

ÉTUDE DE DOSSIER

Adjoint de direction 2017
Concours externe et interne
réservés aux profils scientifiques

La COP 21 a illustré l'intérêt déjà affirmé des pouvoirs publics pour le réchauffement climatique, avec la mise en place de mesures diverses de régulation, de subventions et de taxes. Cependant, la réponse des acteurs financiers semble plus récente, avec des propositions d'outils financiers tels que les dérivés climatiques, la finance verte, le marché du carbone, ou les cat bonds émis notamment par les réassureurs, qui tendent à limiter les effets économiques liés aux conséquences du réchauffement.

À partir des documents ci-joints, vous répondrez aux questions suivantes :

1. Quels sont les risques économiques et financiers liés au réchauffement climatique ?
2. Quelle part de ces risques les assureurs peuvent-ils assumer ?
3. Quelle efficacité peut-on attendre des outils et des acteurs financiers pour couvrir ce risque ?
4. Quels sont les défis à relever pour les superviseurs et les pouvoirs publics ?

Les questions sont indépendantes ; nous vous recommandons toutefois de les traiter dans l'ordre. Il n'est pas nécessaire de recopier l'intitulé des questions.

LISTE DES DOCUMENTS JOINTS

1. **Come rain or shine**
www.economist.com – 4/02/2012 – 1 page
2. **Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse (extrait)**
www.ipcc.ch – 12 pages
3. **Finance carbone et développement - Vue d'ensemble**
www.banquemondiale.org – 29/03/2016 – 2 pages
4. **The impact of climate change on the UK insurance sector**
www.bankofengland.co.uk – September 2015 – 6 pages
5. **Weather derivatives' regulation: open issues and new opportunities for risk coverage products**
Paolo Rainell – www.aida.org.uk – 04/05/2012 – 3 pages
6. **Changement climatique et assurance** – Arthur Charpentier, Anne Eyraud-Loisel, Alexis Hannart, Julien Tomas – www.researchgate.net – 21/03/2016 – 4 pages
7. **Cadre international de lutte contre le changement climatique**
www.developpement-durable.gouv.fr – 07/12/2016 – 3 pages
8. **Effective institutions against climate change** – Christian Gollier and Jean Tirole
<http://fdir.idei.fr> – 06/04/2015 – 10 pages
9. **Régime catastrophe naturelle : les pistes de réformes des assureurs (FFA)** – Sébastien Acedo
www.argusdelassurance.com – 30/11/2016 – 2 pages
10. **Insurability of Climate Risks** – Arthur Charpentier
www.researchgate.net – January 2008 – 8 pages

Come rain or shine

The outlook for the business of hedging against the elements

Wearing lots of layers and a decent waterproof coat is one way to guard against changeable weather. Firms facing losses because of a big freeze or baking sun do not have that option. Insurance companies have long offered cover against flooding, hurricanes and other catastrophes. For less calamitous changes in the weather, derivatives are a better option.

This is still a “niche market”, says Tim Andriesen of CME Group, the exchange where most weather contracts are traded. According to the Weather Risk Management Association, an industry body, the value of trades in the year to March 2011 totalled \$11.8 billion, nearly 20% up on the previous year, though far below the peak reached before the financial crisis took the steam out of the business. In 2005-06 the value of contracts had hit \$45 billion.

Weather derivatives had an inauspicious start: the first trade was done by Enron in 1997. The instruments were initially used by American energy companies to hedge against the effect that unseasonal temperatures could have on gas sales. But abundant shale gas in the United States has rendered hedges against mild weather less important.

Energy companies are still the biggest users of these trades and contracts based on temperatures continue to be the most popular form of weather derivative. But Europe is now the largest market, according to Jürg Trüb of Swiss Re, a reinsurer. And demand for sophisticated and flexible over-the-counter products, which involve other variables such as rainfall, snow and sunshine and are tailored to meet customers' specific needs, are growing far more quickly than standardised, exchange-traded contracts.

The weather-derivatives industry hopes that farmers will pile in to purchase hedges against sun and rain that can affect the size of their harvest. Subsidised government-insurance schemes offer them some reassurance already, but derivatives can fill gaps or boost coverage. Big construction companies, with tight deadlines and costly penalty clauses, are also turning to derivatives. So too are retailers and companies that run big outdoor events beholden to the weather. Online providers such as CelsiusPro and eWeatherRisk offer small businesses simple and relatively cheap weather-risk coverage.

But widening the industry's appeal further may be tricky. In many instances the direct correlation between weather and revenues is not obvious. And collecting current and historical weather data to calculate risks is harder in Africa or India, both regarded as potentially big markets.

As they look to renewables, it may be that energy companies are the best bet for future growth as well as current revenues. There have been some big transactions with companies that generate hydropower, which requires consistent snow and rain. Products based on sunshine for the solar industry are now available. And some firms are offering contracts to limit the exposure of wind farms to either a lack of puff or gusts that are too strong for turbines. This is helping energy firms to raise cash to invest in pricey wind projects by guaranteeing long-term returns from unpredictable blasts of air. If so, an ill wind might now blow some good.

Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse

Résumé à l'intention des décideurs

Selon le Rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions (SRES, 2000), les émissions mondiales de GES (en équivalent-CO₂) augmenteront de 25 à 90 % entre 2000 et 2030 (figure RiD.5), les combustibles fossiles gardant une place prépondérante parmi les sources d'énergie jusqu'en 2030 et au-delà. On obtient des fourchettes comparables avec les scénarios plus récents qui ne prévoient pas de mesures additionnelles de réduction des émissions.^{8,9} {3.1}

La poursuite des émissions de GES au rythme actuel ou à un rythme plus élevé devrait accentuer le réchauffement et modifier profondément le système climatique au XXI^e siècle. Il est très probable que ces changements seront plus importants que ceux observés pendant le XX^e siècle (tableau RiD.1, figure RiD.5). {3.2.1}

Un réchauffement d'environ 0,2 °C par décennie au cours des vingt prochaines années est anticipé dans plusieurs scénarios d'émissions SRES. Même si les concentrations de l'ensemble des GES et des aérosols avaient été maintenues aux niveaux de 2000, l'élévation des températures se poursuivrait à raison de 0,1 °C environ par décennie. Les projections à plus longue échéance divergent de plus en plus selon le scénario utilisé. {3.2}

3. Les changements climatiques projetés et les effets attendus

Vu les politiques d'atténuation et les pratiques de développement durable déjà en place, les émissions mondiales de GES continueront d'augmenter au cours des prochaines décennies (*large concordance, degré élevé d'évidence*). {3.1}

Scénarios d'émissions de GES pour la période 2000–2100 (en l'absence de politiques climatiques additionnelles) et projections relatives aux températures en surface

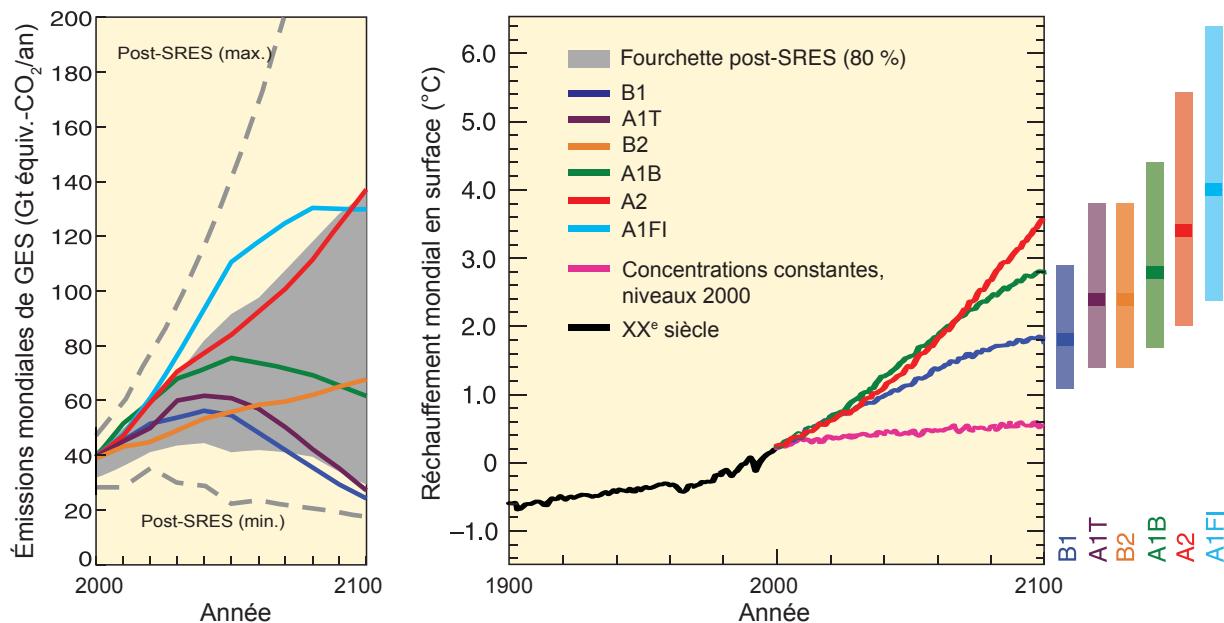


Figure RiD.5. À gauche : Émissions mondiales de GES (en Gt équiv.-CO₂) en l'absence de politiques climatiques : six scénarios illustratifs de référence (SRES, lignes colorées) et intervalle au 80^e percentile des scénarios publiés depuis le SRES (post-SRES, partie ombrée). Les lignes en pointillé délimitent la plage complète des scénarios post-SRES. Les GES sont le CO₂, le CH₄, le N₂O et les gaz fluorés. À droite : Les courbes en trait plein correspondent aux moyennes mondiales multimodèles du réchauffement en surface pour les scénarios A2, A1B et B1, en prolongement des simulations relatives au XX^e siècle. Ces projections intègrent les émissions de GES et d'aérosols de courte durée de vie. La courbe en rose ne correspond pas à un scénario mais aux simulations effectuées à l'aide de modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan (MCGAO) en maintenant les concentrations atmosphériques aux niveaux de 2000. Les barres sur la droite précisent la valeur la plus probable (zone foncée) et la fourchette probable correspondant aux six scénarios de référence du SRES pour la période 2090–2099. Tous les écarts de température sont calculés par rapport à 1980–1999. {Figures 3.1, 3.2}

⁸Les scénarios SRES sont décrits dans le point 3 du Rapport de synthèse (voir l'encadré intitulé « Scénarios SRES »). Seules les politiques climatiques déjà en place sont prises en considération dans ces scénarios ; des études plus récentes intègrent l'action menée au titre de la CCNUCC et du Protocole de Kyoto.

⁹La section 5 analyse les modes de réduction des émissions envisagés dans les scénarios d'atténuation.

Résumé à l'intention des décideurs

Tableau RiD.1 Projections des valeurs moyennes du réchauffement en surface et de l'élévation du niveau de la mer à la fin du XXI^e siècle, à l'échelle du globe. {Tableau 3.1}

Cas	Variation de température (°C, pour 2090–2099 par rapport à 1980–1999) ^{a, d}		Élévation du niveau de la mer (m, pour 2090–2099 par rapport à 1980–1999)
	Valeur la plus probable	Intervalle probable	
Concentrations constantes, niveaux 2000 ^b	0,6	0,3 – 0,9	Non disponible
Scénario B1	1,8	1,1 – 2,9	0,18 – 0,38
Scénario A1T	2,4	1,4 – 3,8	0,20 – 0,45
Scénario B2	2,4	1,4 – 3,8	0,20 – 0,43
Scénario A1B	2,8	1,7 – 4,4	0,21 – 0,48
Scénario A2	3,4	2,0 – 5,4	0,23 – 0,51
Scénario A1FI	4,0	2,4 – 6,4	0,26 – 0,59

Notes :

- a) Les valeurs les plus probables et les intervalles d'incertitude *probables* sont établis à partir d'une hiérarchie de modèles de complexité variable et compte tenu des contraintes d'observation.
- b) La composition constante en 2000 est déduite uniquement des modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan.
- c) Ces scénarios sont les six scénarios SRES de référence. Les concentrations approximatives (en équivalent-CO₂) correspondant au forçage radiatif calculé pour les GES et les aérosols anthropiques en 2100 (voir p. 823 de la contribution du Groupe de travail I au TRE) selon les scénarios SRES illustratifs de référence B1, A1T, B2, A1B, A2 et A1FI s'établissent respectivement à 600, 700, 800, 850, 1 250 et 1 550 ppm environ.
- d) La variation de température est calculée par rapport à 1980–1999. Il suffit d'ajouter 0,5 °C pour obtenir l'écart relativement à 1850–1899.

Les projections (tableau RiD.1) concordent globalement avec celles données dans le troisième Rapport d'évaluation. Toutefois, les incertitudes et les fourchettes supérieures de température sont plus grandes. Cela s'explique essentiellement par le fait que, selon l'éventail élargi des modèles maintenant disponibles, les rétroactions entre le climat et le cycle du carbone seraient plus fortes qu'on ne l'anticipait. Le réchauffement nuit à la fixation du CO₂ atmosphérique dans les terres et les océans, augmentant ainsi la partie des émissions anthropiques qui reste dans l'atmosphère. L'ampleur de cet effet de rétroaction varie considérablement d'un modèle à l'autre. {3.2.3, 3.2.1}

On ne comprend pas assez bien certains effets importants régissant l'élévation du niveau de la mer pour que, dans le présent rapport, on ait pu estimer la probabilité de ce phénomène ou en donner la valeur la plus probable ou la limite supérieure. Le tableau RiD.1 présente les projections de l'élévation moyenne du niveau de la mer pour la période 2090–2099.¹⁰ Les projections ne tenant compte ni des incertitudes liées aux rétroactions entre le climat et le cycle du carbone, ni des effets complets de l'évolution de l'écoulement dans les nappes glaciaires, les valeurs supérieures des fourchettes ne doivent pas être considérées comme les limites supérieures de l'élévation du niveau de la mer. Si l'on a tenu compte de l'accroissement de l'écoulement glaciaire au Groenland et en Antarctique aux rythmes observés entre 1993 et 2003, le phénomène pourrait cependant s'accélérer ou ralentir.¹¹ {3.2.1}

Un degré de confiance plus élevé que dans le troisième Rapport d'évaluation est associé aux projections concernant les configurations du réchauffement et d'autres particularités de portée régionale, dont la modification des régimes du

vent, des précipitations et de certains aspects des phénomènes extrêmes et des glaces de mer. {3.2.2}

Parmi les changements anticipés à l'échelle régionale figurent : {3.2.2}

- un réchauffement maximal sur les terres émergées et dans la plupart des régions des hautes latitudes de l'hémisphère Nord et un réchauffement minimal au-dessus de l'océan Austral et d'une partie de l'Atlantique Nord (figure RiD.6), dans la droite ligne des tendances relevées dernièrement ;
- une contraction de la couverture neigeuse, une augmentation d'épaisseur de la couche de dégel dans la plupart des régions à pergélisol et une diminution de l'étendue des glaces de mer ; selon certaines projections obtenues avec les scénarios SRES, les eaux de l'Arctique seraient pratiquement libres de glace à la fin de l'été d'ici la deuxième moitié du XXI^e siècle ;
- une hausse *très probable* de la fréquence des températures extrêmement élevées, des vagues de chaleur et des épisodes de fortes précipitations ;
- une augmentation *probable* d'intensité des cyclones tropicaux et, avec un degré de confiance moindre, une baisse du nombre de cyclones tropicaux sur l'ensemble de la planète ;
- le déplacement vers les pôles de la trajectoire des tempêtes extratropicales, accompagné de changements dans la configuration des vents, des précipitations et des températures ;
- une augmentation *très probable* des précipitations aux latitudes élevées et, au contraire, une diminution *probable* sur la plupart des terres émergées subtropicales, conformément aux tendances relevées récemment.

¹⁰ Les projections données dans le TRE allaient jusqu'en 2100, tandis que celles du présent rapport portent sur la période 2090–2099. Les fourchettes du TRE auraient été les mêmes que celles du tableau RiD.1 si les incertitudes avaient été traitées de la même manière.

¹¹ Les tendances à long terme sont analysées plus loin.

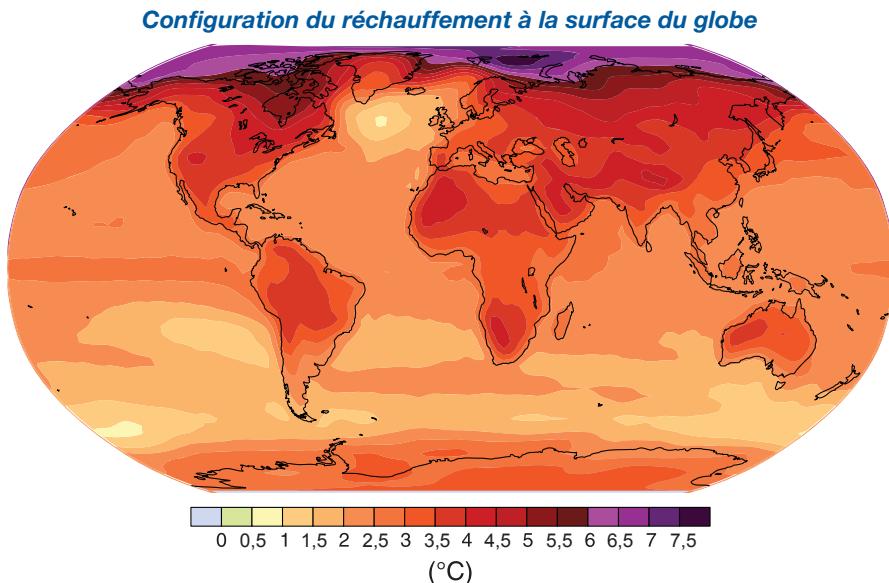


Figure RiD.6 Évolution projetée de la température en surface pour la fin du XXI^e siècle (2090-2099) par rapport à la période 1980-1999, selon les projections moyennes obtenues avec plusieurs modèles de la circulation générale atmosphère-océan pour le scénario A1B du SRES. {Figure 3.2}

On estime avec un *degré de confiance élevé* que, d'ici le milieu du siècle, le débit annuel moyen des cours d'eau et la disponibilité des ressources en eau augmenteront aux hautes latitudes (et dans certaines régions tropicales humides) et diminueront dans certaines régions sèches des latitudes moyennes et des tropiques. Bon nombre de zones semi-arides (bassin méditerranéen, ouest des États-Unis, Afrique australe, nord-est du Brésil, etc.) souffriront d'une baisse des ressources en eau imputable aux changements climatiques (*degré de confiance élevé*). {3.3.1, figure 3.5}

Les études postérieures au TRE permettent de mieux comprendre la chronologie et l'étendue des incidences selon l'ampleur et le rythme des changements climatiques. {3.3.1, 3.3.2}

La figure RiD.7 présente des exemples de cette évolution pour un certain nombre de systèmes et de secteurs. Dans la partie supérieure sont indiquées des incidences qui s'accentuent parallèlement à la hausse des températures. Leur chronologie et leur ampleur estimées dépendent aussi des modes de développement (partie inférieure). {3.3.1}

Le tableau RiD.2 présente quelques incidences anticipées pour différentes régions.

Il est *probable* que certains systèmes, secteurs et régions seront plus durement touchés que d'autres par l'évolution du climat.¹² {3.3.3}

Systèmes et secteurs : {3.3.3}

- Écosystèmes :
 - terrestres : toundra, forêt boréale et régions montagneuses, en raison de leur sensibilité au réchauffement ; écosystèmes de type méditerranéen, à cause de la diminution des

précipitations ; forêts pluviales tropicales, dans les zones où la pluviosité diminue ;

- côtiers : mangroves et marais salants soumis à de multiples contraintes ;
- marins : récifs coralliens soumis à de multiples contraintes ; biome des glaces de mer, en raison de sa sensibilité au réchauffement ;
- Ressources en eau dans certaines régions sèches des latitudes moyennes¹³ et dans les zones tropicales sèches, à cause de la modification de la pluviosité et de l'évapotranspiration, ainsi que dans les zones tributaires de la fonte de la neige et de la glace ;
- Agriculture aux basses latitudes, sous l'effet de la raréfaction des ressources en eau ;
- Basses terres littorales, par suite de la menace d'une élévation du niveau de la mer et du risque accru de phénomènes météorologiques extrêmes ;
- État sanitaire des populations disposant d'une faible capacité d'adaptation.

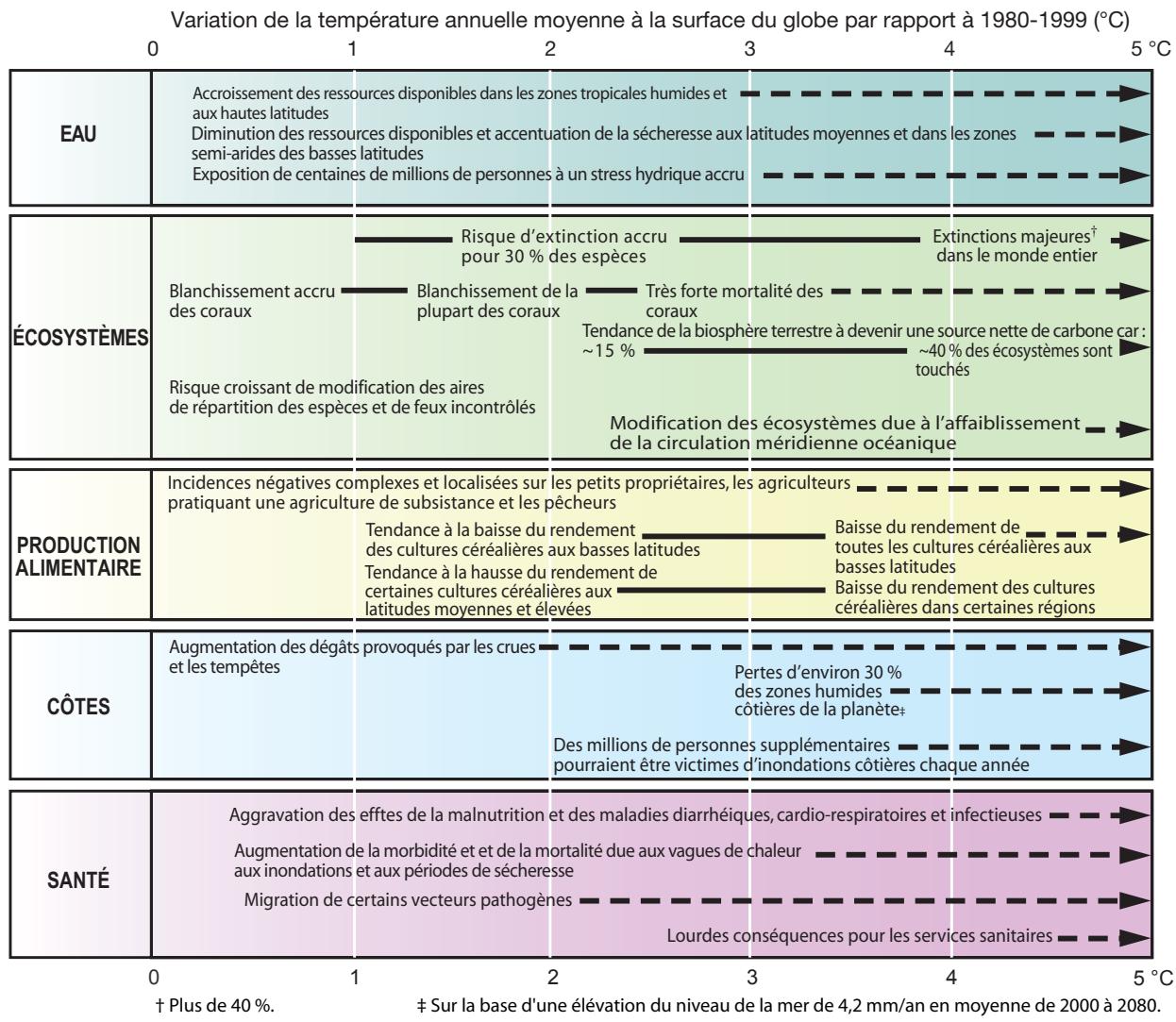
Régions : {3.3.3}

- Arctique, à cause de la vitesse du réchauffement et de ses incidences sur les systèmes naturels et les collectivités humaines ;
- Afrique, vu la faible capacité d'adaptation et les effets projetés ;
- Petites îles, en raison de la forte exposition de la population et de l'infrastructure aux effets projetés ;
- Grands deltas asiatiques et africains, étant donné la densité de population et la forte exposition à l'élévation du niveau de la mer, aux ondes de tempête et aux inondations fluviales.

