dommages bruts demeurent (les dommages résiduels sont égaux aux dommages bruts). Cette fonction mathématique traduit aussi le fait que la baisse marginale des dommages décroît avec la protection : en d'autres termes, plus le niveau de protection augmente, moins un accroissement supplémentaire de ce niveau est efficace. Cela correspond à l'hypothèse qu'on applique d'abord les mesures d'adaptation les plus efficaces et efficientes, puis les mesures les moins efficaces.

L'adaptation totale est la résultante de deux formes d'adaptation (les stocks et les flux). On la modélise en combinant les stocks et les flux d'adaptation au moyen d'une fonction à élasticité constante de substitution qui peut être calibrée pour représenter la relation observée entre les deux formes d'adaptation :

$$P_t = \gamma \cdot (\nu_1 SAD_t^{\rho_A} + \nu_2 FAD_t^{\rho_A})^{\nu_3/\rho_A}$$

où SAD_t est le montant total du stock d'adaptation, FAD_t est le montant dépensé au titre des flux d'adaptation au cours de la période t, et $\rho_A = \frac{\sigma - 1}{\sigma}$, avec σ représentant l'élasticité de substitution.

Le stock d'adaptation est constitué comme suit :

$$SAD_{t+1} = (1 - \delta_k) SAD_t + IAD_t$$

où δ_k est le taux d'amortissement et IAD_t est le total des investissements dans les stocks d'adaptation ($SAD_{r,t}$).

Pour calibrer le module d'adaptation d'AD-DICE2013R, on utilise des estimations des coûts et des avantages de l'adaptation tirées d'études publiées sur les impacts. Plus précisément, on s'appuie sur les différentes estimations des impacts examinées par Tol (2009) pour évaluer l'importance relative de chaque catégorie d'impacts dans chaque région. Puis, pour chaque catégorie d'impacts, on se fonde sur les études d'impact

disponibles et sur l'appréciation d'experts pour estimer les coûts et les avantages de l'adaptation. Enfin, on cumule les coûts et avantages régionaux pour obtenir des valeurs mondiales. Ce processus est décrit en détail par de Bruin (2014).

Le changement climatique est un problème environnemental mondial, qui touche à présent toutes les régions du monde et qui continuera de les toucher au cours des prochains siècles. Ses causes (différentes sources d'émissions de GES) et ses effets sont innombrables et de nature, de portée et d'ampleur diverses. Chercher à intégrer toutes ces causes et tous ces effets dans un modèle unique est une tâche difficile. L'estimation des effets du changement climatique à long terme, en particulier, est un processus complexe, entaché de nombreuses incertitudes. Les modèles d'évaluation intégrée sont des outils créés pour évaluer les effets à long terme de l'économie sur le changement climatique, et réciproquement. Étant donné les nombreux mécanismes en jeu et l'échelle de temps considérée, ces modèles doivent retenir des hypothèses (simplificatrices). Les modèles d'évaluation intégrée sont donc des modèles descendants très agrégés, qui ne prennent pas en compte de manière détaillée tous les impacts sectoriels et régionaux. Bien que les hypothèses et simplifications soient nécessaires à cause, d'une part, du manque de données (il est difficile de prédire les effets qui se matérialiseront à l'avenir) et, d'autre part, des contraintes liées au calcul, elles constituent un inconvénient majeur des modèles d'évaluation intégrée. Cela dit, l'utilisation d'un modèle comme AD-DICE peut fournir d'importantes informations sur la nature et l'amplitude des évolutions de l'économie et du climat. Le changement climatique étant un problème d'ampleur mondiale dont les effets se feront le plus sentir à long terme, son analyse serait incomplète sans une perspective mondiale à long terme. Les modèles d'évaluation intégrée comme AD-DICE ont pour intérêt de fournir des éclairages sur les conséquences climatiques à long terme de nos actions présentes.

La spécification des *dommages de Weitzman* permet de réaliser une analyse de sensibilité des dommages posés en hypothèse dans le modèle. Weitzman (2012) propose une fonction de dommage qui augmente beaucoup plus vite avec la hausse des températures que la fonction de dommage du modèle DICE/AD-DICE. Pour une faible hausse de température, la fonction de Weitzman se comporte comme la fonction de dommage d'origine du modèle DICE/AD-DICE mais, quand la hausse de température est beaucoup plus importante, sa pente devient beaucoup plus raide[2]. La fonction de dommage de DICE suppose que les dommages nets en proportion du PIB ont une composante linéaire et une composante quadratique, représentées comme suit :

$$NHD_t = \alpha_{NH1} \cdot T_t + \alpha_{NH2} \cdot T_t^2$$

où $\alpha_{NH1}, \alpha_{NH2}$ sont les paramètres de dommage.