¹²Selon les avis qualifiés formulés relativement aux textes consultés et compte dûment tenu de l'ampleur, du moment et du rythme des changements climatiques, de la sensibilité du climat et de la capacité d'adaptation.

¹³Zones arides et semi-arides comprises.

**Exemples d'incidences associées à la variation de la température moyenne à la surface du globe
(ces incidences varieront selon le degré d'adaptation, le rythme du réchauffement et le mode de développement socio-économique)**



Réchauffement en 2090–2099 par rapport à 1980–1999 pour des scénarios sans mesures d'atténuation

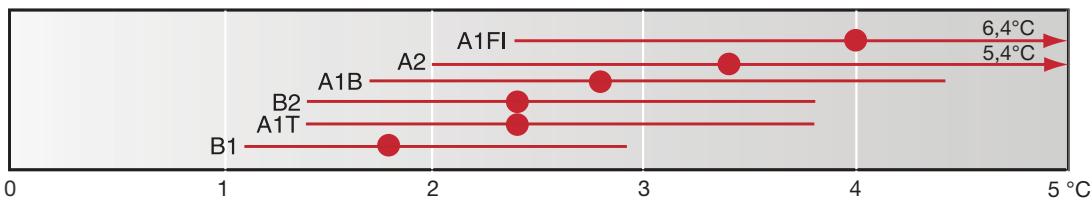


Figure RiD.7. Exemples d'incidences associées à l'élévation de la température moyenne à la surface du globe. **En haut :** Exemples d'incidences planétaires anticipées des changements climatiques (et, le cas échéant, de l'élévation du niveau de la mer et de l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère) selon l'ampleur de la hausse de la température moyenne à la surface du globe au XXI^e siècle. Les traits noirs relient les diverses incidences entre elles, les flèches en pointillé indiquent que ces incidences se poursuivent avec le réchauffement. La disposition du texte permet de voir approximativement à quel niveau de réchauffement s'amorce l'effet mentionné. Les chiffres relatifs à la pénurie d'eau et aux inondations représentent les répercussions supplémentaires des changements climatiques relativement aux conditions projetées selon les scénarios A1FI, A2, B1 et B2 du SRES. Ces estimations ne tiennent pas compte de l'adaptation aux changements climatiques. Toutes ces incidences sont affectées d'un degré de confiance élevé. **En bas :** Les points et les traits représentent les valeurs les plus probables et les fourchettes probables du réchauffement en 2090–2099 par rapport à 1980–1999, pour les six scénarios SRES de référence. {Figure 3.6}

Tableau RiD.2. Exemples d'incidences régionales anticipées. {3.3.2}

Afrique	<ul style="list-style-type: none"> D'ici 2020, 75 à 250 millions de personnes devraient souffrir d'un stress hydrique accentué par les changements climatiques. Dans certains pays, le rendement de l'agriculture pluviale pourrait chuter de 50 % d'ici 2020. On anticipe que la production agricole et l'accès à la nourriture seront durement touchés dans de nombreux pays, avec de lourdes conséquences en matière de sécurité alimentaire et de malnutrition. Vers la fin du XXI^e siècle, l'élévation anticipée du niveau de la mer affectera les basses terres littorales fortement peuplées. Le coût de l'adaptation pourrait représenter 5 à 10 % du produit intérieur brut, voire plus. Selon plusieurs scénarios climatiques, la superficie des terres arides et semi-arides pourrait augmenter de 5 à 8 % d'ici à 2080 (RT).
Asie	<ul style="list-style-type: none"> Les quantités d'eau douce disponibles devraient diminuer d'ici les années 2050 dans le centre, le sud, l'est et le sud-est de l'Asie, en particulier dans les grands bassins fluviaux. Les zones côtières, surtout les régions très peuplées des grands deltas de l'Asie du Sud, de l'Est et du Sud-Est, seront exposées à des risques accrus d'inondation marine et, dans certains grands deltas, d'inondation fluviale. Les changements climatiques devraient amplifier les pressions que l'urbanisation rapide, l'industrialisation et le développement économique exercent sur les ressources naturelles et l'environnement. Les modifications du cycle hydrologique devraient entraîner, dans l'est, le sud et le sud-est de l'Asie, une hausse de la morbidité et de la mortalité endémiques dues aux maladies diarrhéiques qui accompagnent les crues et la sécheresse.
Australie et Nouvelle-Zélande	<ul style="list-style-type: none"> Certains sites d'une grande richesse écologique, dont la Grande Barrière de corail et les « Wet Tropics » (tropiques humides) du Queensland, devraient subir une perte importante de biodiversité d'ici 2020. D'ici 2030, les problèmes d'approvisionnement en eau devraient s'intensifier dans l'est et le sud de l'Australie ainsi que dans le Northland et certaines régions orientales de la Nouvelle-Zélande. D'ici 2030, la production agricole et forestière devrait décroître dans une bonne partie du sud et de l'est de l'Australie ainsi que dans plusieurs régions orientales de la Nouvelle-Zélande, en raison de l'accentuation de la sécheresse et de la fréquence accrue des incendies. Au début toutefois, les changements climatiques devraient se révéler bénéfiques dans d'autres secteurs de la Nouvelle-Zélande. D'ici 2050, dans certaines régions de l'Australie et de la Nouvelle-Zélande, l'aménagement progressif du littoral et la croissance démographique devraient accroître les risques liés à l'élévation du niveau de la mer et à l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des tempêtes et des inondations côtières.
Europe	<ul style="list-style-type: none"> On s'attend que les changements climatiques amplifient les disparités régionales en matière de ressources naturelles et de moyens économiques. Au nombre des incidences négatives figurent un risque croissant d'inondations éclair à l'intérieur des terres, une plus grande fréquence des inondations côtières et une érosion accrue (attribuable aux tempêtes et à l'élévation du niveau de la mer). Les régions montagneuses devront faire face au recul des glaciers, à la réduction de la couverture neigeuse et du tourisme hivernal ainsi qu'à la disparition de nombreuses espèces (jusqu'à 60 % d'ici 2080 dans certaines régions, selon les scénarios de fortes émissions). Dans le sud de l'Europe, région déjà vulnérable à la variabilité du climat, les changements climatiques devraient aggraver la situation (températures élevées et sécheresse) et nuire à l'approvisionnement en eau, au potentiel hydroélectrique, au tourisme estival et, en général, aux rendements agricoles. Les risques sanitaires liés aux vagues de chaleur et à la fréquence accrue des incendies devraient être amplifiés par les changements climatiques.
Amérique latine	<ul style="list-style-type: none"> D'ici le milieu du siècle, les forêts tropicales devraient être progressivement remplacées par la savane dans l'est de l'Amazonie sous l'effet de la hausse des températures et du dessèchement des sols. La végétation de type semi-aride aura tendance à laisser place à une végétation de type aride. La disparition de certaines espèces risque d'appauvrir énormément la diversité biologique dans de nombreuses régions tropicales de l'Amérique latine. Le rendement de certaines cultures importantes et de l'élevage du bétail devrait diminuer, au détriment de la sécurité alimentaire. On anticipe en revanche une augmentation du rendement des cultures de soja dans les zones tempérées. D'un point de vue général, on anticipe une augmentation du nombre de personnes exposées à la famine (RT ; degré de confiance moyen). La modification des régimes de précipitations et la disparition des glaciers devraient réduire considérablement les ressources en eau disponibles pour la consommation humaine, l'agriculture et la production d'énergie.
Amérique du Nord	<ul style="list-style-type: none"> Selon les projections, le réchauffement du climat dans les régions montagneuses de l'ouest du continent diminuera l'enneigement, augmentera la fréquence des inondations hivernales et réduira les débits estivaux, avitant la concurrence pour des ressources en eau déjà surexploitées. L'évolution modérée du climat au cours des premières décennies du siècle devrait accroître de 5 à 20 % le rendement des cultures pluviales, mais avec de nets écarts d'une région à l'autre. De graves difficultés risquent de surgir dans le cas des cultures déjà exposées à des températures proches de la limite supérieure de leur plage de tolérance ou qui dépendent de ressources en eau déjà fortement utilisées. Au cours du siècle, les villes qui subissent actuellement des vagues de chaleur devraient faire face à une hausse du nombre, de l'intensité et de la durée de ces phénomènes, ce qui pourrait avoir des incidences défavorables pour la santé. Dans les régions côtières, les établissements humains et les habitats naturels subiront des pressions accrues découlant de l'interaction des effets du changement climatique avec le développement et la pollution.

Table SPM.2. suite...

Régions polaires	<ul style="list-style-type: none"> Les principales répercussions biophysiques attendues sont la réduction de l'épaisseur et de l'étendue des glaciers, des nappes glaciaires et des glaces de mer ainsi que la modification des écosystèmes naturels au détriment de nombreux organismes, dont les oiseaux migrateurs, les mammifères et les grands prédateurs. Pour les communautés de l'Arctique, les effets devraient être mitigés, notamment ceux qui résulteront de l'évolution de l'état de la neige et de la glace. Les éléments d'infrastructure et les modes de vie traditionnels des populations autochtones seront touchés. On estime que les écosystèmes et les habitats propres aux régions polaires de l'Arctique et de l'Antarctique seront fragilisés, du fait de l'atténuation des obstacles climatiques à l'invasion de nouvelles espèces.
Petites îles	<ul style="list-style-type: none"> Selon les prévisions, l'élévation du niveau de la mer devrait intensifier les inondations, les ondes de tempête, l'érosion et d'autres phénomènes côtiers dangereux, menaçant l'infrastructure, les établissements humains et les installations vitales pour les populations insulaires. La détérioration de l'état des zones côtières, par exemple l'érosion des plages et le blanchissement des coraux, devrait porter atteinte aux ressources locales. D'ici le milieu du siècle, les changements climatiques devraient réduire les ressources en eau dans de nombreuses petites îles, par exemple dans les Caraïbes et le Pacifique, à tel point que la demande ne pourra plus être satisfaite pendant les périodes de faible pluviosité. La hausse des températures devrait favoriser l'invasion d'espèces exotiques, notamment aux moyennes et hautes latitudes.

Note :

Sauf indication contraire, ces projections sont extraites du Résumé à l'intention des décideurs préparé par le Groupe de travail II. Elles bénéficient d'un *degré de confiance élevé ou très élevé* et concernent les secteurs susceptibles d'être touchés, soit l'agriculture, les écosystèmes, les ressources en eau, les côtes, la santé, l'industrie et les établissements humains. Le Résumé à l'intention des décideurs du Groupe de travail II précise la source des énoncés, les calendriers estimés et les températures escomptées. La gravité des impacts et le moment où ils surviendront dépendent de l'ampleur et du rythme de l'évolution du climat, des scénarios d'émissions, des modes de développement et des stratégies d'adaptation.

Dans les autres régions du globe, même prospères, des segments particuliers de la population (par exemple les pauvres, les jeunes enfants ou les personnes âgées), tout comme certaines zones et activités, risquent d'être gravement menacés. {3.3.3}

Acidification des océans

La fixation du carbone anthropique émis depuis 1750 a abaissé le pH des océans de 0,1 unité en moyenne. La hausse de la concentration atmosphérique de CO₂ a accentué encore l'acidité du milieu marin. Selon les projections fondées sur les scénarios SRES, le pH moyen des océans en surface devrait baisser de 0,14 à 0,35 unité au cours du XXI^e siècle. Les effets sur la biosphère marine ne sont pas connus à ce jour, mais on pense que le phénomène aura une incidence néfaste sur les testacés et crustacés marins (les coraux, par exemple) et sur les espèces qui en sont tributaires. {3.3.4}

Le changement de fréquence et d'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes, conjugué à l'élévation du niveau de la mer, devrait avoir surtout des effets néfastes sur les systèmes naturels et humains. {3.3.5}

Un certain nombre de phénomènes extrêmes et leurs incidences sur différents secteurs sont décrits dans le tableau RiD.3.

Même si les concentrations de gaz à effet de serre étaient stabilisées, le réchauffement anthropique et l'élévation du niveau de la mer se poursuivraient pendant des siècles en raison des échelles de temps propres aux processus et aux rétroactions climatiques. {3.2.3}

La figure RiD.8 présente les valeurs estimées du réchauffement à long terme (sur plusieurs siècles) correspondant aux six catégories de scénarios de stabilisation élaborés par le Groupe de travail III pour le quatrième Rapport d'évaluation.

Estimation du réchauffement sur plusieurs siècles, par rapport à 1980–1999, selon les catégories de scénarios de stabilisation du quatrième Rapport d'évaluation

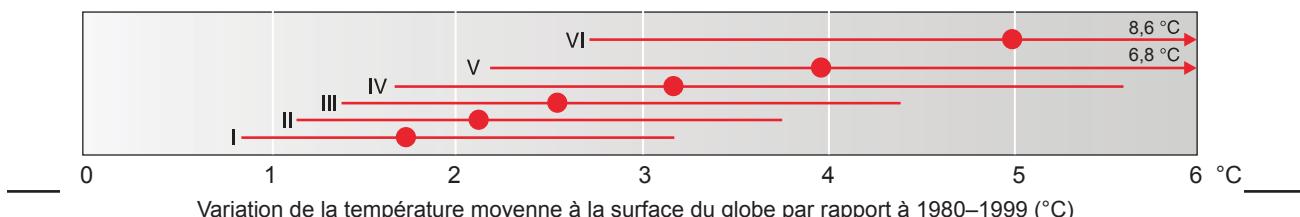


Figure RiD.8. Valeurs estimées du réchauffement à long terme (sur plusieurs siècles) correspondant aux six catégories de scénarios de stabilisation élaborés par le Groupe de travail III pour le quatrième Rapport d'évaluation (tableau RiD.6). L'échelle des températures a été décalée de -0,5 °C par rapport au tableau RiD.6, afin de tenir compte du réchauffement intervenu entre l'époque préindustrielle et 1980-1999. La température moyenne à la surface du globe approche de l'équilibre au bout de quelques siècles pour la plupart des niveaux de stabilisation. Selon les scénarios d'émissions de GES qui entraînent, d'ici à 2100, une stabilisation à des niveaux comparables à ceux des scénarios B1 et A1B du SRES (600 et 850 ppm équiv.-CO₂, catégories IV et V), les modèles indiquent que la hausse de la température mondiale à l'équilibre serait réalisée dans une proportion de 65 à 70 % environ au moment de la stabilisation, en fixant la sensibilité du climat à 3 °C. La température à l'équilibre pourrait être atteinte plus tôt avec les scénarios de stabilisation à des niveaux nettement inférieurs (catégories I et II, figure RiD.11). {Figure 3.4}

Tableau RiD.3. Exemples d'incidences possibles des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes associés aux changements climatiques, selon les projections visant la deuxième moitié du XXI^e siècle. L'évolution de la capacité d'adaptation n'est pas prise en compte. Les probabilités indiquées dans la deuxième colonne concernent les phénomènes recensés dans la première colonne. {Tableau 3.2}

Phénomène ^a et évolution anticipée	Probabilité de l'évolution future selon les projections établies pour le XXI ^e siècle sur la base des scénarios SRES	Principales incidences anticipées par secteur			
		Agriculture, foresterie et écosystèmes	Ressources en eau	Santé	Industrie, établissements humains et société
Journées et nuits froides moins nombreuses et moins froides, journées et nuits chaudes plus nombreuses et plus chaudes, sur la plupart des terres émergées	Pratiquement certain ^b	Hausse des rendements dans les régions froides ; baisse dans les régions chaudes ; invasions d'insectes plus fréquentes	Effets sur les ressources en eau tributaires de la fonte des neiges ; effets sur certaines sources d'approvisionnement	Baisse de la mortalité humaine due au froid	Baisse de la demande énergétique pour le chauffage, hausse pour la climatisation ; détérioration de la qualité de l'air urbain ; perturbations moins fréquentes des transports (pour cause de neige, verglas) ; effets sur le tourisme hivernal
Périodes ou vagues de chaleur plus fréquentes sur la plupart des terres émergées	Très probable	Baisse des rendements dans les régions chaudes en raison du stress thermique ; risque accru d'incendies	Hausse de la demande ; problèmes liés à la qualité de l'eau (prolifération d'algues, p. ex.)	Risque accru de mortalité due à la chaleur, surtout chez les personnes âgées, les malades chroniques, les très jeunes enfants et les personnes isolées	Baisse de la qualité de vie des personnes mal logées dans les régions chaudes ; effets sur les personnes âgées, les très jeunes enfants et les pauvres
Fortes précipitations plus fréquentes dans la plupart des régions	Très probable	Perte de récoltes ; érosion des sols ; impossibilité de cultiver les terres détrempées	Effets néfastes sur la qualité de l'eau de surface et souterraine ; contamination des sources d'approvisionnement ; atténuation possible de la pénurie d'eau	Risque accru de décès, de blessures, de maladies infectieuses, d'affections des voies respiratoires et de maladies de la peau	Perturbation des établissements humains, du commerce, des transports et de l'organisation sociale lors des inondations ; pressions sur l'infrastructure urbaine et rurale ; pertes matérielles
Progression de la sécheresse	Probable	Dégénération des sols ; baisse des rendements ou perte de récoltes ; mortalité plus fréquente du bétail ; risque accru d'incendies	Intensification du stress hydrique	Risque accru de pénurie d'aliments et d'eau, de malnutrition, de maladies d'origine hydrique et alimentaire	Pénurie d'eau pour les établissements humains, l'industrie et les sociétés ; baisse du potentiel hydroélectrique ; possibilité de migration des populations
Augmentation de l'activité cyclonique intense	Probable	Perte de récoltes ; déracinage d'arbres par le vent ; dégâts causés aux récifs coralliens	Perturbation de l'approvisionnement en eau lors des pannes de courant	Risque accru de décès, de blessures et de maladies d'origine hydrique et alimentaire ; états de stress post-traumatique	Perturbations causées par les inondations et les vents violents ; impossibilité de s'assurer auprès du secteur privé dans les zones vulnérables ; possibilité de migration des populations ; pertes matérielles
Incidence accrue des épisodes d'élévation extrême du niveau de la mer (à l'exception des tsunamis) ^c	Probable ^d	Salinisation des eaux d'irrigation, des estuaires et des systèmes d'eau douce	Diminution de la quantité d'eau douce disponible en raison de l'intrusion d'eau salée	Risque accru de décès et de blessures lors des inondations ; effets sanitaires liés à la migration	Coût de la protection du littoral par rapport au coût de la réévacuation des terres ; possibilité de déplacement des populations et de l'infrastructure ; voir aussi l'activité cyclonique (ci-dessus)

Notes :

- a) Les définitions exactes sont données dans le tableau 3.7 du Groupe de travail I.
- b) Élévation des valeurs extrêmes des températures diurnes et nocturnes relevées chaque année.
- c) L'élévation extrême du niveau de la mer dépend du niveau moyen de la mer et des systèmes météorologiques régionaux. Elle correspond à la tranche supérieure (1 %) des valeurs horaires relevées à une station donnée pendant une période de référence.
- d) Dans tous les scénarios, le niveau moyen de la mer en 2100 est supérieur à celui de la période de référence. Les effets de l'évolution des systèmes météorologiques régionaux sur les épisodes d'élévation extrême du niveau de la mer ne sont pas pris en compte.

L'inlandsis groenlandais devrait continuer de se rétracter et de contribuer à l'élévation du niveau de la mer après 2100. Selon les modèles actuels, si le réchauffement moyen à l'échelle du globe se maintenait pendant des millénaires au-delà de 1,9 à 4,6 °C par rapport à l'époque préindustrielle, la nappe glaciaire pourrait disparaître presque complètement et éléver le niveau de la mer de quelque 7 mètres. Les températures projetées pour le Groenland sont comparables à celles de la dernière période interglaciaire, il y a 125 000 ans ; à cette époque, selon les données paléoclimatiques

disponibles, l'étendue des glaces polaires terrestres avait diminué et le niveau de la mer s'était élevé de 4 à 6 mètres. {3.2.3}

Les études actuelles réalisées avec des modèles globaux prévoient que la nappe glaciaire antarctique restera trop froide pour fondre de manière importante en surface et que sa masse augmentera en raison de chutes de neige plus abondantes. Cependant, une perte nette pourrait se produire si le déversement de glace dynamique l'emportait dans le bilan de masse. {3.2.3}

Le réchauffement anthropique pourrait avoir des conséquences brusques ou irréversibles selon l'ampleur et le rythme de l'évolution du climat. (3.4)

L'ablation d'une partie des nappes glaciaires qui recouvrent les zones polaires pourrait faire monter de plusieurs mètres le niveau de la mer, modifier profondément la topographie des côtes et provoquer l'inondation des basses terres. Les effets seraient particulièrement marqués dans les deltas et sur les îles de faible altitude. De tels bouleversements devraient s'échelonner sur plusieurs millénaires, mais on ne peut écarter la possibilité que le niveau de la mer s'élève plus rapidement que prévu en quelques siècles. (3.4)

Il est *probable* que les changements climatiques auront un certain nombre d'incidences irréversibles. Si le réchauffement moyen de la planète excérait 1,5 à 2,5 °C par rapport à 1980-1999, le risque d'extinction de 20 à 30 % des espèces recensées à ce jour serait *probablement* accru (*degré de confiance moyen*). Si la température s'élèvait de plus de 3,5 °C environ, les modèles prévoient que 40 à 70 % des espèces recensées pourraient disparaître de la surface du globe. (3.4)

D'après les simulations actuelles, il est *très probable* que la circulation méridienne océanique accusera un ralentissement dans l'Atlantique au cours du XXI^e siècle, sans pour autant que les températures cessent d'augmenter au-dessus de l'Atlantique et en Europe. Il est *très improbable* que la circulation méridienne océanique change brusquement pendant cette période. On ne peut prévoir avec un degré suffisant de confiance l'évolution à plus long terme. Les changements importants et persistants de la circulation méridienne océanique auront *probablement* des effets sur la productivité des écosystèmes marins, la pêche, la fixation du CO₂ dans les océans, la teneur en oxygène des océans et la végétation terrestre. Il est possible que la modification de l'absorption du CO₂ par les terres et les océans ait un effet de rétroaction sur le système climatique. (3.4)

4. Les possibilités d'adaptation et d'atténuation¹⁴

Les possibilités d'adaptation sont multiples, mais il est impératif d'intensifier l'action engagée si l'on veut réduire la vulnérabilité à l'égard des changements climatiques. Il existe des obstacles, des limites et des coûts que l'on ne cerne pas toujours parfaitement. (4.2)

Les sociétés se sont de tout temps adaptées aux conditions météorologiques et climatiques. Toutefois, davantage de mesures devront être prises pour réduire les répercussions de l'évolution et de la variabilité du climat et ce, indépendamment de l'ampleur des stratégies d'atténuation qui seront mises en œuvre dans les vingt à trente prochaines années. Plusieurs facteurs sont susceptibles d'amplifier la vulnérabilité à l'égard des changements climatiques, notamment la pauvreté, l'accès inégal aux ressources, l'insécurité alimentaire, la tendance à la mondialisation de l'économie, les conflits en cours et l'incidence de maladies telles que le VIH/SIDA, sans oublier les dangers climatiques déjà présents. (4.2)

On commence à prendre certaines mesures d'adaptation à une échelle limitée. L'adaptation peut atténuer la vulnérabilité, surtout si elle s'inscrit dans des initiatives sectorielles plus larges (tableau RiD.4). Certaines solutions intéressantes pourraient être mises en pratique à faible coût et/ou avec de grands avantages par rapport au coût dans divers secteurs (*degré de confiance élevé*). Toutefois, trop peu d'études ont tenté d'estimer l'ensemble des coûts et avantages des mesures d'adaptation. (4.2, tableau 4.1)

La capacité d'adaptation, intimement liée au développement socioéconomique, est inégalement répartie entre les sociétés et au sein de ces dernières. (4.2)

Plusieurs obstacles freinent la mise en œuvre des mesures d'adaptation ou nuisent à leur efficacité. La capacité de s'adapter est un processus dynamique qui est en partie fonction de la base de production dont dispose une société donnée : ressources naturelles et moyens économiques, réseaux et programmes sociaux, capital humain et institutions, mode de gouvernement, revenu national, santé et technologie. Même les sociétés dotées d'une grande capacité d'adaptation restent vulnérables à l'évolution et à la variabilité du climat ainsi qu'aux extrêmes climatiques. (4.2)

Selon les études ascendantes et descendantes réalisées à ce jour, il existerait un potentiel économique appréciable d'atténuation des émissions mondiales de GES pour les prochaines décennies, qui pourrait neutraliser la hausse prévue de ces émissions ou les ramener sous les niveaux actuels (large concordance, degré élevé d'évidence) (figures RiD.9, RiD.10).¹⁵ Les résultats des deux types d'études concordent à l'échelle du globe (figure SRID.9), mais des écarts considérables existent entre les secteurs. (4.3)

¹⁴L'adaptation et l'atténuation sont étudiées séparément ici, bien que ces mesures puissent être complémentaires. La question est analysée dans la section 5.

¹⁵La notion de **potentiel d'atténuation** a été forgée dans le but d'évaluer l'ampleur des réductions de GES qu'il serait possible d'atteindre, par rapport à des niveaux de référence, pour un prix donné du carbone (exprimé en coût par unité d'émissions d'équivalent-CO₂ évitée ou réduite). On distingue le potentiel d'atténuation « de marché » et le potentiel d'atténuation « économique ».

Le **potentiel de marché** représente le potentiel d'atténuation fondé sur les coûts et les taux d'actualisation privés (réflétant le point de vue des consommateurs et des entreprises) qui peut être réalisé dans les conditions prévues du marché, y compris les politiques et mesures en place, en tenant compte des obstacles à la réalisation effective.

Le **potentiel économique** représente le potentiel d'atténuation qui prend en compte les coûts et avantages et les taux d'actualisation sociaux (réflétant le point de vue de la société, les taux d'actualisation sociaux étant inférieurs à ceux utilisés par les investisseurs privés), en supposant que l'efficacité du marché est améliorée par les politiques et mesures adoptées et que les obstacles sont levés.

Il existe plusieurs façons d'estimer le potentiel d'atténuation. **Les études ascendantes** évaluent les options d'atténuation en s'attachant à des technologies et des règlements spécifiques. Ce sont des études essentiellement sectorielles dans lesquelles la macroéconomie est jugée invariable. **Les études descendantes** évaluent le potentiel que présentent les options d'atténuation pour l'ensemble de l'économie. Elles utilisent des cadres cohérents et des informations globales sur les possibilités qui s'offrent et intègrent les rétroactions des systèmes macroéconomiques et des marchés.

Tableau RiD.4. Exemples de mesures d'adaptation prévues par secteur. {Tableau 4.1}

Secteur	Possibilité/stratégie d'adaptation	Cadre d'action sous-jacent	Principaux facteurs pouvant limiter ou favoriser la mise en œuvre
Eau	Extension de la collecte des eaux de pluie ; techniques de stockage et de conservation ; réutilisation ; dessalement ; méthodes efficaces d'utilisation et d'irrigation	Politiques nationales de l'eau et gestion intégrée des ressources ; gestion des risques	Obstacles financiers, humains et physiques ; <i>gestion intégrée des ressources ; synergies avec d'autres secteurs</i>
Agriculture	Modification des dates de plantation et des variétés cultivées ; déplacement des cultures ; meilleure gestion des terres (lutte contre l'érosion et protection des sols par le boisement, etc.)	Politiques de R.-D. ; réforme institutionnelle ; régime foncier et réforme agraire ; formation ; renforcement des capacités ; assurance-récolte ; incitations financières (subventions, crédits d'impôt, etc.)	Contraintes technologiques et financières ; accès aux nouvelles variétés ; marchés ; <i>allongement de la période de végétation aux hautes latitudes ; recettes tirées des « nouveaux » produits</i>
Infrastructure/établissements humains (y compris dans les zones côtières)	Changement de lieu d'implantation ; digues et ouvrages de protection contre les ondes de tempête ; consolidation des dunes ; acquisition de terres et création de terrains marécageux/zones humides contre l'élévation du niveau de la mer et les inondations ; protection des obstacles naturels	Normes et règlements intégrant dans la conception les effets des changements climatiques ; politiques d'utilisation des terres ; codes du bâtiment ; assurance	Obstacles financiers et technologiques ; difficultés de réimplantation ; <i>politiques et gestion intégrées ; synergies avec les objectifs du développement durable</i>
Santé	Plans de veille sanitaire pour les vagues de chaleur ; services médicaux d'urgence ; surveillance et contrôle accrus des maladies sensibles au climat ; salubrité de l'eau et assainissement	Politiques de santé publique tenant compte des risques climatiques ; renforcement des services de santé ; coopération régionale et internationale	Seuils de tolérance humaine (groupes vulnérables) ; connaissances insuffisantes ; moyens financiers ; <i>amélioration des services de santé ; meilleure qualité de vie</i>
Tourisme	Diversification des attractions et des recettes touristiques ; déplacement des pentes de ski à plus haute altitude et vers les glaciers ; production de neige artificielle	Planification intégrée (capacité d'accueil ; liens avec d'autres secteurs, etc.) ; incitations financières (subventions, crédits d'impôt, etc.)	Demande et mise en marché de nouvelles attractions ; problèmes financiers et logistiques ; effets potentiellement négatifs sur d'autres secteurs (p. ex. consommation accrue d'énergie pour la production de neige artificielle) ; <i>recettes tirées des « nouvelles » attractions ; élargissement du groupe des parties prenantes</i>
Transports	Harmonisation/réimplantation ; normes de conception et planification des routes, voies ferrées et autres éléments d'infrastructure en fonction du réchauffement et des impératifs de drainage	Politiques nationales des transports intégrant les effets des changements climatiques ; investissement dans la R.-D. sur des conditions particulières (zones à pergélisol, etc.)	Obstacles financiers et technologiques ; absence de trajets moins exposés ; <i>amélioration des technologies et intégration avec des secteurs essentiels (p. ex. l'énergie)</i>
Énergie	Renforcement des réseaux aériens de transport et de distribution ; enfouissement des câbles ; efficacité énergétique ; recours aux sources d'énergie renouvelables ; réduction de la dépendance à l'égard d'une seule source d'énergie	Politiques énergétiques nationales, règlements, incitations fiscales et financières au profit d'autres formes d'énergie ; normes de conception intégrant les effets des changements climatiques	Difficultés d'accès à des solutions de recharge viables ; obstacles financiers et technologiques ; degré d'acceptation des nouvelles technologies ; <i>stimulation des nouvelles technologies ; utilisation des ressources locales</i>

Note :

Les systèmes d'alerte précoce font partie des options envisagées dans de nombreux secteurs.

Aucune technologie ne permettra, à elle seule, de réaliser tout le potentiel d'atténuation dans quelque secteur que ce soit. Le potentiel économique, qui est généralement supérieur au potentiel de marché, ne pourra se concrétiser que si les politiques voulues sont en place et les obstacles levés (tableau RiD.5). {4.3}

Selon les études ascendantes, les possibilités d'atténuation dont le coût net est négatif pourraient réduire les émissions de quelque

6 Gt equiv.-CO₂/an en 2030, à condition d'analyser et d'éliminer les obstacles à la mise en œuvre. {4.3}

Les décisions concernant les investissements dans l'infrastructure énergétique, qui devraient excéder 20 billions¹⁶ de dollars É.-U. entre 2005 et 2030, auront une incidence à long terme sur les émissions de GES en raison de la durée de vie des centrales et autres immobilisations. De nombreuses décennies pourraient

¹⁶20 billions = 20 000 milliards = 20×10^{12} .

Comparaison du potentiel économique mondial d'atténuation et de l'augmentation prévue des émissions en 2030

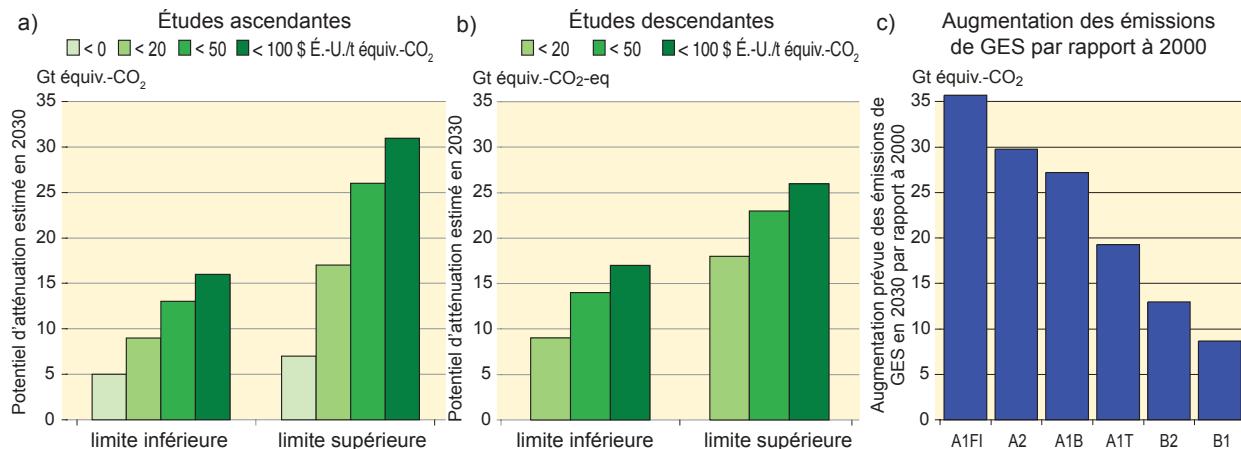


Figure RiD.9. Potentiel économique mondial d'atténuation estimé en 2030 à partir d'études ascendantes (diagramme a) et descendantes (diagramme b), en comparaison de l'augmentation anticipée des émissions selon différents scénarios SRES par rapport aux niveaux de 2000, soit 40,8 Gt équiv.-CO₂ (diagramme c). Note : Par souci de cohérence avec les résultats des scénarios SRES, les émissions de GES en 2000 ne comprennent pas les rejets issus de la décomposition de la biomasse aérienne qui subsiste après une coupe forestière ou un déboisement, ni ceux issus de la combustion de tourbe et des sols tourbeux asséchés. {Figure 4.1}

Potentiel économique d'atténuation par secteur en 2030 selon des études ascendantes

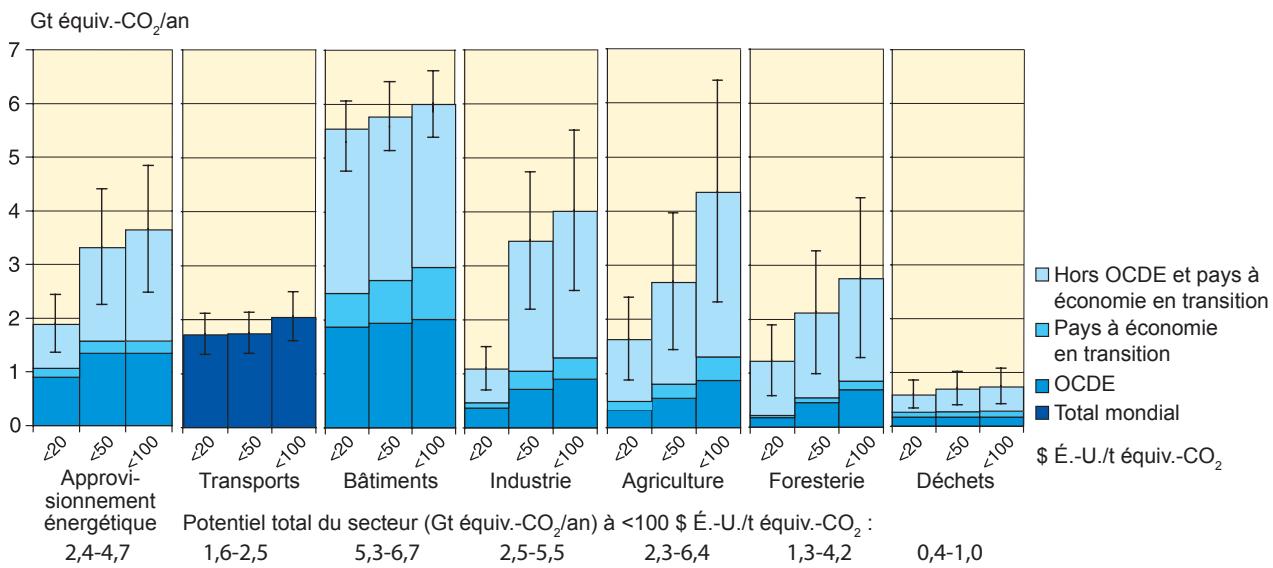


Figure RiD.10. Potentiel économique d'atténuation estimé par secteur en 2030 selon des études ascendantes, relativement aux bases de référence utilisées pour l'évaluation des divers secteurs. Le potentiel indiqué ne comprend pas les options non techniques, telle la modification des modes de vie. {Figure 4.2}

Notes :

- Les lignes verticales représentent la fourchette du potentiel économique mondial estimé pour chaque secteur. Les émissions sont attribuées selon l'usage final ; ainsi, les rejets produits par la consommation d'électricité sont imputés aux secteurs utilisateurs et non au secteur de l'approvisionnement énergétique.
- L'estimation des potentiels a été rendue difficile par le nombre limité d'études, notamment pour des prix élevés du carbone.
- Les bases de référence diffèrent selon le secteur. Pour l'industrie, on a utilisé celle du scénario B2 du SRES et, pour l'approvisionnement énergétique et les transports, celle du scénario WEO 2004. Dans le cas des bâtiments, la base de référence se situait entre celles des scénarios B2 et A1B du SRES. Pour le secteur des déchets, on a établi la base de référence à partir des forces motrices du scénario A1B du SRES. Enfin, dans le cas de l'agriculture et de la foresterie, les bases de référence reposaient essentiellement sur les forces motrices associées au scénario B2.
- Les chiffres de l'aviation internationale étant inclus, seuls figurent les totaux mondiaux pour le secteur des transports.
- Les catégories exclues sont : les émissions de gaz autres que le CO₂ (bâtiments et transports), une partie des options visant le rendement des matériaux, la production de chaleur et la cogénération (approvisionnement énergétique), les véhicules utilitaires lourds, le trafic maritime et les transports de passagers à fort taux d'occupation, la plupart des options coûteuses (bâtiments), le traitement des eaux usées, la réduction des rejets des mines de charbon et des gazoducs, les gaz fluorés (approvisionnement énergétique et transports). La sous-estimation du potentiel économique total qui en résulte est de l'ordre de 10 à 15 %.

Tableau R1-D.5. Exemples des principales technologies d'atténuation, des politiques et mesures connexes et des conditions favorables ou défavorables à leur application, par secteur. [Tableau 4.2]

Secteur	Principales technologies et méthodes d'atténuation déjà sur le marché. Principales technologies et méthodes d'atténuation qui devraient être commercialisées d'ici 2030	Politiques, mesures et instruments ayant la preuve de leur efficacité sur le plan de l'environnement	Principales conditions favorables (italique) ou défavorables
Approvisionnement énergétique	Amélioration de la production et de la distribution ; passage du charbon au gaz ; énergie nucléaire ; sources d'énergie renouvelables hydropotentielle, géothermique, bioénergie) ; cogénération ; premières applications de la technique de piégeage et de stockage du dioxyde de carbone (PSC) (p. ex. stockage du CO ₂ pour l'extraction du gaz naturel) ; PSC dans les centrales électriques fonctionnant au gaz, à la biomasse et au charbon ; énergie nucléaire de pointe ; énergies renouvelables de pointe, y compris l'énergie marémotrice et houleomotrice, l'énergie solaire concentrée et photovoltaïque	Réduction des subventions visant les combustibles fossiles ; taxes sur les combustibles fossiles ou redevances sur le carbone	La résistance des intérêts en place peut rendre l'application difficile
Transports	Véhicules offrant un meilleur rendement énergétique ; véhicules hybrides ; véhicules diesel moins polluants ; biocarburants ; passage du transport routier au transport ferroviaire et au transport en commun ; modes de déplacement non motorisés (bicyclette, marche) ; aménagement du territoire et planification des transports ; biocarburants de deuxième génération ; aéronefs plus performants ; véhicules électriques et hybrides de pointe dotés de batteries plus puissantes et plus fiables	Économie obligatoire de carburant ; mélange de biocarburants ; normes de CO ₂ pour le transport routier Taxes à l'achat, l'enregistrement et l'utilisation de véhicules ; taxes sur les carburants ; taxation du réseau routier et du stationnement	Peut aider à créer un marché pour les technologies moins polluantes L'efficacité peut être limitée si tout le parc automobile n'est pas visé L'efficacité peut être moindre si les revenus sont élevés
Bâtiments	Éfficacité de l'éclairage et utilisation de la lumière naturelle ; meilleur rendement des appareils électriques et des systèmes de chauffage et de climatisation ; amélioration des cuisinières et de l'isolation, utilisation active et passive de l'énergie solaire pour le chauffage et la climatisation ; fluides réfrigérants de substitution, récupération et recyclage des gaz fluorés ; conception intégrée des bâtiments commerciaux comprenant des techniques de contrôle et de rétention, tels les compteurs intelligents ; énergie solaire photovoltaïque intégrée aux bâtiments	Normes et étiquetage des appareils Codes du bâtiment et certification Programmes de gestion de la demande	Nécessité de revoir régulièrement les normes Intéressant pour les bâtiments neufs. L'application peut se révéler difficile Réglementation requise pour que les entreprises de services publics puissent en bénéficier
Industrie	Équipement électrique (utilisation finale) plus efficace ; récupération de la chaleur et de l'énergie ; recyclage et remplacement des matériaux ; maîtrise des émissions de gaz autres que le CO ₂ ; multitude de technologies adaptées aux différents procédés ; efficacité énergétique améliorée ; PSC dans les usines de production de ciment, d'ammoniaque et de fer ; électrodes inertes pour la fabrication d'aluminium	Initiatives du secteur public, y compris par les achats Aide aux sociétés de services énergétiques	Les achats du secteur public peuvent accroître la demande de produits à haut rendement énergétique Facteur de succès : accès au financement par des tiers
Agriculture	Meilleure gestion des terres arables et des pâtures afin de favoriser la fixation du carbone dans les sols ; remise en état des sols tourbeux cultivés et des terres dégradées ; amélioration de la riziculture et gestion du bétail et du fumier de manière à réduire les rejets de CH ₄ ; amélioration de l'épandage d'engrais azotés afin d'abaisser les émissions de N ₂ O ; culture de variétés destinées à remplacer les combustibles fossiles ; meilleure efficacité énergétique ; hausse du rendement des cultures	Initiations financières et règlements visant à améliorer la gestion des terres : maintien de la teneur en carbone des sols ; utilisation efficace des engrains et de l'irrigation	Peut stimuler l'adoption de nouvelles technologies. La politique nationale doit être stable pour préserver la compétitivité à l'échelle internationale Mécanismes d'attribution prévisibles et signaux de stabilité des prix pour les investissements
Forêtterie/forêts	Boisement ; reboisement et des pâtures afin de favoriser la fixation du carbone dans les sols ; remise en état des sols tourbeux cultivés et des terres dégradées ; amélioration de la productivité de la biomasse et la fixation du carbone ; affinement des techniques de télédétection servant à analyser le potentiel de fixation du carbone dans la végétation ou les sols et à cartographier les changements d'affection des terres	Initiations financières visant à améliorer la gestion des sols et des eaux usées	Facteurs de succès : objectifs précis, scénario de référence, contribution de tiers à la conception et à l'examen, règles formelles de suivi, coopération étroite entre le secteur public et privé
Déchets	Récupération du CH ₄ sur les sites d'enfouissement ; incinération des déchets avec récupération d'énergie ; compostage des matières organiques ; traitement contrôlé des eaux usées ; recyclage et minimisation des déchets ; couvertures et filtres biologiques destinés à optimiser l'oxydation du CH ₄	Initiations financières ou obligation d'utiliser les énergies renouvelables Réglementation de la gestion des déchets	Peut favoriser les synergies avec le développement durable et la réduction de la vulnérabilité à l'égard des changements climatiques, surmontant ainsi les obstacles à la mise en œuvre Manque de capitaux d'investissement et questions relatives aux régimes fonciers. Peut contribuer à réduire la pauvreté

s'écouler avant que les technologies faisant peu appel au carbone soient largement exploitées, même dans l'éventualité où des mesures rendraient les investissements initiaux plus intéressants. Selon les premières estimations, il faudrait remettre profondément en question les choix effectués en matière d'investissement pour que, d'ici 2030, les émissions globales de CO₂ dues au secteur énergétique soient ramenées aux niveaux de 2005, alors même que le surcoût net ne devrait guère excéder 5 à 10 % du total des investissements. (4.3)

Les gouvernements peuvent mettre en œuvre un large éventail de politiques et d'instruments destinés à stimuler l'atténuation, mais les possibilités d'application dépendent des circonstances nationales et du secteur visé (tableau RiD.5). (4.3)

Parmi ces moyens figurent les politiques climatiques qui doivent être intégrées dans les politiques de développement, les règlements et normes, les taxes et redevances, les permis négociables, les incitations financières, les accords volontaires, les outils d'information et les travaux de recherche, développement et démonstration. (4.3)

Un signal fort concernant le prix du carbone pourrait concrétiser une part appréciable du potentiel d'atténuation dans tous les secteurs. Selon les études de modélisation, si la tonne d'équivalent-CO₂ valait 20 à 80 \$ É.-U. en 2030, la stabilisation interviendrait aux alentours de 550 ppm d'équiv.-CO₂ en 2100. Il est possible, au même niveau de stabilisation, que les changements technologiques induits ramènent cette fourchette à 5–65 \$ É.-U. en 2030¹⁷. (4.3)

Des avantages connexes peuvent découler rapidement des mesures d'atténuation (par exemple l'amélioration de la santé grâce à la réduction de la pollution de l'air) et compenser une bonne partie des coûts encourus (*large concordance, degré élevé d'évidence*). (4.3)

L'action engagée par les Parties visées à l'annexe I de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) est capable d'infléchir l'économie mondiale et les émissions globales, mais l'ampleur des transferts d'émissions de carbone demeure incertaine (*large concordance, degré moyen d'évidence*).¹⁸ (4.3)

Comme le mentionnait le troisième Rapport d'évaluation, les pays exportateurs de combustibles fossiles (qu'ils soient ou non visés à l'annexe I de la CCNUCC) doivent s'attendre à un recul de la demande et des prix et à un ralentissement de la croissance du produit intérieur brut (PIB) sous l'effet des mesures d'atténuation. L'étendue de ces répercussions dépend largement des hypothèses

retenues quant aux politiques adoptées et à la conjoncture du marché du pétrole. (4.3)

La modification des modes de vie, des comportements et des pratiques de gestion peut concourir à atténuer les effets de l'évolution du climat dans l'ensemble des secteurs (*large concordance, degré moyen d'évidence*). (4.3)

La coopération internationale peut contribuer de bien des manières à réduire les émissions mondiales de GES.