Au contraire, la fonction de dommage de Weitzman a la forme suivante :

$$WD_t = \left(\frac{T_t}{20.46}\right)^2 + \left(\frac{T_t}{6.08}\right)^{6.76}$$

La fonction de dommage de Weitzman utilisée dans le modèle AD-DICE est calibrée dans AD-DICE2013R pour reproduire le même niveau de dommages net que la fonction de dommage d'origine de Weitzman. Pour les dommages qui suivent la fonction de dommage de DICE, autrement dit à de faibles hausses de température, on suppose que les coûts et les avantages de l'adaptation respectent la spécification des dommages utilisée au départ dans AD-DICE. Au-delà de la fonction de dommage de DICE, tout dommage supplémentaire prévu par la fonction de Weitzman est supposé catastrophique (voir de Bruin (à paraître)

pour de plus amples informations). Comme on estime que le potentiel d'adaptation permettant de réduire les dommages catastrophiques est limité, l'adaptation joue un rôle beaucoup moins important avec la spécification des dommages de Weitzman qu'avec la spécification d'origine, en particulier à long terme. C'est pourquoi les deux spécifications produisent des résultats très proches à de faibles hausses de température, mais différents à des hausses de température plus fortes : la spécification de Weitzman prévoit alors des dommages beaucoup plus graves et des niveaux d'adaptation inférieurs.

Le calibrage du modèle AD-DICE2013R pour le projet CIRCLE se fait en plusieurs étapes. Tout d'abord, on crée une réplication AD-DICE2013R du modèle DICE2013R. Ensuite, on extrait du modèle ENV-Linkages les données socioéconomiques de référence et les projections des dommages jusqu'en 2060. On doit donc modifier les paramètres pour la croissance démographique, l'activité économique, le progrès technologique et les fonctions de dommage et d'adaptation. Les valeurs révisées des paramètres relatifs à l'adaptation tiennent compte de la composition sectorielle des dommages dans ENV-Linkages, c'est-à-dire qu'on a ajusté les coûts et l'efficacité de l'adaptation pour refléter la part des différents impacts dans ENV-Linkages. Enfin, la projection centrale inclut un certain nombre de choix non standard dans le modèle DICE d'origine : sensibilité climatique à l'équilibre égale à 3.0, taux d'actualisation fondés sur les règles du Trésor du Royaume-Uni et, ce qui est important, seulement les flux d'adaptation sont pris en compte.

La projection centrale obtenue avec AD-DICE2013R peut être mise en relation avec les projections des dommages du modèle DICE d'origine de la manière suivante :

	2060 %	2100 %
1. Projection centrale	**2.1**	**5.8**
2. 1 plus adaptation complète (au lieu des seuls flux d'adaptation)	1.8	4.6
3. 2 plus actualisation Nordhaus (au lieu du Trésor britanique)	1.8	4.6
4. 3 plus sensibilité climatique à l'équilibre égale à 2.9 (au lieu de 3.0)	1.7	4.4
5. 4 plus dommages DICE au lieu de ENV-Linkages jusqu'en 2060	1.6	4.3
6. 5 plus référence socioéconomique DICE (au lieu de CIRCLE)	1.5	4.0
7: DICE d'origine : 6 sans adaptation explicite	1.5	4.0

Comme le montre le tableau, la principale différence entre la projection centrale AD-DICE et la projection originale DICE tient au fait que, dans AD-DICE, tous les choix d'adaptation ne sont pas disponibles en l'absence de politiques (ce qu'on approxime en excluant les stocks d'adaptation). Les données socioéconomiques de référence, avec des émissions quelque peu supérieures, et la sensibilité climatique accrue de CIRCLE expliquent aussi cette différence : on obtient des hausses de température plus grandes donc des dommages plus importants. Les autres ajustements, notamment le recalibrage sur la base des niveaux de dommage d'ENV-Linkages, ont beaucoup moins d'impact sur les résultats.