Parmi les résultats les plus remarquables de l'action menée au titre de la CCNUCC et du Protocole de Kyoto figurent l'élaboration d'une réponse mondiale face aux changements climatiques, l'adoption d'une panoplie de politiques nationales et la création d'un marché international du carbone et de mécanismes institutionnels sur lesquels pourront s'appuyer les efforts futurs (*large concordance, degré élevé d'évidence*). Les questions d'adaptation sont en outre mieux prises en compte dans le cadre de la CCNUCC, et l'on envisage de prendre d'autres initiatives internationales. (4.5)

L'intensification de la coopération et l'expansion des mécanismes axés sur le marché abaisseront les coûts à engager pour atteindre un niveau d'atténuation donné ou augmenteront les effets bénéfiques pour l'environnement. On peut envisager, par exemple, la fixation d'objectifs d'émissions, l'exécution d'actions sectorielles, locales, infranationales et régionales, la mise en œuvre de programmes de recherche, développement et démonstration, l'adoption de politiques communes, la mise en place de stratégies de développement et l'élargissement des mécanismes de financement. (4.5)

Dans plusieurs secteurs, il est possible de créer des synergies sans nuire à d'autres dimensions du développement durable. De fait, les décisions concernant les politiques d'ordre macroéconomique et d'autres politiques non climatiques peuvent avoir une incidence notable sur les taux d'émission, la capacité d'adaptation et la vulnérabilité à l'égard des changements climatiques. (4.4, 5.8)

Les mesures prises aux fins d'un développement plus durable peuvent accroître les capacités d'atténuation et d'adaptation, faire reculer les émissions et réduire la vulnérabilité, mais des obstacles peuvent s'opposer à leur mise en œuvre. Pourtant, il est très probable que les changements climatiques risquent de ralentir les progrès accomplis sur la voie du développement durable. Ils pourraient d'ailleurs empêcher la réalisation des objectifs du Millénaire pour le développement au cours du prochain demi-siècle. (5.8)

¹⁷ Dans les études évaluées dans le présent rapport, les mesures d'atténuation et les coûts macroéconomiques sont analysés au moyen de modèles descendants. La plupart de ces modèles examinent l'éventail des possibilités en fonction du moindre coût global, sur la base d'un échange universel des droits d'émission et en supposant une transparence des marchés, la gratuité des transactions et, par conséquent, une application optimale des options d'atténuation tout au long du XXI^e siècle. Les coûts sont donnés pour une date précise. Si des régions, des secteurs (par exemple, l'utilisation des terres), des options ou des gaz sont exclus, les coûts globaux modélisés augmentent. Ils baissent au contraire si l'on prend des bases de référence plus basses, si l'on affecte les recettes provenant des taxes sur le carbone et de l'échange des permis et si l'on intègre l'apprentissage technologique induit. Ces modèles ne tiennent compte ni des effets bénéfiques des changements climatiques ni, en général, des avantages connexes découlant des mesures d'atténuation, ni des questions d'équité. On parvient beaucoup mieux aujourd'hui à inclure dans les études de stabilisation les approches basées sur les changements technologiques induits, mais plusieurs difficultés conceptuelles demeurent. Lorsque ces changements sont pris en considération, les coûts projetés pour atteindre un niveau de stabilisation donné sont moindres ; la réduction est encore plus importante aux niveaux de stabilisation inférieurs.

¹⁸ Le point 4 du Rapport de synthèse donne davantage d'explications à ce sujet.

Finance carbone et développement - Vue d'ensemble

A l'heure actuelle, le Groupe de la Banque mondiale consacre chaque année, en moyenne, 10,3 milliards de dollars de financements directs à la lutte contre le changement climatique. En octobre 2015, son président Jim Yong Kim a annoncé que la part des financements climatiques dans le portefeuille du Groupe pourrait croître de 21 à 28 % d'ici 2020, afin de faire face à la demande de ses clients. En y ajoutant les cofinancements, cette progression porterait le montant total des projets axés sur le climat à 29 milliards de dollars par an à l'horizon 2020.

Le Groupe de la Banque mondiale et les autres banques multilatérales de développement jouent un rôle clé dans la mobilisation de financements en faveur de l'atténuation du changement climatique et de l'adaptation à ses effets. Concrètement, entre 2011 et 2014, ces organismes ont collectivement consacré plus de 100 milliards de dollars (près de 26,5 milliards de dollars par an) à l'action climatique dans les pays en développement et émergents.

En avril 2015, dans la perspective de la COP21, les principales institutions financières d'aide au développement se sont entendues sur des principes communs pour le suivi des ressources consacrées aux mesures d'adaptation et d'atténuation du changement climatique. Cet accord contribuera à renforcer la confiance dans les flux financiers, ainsi que la transparence des financements climatiques.

Le Groupe de la Banque mondiale aide par ailleurs les pays à accéder à d'autres sources de financement via le Fonds pour l'environnement mondial, les Fonds d'investissement climatiques, divers fonds carbone et le Protocole de Montréal. Depuis 2011, il a engagé 52 milliards de dollars dans plus de 900 projets liés au climat ; rien que sur l'exercice 2015, 188 investissements ont porté sur le changement climatique et concerné 59 pays.

Le volume total des financements nécessaires pour que les pays deviennent des économies en croissance résilientes et sobres en carbone se chiffre en milliers de milliards de dollars. Selon l'Agence internationale de l'énergie, il faudrait décaisser 1 000 milliards de dollars par an d'ici 2050 pour pouvoir financer une transition vers un monde à faibles émissions de carbone.

Le secteur public ne pouvant à lui seul répondre aux besoins du financement climatique, le secteur privé a un rôle crucial à jouer. À cet égard, le Groupe de la Banque mondiale a su trouver des moyens innovants pour mobiliser des ressources supplémentaires en travaillant avec ses partenaires et en levant des sommes importantes auprès du secteur privé.

La Société financière internationale (IFC), la branche du Groupe de la Banque mondiale chargée des opérations avec le secteur privé, a commencé en 2005 à assurer le suivi des composantes « climato-intelligentes » de ses activités d'investissement et de conseil. Depuis cette date, l'IFC a alloué environ 13 milliards de dollars au financement à long terme de programmes portant sur les énergies renouvelables, la maîtrise de l'énergie, l'agriculture durable, les bâtiments écologiques et l'adaptation du secteur privé au changement climatique.

Sur l'exercice 2015, l'IFC a consacré 22 % de ses financements à long terme à des investissements climato-intelligents (contre un objectif de 20 %), soit 2,3 milliards de dollars pour 103 projets répartis dans 31 pays, avec une mobilisation record de 2,2 milliards

supplémentaires auprès d'investisseurs privés. Globalement, les projets d'investissement et de services-conseil entrepris en 2015 dans le domaine du climat devraient réduire les émissions de gaz à effet de serre de 9,6 millions de tonnes par an, ce qui équivaut au retrait de la circulation de 2 millions de voitures.

L'IFC a en particulier alloué 893 millions de dollars aux énergies renouvelables, dont 234 millions à l'éolien et 367 millions au solaire.

Voici quelques exemples de réalisations :

- En Jordanie, via un investissement de 79,66 millions de dollars et la mobilisation de 107 millions supplémentaires, l'IFC a contribué au financement de la construction de sept parcs solaires photovoltaïques qui permettront à ce pays de promouvoir l'utilisation des énergies renouvelables et de transformer son secteur énergétique. C'est le plus vaste programme solaire emmené par le secteur privé au Moyen-Orient et en Afrique du Nord.
- À la fin 2014, l'IFC a finalisé un financement de 300 millions de dollars pour le parc éolien de Penonome (Panama), le plus grand d'Amérique centrale. Cette centrale d'une puissance de 337,5 mégawatts devrait générer aux alentours de 5 % des besoins en énergie du Panama et faire baisser les émissions de carbone de 400 000 tonnes par an, ce qui équivaut au retrait de la circulation de 84 000 voitures.
- En Chine, le financement apporté par l'IFC a permis au China WindPower Group de construire une ferme éolienne de 201 MW à Xiehe (province du Gansu). Il s'agit du premier projet éolien chinois entièrement financé par un consortium bancaire international.

En 2015, l'Agence multilatérale de garantie des investissements (MIGA) a émis pour 1 milliard de dollars de garanties destinées à des projets climato-intelligents.

La Banque mondiale et l'IFC sont en outre parmi les plus grands émetteurs d'obligations vertes : la Banque mondiale (BIRD) en a émis pour 8,6 milliards de dollars et le service de la Trésorerie de l'IFC pour 3,8 milliards de dollars.

- Exemple de l'impact des émissions obligataires de la BIRD : au Mexique, un projet visant à améliorer la gestion forestière devrait permettre de réduire la déforestation et la dégradation des forêts sur 1,6 million d'hectares, c'est-à-dire sur une superficie plus vaste que l'État du Connecticut aux États-Unis.
- Exemple de l'impact des émissions obligataires de la BIRD : en Chine, deux projets axés sur la maîtrise de l'énergie dans l'industrie devraient aboutir à une réduction des émissions de carbone qui équivaldra au retrait de la circulation de 2,7 millions de voitures, selon une formule de calcul appliquée par l'agence américaine de protection de l'environnement (EPA).
- Au Honduras, le produit de ces émissions a servi à financer trois centrales solaires. C'est la preuve que le solaire à l'échelle industrielle est viable et rentable dans ce pays, et qu'il permet de réduire les importations d'hydrocarbures coûteux, d'abaisser les coûts de production moyens et d'accroître la compétitivité du secteur de l'électricité.

The impact of climate change on the UK insurance sector

A Climate Change Adaptation Report by the Prudential Regulation Authority
September 2015

Executive summary

- 1.1 In April 2014, the PRA accepted an invitation from the Department for Environment, Food & Rural Affairs (Defra) to complete a Climate Change Adaptation Report, focused on insurance. This document is the PRA's response to Defra and also the PRA's first report on the subject of climate change.
- 1.2 The report's objective is to provide a framework for considering the risks arising from climate change through the lens of the PRA's statutory objectives in relation to insurers – ie the safety and soundness of firms and appropriate protection of policyholders. The report therefore takes the form of an initial risk assessment. It explores possible responses to the risks identified but is not intended to provide a policy prescription. The report also discusses climate change-related opportunities.
- 1.3 The PRA has not developed an independent view on the science behind climate change. To provide context, the report seeks to reflect evidence provided by respected authorities, particularly the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The PRA's areas of judgement are focused on the relevance of scientific evidence to regulated firms, and to our statutory objectives.
- 1.4 The PRA would welcome technical comments on the existing content of the report from interested stakeholders and may update it in light of them in due course.

Analytical framework

- 1.5 Insurance is a market-based mechanism for the transfer of risk. The PRA's role, through its statutory objectives, is to contribute to ensuring that this risk transfer can occur in a reliable and effective way through the UK insurance sector.
- 1.6 The ways in which the insurance sector, and hence the PRA's objectives, could be impacted by climate change are diverse, complex and uncertain. Nevertheless, the report identifies three primary channels ('risk factors') through which such impacts might be expected to arise:
 - (i) **Physical risks:** the first-order risks which arise from weather-related events, such as floods and storms. They comprise impacts directly resulting from such events, such as damage to property, and also those that may arise indirectly through subsequent events, such as disruption of global supply chains or resource scarcity.
 - (ii) **Transition risks:** the financial risks which could arise for insurance firms from the transition to a lower-carbon economy. For insurance firms, this risk factor is mainly about the potential re-pricing of carbon-intensive financial assets, and the speed at which any such re-pricing might occur. To a lesser extent, insurers may

also need to adapt to potential impacts on the liability side resulting from reductions in insurance premiums in carbon-intensive sectors.

- (iii) **Liability risks:** risks that could arise for insurance firms from parties who have suffered loss and damage from climate change, and then seek to recover losses from others who they believe may have been responsible. Where such claims are successful, those parties against whom the claims are made may seek to pass on some or all of the cost to insurance firms under third-party liability contracts such as professional indemnity or directors' and officers' insurance.
- 1.7 For each of these risk factors, this report explores the nature of the risk, the possible impacts on the liability and/or asset sides of insurance firms' balance sheets, and the actions firms are taking to mitigate them. The clearest risk is from the first category – physical risks – and accordingly most of the report is focused on that aspect. The other two risk categories are less well developed and more uncertain – nonetheless, they could have a meaningful impact on the PRA's objectives over time.
- 1.8 Across these risk factors, the PRA's analysis suggests that there is potential for climate change to present a substantial challenge to the business model of insurers. In particular, while there are opportunities for the sector from writing new climate change-related business, it is also possible that climate change would reduce or eliminate the sector's appetite to provide insurance cover for specific sets of activities, assets or customers. This is relevant for the PRA's objectives of safety and soundness and policyholder protection, and could also be an area of interest for other policymakers, a point the report highlights where appropriate.

Physical risks

- 1.9 The PRA has focused analysis on the direct impact of global natural catastrophes and windstorm, flood and related hazards in the United Kingdom (UK). These are particularly relevant to the liability side of general insurers' balance sheets, and specifically to property-related classes of insurance business, which account for 38% of the £78 billion of gross written premiums underwritten by the UK general insurance market.
- 1.10 There is evidence to suggest that insurance payouts (generally referred to as 'losses') arising from global natural catastrophes are increasing. The number of registered weather-related natural hazard loss events has tripled since the 1980s and inflation-adjusted insurance losses from these events have increased from an annual average of around US\$10 billion in the 1980s to around US\$50 billion over the past decade.
- 1.11 The driving factors behind insurance losses from these and other weather-related events are complex. While research generally suggests that increasing exposure (via expansion of the industry) is the primary factor, there are indications that climate change is also having an impact. For example, Lloyd's of London estimates that the 20cm of sea-level rise since the 1950s increased Superstorm Sandy's (2012) surge losses by 30% in New York alone.
- 1.12 The use of catastrophe risk modelling, portfolio diversification, alternative risk transfer and short-term contracts would suggest general insurers are reasonably well equipped to manage the current level of direct physical risks. Over the past 20 years, the industry

has developed more sophisticated approaches to modelling risks from catastrophes and other weather-related events. This has supported more robust pricing of risk, albeit with models generally built to provide estimates of today's risk, not to anticipate future climate trends. By insuring a diverse range of risks, general insurers reduce exposure to any one specific hazard or event. The use of reinsurance and, increasingly, alternative risk transfer through capital markets, allows individual firms to smooth out their peak exposures. Meanwhile, the predominance of annual contracts enables insurance firms regularly to adjust prices in response to a changing environment.

- 1.13 Regulatory capital requirements and the basic insurance business model both help to provide resilience to changes in climate. Regulatory standards require UK insurers to hold sufficient capital to withstand the losses of a 1 in 200 year event, thus building in substantial resilience. Insurance firms also differ from most companies in that premiums are paid up-front, with benefits payable at a later date, which tends to dampen immediate shocks to liquidity that could arise from extreme events.
- 1.14 Looking further ahead, increasing levels of physical risk due to climate change could present challenges related to the liability side of general insurance balance sheets in a number of ways.
- 1.15 First, the impact of changing climatic conditions (which may or may not reflect the impact of longer-term climate change) can cause disruption in established insurance arrangements and associated risks, and create important issues for public policy. An example of this in the UK is the greater incidence of flooding alongside increased property construction in affected areas. While traditional general insurance provision can adapt to such change, governments may decide that the provision of insurance cover has more of the nature of a public good. This is the case with the Flood Re proposals in the UK.
- 1.16 Second, in determining a firm's regulatory capital requirement, the level of diversification benefit allowed rests on important assumptions about the correlation of different risks – for instance, the extent to which European windstorms occur in clusters. The impact of climate change on those correlations, and therefore the assumptions made for setting insurance firms' capital requirements, is highly uncertain. But an increased correlation between modelled risks, and increased volatility, would affect insurance firms' diversification benefits and capital requirements.
- 1.17 Third, changes in the nature and incidence of such direct weather-related risks (eg floods) can lead to changes in associated indirect risks. For example, in 2011 Thai floods caused US\$45 billion of economic damage, which resulted in US\$12 billion of insurance payments including claims arising from second-order effects such as supply chain interruption of global manufacturing firms.⁴ Given the inherent uncertainty around such events, the emergence of more frequent and severe 'non-modelled' risks across a broad range of classes of business could present substantial challenges to insurance firms and warrants further consideration.
- 1.18 Physical risks are also likely to become increasingly relevant to the asset side of insurance firm balance sheets, particularly for life insurers given the need to match assets to liabilities over the longer term. These physical risks can directly impact upon specific financial assets, such as investments in real estate, as well as affecting large parts of portfolios through real-economy effects.

- 1.19 In terms of real estate, there are already cases, albeit limited in scope, of severe weather events resulting in general insurers restricting property insurance in high-risk areas, which can impact upon property values. The potential impact of extreme weather on both the asset and liability side of insurers' balance sheets presents another example of correlated risk. Insurers may also suffer from 'cognitive dissonance'; they employ sophisticated techniques to manage physical risks to the liability side of their balance sheets, and generally re-price on an annual basis, but are less alert to the potential for the same risks to affect their assets, particularly if insurance is re-priced or withdrawn.
- 1.20 On a broader basis, physical risks can also affect large parts of portfolios indirectly through real-economy effects and have a material impact on the value of the global stock of manageable assets. The PRA also notes the possibility of more near-term impacts through potential changes in investor sentiment or market expectations around climate risk, and the extent to which the systemic risks that arise from climate change may, at least in part, be challenging to diversify. Insurance firms could be expected to be affected by these factors in the same way as other major investors.

Transition risks

- 1.21 The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) estimates that maintaining a greater than 66% probability of keeping human-induced warming within the globally agreed goal of 2oC would require total global carbon emissions from 2011 onwards to be less than around 1,000 GtCO₂.5 Keeping within this '2oC carbon budget' would require a significant shift in the trajectory of carbon emissions – at current rates, the entire budget would be fully used within the next 25 years.
- 1.22 The global transition to a lower carbon economy could have an impact on insurance firms through their investments in carbon-intensive assets. This is particularly relevant for two tiers of financial assets: (i) securities of firms that may be impacted directly by regulatory limits on their ability to produce or use fossil fuels, ('Tier 1' – these include coal, oil and gas extraction companies, and conventional utilities); and (ii) securities of firms that are energy-intensive, which might be affected indirectly via an increase in energy costs ('Tier 2' – these include chemicals, forestry and paper, metals and mining, construction and industrial production). Between them, these two tiers of assets account for around a third of global equity and fixed-income assets.
- 1.23 These asset-side impacts might be felt across general and life insurers and a range of factors could influence the speed of the transition, including public policy, technology and changing investor preferences and market sentiment. There could also be a separate, probably more limited, liability-side impact on general insurance firms through a potential reduction in insurance premiums from carbon-intensive sectors; the energy sector accounts for around 4% of total UK premiums.
- 1.24 Discussions with market participants and wider stakeholders identified a range of possible strategies for managing transition risk, as well as a number of public commitments, including divesting from, and engaging with, specific high-carbon sectors. Views from firms included expressing an urgent need to agree a carbon pathway. This would improve transparency of potential exposures to carbon and resource-intensive sectors.

1.25 Practices relating to transition risk are likely to evolve and improved disclosure could be beneficial to ensure market participants have sufficient information to assess risks fully in this area. While significant shifts in industry structure are not unknown to market participants, the PRA considers the impacts from a low carbon transition as an important area for further assessment, with the likely impact depending on the speed of transition.

Liability risks

- 1.26 Liability risks are those which can arise as a result of parties which have suffered loss from climate change seeking to recover losses from others who they believe may have been responsible. The PRA views this risk as being of most relevance to general insurers through the possibility of increased third-party liability claims.
- 1.27 Liability insurance protects the purchaser of insurance (the ‘insured’) from the risk of being held legally liable for the loss or damage suffered by other parties as a result of the insured’s actions. Insurance cover normally extends to legal costs as well as legal settlements, up to a policy limit. Liability risks may take a long time to crystallise compared to catastrophe claims as it can take years to establish whether the insured party was at fault and to determine the amount of loss that has arisen as a result. The true cost of liability claims can often be uncertain and complex to determine.
- 1.28 Historical events have shown that over time liability claims can be more disruptive to the insurance industry than losses caused by individual extreme weather events, especially when new sources of claims emerge. It would be simplistic to draw too close a comparison between climate change and asbestos and pollution, but these cases demonstrate how what at the time appear to be low probability risks can transform into large and unforeseen liabilities for insurers. For instance, the total current estimate of net asbestos losses is estimated at US\$85 billion in the United States.
- 1.29 Respondents to the PRA’s survey saw the potential for increased claims in general liability classes of business, such as public liability, directors’ and officers’ and professional indemnity, with three primary lines of argument for establishing liability considered most relevant: failure to mitigate, failure to adapt and failure to disclose.
- 1.30 It can take time for a new category of liability claim to gain traction in the courts, and climate change-related litigation is still an emerging and evolving area which varies considerably across different jurisdictions. Generally, cases have been unsuccessful, which is not unusual in the early years for this type of issue.
- 1.31 The scope of insurance cover will also be important in determining future exposures for PRA-regulated general insurance firms. Questions may arise as to how the continuous emission of greenhouse gases relates to these policies, or whether policy exclusions on areas such as pollution would stand up to scrutiny if claims are made. While significant losses have yet to occur, relevant cases are already evident. Liability risk, in particular third-party liability claims, is an area that may evolve adversely, particularly if the attribution of changes in climate to man-made sources continues to strengthen and claimants increasingly seek to hold those responsible to account.

Conclusion and next steps

- 1.32 The PRA sees three primary channels through which climate change may impact its objectives in relation to insurers. Although a potential increase in physical risks is the most apparent of these, each of the other two – transition and liability risks – has the potential to have a substantial impact.
- 1.33 The potential impacts identified have most relevance to the liability-side of general insurance firms' balance sheets. However, there is also some potential for meaningful asset-side impacts which could affect both general and life insurers.
- 1.34 By their nature, these risks do not appear likely to crystallise in full in the near term and a number of mitigants are in place which, in the PRA's view, mean that firms are reasonably well-equipped to manage the current level of physical risks. Looking further ahead, increasing physical risks could present meaningful challenges to insurance business models and the full range of risks from climate change identified in this report will be important to consider.
- 1.35 The PRA will also continue its work on climate change through international collaboration, research, and continued engagement of the kind undertaken in the preparation of this report, and will seek appropriate inclusion of climate change risks in ongoing supervisory activity. In light of its analysis, the PRA will be sharing the findings of this report with PRA-regulated insurance firms and will expect them to consider the risks identified.
- 1.36 Finally, the report identifies a number of climate change-related opportunities for insurance firms. These include new sources of premium growth, such as renewable energy project insurance, supporting resilience to climate change through risk awareness and risk transfer, investments in 'green bonds' and providing financial sector leadership on climate change.

Weather derivatives' regulation: open issues and new opportunities for risk coverage products

Weather derivatives

- A derivative is a financial product, the value of which derives from an underlying index, rate, commodity or other variable element.
- The special feature of weather derivatives is that the underlying element is represented by weather-related indexes such as temperature, rainfall, snowfall, wind, etc.
- Two variants: customized weather derivatives vs. standardized weather derivatives (tradable).
- Origin: Aquila Energy structured a dual-commodity hedge for Consolidated Edison (USA, 1996)
- However the weather component was embedded in the very first derivative transactions: weather forecasts and renting of olive mills/presses by Thales of Miletus (Asia Minor 600 B.C.).

"The insurance industry was not then receptive to requests to provide non-catastrophic protection. Accordingly, the energy market was left to fend for itself. Energy companies, realizing that the market was changing, took control of their weather risk and created a new business around it"

Lynda Clemons (former head of Enron Environmental Desk, 2002)

Some figures...

- The weather derivatives market expanded from being a very small U.S. energy product (back in 1997) to quickly become a USD 11.8 billion industry by 2011 (WRMA).
- A growing market (that survived its pioneers, namely Enron).
- According to data collected by WRMA, during the 2010-2011 period:
 - the market for customized weather derivatives grew by nearly 30%;
 - the total notional value for OTC contracts rose to USD 2.4 billion;
 - the overall market grew to USD 11.8 billion (20% increase).

Who needs weather derivatives?

- Number of potential “end-users”:
 - Energy (and other utilities);
 - Agriculture;
 - Travel;
 - Manufacturer of weather-driven seasonal products; and
 - Insurance (covering third parties’ weather-related risks).
- Traditional use of derivatives in the insurance business (e.g., hedging currency risk, stock market fluctuations, interest rates) but weather derivatives may also allow insurers “to cope with climate changes” (Marcel Fontaine - AIDA World Congress 2010).
- Together with CAT bond, they represent a form of alternative risk transfer (ART) when reinsurance capacity is limited or too expensive.

Benefits of weather derivatives

- Assuring smooth revenues and compensating for the loss of demand: for instance a utilities company might want to hedge the decreased revenues due to a warm winter.
- Covering excess costs: for instance, industrial consumers of energy might want to hedge the cost of purchased electricity associated with peak load demand.
- Reimbursing lost opportunity costs: firms operating in weather dependant sectors might want to hedge the risks of stock-outs.
- Stimulating sales: firms (particularly in the travel sector) might use weather derivatives to back up their “money back guarantee” clauses within their customer satisfaction policies.
- Diversifying investment portfolios: financial investors – who are not directly exposed to weather related risks – might want to take advantage of the low correlation between returns associated with weather and returns from other asset classes.

Types of weather derivatives

- Floors grant downside protection when the underlying weather variable falls below the established threshold (whereas the upside remains unconstrained).
- Cap derivatives provide compensation if the underlying weather variable goes above a certain level.
- Collars and swaps usually involve parties having opposite interests exchanging their respective risks (one party buys a floor and sells a cap).
- Futures (most common type of publicly traded weather derivative at the Chicago Mercantile Exchange) incorporate the commitment to deliver or accept a commodity (e.g., temperature or other weather index) at a certain time and at a certain price. Variations above or below that price trigger a cash settlement between the buyer and seller.

Weather derivatives vs. Insurance Contracts

- Weather derivative are (mostly) intended as risk-shifting instruments
- Sounds familiar? YES
- Debate around relationship between weather derivatives and insurance contracts
- Derivatives rapidly turned from a resource (alternative risk management) into a threat (potential and/or actual competition with traditional insurance policies).
- The NAIC battle: in 2003 the National Association of Insurance Commissioners (NAIC) released a draft white paper arguing that weather derivatives were “disguised” insurance contracts and recommending a legislative intervention on authorization and monitoring of their issuance.
- Unfair competition between heavily regulated insurance companies and virtually unregulated players.
- If weather derivatives were found to be disguised insurance policies, only licensed insurance brokers would have been authorized to sell such products.
- Unsuccessful outcome of the 2003 NAIC battle: paper was never released, immediate reactions by WRMA and International Swaps and Derivatives Association (ISDA).
- Despite the similarities between weather derivatives and weather-risk insurances, functional equivalence must be distinguished from legal equivalence.
- Presumably the discussions on the different “legal nature” of weather derivatives – at least in the USA – have come to an end.

The insured party:

- must have an insurable risk with respect to a fortuitous event that is capable of a financial estimate;
- must “transfer” its “risk of loss” to the insurance company;
- pays a “premium” to the company for assuming the risk;
- in order to collect the indemnity, must provide evidence of an actual loss and the payment is limited to an amount equal to the lesser of the insured’s actual loss or the maximum amount of loss covered.

The insurance company:

- assumes the risk as part of a larger program for managing loss by holding a large pool of contracts covering similar risks (risk distribution or risk spreading).

None of the statements above apply to weather derivatives

“The subject matter of a weather option is the specified weather component and it is a conceptual impossibility for anyone to have an economic interest in the elements”

WRMA’s answer to NAIC draft white paper 2004

What's going on?

- Unenforceability issues in purely speculative environments (gambling exception);
- “Commodification” of weather indexes. Consolidation of weather derivatives’ treatment as “commodity derivatives” (trying to address overlap with insurance products and gambling issues);
- Similar market structures.
Primary market: secondary market = insurance: reinsurance
- Existence of regulatory constraints. In certain jurisdictions prohibition for insurers or reinsurers to “sell” or issue weather derivatives (as they are not insurances);
- Disclosure/pre-contractual information
- Pricing models (e.g., market based, actuarial) impact of climate change
- Different tax (over premiums/price) and accounting treatments

What's ahead for insurance companies?

- TRADING. Insurance companies continue using weather derivatives as alternative risk transfer tools/reinsurance products (a well-established and mature market);
- ISSUANCE. Insurance companies start (or strengthen) the issuance/sale of customized weather derivatives (requires regulatory changes in certain jurisdictions and/or intra-group separation);
- CONVERGENCE: a so-called “weather derivative component” incorporated into traditional insurance products (affecting the economics or the dynamics of the contract).

Probably new opportunities for non-catastrophic risk coverage products.

Changement Climatique et Assurance

5

Arthur Charpentier (1999), Professeur UQAM & Université de Rennes 1
 Anne Eyraud-Loisel, Maître de Conférences ISFA
 Alexis Hannart (1999), Chercheur CNRS
 Julien Tomas, SCOR & ISFA

Impact du changement climatique

Munich Re (2014) a montré, au regard des données des 50 dernières années que la fréquence des catastrophes météorologiques et climatiques ne cesse d'augmenter dans le monde. Et les pertes assurées également, en grande partie à cause du développement de l'assurance. Selon Mills (2009), 16 % des pertes liées aux conditions météorologiques étaient assurées dans les années 1980, pour atteindre 37,6 % en moyenne au cours des dix dernières années. La croissance économique, l'augmentation des richesses, l'industrialisation de zones vulnérables et la concentration des populations expliquent une grande partie de l'augmentation, comme le note Botzen et al. (2010).

Les liens entre cette augmentation de la fréquence et de la gravité de ces catastrophes (allant des vagues de chaleur aux épisodes froids, des sécheresses aux pluies diluviales, ou encore aux tempêtes et ouragans) et le changement climatique sont encore mal connus. Comme le note IPCC (2013), de faibles changements sur la distribution moyenne des températures peuvent avoir de gros impacts sur les quantiles élevés. Vecchi & Knutson (2011) propose par exemple une étude passionnante sur la prévision des phénomènes cycloniques tropicaux en Amérique du Nord. Mais comme le souligne Changnon *et al.* (2000), la hausse exponentielle des coûts est très largement expliquée par des facteurs sociaux. Et ces catastrophes posent de réels défis aux assureurs de par leur caractère largement imprévisible.

Au cours des 20 dernières années, le coût global des aléas naturels en France s'élève à 34 milliards d'euros, et ce pour les seuls assureurs. Selon un chiffrage décrit dans FFSA (2009), la charge totale pour les 20 prochaines années pourrait être le double (en euros constants), la moitié de cette

Figure 1 : CATASTROPHES MÉTÉOROLOGIQUES ET CLIMATIQUES DANS LE MONDE, MODIFIÉ DE MUNICH RE (2014).

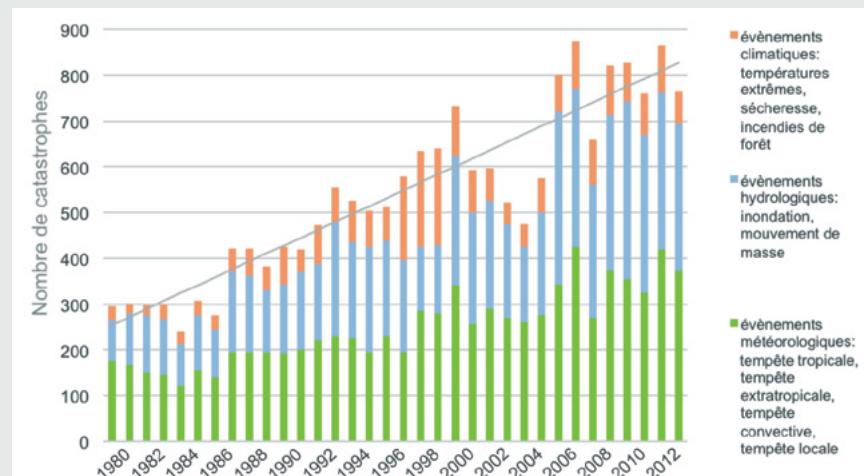


Figure 2 : MONTANTS DES SINISTRES CAUSÉS PAR LES CATASTROPHES MÉTÉOROLOGIQUES ET CLIMATIQUES DANS LE MONDE, MODIFIÉ DE MUNICH RE (2014).

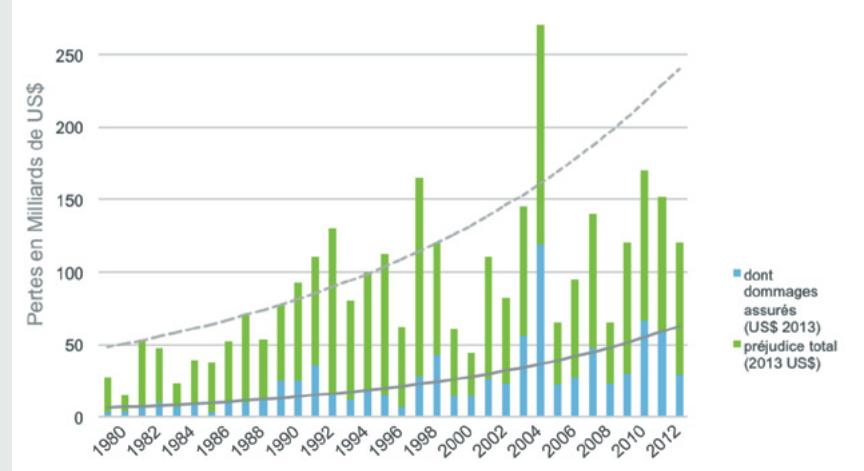
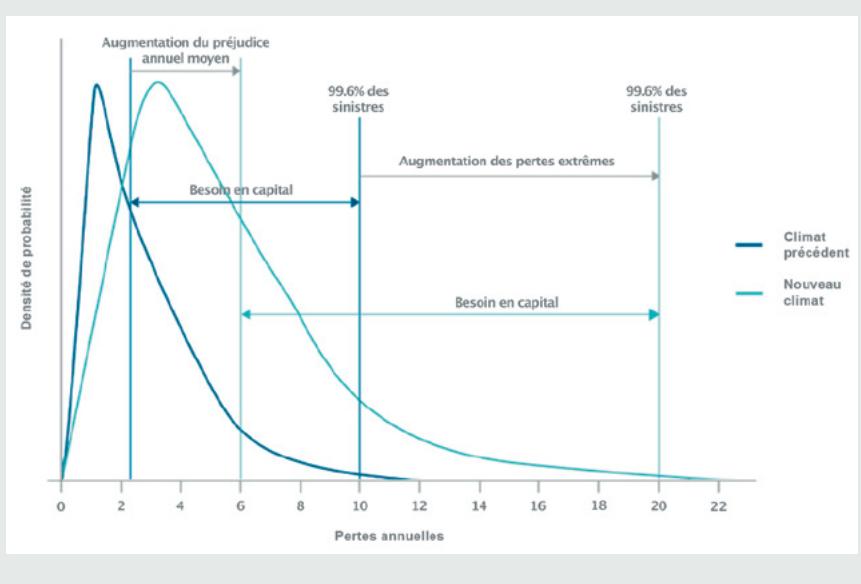


Figure 3 : COUVERTURE D'ASSURANCE DES CATASTROPHES NATURELLES EN EUROPE, MODIFIÉ DE MILLS (2009).

	Allémande	Autriche	Belgique	Danemark	Espagne	Finlande	France	Grèce	Italie	Norvège	PaysBas	Pologne	Portugal	Suede	Suisse	Turquie	Tchéquie	Royaume-Uni
tempête	O	O	C ¹	O	P	O	C	S	N	P	O	O	O	O	O	O	O	O
cyclone	O	O	C ¹	O	P	O	C	S	N	P	O	N	O	O	O	C	O	O
inondation	S	O	C ¹	N	P	O	C	S	O	P	N	O	O	O	O	C	O	O
grêle	O	O	O	O	O	O	O	S	O	S	O	O	C ²	O	C	S	O	O
glissement de terrain	S	O	C ¹	O	S	O	C	S	O	P	S	O	O	O	C	O	O	O
neige	S	O	O	O	O	O	O	S	O	N	O	O	N	O	C	O	O	O
gel	O	O	O	O	O	N	O	S	O	O	O	O	O	O	O	N	O	O
avalanche	S	O	N	N	O	O	C	N	O	P	N	O	N	O	C	N	O	N
sécheresse	N	O	N	N	S	N	C	N	N	N	N	N	N	O	N	N	S	N
affaissement de terrain	S	O	C	N	S	N	C	S	N	N	N	O	O	O	O	N	O	O
séisme	O	N	C ¹		P		C	O	N	P	N	O	O	C	C	O	O	O
incendie de forêt	O	S	N	O	S	O	S	S	S	N	O	O	O	O	N	S	N	N
éruption volcanique	O	N	N		P		C	O	N	P	N	O	O			O	N	
foudre	O	O	O		O	O	O	O	O	O	O			O	O	O	O	O

Figure 4 : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE CAPITAL RÉGLEMENTAIRE, MODIFIÉ DE ABI (2005).



charge étant expliquée par des facteurs liés aux évolutions socio-économiques (augmentation de la somme assurée en grande partie, mais aussi migration vers des zones à risque), et la moitié étant expliquée par des facteurs liés au changement climatique.

Mais au-delà de ces catastrophes, le changement climatique impacte tous les secteurs de l'assurance. L'augmentation des précipitations en Europe (non seulement en moyenne, mais aussi avec une hausse des crues éclair) va affecter les infrastructures souterraines, ou situées à proximité des cours d'eau. Les propriétés situées sur les côtes sont menacées par l'élévation du niveau des mers. Les risques liés aux inondations constituent une catégorie de catastrophe très impactée par le changement climatique : selon la CCR, les plus fortes évolutions attendues des sinistres catastrophes des 30 prochaines années seront relatives à la submersion marine (+60 %) et aux inondations par débordement et ruissellement (+20 %). Un autre risque est celui lié aux sécheresses, qui endommage aussi les bâtiments par affaissement des sols. La canicule de l'été 2003 en France a causé une hausse des réclamations en assurance construction de l'ordre de 20 %. En assurance vie, la canicule de 2003, exceptionnelle par sa durée, a là aussi montré l'impact potentiel du changement climatique sur les personnes les plus vulnérables (enfants très jeunes, personnes âgées, et malades chroniques). L'assurance agricole est également impactée par les sécheresses et les inondations. Les sécheresses augmentent aussi le risque d'incendie, pouvant détruire forêts et récoltes. En assurance automobile, les conditions climatiques restent une explication à bon nombre de sinistres. Le nombre d'accidents augmente fortement lors des journées (très) chaudes. La grêle est l'événement climatique qui cause le plus de dommages directs en assurance automobile.

L'assurabilité des risques climatiques

Godard (1997), reprenant des idées développées par Ewald (1986) a montré que le développement de la société industrielle s'était traduit par une augmentation de la demande de protection. Cette protection peut être offerte par des Etats, mais aussi par des compagnies d'assurance, si le risque le permet. Plusieurs critères sont nécessaires pour que le risque soit « assurable ».

Légalement, un contrat d'assurance ne peut être valide que si l'occurrence des sinistres satisfait un caractère aléatoire. En France, l'article 1 de la loi

du 13 Juillet 1982 relative à l'indemnisation des biens assurés suite à une catastrophe naturelle mentionne que « *sont considérés comme les effets des catastrophes naturelles, au sens de la présente loi, les dommages matériels directs ayant eu pour cause déterminante l'intensité anormale d'un agent naturel [...]* ». Est-il anormal d'avoir des inondations récurrentes dans des zones potentiellement inondables comme par exemple l'ancien lit d'une rivière ? D'un point de vue actuariel, la perte maximale ne doit pas être trop importante. Les tempêtes de 1999 (non couvertes par le mécanisme dit *Cat Nat*) ont ainsi causé des dommages supérieurs à la « *perte maximale possible* » calculée par le secteur de l'assurance. Ces risques doivent aussi être mutualisables. Pour que le mécanisme d'assurance fonctionne, comme le rappelle Ewald (1986), « *le risque est collectif [...] ce n'est en effet que sur l'étendue d'une population qu'un risque devient calculable. Le travail d'un assureur est précisément de constituer cette population par sélection et diversification des risques. L'assurance [...] passe par la socialisation des risques* ». Quand un même événement engendre 3 millions de demandes d'indemnisation (comme les tempêtes survenues en décembre 1999 en France), on peut difficilement parler de mutualisation des risques, « *the contribution of the many to the misfortune of the few* » (pour reprendre la devise du Lloyd's). Mais plus important, il faut qu'un marché de l'assurance existe, avec des assureurs prêts à offrir une couverture, et des assurés prêts à souscrire de tels contrats.

Les solutions d'assurance en Europe

Les assureurs se sont efforcés d'offrir une couverture dans la mesure du possible. Ces solutions font souvent intervenir les compagnies d'assurance. Il n'y a généralement pas d'intervention de l'Etat, et les couvertures pour ces risques sont facultatives. Dans ce cas, le taux de pénétration¹ dépend de la perception du risque par les citoyens. Dans d'autres pays, au contraire, les assureurs n'interviennent pas, et c'est l'Etat qui prend à sa charge les sinistres (à partir du budget ou d'un fonds spécifique alimenté par une taxe sur les contrats d'assurance). Dans le cas de la France, il existe un mécanisme mixte dit *Cat Nat*, basé sur un mélange d'assurance obligatoire et d'intervention publique. Enfin, la couverture doit être proposée par les assureurs, mais la souscription de tels contrats est facultative. La Figure 3 tente de résumer le patchwork européen.

Ce subtil équilibre entre assureurs privés et Etat évolue dans le temps. Car tous ont peur

des conséquences financières des catastrophes. L'Etat qui avait offert sa caution – par exemple en tant qu'« assureur en dernier ressort » – se voit contraint de faire figurer cet engagement dans son budget. Et les assureurs savent que le changement climatique va se traduire par des exigences en terme de capital, comme le montre la Figure 4.

L'articulation entre le marché de l'assurance et l'Etat peut se voir comme un effet de subvention du marché de l'assurance, pour couvrir les risques climatiques, comme le note Stern (2006).