Notes

1. Le modèle AD-DICE ne permet pas de calibrer les dommages causés par le changement climatique en suivant l'approche détaillée fondée sur une fonction de production présentée dans la section 1.3.
2. On notera que la fonction de dommage de Weitzman a été calibrée pour correspondre à la réplication DICE du modèle AD-DICE, mais n'a pas ensuite été recalibrée pour correspondre à la spécification CIRCLE.

Références

Burniaux, J-M., G. Nicoletti et J. Oliveira Martins (1992), « GREEN: A Global Model for Quantifying the Costs of Policies to Curb CO_2 Emissions », *Revue économique de l'OCDE*, n° 19 (hiver).

Château, J., R. Dellink et E. Lanzi (2014), « An Overview of the OECD ENV-Linkages Model: Version 3 », *Documents de travail de l'OCDE sur l'environnement*, n° 65, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/5jz2qck2b2vd-en*.

De Bruin, K.C. (2014), « Documentation and calibration of the AD-RICE 2012 model », *Document de travail du CERE*, n° 2014-3, Umeå.

GIEC (2007), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution du Groupe de travail I au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis, 996 p.

Hyman, R.C., J.M. Reilly, M.H. Babiker, A. De Masin et H.D. Jacoby (2002), « Modeling Non-CO_2 Greenhouse Gas Abatement », *Environmental Modeling and Assessment*, vol. 8, n° 3, pp. 175-86.

Nordhaus, W.D. (2007), *A question of balance*, Yale University Press, New Haven, États-Unis.

OCDE (2014), *Perspectives économiques de l'OCDE*, vol. 2014, n° 1, Éditions OCDE, Paris, *http://dx.doi.org/10.1787/eco_outlook-v2014-1-fr*.

Tol, R.S.J. (2009), « The Economic Effects of Climate Change », *Journal of Economic perspectives*, vol. 23, n° 2, pp. 29-51.

Weitzman, M.L. (2012), « GHG targets as insurance against catastrophic climate damages », *Journal of Public Economic Theory*, vol. 14, n° 2, pp. 221-244.

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

L'OCDE est un forum unique en son genre où les gouvernements œuvrent ensemble pour relever les défis économiques, sociaux et environnementaux que pose la mondialisation. L'OCDE est aussi à l'avant-garde des efforts entrepris pour comprendre les évolutions du monde actuel et les préoccupations qu'elles font naître. Elle aide les gouvernements à faire face à des situations nouvelles en examinant des thèmes tels que le gouvernement d'entreprise, l'économie de l'information et les défis posés par le vieillissement de la population. L'Organisation offre aux gouvernements un cadre leur permettant de comparer leurs expériences en matière de politiques, de chercher des réponses à des problèmes communs, d'identifier les bonnes pratiques et de travailler à la coordination des politiques nationales et internationales.

Les pays membres de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Chili, la Corée, le Danemark, l'Espagne, l'Estonie, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, Israël, l'Italie, le Japon, la Lettonie, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, la Nouvelle-Zélande, les Pays-Bas, la Pologne, le Portugal, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Slovénie, la Suède, la Suisse et la Turquie. L'Union européenne participe aux travaux de l'OCDE.

Les Éditions OCDE assurent une large diffusion aux travaux de l'Organisation. Ces derniers comprennent les résultats de l'activité de collecte de statistiques, les travaux de recherche menés sur des questions économiques, sociales et environnementales, ainsi que les conventions, les principes directeurs et les modèles développés par les pays membres.

ÉDITIONS OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16
(97 2016 10 2 P) ISBN 978-92-64-24863-2 – 2016

Les conséquences économiques du changement climatique

Sommaire

Résumé

Chapitre 1. Modélisation des conséquences économiques du changement climatique

Chapitre 2. Dommages du changement climatique imputables aux impacts considérés à l'horizon 2060

Chapitre 3. Vue d'ensemble du changement climatique

Chapitre 4. Avantages des politiques publiques

Annexe. Description des outils de modélisation

Veuillez consulter cet ouvrage en ligne : ***http://dx.doi.org/10.1787/9789264261082-fr***.

Cet ouvrage est publié sur OECD iLibrary, la bibliothèque en ligne de l'OCDE, qui regroupe tous les livres, périodiques et bases de données statistiques de l'Organisation.
Rendez-vous sur le site ***www.oecd-ilibrary.org*** pour plus d'informations.

éditionsOCDE
www.oecd.org/editions

ISBN 978-92-64-24863-2
97 2015 10 2 P