Le rôle des assureurs

Le changement climatique engendre davantage d'incertitude pour les assureurs, et il n'est alors pas surprenant de les voir s'impliquer pour tenter de proposer des solutions. On peut ainsi souligner les actions collaboratives sur Climate Wise Group, qui tente d'encourager la prévention. L'exemple des inondations survenues en 2007 au Royaume Uni est intéressant à ce titre. Comme le note ABI (2007), l'évaluation et la gestion du risque d'inondation ont montré de nombreuses faiblesses. Mills (2009) rapporte que l'industrie de l'assurance britannique s'est alors engagée dans le financement de travaux de recherche sur les inondations en milieu urbain. Les assureurs britanniques (mais le même phénomène a été observé en France) ont alors cherché à être impliqués dans les processus d'aménagement du territoire, de planification d'utilisation des terres, et la conception et la mise en œuvre des codes de construction.

Plusieurs travaux soulignent que les gains engendrés par les mesures de précaution sont souvent colossaux par rapport à leur coût. En 2004, la Banque Mondiale avait ainsi calculé que pour toutes les catastrophes naturelles survenues dans les années 1990, 40 milliards d'€ investis dans des mesures de prévention auraient permis de réduire le coût total de 280 milliards d'€. On retrouve le même ordre de grandeur lorsque ABI (2007) déclare que chaque livre sterling dépensée dans des mesures de prévention permettrait d'économiser 6 livres sterling en coûts de réparation, lors d'inondations. Un groupe de travail sur l'économie de l'adaptation, impulsé en particulier par Swiss Re et McKinsey, a vu le jour ces dernières années avec pour but de systématiser ce type d'analyse en vue d'optimiser les choix d'investissement d'adaptation (ECA 2010). Par exemple, une des multiples études de cas issue de ces travaux, portant sur la côte

¹ - Pourcentage du nombre d'assurés réel rapporté au nombre d'assurés potentiel

du Golfe du Mexique aux Etats-Unis, montre qu'investir 50 milliards de \$ dans les vingt prochaines années, principalement dans le remblayage des plages et les modifications du code de construction, permettrait une réduction de 135 milliards de \$ dans le coût des catastrophes futures.

Finalement on peut saluer l'apparition dans les dernières années du concept de « pertes et dommages » dans les négociations internationales ayant lieu dans le cadre de la convention cadre de l'ONU sur le changement climatique. Ce concept a abouti à la création lors de la COP19 de 2013, du « mécanisme international de Varsovie pour les pertes et dommages» (UNFCCC 2013) repris lors de la COP21 de 2015, dont le fonctionnement reste encore largement à préciser mais vise à incorporer plusieurs aspects: (i) réduction et transfert des risques liés aux catastrophes climatiques, (ii) adaptation au change-

ment climatique, (iii) considérations politiques telles que le dédommagement des pays les plus vulnérables par les pays développés, principaux responsables du problème (Surminski and Lopez 2014). Le rôle des assureurs dans ce dispositif international devra être précisé mais il est clair que son existence fournit d'emblée un cadre adapté permettant aux assureurs d'aborder l'ensemble des questions présentées ci-dessus en lien avec les multiples secteurs concernés (par exemple par le biais d'entités telles que *Munich climate insurance initiative*). Parmi les multiples points restant à préciser, il sera nécessaire de pouvoir statuer sur la nature anthropogénique ou non des catastrophes climatiques couvertes par le dispositif, afin de déterminer en conséquence le bien-fondé et le montant des indemnités. Pour cette raison, cette question de l'attribution causale des événements climatiques fait actuellement l'objet de nombreuses recherches en sciences du climat (James et al. 2014). ■

Bibliographie

- ABI (2005). *Financial risks of climate change. Technical report, Association of British Insurers.*
- ABI (2007). *Summer floods 2007 : Learning the lessons. Technical report, Association of British Insurers.*
- Botzen, W. J. W., van den Bergh, J. C. J. M., and Bouwer, L. M. (2010). *Climate change and increased risk for the insurance sector: a global perspective and an assessment for the Netherlands. Natural Hazards*, **52**(3), 577–598.
- Ewald, F. (1986). L'Etat providence. Grasset
- FFSA (2009). Synthèse de l'étude relative à l'impact du changement climatique et de l'aménagement du territoire sur la survenance d'événements naturels en France. FFSA Technical report.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis.*
- Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Mills (2009). *From Risk to Opportunity: Insurer Responses to Climate Change* http://www.climate-insurance.org/upload/pdf/Mills2008_risk-to-opportunity.pdf
- Munich Re (2014). *Loss events worldwide 1980 - 2013., Geo risks research. Munich Reinsurance Group.* <http://www.munichre.com/en/reinsurance/business/non-life/natcatservice/index.html>
- Stern, N. (2006). *Stern review : the economics of climate change.* Cambridge University Press.
- Vecchi, G. A. & Knutson, T. R. (2011). *Estimating annual numbers of Atlantic hurricanes missing from the hurdat database (1878–1965) using ship track density. Journal of Climate*, **24**(6), 1736–1746.
- MCII. (2012). *Munich climate insurance initiative.* <http://www.climate-insurance.org/>
- UNFCCC. (2013). *Decision 2/CP.19 Warsaw international mechanism for loss and damage associated with climate change impacts.* Retrieved February 10, 2014, from <http://unfccc.int/resource/docs/2013/cop19/eng/10a01.pdf>
- Surminski S., A. Lopez (2014): *Concept of loss and damage of climate change – a new challenge for climate decision-making? A climate science perspective. Climate and Development*
- James R., Otto F., Parker H., Boyd E., Cornforth R., Mitchell D., Allen M. (2014) *Characterizing loss and damage from climate change. Nat Clim Change* 4:938–939

Cadre international de lutte contre le changement climatique

La France participe aux négociations internationales sur le climat qui ont lieu à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Elle a notamment accueilli en 2015 la 21^{ème} Conférence des Parties (COP21), qui s'est soldée par l'adoption de l'Accord de Paris. Cet accord universel et ambitieux fournit le futur cadre international d'action contre les changements climatiques.

COP22 : la mise en œuvre de l'Accord de Paris

Entrée en vigueur de l'Accord de Paris

Le 12 décembre 2015 à la COP21, l'Accord de Paris, premier accord universel sur le climat, a été adopté. C'est un succès sans précédent : pour la première fois dans l'histoire des négociations internationales, 195 pays ont su trouver un consensus universel pour limiter le dérèglement climatique dans les prochaines décennies. L'adoption de l'Accord de Paris n'aurait pu être possible sans la formidable mobilisation des États et de la société civile.

Le 4 novembre 2016, une nouvelle étape décisive a été franchie, moins d'un an après la COP21 : grâce aux efforts de la présidence française de la COP21, le double seuil nécessaire pour l'entrée en vigueur de l'Accord -55 pays couvrant au moins 55 % des émissions de gaz à effet de serre (GES)- a été officiellement dépassé. C'est une première mondiale pour un traité international. À l'image de la France, premier grand pays industrialisé à le faire dès le 15 juin, près de 80 pays, dont la Chine, les États-Unis, l'Inde et le Canada, ont ratifié dans leurs instances nationales cet Accord, ouvrant la voie à un nouveau modèle de développement.

La COP22

La 22^{ème} session de la Conférence des Parties de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (COP22) s'est tenue à Marrakech du 7 au 18 novembre 2016. Compte tenu de l'entrée en vigueur de l'Accord de Paris, les travaux se sont accélérés pour permettre la finalisation de ses règles d'application d'ici 2018, avec deux ans d'avance par rapport au calendrier initialement envisagé.

Les engagements des États se sont également renforcés : la France s'est engagée à atteindre la neutralité carbone en 2050 ; plusieurs pays -Allemagne, États-Unis, Canada et Mexique- ont présenté des stratégies de réduction de leurs émissions à l'horizon 2050.

Le soutien aux pays en voie de développement pour la réalisation de leur contribution s'est renforcé : la France a rejoint le Partenariat pour la mise en œuvre des contributions nationales (NDC Partnership) et l'Agence française de développement a annoncé la mise en place d'une facilité d'appui pour un montant de 30 millions d'euros. La feuille de route qui confirme la mobilisation de 100 milliards de dollars par an pour le climat par les pays développés a permis de renforcer la confiance.

Le débat porte désormais sur les outils de gestion de l'ensemble des flux financiers, publics et privés, à orienter vers l'économie bas-carbone. Le travail se poursuivra pour faciliter l'accès aux financements pour tous les pays, notamment les pays africains et les plus vulnérables.

(...)

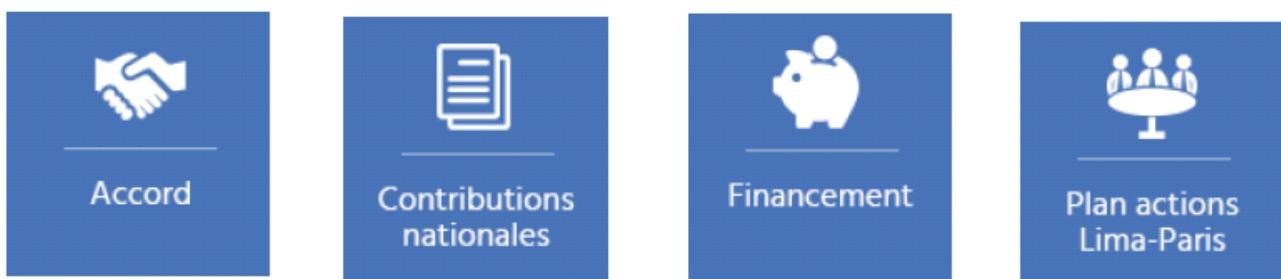
Retour sur la COP21

En 2015 s'est tenue la COP21 qui, sous la présidence française, a abouti à un accord universel et ambitieux posant les bases d'un nouveau régime climatique dont l'objectif est de contenir la hausse des températures bien en deçà de 2° C et de s'efforcer de la limiter à 1,5° C.

L'accord international devait d'abord traiter, de façon équilibrée, de l'atténuation -c'est-à-dire des efforts de baisse des émissions de gaz à effet de serre- et de l'adaptation des sociétés aux dérèglements climatiques déjà existants.

L'objectif de la COP21 était de bâtir une « alliance de Paris pour le climat » qui permette de contenir l'élévation de la température moyenne de la planète en dessous de 2° C d'ici 2100 et d'adapter nos sociétés aux dérèglements existants.

Cette alliance se décline en 4 volets :



1. La négociation d'un accord universel, conformément au mandat de Durban, qui établisse des règles et des mécanismes capables de relever progressivement l'ambition pour respecter la limite des 2° C.
2. La présentation par tous les pays de leurs contributions nationales, avant la COP21, afin de créer un effet d'entraînement et de démontrer que tous les États avancent, en fonction de leurs réalités nationales, dans la même direction.
3. Le volet financier permettra de soutenir les pays en développement et de financer la transition vers des économies bas-carbone et résilientes, avant et après 2020.
4. Le renforcement des engagements des acteurs de la société civile et non-étatiques et des initiatives multiparténariales de l'Agenda des solutions ou Plan d'actions Lima-Paris, afin d'associer tous les acteurs et d'entamer des actions concrètes sans attendre l'entrée en vigueur du futur accord en 2020.

Contributions nationales

En marge de la COP21, les pays ont été invités à publier une contribution présentant leurs efforts nationaux. Cet exercice constitue une grande nouveauté dans le cadre des négociations climatiques internationales. Certains États y ont inclus des mesures d'adaptation ou des demandes de financement.

La France s'est engagée à aider les pays en difficulté dans la préparation de leurs contributions, afin que chacun puisse présenter, en fonction de sa situation, une contribution nationale participant à la lutte universelle contre le dérèglement du climat. 147 pays avaient publié leur contribution nationale au 1^{er} octobre 2015.

Différentes analyses ont évalué l'impact global des contributions agrégées.

On note un impact significatif des contributions par rapport à une trajectoire de poursuite des politiques actuelles : le rapport du PNUE présente les contributions comme cohérentes avec un réchauffement probablement inférieur à 3,2° C d'ici la fin du siècle, voire inférieur à 3° C si l'ensemble des objectifs conditionnels des contributions sont respectés.

Financements et Fonds vert

Autre objectif essentiel visé à Paris : la mobilisation de 100 milliards de dollars par an par les pays développés, de source publique et privée, à partir de 2020. Cet engagement, formulé lors de la conférence sur le climat de Copenhague en 2009, doit permettre aux pays en développement de lutter contre le dérèglement climatique tout en favorisant un développement durable et juste. Une partie de ces financements transitera par le Fonds vert pour le climat, dont la première capitalisation a atteint 10,2 milliards de dollars, dont plus d'un milliard abondé par la France. Plus largement, la conférence de Paris a permis d'adresser aux acteurs économiques et financiers les signaux nécessaires à la réorientation de leurs investissements, afin d'engager la transition vers des économies bas carbone.

Le Fonds vert a été créé lors de la COP16 à Cancun en 2010 afin d'aider les pays en développement à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et à s'adapter au changement climatique, ainsi que d'encourager des trajectoires de développement bas-carbone. Il est composé d'un Conseil de 24 membres nommés pour un mandat de trois ans renouvelable. Deux coprésidents sont élus parmi les membres pour une période d'un an.

(...)

Effective institutions against climate change

Abstract

In environmental matters, the free riding generated by the lack of collective action is aggravated by concerns about leakages and by the desire to receive compensation in future negotiations. The dominant “pledge-and-review” approach to mitigation will deliver appealing promises and renewed victory statements, only to prolong the waiting game. The climate change global commons problem will be solved only through coherent carbon pricing. With political economy reasons in mind, we favor an international cap-and-trade agreement in which equity and acceptability considerations would be treated through the allocation of emission permits across countries, and in which each country could sovereignly choose the allocation of its efforts. We suggest an enforcement scheme based on financial and trade penalties to induce all countries to participate and comply with the agreement.

1. Climate change is a global commons problem

Before discussing efficient institutions against climate change, let us restate the obvious.

1.1. We must put an end to the waiting game

1.2. Two “good” reasons for inaction

Most benefits of mitigation are *global* and *distant*, while costs are local and immediate. The geographic and temporal dimensions of the climate problem account for the current inaction.

1.3. We must accept the fact that climate mitigation is costly in the short run

2. A uniform carbon price is necessary

2.1. Economic approach vs. command-and-control

As we have discussed, the core of the climate externality problem is that economic agents do not internalize the damages that they impose on other economic agents when they emit GHGs. Two economic approaches have been proposed to solve the free-rider problem: A liability system, and a Pigovian price mechanism. Because of the diffuse and intertemporal nature of the pollution, it is not possible to link current individual emissions to future individual damages. Therefore, a liability system is unlikely to fix the problem. Even if such a link could be established, one would need an international agreement to prevent free-riding.

The alternative solution consists in inducing economic agents to internalize the negative externalities that they impose when they emit CO₂ (“*polluter pays principle*”). This is done by pricing it at a level corresponding to the present value of the marginal damage associated to the emission, and by forcing all emitters to pay this price. Because the GHGs generate the same marginal damage regardless of the identity of the emitter and of the nature and location of the activity that generated the emission, all tons of CO₂ should be priced equally. By imposing the same price to all economic agents around the world, one makes sure that all actions to abate emissions that cost less than that price will be implemented. This least-cost approach guarantees that the reduction of emissions that is necessary to attain the global concentration objective will be made at the minimum global cost. By contrast with this economic approach, “command-and-control” approaches (source-specific emissions limits, standards and technological requirements, uniform

reductions, subsidies/taxes that are not based on actual pollution, vintage-differentiated regulations, industrial policy....) usually imply wide discrepancies in the implicit price of carbon put on different emissions. This has been shown empirically to lead to substantial increases in the cost of environmental policies. Intuitively, if agent A faces a price of 30 \$/tCO₂ whereas agent B faces a price of 10 \$/tCO₂, agent A will invest in a pollution-abating project that costs 29 \$/tCO₂ whereas agent B will not invest in a pollution-abating project that costs 11 \$/tCO₂. This is clearly a misallocation of mitigation efforts.

Western countries have made some attempts at reducing GHG emissions, notably through direct subsidies of green technologies: generous feed-in electricity tariffs for solar and wind energy, bonusmalus systems favoring low-emission cars, subsidies to the biofuel industry, etc. For each green policy one can estimate its implicit carbon price, i.e., the social cost of the policy per ton of CO₂ saved. A recent OECD study (OECD 2013) showed that these implicit prices vary widely across countries, and also across sectors within each country. In the electricity sector, OECD estimates range from less than 0 to 800 €. In the road transportation sector, the implicit carbon price can be as large as 1,000 €, in particular for biofuels. The high heterogeneity of observed implicit carbon prices is a clear demonstration of the inefficiency of this command-and-control approach. Similarly, any global agreement that would not include all world regions in the climate coalition will exhibit the same inefficiency by setting a zero carbon price in non-participating countries.

2.2. Carbon pricing and inequality

Wealth inequalities at the domestic and international levels are often invoked to dismiss uniform carbon pricing. The problems raised by wealth inequalities around the world are ubiquitous in analyses of climate change, as discussed by Posner and Weisbach (2010). On the one hand, if poor people emit proportionally more CO₂, carbon pricing will worsen inequality starting today (Cremer et al 2003). On the other hand, poor people may also be more vulnerable to climate change, so that reducing emissions will reduce inequalities in the future. However, because international and national credit markets are imperfect, poor people may face large discount rates, making them short-termist and focused on their immediate survival to the detriment of the long-term climate risk.

International wealth inequalities raise the question of the allocation of the burden of the global climate policy. For example, the principle of common but differentiated responsibility is redistributive because wealthier countries are also typically those which contributed more to the accumulation of GHG in the atmosphere. This is certainly an important issue, but its solution should not be found in a Kyoto- Protocol-like manipulation of the law of a single carbon price. The non-Annex I parties of the Kyoto Treaty had no binding obligation and their citizens faced no carbon price. This derailed the ratification of the protocol by the U.S. Senate. The Clean Development Mechanism designed in Kyoto was aimed at alleviating the imperfect coverage problem; it met with a limited success and anyway was not a satisfactory approach due to yet another leakage problem. For example, Annex I countries' paying to protect a forest in a less developed country increases the price of whatever the deforestation would have allowed to sell (beef, soy, palm or wood) and encourages deforestation elsewhere. The CDM mechanism also created the perverse incentive to build, or maintain in operation longer than planned, polluting plants in order to afterward claim CO₂ credits for their reduction.

Using price distortions to reduce inequalities is a second-best solution. Policies around the world that manipulate agricultural prices to support farmers' incomes end up generating surpluses and highly inefficient productions. The same hazard affects climate policies if one lets redistributive considerations influence carbon price signals to economic agents. At the national level, one should instead use the income tax system to redistribute income in a transparent way when this is possible. At the international level, one could use the revenues generated by carbon pricing to subsidize low-

income countries. Given that we emit today approximately 50 GtCO₂, a carbon tax at 30 \$/tCO₂ would generate a revenue of \$ 1,500 bn per year. The same revenue would be obtained through the auctioning of carbon permits in the cap-and-trade mechanism. If wisely redistributed, this large global revenue must make all countries better off. One could alternatively alleviate international inequalities by offering free permits to countries from the South while preserving the benefits of a single carbon price around the world.

2.3. Computing the right price signals

Most infrastructure and R&D investments to reduce GHG emissions have in common that they are irreversible (sunk) costs and yield a delayed reduction of emissions over an extended time span. Energy retrofit programs for residential building reduce emissions for decades, hydroelectric power plans last for centuries. As a consequence, what matters to trigger an investment in these sectors is not the current price of CO₂, but the expectation of high prices in the future. The right price signal is thus given by an entire path of carbon prices from today to potentially the next century. There are strong arguments for recommending a carbon price schedule that is increasing with time. First, if the damage function is convex, our inability to stabilize the concentration of CO₂ within the next 100 years would imply that the marginal climate damages of each ton of CO₂ will rise in the future. However, if we believe that the climate policy will be strong enough to reduce concentration after a peak, the carbon price path should be hump-shaped. Second, if we impose a cap on GHGs in the atmosphere that we should never exceed, the determination of the optimal emission path under this maximum quantity constraint is equivalent to the problem of the optimal extraction path of a non-renewable resource. From Hotelling's rule, the carbon price should then increase at the risk free rate (Chakravorty et al 2006). Any climate policy must also address the various commitment and credibility problems associated with the fixation of the long-term carbon price schedule. This challenge is reinforced by the current uncertainties affecting the marginal damage function, the optimal GHG concentration target, and the speed at which green R&D will produce mature low-carbon energy technologies. This question is addressed in Section 3.2.

Although the fifth report of the IPCC (IPCC 2014) does not contain much information about it, there is now a sizeable literature about the social cost of carbon (SCC). In order to send the right signal to economic agents, the carbon price must be equal to the present value of the marginal damages generated by the emission of one more ton of CO₂. Estimating the SCC is complex because most of these damages will materialize only in the distant future and are uncertain. The time and risk dimensions raise the problem of the choice of the discount rate. If future climate damages were statistically independent of world GDP growth, a relatively low real discount rate of 1% should be used to discount these damages to the present (Weitzman 1998 and 2001, Gollier 2012). However, most standard integrated assessment models such as the DICE model are such that climate damages are positively linked to consumption growth (Dietz et al 2015). Indeed, a stronger consumption growth raises emissions in the business-as-usual scenario. If the damage function is convex, the increased concentration of GHGs in the atmosphere implies a larger marginal damage, hence the positive correlation. Using technical terms from finance theory, this implies that the climate consumption-based CAPM beta is positive, and that the relevant climate discount rate is closer to the mean return of equity than to the risk-free rate (Gollier 2014).

Over the last two decades, governments have commissioned estimates of the SCC. In France, the Commission Quinet (Quinet 2009) used a real discount rate of 4%, and recommended a price of carbon (/tCO₂) at 32 € in 2010, rising to 100 € in 2030 and between 150 € and 350 € in 2050. In the United States, the US Interagency Working Group (2013) proposed three different discount rates (2.5%, 3% and 5%) to estimate the SCC. Using a 3% real discount rate, their estimation of the SCC is \$32 in 2010, rising to \$52 and \$71 respectively in 2030 and 2050.

2.4. Two economic instruments

There are two alternative strategies for organizing an efficient, uniform pricing of CO₂ emissions: carbon tax and cap-and-trade. Under the first strategy, a uniform tax on all emissions around the world would be agreed upon and collected by individual countries. The carbon price would then be equal to this tax. Under the alternative, cap-and-trade strategy, a multilateral organization would either auction off or allocate a predetermined number (cap) of tradable emission permits to the different countries or regions. A market for these permits would ensure that a single carbon price emerges from mutually advantageous trades of permits around the world. The cap-and-trade solution is simple and straightforward to implement as long as emissions are verifiable and penalties can be imposed for uncovered emissions. The implementation of credible and transparent mechanisms to measure emissions is of course a prerequisite to any efficient approach (tax or cap-and-trade) to climate change mitigation, or for that matter to any policy.

2.5. Failed or unsatisfactory attempts at pushing the economic approach

The cap-and-trade system was adopted, albeit with a failed design, by the Kyoto Protocol. The Kyoto Protocol of 1997 extended the 1992 UNFCCC that committed participating countries to reduce their emissions of GHG. The main real attempt to implement a carbon pricing mechanism within the Kyoto agreement emerged in Europe, with the EU Emission Trading Scheme (EU ETS). In its first trading period of 2005-2007 (“phase 1”), the system was established with a number of allowances based on the estimated needs; its design was flawed in many respects, and in any case far inferior to that which had been adopted in the US in 1990 to reduce SO₂ emissions by half. In the second trading period of 2008-2012, the number of allowances was reduced by 12% in order to reduce the emissions of the industrial and electricity sectors of the Union. This crackdown was offset by the possibility given to the capped entities to use Kyoto offsets (mostly from the Clean Development Mechanism described in 2.2) for their compliance. In addition, the deep economic crisis that hit the region during the period reduced the need of permits. Moreover, large subsidies in the renewable energy sector implemented independently in most countries of the Union reduced further the demand for permits. In the absence of any countervailing reaction on the supply of permits, the carbon price went down from a peak of 30 €/tCO₂ to around 5-7 €/tCO₂ today. This recent price level is without any doubt way below the social cost of carbon. This price signal therefore has a limited impact on emissions. It even let electricity producers to substitute gas by coal, which emits 100% more carbon (not counting dirty micro particles). An additional problem came from the fact that the ETS scheme covered only a fraction of the emissions of the region. Many specific emitters, e.g. the transport and building sectors, faced a zero carbon price. During the third trading period (2013-2020), the EU-wide cap on emissions is reduced by 1.74% each year, and a progressive shift towards auctioning of allowance in substitution of cost-free allocation is implemented.

Over the last three decades, Europeans have sometimes believed that their (limited) commitment to reduce their emissions would motivate other countries to imitate their proactive behavior. That hope never materialized.

Other cap-and-trade mechanisms have been implemented since Kyoto. A mixture of collateral damages (we mentioned the emission of SO₂, a local pollutant, jointly with that of CO₂ by coal plants), the direct self-impact of CO₂ emissions for large countries like China, and the desire to placate domestic opinion and avoid international pressure all lead to *some* carbon control.

Some countries have implemented a carbon tax. The most aggressive country is Sweden, in which a carbon tax of approximately 100 €/tCO₂ has been implemented in 1991. France has fixed its own carbon tax at 14.5 €/tCO₂. Outside Europe, some modest carbon tax exists in Japan and Mexico for

example. Except for the Swedish case, these attempts put a carbon price that is far too low compared to the SCC.

3. Carbon tax or cap-and-trade?

Given our concern that the pledge and review approach currently favored by policymakers might prevail at the COP 21, it may be premature to enter the intricacies of “prices vs. quantities” (to use Weitzman’s 1974 terminology) or “carbon tax vs. cap-and-trade”. Furthermore, the question is far from being settled among economists. It has two dimensions: the purely economic question of which system best accommodates scientific and demand uncertainty, a complex question that was treated at a theoretical level in Weitzman’s article; and a political economy dimension on which we focus in Sections 3.1 and 3.2.

3.1. Enforceability

An international negotiation on a global carbon price has the advantage of linking each region’s mitigation effort to the efforts of the other regions. However, a global carbon price commitment faces a number of obstacles.

The first and most fundamental one is *enforcement*. A possible strategy would be to set up an international carbon tax collection entity. This however is not discussed in existing proposals, probably because it could be perceived as too large an infringement on sovereignty, or because there are returns to scope in tax collection. Thus, the implementation of the carbon tax would likely be left to individual countries. Under this scheme, a supra-national supervision of the national tax collection at the internationally agreed level is necessary. Indeed, countries as we have seen individually prefer to freeride to reduce or even not to collect the tax even if they receive its proceeds- otherwise they would already collect one. Moral hazard is not going to disappear because of the existence of an international agreement.

Individual countries will have strong incentives for lax enforcement: they can turn a blind eye on certain polluters or underestimate their pollution, thereby saving on enforcement resources and especially on the cost of green policies. Another form of moral hazard consists in undoing the carbon tax through compensating transfers; presumably the countries would do this in an opaque way so as not to attract the attention of the international community. For example, when a product is subject to a specific excise tax or VAT, as is often the case for heating oil or gasoline, it is impossible to disentangle the carbon tax from other taxes justified by local pollutants, use of public road infrastructures, and congestion. The outcome would nonetheless be a reduction in the incentives of the country’s economic agents to emit less CO₂. Mitigation efforts are costly, and letting countries keep the proceeds of the tax does not suffice to incentivize them to collect the tax (incidentally, they can already collect and keep carbon taxes today, and predictably do not do so, at least at a decent level). And even if the tax is perfectly collected, there is no other way of measuring the country’s CO₂ effort than through emissions.

By contrast, enforcing an international cap-and-trade mechanism is relatively straightforward when countries, rather than economic agents, are liable for their national emissions. Under this subsidiarity principle, it suffices to monitor the country’s CO₂ emissions and, like for existing cap-and-trade mechanisms agents (here countries) with a shortage of permits at the end of the year would have to buy extra permits, while those with a surplus would sell or bank them.

3.2 Compensation and the dimensionality of negotiations

The second obstacle to a carbon tax in our view is *compensation*. Whether the international architecture adopts a carbon tax or a cap-and-trade mechanism, cross-country transfers will be needed so as to bring reluctant countries on board. Under a carbon tax, the proposed transfer mechanism is to use a fraction of the collected revenue to help developing countries to adopt low-carbon technologies and to adapt to climate change. This is illustrated by the Green Climate Fund which was decided at the COP-15 of Copenhagen in 2009. Under a cap-and-trade protocol, transfers operate through the distribution of permits across countries.

Either way, the design of compensation poses a complex problem: each country will want to pay the smallest possible contribution to the green fund or receive the maximum number of permits. This negotiation is complex and of course a major impediment to reaching an agreement on a carbon tax or a cap-and-trade. On the other hand, it must be realized that most international negotiations involve give-and-take. And there have been successful negotiations in the past. A case in point is the 1990 Clean Air Act Amendment in 1990. This arrangement was not imposed by a centralized authority, but rather was the outcome of a protracted negotiation, in which the mid-west states, high emitters of SO₂ and NO_x, delayed jumping on board until they received sufficient compensation (in the form of free permits in that case).

De Perthuis and Jouvet (2015) propose to finance the green fund on the basis of a bonus-malus system where high emission-per-capita countries would finance green projects to be implemented in low emission-per-capita countries, and to pay for the implementation of the common supervising institutions of the international agreement. In our view, a green fund is too transparent to be politically acceptable. The transparency argument requires further thought, but experience here suggests a serious concern; the Green Climate Fund established at COP 16 aims at a flow transfer of \$100 bn per year by 2020, and four years later had received promises of less than \$10 bn in stock. As is known from other realms (like humanitarian relief after a natural disaster or LDC health programs), parliaments are known to be reluctant to appropriate vast amounts of money to causes that benefit foreigners. Even successful programs such as the Vaccine Alliance GAVI - which involves much smaller amount of money - took off only when the Bill & Melinda Gates Foundation brought a substantial financial commitment. Politicians often pledge money at international meetings, only to downsize or renege on their pledge. Substantial free-riding is expected to continue, jeopardizing the build-up of the green fund.

Like it or not, the transparency issue is one of the reasons why pollution-control programs around the world have often adopted cap-and-trade and handled the compensation issue through the politically less involved distribution of tradable permits (often in a grandfathered way). In the EU ETS scheme for example, billions of euros have been transferred to Eastern European and former Soviet Union countries ("Hot Air") through the allocation of permits in order to convince them to sign the Kyoto Protocol. No such transfers would have been possible through the vote of direct financial subsidies by Western European countries.

An attractive aspect of a stand-alone carbon tax is that it does not lead to transfers among countries, and therefore perhaps generates less resistance in countries that would suffer a permit deficit in a cap-and-trade approach. It facilitates negotiations by focusing it on a single variable. This comparative benefit however disappears if, as is understandably conceived, the carbon tax is complemented with a green fund, which sets the net (positive or negative) transfer to the fund for each country and therefore involves the same dimensionality (the number of countries, n, plus 1, the carbon tax) as a cap-and-trade mechanism with an allocation of permits. Another way to see the equivalence between a carbon tax and cap-and-trade along the dimensionality problem is that if

transfers are ruled out, the cap-and-trade mechanism becomes single dimensional: countries only need to agree on the overall emission cap and then permits can be auctioned off.

Also, it should be noted that countries routinely transfer sizeable fraction of their GDP to foreign investors in reimbursement of their sovereign debt. It would be useful to have estimates of likely shortfalls/surpluses of permits (which of course depend on the initial distribution) so as to have a better assessment of the sums involved.

3.2. Price volatility under a carbon tax and cap-and-trade

Returning to the economic dimension of the carbon tax vs. cap-and-trade debate, we should also note that attention should be paid to the question of how to *accommodate uncertainty*. A cap-and-trade approach would compute and issue a worldwide number of permits consistent with the 2-degree Celsius target. However, there is scientific uncertainty about the link from emissions to global warming. There is also uncertainty about the abatement technology, consumer demand and so forth. So the number of permits may need to be adjusted over time. The market price of permits will be volatile (although presumably less so than under the flawed and unstable attempts at pricing CO₂ so far).

The same concern holds for a carbon tax. Due to the same sources of uncertainty, there is no guarantee that the tax will initially be set at the “right level”, consistent with the overall global warming target. Thus, the tax will need to be adjusted over time as well. In the absence of further investigation, it is hard to ascertain which of cap-and-trade and carbon tax will deliver the highest price volatility.

More generally still, any proposal must confront the volatility question, as price volatility is likely to be unpopular. One possibility, which *a priori* does not require public intervention, is to transfer risk through hedging instruments to those who can bear that risk more easily. Another approach is to intervene in markets to stabilize prices. For example, the European Commission in 2014 has proposed a “Market Stability Reserve”, in which the auction volumes will be adjusted in phase 4 of the EU ETS starting in 2021, so as to create a soft target corridor for banking of EU Allowance units (EUAs). The mechanism will reduce the amount of EUAs that are auctioned if an upper threshold of EUAs in circulation is exceeded and releases them if the EUAs in circulation fall short of a lower threshold. This scheme is meant to be automatic, but its efficiency can be questioned. In particular, one can wonder how it can be made responsive to news in a way that guarantees that the 2C target is reached. This brings us to the question of the trade-off between flexibility and commitment.

3.3. The potential time inconsistency of carbon taxes and cap-and-trade

Whether one opts for a carbon tax or for cap-and-trade, one should be concerned by the possibility that, conditional on the accruing news about the climate change process, technology or demand, the ex-post adjustment be too lax (too low a carbon tax, too high a number of tradable permits). To understand why, note that the carbon tax or tradable rights path is designed so as to incentivize long-term investments: in carbon-light housing, transportation infrastructures or power plants and in green R&D. Ex post the price incentive has served its purpose and now imposes undue sacrifices; put differently, optimal environmental policies are not time-consistent. Furthermore, the possibility of administration turnover or news about other aspects (say, public deficit or indebtedness, economic opportunities) may transform climate policy into an adjustment variable, adding to the overall time inconsistency.

This time inconsistency is studied in Laffont-Tirole (1996 a, b), who look at the optimal mechanism designed by a centralized authority (the world's nations here) when news will accrue that may vindicate a change of course of action. The optimal mechanism must trade off commitment and adaptation. The optimal policy consists in providing authorities with flexibility, provided that the latter commit to compensate permit owners (in cash or Treasury securities). More precisely, authorities must issue a menu of permits with different redeeming values that limit the authority's ability to expropriate their owners by flooding the market with pollution permits. For example, if news led the authority to lower the price of permits (or the carbon tax) from \$ 50 to \$ 40, some \$ 50 and \$ 45- strike price put options on the Treasuries (with agreed upon country keys) would become in the money; at \$ 35, some other options (with a \$ 40 strike price) would also be in the money, and so forth. This approach creates flexibility but constrains it by forcing the authority to partly compensate permit owners. It obviously requires a governance mechanism, whose existence is inescapable anyway in any international agreement.

Cap-and-trade mechanisms can obviously accommodate various automatic mechanisms that react to news accrual. For example, in January 2014, the European Commission proposed to amend the EU ETS system, starting in 2021, by appending a "Market Stability Reserve", which is a "an objective and rulebased mechanism on the basis of which the auction volumes are adjusted in an "automatic manner". The mechanism reduces the amount of EU Allowance units that are auctioned if an upper threshold of EUAs in circulation is exceeded and releases them if the EUAs in circulation fall short of a lower threshold. Thus a target corridor for banking of allowance units is introduced to the EU ETS. The precise implementation of this mechanism has been criticized for being asymmetric and failing to have the desired dampening effect. We have not studied when the MSR or a variant thereof can approximate the optimal adjustment mechanism described in Laffont-Tirole, and we think that economists have not paid enough attention to this aspect, whether they favor taxes or cap-and-trade.

4. Pledge and review: The waiting game in the current international negotiation

The Copenhagen conference in December 2009 was expected to deliver a new Kyoto Protocol with more participating countries. In reality, the conference delivered a completely different project. The central idea of a unique carbon price was completely abandoned, and the secretariat of the UNFCCC became a chamber of registration of non-committal pledges by individual countries. This change of vision was upheld at the Cancun Conference in 2010 and more recently at the COP 20 in Lima in 2014. The new "pledge-and-review" mechanism is likely to be confirmed at the Paris COP 21 conference in December 2015. Voluntary climate actions (or "*intended nationally determined contributions*") will be registered without any coordination in the method and in the metric of measurement of the ambition of these actions. Although they are crucial to the credibility of the system, the reporting, and verification of the pledges are not being discussed.

The pledge-and-review strategy has three main deficiencies, and definitely is an inadequate response to climate change. First, if implemented, the agreement that will come out of this bottom-up process is expected to yield an inefficient allocation of efforts by inducing some economic agents to implement high-cost mitigation actions while others will emit GHGs that would be much cheaper to eliminate. Because the marginal costs of emission reduction are likely to be highly heterogeneous within and across countries, it will be almost impossible to measure the ambition of each country's pledge. In fact, individual countries will have a strong incentive to "green wash" their actions by making them complex to measure and to price. Second, the absence of commitment to the pledge limits its long-term credibility. This fragility makes it very tempting for countries to deviate from their pledges. The absence of credibility of long-term pledges will reduce the innovators' incentive to perform green R&D, and to implement mature technologies yielding reduction of emissions for a long period of time. Third and relatedly, the pledge-and-review process

does not address the free-rider problem. Free-riding remains individually optimal in this game, so that these pledges are expected to deliver much less effort than what would be collectively desirable. Following Buhr et al (2014), “*pledge-and-review means that climate change is dealt with the lowest possible level of decision making*”. Pledge-and-review will only magnify the free-rider problem.

The pledge-and-review regime can be analyzed as a waiting game, in which the global negotiation on formal commitments is postponed. Beccherle and Tirole (2011) and Tirole (2011) show that the free riding in this waiting game is magnified by the incentive to achieve a better deal at the bargaining table in the future. Building on both theory and past experiences, countries will realize that staying carbon-intensive will put them in a strong position to demand compensation to join an agreement later: the carbon-intensity of their economy making them less eager to join an agreement, the international community will award them higher transfers (either monetary or in terms of free pollution allowances) so as to bring them on board. Moreover, when the damage function is convex, a country committing to a high emission level before this negotiation raises the marginal damages of all other countries and therefore induces them to reduce their emissions more heavily. All in all, these strategic considerations increase the cost of delay beyond what would be obtained in the traditional free-riding model with no expectation about a future negotiation.

To conclude this section on a more positive note, the pledge-and-review process could be useful if in the second half of this year, one were to call the countries’ bluff and transform or modify their pledges into real commitments. Suppose indeed that the various pledges are in line with a reasonable trajectory for GHG emissions (asserting this requires being able to aggregate/compare the various pledges, as some concern mitigation and others adaptation, and current pledges have rather different time horizons...). One could then transform the predicted global trajectory of emissions into an equivalent number of permits; in a second stage one could allocate permits under the requirement so that countries receive the same welfare as they would if their pledge were implemented. A key point is that countries that are sincere about their pledge could only gain from having all countries commit.

5. Enforcing an international agreement

An efficient international agreement should create a grand coalition in which all countries and regions will be induced to set the same carbon price in their jurisdiction. Under the principle of subsidiarity, each country or region would be free to determine its own carbon policy, for instance through a tax, a cap-and-trade, or a hybrid. The free-rider problem raises the question of the stability of this grand coalition. An analogy is sovereign borrowing. Sanctions for defaulting are limited (fortunately gunboat diplomacy has waned!), which raises concerns about countries’ commitment to repay creditors. The same applies to climate change. Even if a good agreement is reached, it must still be enforced with limited means. The Lalaland of international climate negotiations most often ignores this central question.

Naming and shaming is an approach and should be used; but as we have seen with the Kyoto “commitments”, it has limited effects. Countries always find a multitude of excuses (choice of other actions such as R&D, recession, insufficient effort by others, commitment made by a previous government, etc.) not to abide by their pledge.

There is no bullet-proof solution to the enforcement problem, but we think that at a minimum two instruments should be employed. First, countries care about gains from trade; the WTO should view noncompliance with an international agreement as a form of dumping, leading to sanctions. Needless to say, the nature of these sanctions should not be decided by individual countries, as the latter would then gladly take this opportunity to implement protectionist policies.

In the same spirit, one could penalize non-participants through punitive border taxes. This policy would incentivize reluctant countries to jump on board and be conducive to the formation of a stable world climate coalition. Nordhaus (2015) examines the formation of stable climate coalitions when coalitions are able to impose internally a uniform carbon price together with uniform trade sanctions against nonparticipants. For a carbon price around \$25 per ton of CO₂, a worldwide climate coalition is stable if a uniform tax of 2% is imposed by the coalition for any good or service imported from a non-participating country.

Second, non-compliance with a climate agreement should be treated as committing future administrations and treated as sovereign debt. This policy would involve the IMF as well. For example, in the case of a cap-and-trade approach, a shortfall of permits at the end of the year would add to the public debt; the conversion rate would be the current market price. Of course, we are aware of the potential collateral damages associated with such linkages with other successful international institutions. But the real question is that of the alternative. Proponents of nonbinding agreements hope that the countries' good will suffice to control GHG emissions. If they are correct, then the incentives provided through institutional linkages will also suffice a fortiori, without any collateral damage on these institutions.

6. Conclusion

In spite of the mounting evidence about global warming, the international mobilization has been most disappointing. The Kyoto protocol failed to build an international coalition supporting a carbon price in line with its social cost and illustrates the intrinsic instability of any international agreement that does not seriously address the free-rider problem. An international agreement must satisfy three properties: economic efficiency, incentive compatibility, and fairness. Efficiency can be attained only if all economic agents face the same carbon price. Incentive compatibility can be attained by penalizing free-riders. Fairness, a concept whose definition differs across stakeholders in the absence of a veil of ignorance, can potentially be reached through lump-sum transfers.

There is currently some enthusiasm about the process of letting each country pledge emission reduction efforts in preparation of the Paris COP 21 in December 2015. We believe that this strategy is doomed to fail. It does not address the fundamental free-rider problem of climate change. The pledge-and-review process is another illustration of the waiting game played by key countries, which are postponing their real commitment to reduce emissions. Countries will make sure that their pledge is hard to compare with other pledges, and that it is non-verifiable and non-enforceable. The predicted outcome of this waiting game in terms of emissions of GHGs is potentially worse than in the business-as-usual. We should tackle the climate challenge more seriously.

Our proposal is to implement an international cap-and-trade scheme, in which each country must purchase additional permits when their nationals emit more than the allowance allocated to the country, and can sell surplus permits when they over-perform environmentally. Participating countries will also commit to impose penalties on non-participating countries, through punitive border taxes administered by the WTO and through the recognition of a "climate debt" accounting for the uncovered emissions of the non-abiding countries valued at the price of carbon prevailing within the coalition. Finally, the allocation of country-specific allowances can be organized in such a way to transfer revenue to developing countries, with an eye on alleviating the fairness and acceptability concerns. Allocating free permits to a country is likely to be politically easier to arrange for donor countries than a lump-sum transfer, as illustrated by the failure of the Green Fund set up at the 2009 Copenhagen Conference.

Christian Gollier and Jean Tirole
Toulouse School of Economics

Régime catastrophe naturelle : les pistes de réformes des assureurs (FFA)

Quelques jours après la clôture de la COP22 au Maroc, Bernard Spitz, président de la Fédération française de l'assurance (FFA), a réitéré son appel à une modernisation du régime catastrophe naturelle en France : modulation des franchises, responsabilisation des élus et des entreprises, plans de prévention des risques. En l'absence de mesures, le coût des catastrophes naturelles pourrait doubler d'ici 2040 pour atteindre 92 Md€.

Le message n'a pas fondamentalement changé, mais il prend une résonnance particulière dans le contexte de la COP22, la Conférence pour le climat qui s'est tenue à Marrakech (Maroc) du 7 au 18 novembre 2016. Lors d'un colloque consacré aux « politiques d'adaptation face au changement climatique », Bernard Spitz, président de la FFA, a jugé le régime catastrophe naturelle français « *solide* » mais « *perfectible* », si l'on souhaite que « *les aléas naturels restent dans le domaine de l'assurabilité* ».

D'autant qu'en l'absence de mesures d'adaptation, la résilience financière du secteur pourrait en souffrir. La preuve : dans une étude publiée en décembre 2015, dans le cadre de la COP21, la FFA projetait un possible doublement du coût des événements naturels en France à horizon 2040, passant de 48 Md€ entre 1988 et 2013 à 92 Md€ entre 2015 et 2040.

Modulation de franchises

Pour éviter que ces projections ne deviennent des prévisions, la profession défend plusieurs pistes d'amélioration du dispositif français, lesquelles ont été synthétisées dans le Livre blanc pour une meilleure prévention et protection.

Entre autres mesures, la FFA milite pour une modulation des franchises légales (voir ci-dessous) applicables aux sinistrés en cas de catastrophes naturelles. « *La franchise légale de 10 % est très dure à gérer pour certaines petites entreprises sinistrées. Les inondations de juin ont particulièrement mis en avant ce problème car beaucoup de commerçants ont vu leur bien totalement détruit. C'est pourquoi nous pensons qu'un plafonnement de cette franchise pour les commerçants et artisans dont le capital assuré n'excède pas 200 k€ serait pertinent* », souligne Stéphane Pénet, directeur des assurances de biens et de responsabilités de la FFA.

Cette franchise avait été notamment mal perçue lors des inondations de juin ainsi que nous le révélions le mois dernier dans notre dossier « Catastrophes naturelles : et si c'était les assurés qui en parlaient le mieux ».

Responsabilisation des collectivités et des entreprises

La profession veut également encourager les communes à se doter de plans de préventions des risques (PPR) et surtout... à les appliquer. Lors des inondations d'octobre 2015 qui ont frappé le département de l'Hérault, 6 des 26 communes sinistrées ne disposaient pas d'un PPR. Inondation alors que deux d'entre-elles avaient fait l'objet de 15 arrêtés catastrophe naturelle ces 30 dernières années. « *Il faut responsabiliser les communes. Entre une commune dotée d'un PRRI et une autre sans, on observe entre 20 et 30 % de dégâts matériels en moins pour la première* », relève Bernard Spitz.

Responsabilisation des communes et des entreprises qui pourra se traduire par des accords avec les compagnies d'assurance sur le niveau de franchise applicable en cas d'accident climatique. Une mesure qui pourrait s'exercer dans le cadre de la liberté contractuelle et non par l'adoption d'un texte de loi.

Le cas spécifique de la sécheresse

Outre l'inondation, la sécheresse pourrait se révéler comme l'aléa naturel le plus coûteux pour le secteur d'ici 2040. Le phénomène de subsidence (rétraction ou gonflement des sols) représenterait une facture cumulée de 21 Md€ sur les 25 prochaines années, selon les projections de la FFA.

Pour enrayer ce mouvement inflationniste, « *nous suggérons la réalisation d'études obligatoires dans des zones à risques pour éviter les sinistres* », souligne Bernard Spitz. Et ce, alors que plusieurs milliers de maisons continuent de se construire chaque année sur des sous-sols à risques.

La prévention... dès l'enfance

Éduquer dès le plus jeune âge aux risques naturels. C'est l'autre volet de la prévention défendue par le secteur pour permettre l'adoption des bons comportements et des réflexes à adopter en cas de survenance d'événement de grande ampleur.

Une sensibilisation qui pourrait prendre la forme d'une Journée nationale consacrée à la prévention contre les risques naturels. Une initiative déjà à l'œuvre au Japon.

Les franchises légales applicables en cas de cat' nat' :

Les franchises minimales légales

Elles sont fixées par l'Etat, obligatoires, et non rachetables. Depuis le 1er janvier 2001, elles s'établissent comme suit :

Biens à usage non professionnel	Dommages directs	380 €	Sécheresse 1 520 €
Biens à usage professionnel	Dommages directs	10 % mini 1 140 €	3 050 €
	Pertes d'exploitation	3 jours ouvrés mini 1 140 €	

Modulation des franchises :

1 à 2 reconnaissances : Franchise de base

3 reconnaissances : Doublement de la franchise

4 reconnaissances : Triplement de la franchise

5 reconnaissances et plus : Quadruplement de la franchise

Source : CCR

Sébastien Acedo

Insurability of Climate Risks

From global warming to catastrophes

As mentioned already in the previous section, the most important aspect is that climate changes will increase the intensity and the frequency of climate hazards even if it is scientifically impossible to blame the greenhouse effect for powerful hurricanes or major storms or floods in Europe. As quoted in Leggett, “the increased intensity of all convective processes in the atmosphere will force up the frequency and severity of tropical cyclones, tornados, hailstorms, floods and storm surges in many parts of the world, with serious consequences for all types of property insurance”. This was confirmed recently by Emanuel, for hurricanes and cyclones at least: “future warming may lead to an upward trend in a tropical cyclone’s destructive potential, and a substantial increase in hurricane-related losses in the 21st century”.

Of the 10 most expensive natural catastrophes over the past 56 years, six occurred in 2004 and 2005 (see Table 2).

Table 2 The 10 most expensive catastrophes, 1950–2005

Date	Loss event	Region	Overall loss	Insured loss	Fatalities
25.8.2005	Hurricane Katrina	U.S.A.	1,25,000	61,000	1,322
23.8.1992	Hurricane Andrew	U.S.A.	26,500	17,000	62
17.1.1994	Earthquake Northridge	U.S.A.	44,000	15,300	61
21.9.2004	Hurricane Ivan	U.S.A., Caribbean	23,000	13,000	125
19.10.2005	Hurricane Wilma	Mexico, U.S.A.	20,000	12,400	42
20.9.2005	Hurricane Rita	U.S.A.	16,000	12,000	10
11.8.2004	Hurricane Charley	U.S.A., Caribbean	18,000	8,000	36
26.9.1991	Typhoon Mireille	Japan	10,000	7,000	62
9.9.2004	Hurricane Frances	U.S.A., Caribbean	12,000	6,000	39
26.12.1999	Winter storm Lothar	Europe	11,500	5,900	110

Source: Munich Re (2006).

However, one should note that not only is climate change to blame, but that human actions also are partially responsible for these major natural catastrophes (e.g., flood events are not only due to rainfall but also linked to the stability of soil structures or natural slopes which can be influenced by human constructions). These two factors increase the risk simultaneously, both affecting frequency as well as loss amounts.

The following section of this paper will come back to the conditions necessary for insurability, focusing on actuarial conditions (finite premium, diversification, quantifiable risks, etc.) and economic ones (no adverse selection, insurers’ willingness to pay the premium proposed by insurance companies, etc.). And, as we will see, climate risks are hardly insurable. The only possibility is to be able to transfer these risks, either to (classical) reinsurance markets, or also, due to the lack of capacities, to capital markets. The next section will present all the possible techniques for transferring large risks. Finally, the last section will highlight one of the most challenging parts of climate risk: climate change. Is it simple to insure in a changing environment? How do insurance companies manage to forecast future losses? This additional uncertainty is, without a doubt, the most challenging aspect for the insurance industry, and the most risky one too, from a solvency perspective.

Insurability: when can we sell/buy insurance?

Insurance is usually defined as “the contribution of the many to the misfortune of the few”. Some risk adverse agents (called the insured) are willing to pay even more than the actual value of predictable risk to transfer its consequences to another agent (called the insurer). Hence, the

fundamental concept is the mutualization of risks by the insurer. Following the ideas of Berliner, it is possible to define criteria so that a risk can be insured.

1. Judicially, an insurance contract can be valid only if the claim occurrence satisfies some randomness property. This is the concept of legal insurability.
 2. The possible maximum loss should not be huge with respect to insurer's solvency.
 3. The average cost should be identifiable and quantifiable.
 4. Risks should be pooled so that the law of large numbers can be used (independent and identically distributed claims).
- Points 2–4 yield the concept of actuarial insurability.
5. There should be no moral hazard, and no adverse selection,
 6. There must exist an insurance market, that is, the supply and the offer should meet, and an equilibrium price should arise.

These two points are sometimes related to market imperfections and can be related to some general concept of economic insurability.

Legal insurability: randomness properties

The first point is rather important. As mentioned in the first article of French Law 82–600 of 13, July, 1982 (since natural catastrophes are covered by a public mechanism, natural catastrophes are defined by the law), “are considered as consequences of natural catastrophes all direct damages caused by abnormal intensity of natural hazard, when standard measures usually taken to prevent those events did not prevent its occurrence”. But what does “abnormal intensity of natural hazard” mean? Is it “abnormal” to have recurrent floods in some areas easily flooded (in a former river channel)? This notion can be related to the notion of “known risks” and will be discussed later.

Actuarial insurability: the problem of large risks non-diversifiable

The second and third points describe the ability to identify and quantify the chances of an event to occur, as well as the extent of losses. And, as observed already in Zajdenweber, it might not be satisfied in the case of natural catastrophes. A natural idea can be to fit a Pareto distribution to the distribution of the losses, for the largest claims. Recall that for the Pareto distribution,

$$F(x) = P(X \leq x) = 1 - (x/x_0)^b \text{ or } \log[1 - F(x)] = a + b \log x$$

where $x_0 = \exp(-a/b)$.

Hence, in the case of the scatterplot of $\log X_i$ versus $\log[1 - \hat{F}(X_i)]$ being on a straight line, the claims are Pareto distributed, and the slope is b . Note that if $-b \geq 1$, then $E(X)$ is infinite.

Those points are also related to the concept of risk (with known probabilities) and uncertainty or ambiguity: risk should be based on probabilistic uncertainty.

The fourth point is also an important issue since the central limit theorem (based on independence of claims) helps to derive confidence intervals, and thus, to assess additional capital required for solvency purposes of safety margins in premium calculation. In case of positive dependence (e.g., geographical dependence, where thousands of claimed policies are from a common event), capital should increase since quantiles will increase, while the pure premium will remain unchanged.

One of the challenges of natural catastrophes is that they can jeopardize the solvency of insurance and reinsurance markets. Defining a catastrophe is quite difficult, but as mentioned, for example, in Kunreuther, a key concept is the geographic area, and an induced strong correlation among the losses in their portfolio (thousands of policies hit, for several lines of business – property, car insurance, life

insurance for casualties, business interruption, etc.). Hence, diversification is no longer possible. Note that Mayers and Smith already pointed out that catastrophe risks were hardly diversifiable.

Economic insurability: the problem of finding a fair price

With regard to economic insurability, adverse selection is a difficult issue, since major natural events can be covered only when pooling a large number of insured. In that case, risks are hardly homogeneous (non-coastal regions being usually less risky for instance). Further, moral hazard is also hard to deal with, especially in the case of natural catastrophes. Recall that in some countries, the premium to insure against floods is related to prevention measures (and is controlled by the NFIP in the United States).

And, finally, the last point is perhaps the most difficult one to satisfy, as shown in the following example.

Example: Kunreuther and Pauly mention a comment from Business Insurance in 2001: “my dwelling is insured for \$2,50,000. My additional premium for earthquake insurance is \$768 (per year). My earthquake deductible is \$43,750 [...] The more I look to this, the more it seems that my chances of having a covered loss are about zero. I’m paying \$768 for this?” Since the annual probability of an earthquake in Seattle is around $1/250=0.4$ per cent and the actuarial implied probability is $768/(2,50,000-43,750)=0.37$ per cent it appears that the premium asked is fair from an actuarial point of view, and that the insurance company cannot ask less than the pure premium. Thus, in this case, it is hard to find an equilibrium price that both the insured and the insurer accept. Many individuals perceive the probability of a disaster as a very low-probability event, and therefore find it unnecessary to invest in protective measures: “we live from payday to payday”, as mentioned in Kunreuther et al. It was also noticed that the householder’s decision either to mitigate or not is based on a time horizon of 30 years. More precisely when facing ambiguity, insurance companies can also use cautious and safe premiums, with an additional loading.

Transferring large risks: reinsurance and ART

Based on these remarks, it appears that natural catastrophes are hardly insurable. Kleindorfer and Kunreuther 15 already observed that “the private insurance industry feels that it cannot continue to provide coverage against hurricanes and earthquakes as it has done in the past without opening itself up to the possibility of insolvency or a significant loss of surplus”. The only possibility is to transfer very large risks, exceeding a predefined limit (e.g., when the pure premium is infinite).

Development of the capital markets followed the shortage of reinsurance following Hurricane Andrew (1992) and the Northridge earthquake (1994). Alternative Risk Techniques can be used to solve the following three challenges:

- Finding additional capacities for insurance and reinsurance markets, especially in the case of a hard market, where traditional capacities of a reinsurance market are constrained. This was the goal of Zenkyoren (the National Mutual Insurance Federation of Agricultural Cooperatives) in Japan in 2003, which was looking for capacities to provide insurance cover for a second event.
- Avoiding the credit risk of reinsurers, since liabilities are collateralized in bonds.
- Getting an actuarial price for these products, with consistency over time: reinsurance markets are very sensitive to catastrophes (until 2001 Chicago Airport paid a premium of \$0.125 million for a \$750 million cover, and following 9/11 the premium was \$6.9 million for a \$125 million cover), while financial markets react more softly: When typhoon Charley was destroying the Caribbean and Cuba in 2004, secondary markets became more active, with \$15 million bonds traded while the hurricane was approaching the U.S., with higher volatility but prices remaining in a thin range.

(Traditional) reinsurance: excess of loss and “cat” excess of loss treaties

In reinsurance excess of loss (stop loss) treaties, the reinsurer undertakes the upper layer of the risk, after a certain attachment point. In classical reinsurance treaties, the trigger is indemnity based (the reinsurance company pays some indemnity when actual losses exceed a given threshold called priority). From an economic perspective, there is moral hazard in these contracts since the trigger is related only to actual losses of the insurance company (claims being settled by the insurance company). Furthermore, there is also a credit default issue: if the reinsurance company defaults, the insurance company still has to pay back losses to the insured, but will not be reimbursed by the reinsurance company. The first drawback can explain the interest for alternative triggers (based on industry or environmental indices); the second one can explain the interest for securitization and capital market-based solutions.

In classical excess of loss treaties, the reinsurer pays when a single policy claims a loss. For “cat” excess of loss treaties the reinsurer pays an indemnity based on the total loss due to a single natural event (a flood, a hurricane, etc.). The main difficulty is to define precisely the event or a single natural event. This point will be developed afterwards when defining a catastrophe event.

(Traditional) reinsurance: limited capacities

Given the limitation of the reinsurance capacities, that is, the amount of reinsurance that insurance companies can afford to purchase, insurance companies have been concerned with probable maximum loss that can be experienced. One should note that this concern is not only theoretical: as mentioned in Conning et al., nine insurance companies in Florida were insolvent following hurricane Andrew.

As the size of catastrophes increases, the limitation of reinsurance markets emerges: if the risk is too large to aggregate and diversify, the reinsurance industry (as a whole) might not be able to provide sufficient capital to cover a loss. For the top ten reinsurance companies, total net written premium represents \$72 billion in 2005 and for the top 20, \$90 billion. This capital can be compared to the \$49 billion paid for catastrophes in 2004, and \$86 billion in 2005.

Alternative reinsurance: captives, industry loss warranties, sidecars

Additional capacities can be brought into the market through captives, sidecars and industry loss warranties (ILW). On the one hand, captives and side cars are simply dedicated reinsurance vehicles, with quota share covers (it is simply a hedge fund that wishes to get into the reinsurance business and will start a special purpose vehicle with a reinsurer). On the other hand, ILW pay a fixed amount based on the amount of industry loss (e.g., Property Claim Services (PCS) or SIGMA).

Financial reinsurance: cat options and cat bonds

In the case of catastrophe bonds, the issuing company enters into a reinsurance treaty with a special purpose vehicle (SPV), which converts insurance risk into financial or investment risk. The cedent pays a premium to the SPV in exchange for loss payments in case an event occurs. The SPV issues securities to finance this coverage. Investors purchase securities by paying the principal, and they receive interest payments equal to a risk-free rate (e.g., LIBOR) plus a risk premium, less loss payments that may be made.

Financial options can also be used to hedge against large losses. Options are securities that give the purchaser the right to buy something (usually the underlying security, i.e., an asset, a basket of assets, an index, or even another derivative) to the seller at a predetermined price and for a specified period of time. Similarly, exchange-traded catastrophe options are standardized contracts bought and sold through an organized market (e.g., CBOT, the Chicago Board of Trade). Catastrophe options give the

purchaser the right to a cash payment if a specified index of catastrophe losses reaches a specified level – the strike price. Hence, these options work much like excess reinsurance.

Example: CBOT's PCS Catastrophe Insurance Options began trading in September 1995. They are European cash options (they are settled in cash, only at the expiration of the contract – either 6 or 12 months after the end of the loss period). Loss periods are generally calendar quarters, and estimates of aggregate industry catastrophic losses are made daily by PCS. They provide an index, where each index point is equivalent to \$100 million of aggregate industry catastrophe losses.

“The government as the ultimate risk manager”

In several countries (France, Spain, Norway, Switzerland) there is an “unlimited government guarantee” for catastrophes. In case of such a public mechanism, risk-financing instruments can also be considered (catastrophe tax, government debt instruments, international loans), but it is not (ex ante) insurance anymore. Therefore, we will not expand further on this point.

Defining a natural catastrophe

In single-event reinsurance, the main difficulty is to define clearly – and without ambiguity – the event.

Example: In December 1999, two major winterstorms crossed Europe within 48 hours, Lothar and Martin. There were intense discussions between cedents and reinsurers to decide if there were one or two storms. In this particular case of two large storms, reinsurers were arguing that this was a single event (and they therefore should pay for a single layer, not two). For smaller events, they would have argued that there were several events, so that none of them may reach priority.

Four techniques can be considered to define the trigger (and so the event):

- indemnity trigger: directly connected to the experienced damage (for classical reinsurance),
- industry-based index trigger: connected to the accumulated loss of the industry (e.g., PCS for ILW),
- environmental-based index trigger: connected to some climate index (rainfall, windspeed, Richter scale, etc.) measured by national authorities and meteorological offices (e.g., EuroNextWeather and Metnext indices, produced by Meteo France, Powernext and Euronext),
- parametric trigger: a loss event is given by a cat-software, using climate inputs and exposure data.

Insuring in a changing environment

Insurance policies are usually renewed annually and, therefore, insurers have to set an appropriate premium level (with a given cover for the coming year) with a lot of uncertainty about systematic change or short-term trend. Warren Buffet already pointed out in 1992 that “catastrophe insurers can't simply extrapolate past experience. If there is truly global warming, for example, the odds would shift, since tiny changes in atmospheric conditions can produce momentous changes in weather patterns”. Many other authors mentioned this point. For instance, as quoted in Banham, “insurers are making huge assumptions that the past will be the key to the future. We have at hand about 110 years of recorded observations of global climate activity. I can tell you with certainty that we have not seen the range of climate variation in that time”. This was also mentioned by Nott who observed that some extremely large events were not necessarily unusual, based on a very long time horizon.

Note that two factors increase risks:

- the increase of frequency that can be related to global warming (for atmospheric-related claims);
- the increase of value-at-risk, due to the increase of concentration of wealth in risky areas (Florida, California, Japan).

Increasing frequency

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) stated in its 2001 Third Assessment report that: “peak wind intensity and mean and peak precipitation intensities of tropical cyclones are likely to increase”. As shown in Webster et al. the number of category four and five hurricanes has doubled over the past 35 years (see also Figure 4 for a longer trend graph). As they highlight, “this trend is not inconsistent with recent climate model simulations that a doubling of CO₂ may increase the frequency of the most intense cyclones although attribution of the 30-year trend to global warming would require a longer global data record and, especially, a deeper understanding of the role of hurricanes in the general circulation of the atmosphere and ocean, even in the present climate state”. A heuristic explanation is that hurricanes get their energy from warm water and, as global warming progresses, the world’s oceans warm. As the oceans warm there is more energy available to feed hurricanes. Note that meteorologists are still arguing whether the change is due only to climate change or if it is a long-term cycle. But even if there is no strict consensus on the link between global warming and increasing trends in extreme hurricane events for a short-term perspective (as in insurance pricing), policyholders in Florida are very likely to face a large hurricane in a close future.

This increase of frequency can be observed for hurricanes (see Figure 4) in the United States, as well as coastal floods, and also in Europe for major winter storms.

Increasing value-at-risk

To illustrate this second point recall that in 1950 only New York could be considered a mega city with more than 10 million inhabitants, while 26 of such cities are expected to exist by 2015 (most in high natural risk prone area, such as Tokyo, Shanghai, New York or Los Angeles). Moreover, the value-at-risk of costal areas in the United States increased by 69 per cent from 1993 to 1998, to reach \$3,150 billion in 1998. In Florida, 80 per cent of the insured assets are located near the coasts (with a total exposure around \$2 trillion, similar to the exposure in New York).

In Europe, London is a well-known example of major city that can be devastated by a flood if everything remains unchanged. As a warning, during the 2007 summer the worst floods in 60 years hit England.

From intuitive perception to risk models and actuarial prices

The architecture of catastrophe models are based on three main components:

- the hazard module, which generates stochastic climate scenarios and assesses perils;
- the engineering model (based on the exposure, the values, the building) which calculates damage;
- the insurance module, which quantifies financial losses based on deductibles and reinsurance (or retrocession) treaties.

Using simulations to generate scenarios started in the 1970s. But cat-software were developed only at the end of the 1980s (AIR in 1987, RMS in 1988). The interest for those models came in the 1990s, following the two large-scale events of 1989 (hurricane Hugo in September in South Carolina, \$4 billion; and the Loma Prieta earthquake in October 1989 in the San Francisco peninsula, \$6 billion).

Those two events were a warning, and the main signal was hurricane Andrew, in August 1992, where AIR estimated the loss at the unbelievable level of \$13 billion, within hours of landfall.

The model characterizes the risk of natural phenomena, such as projected path and wind speed for hurricanes, including the frequency of certain magnitudes or frequencies. Hence, since a tropical cyclone requires a large expanse of warm ocean water, those cyclones are most likely to form between 51 and 20° latitude. The determination of the annual probability of occurrence of natural events is the most uncertain module of the model's hazard. For one scenario, the model generates the storm's source parameters and simulates the storm's movement along a track. Local windfields are generated by calculation of maximum over-water wind speed. Wind duration is also a key element to get damage estimation. The model characterizes the inventory, or portfolio of properties, such as location (geocoding, based on latitude and longitude, or ZIP codes). Those factors enable the calculation of vulnerability (or susceptibility to damage). Not only surveying the inventory of building is necessary, but also building performance (or fragility).

A major challenge for cat-software (RMS, EQECat) is the first module: how to generate consistent future scenarios based on past experience? Even if those models learn by experience each time, estimations of insured losses are far from estimated values. Consider the example of Kyrill, a European windstorm, forming an extra-tropical cyclone with hurricane-strength winds, which crossed Europe in January 2007. Table 3 presents estimated losses with market-based estimated losses versus estimations provided by several cat-software. Note that the range of estimated losses per country is rather large (e.g., from 8 million to 67 million for France), but also that all the models either underestimate (e.g., Germany) or overestimate (e.g., United Kingdom).

Recall that scenarios are already quite pessimistic: a hurricane of level four hitting Miami will cost more than \$100 billion; the centennial Mississippi flood will cost more than \$34 billion (only a short proportion paid by the insurer because of the National Flood Insurance Program); a winter storm in the North East (as in 1998 in Canada) will cost more than \$20 billion; a major forest fire in California or in France, more than \$9 billion.

Table 3 Kyrill best estimate losses from a European insurance group

	<i>Local entities best estimate</i>	<i>+ a safety margin</i>	<i>Market share assessment</i>	<i>Catastrophe models</i>	
				<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>
France	10	15	45	8	67
Belgium	30	35	30	8	34
United Kingdom	31	36	35	68	164
Ireland	1	1	0	1	35
Netherlands	9	10	8	5	22
Germany	120	140	140	99	114
Switzerland	1	3	3	1	9
Total	202	240	261	190	445

The challenge of updating probabilities

One challenging problem with natural catastrophes is that, on the one hand, once society is alerted to the risk, it may take preventive actions (e.g., reinforcing buildings) that will make the risk less likely to occur, or less expensive in the future, and therefore the premium should decrease. On the other hand, by updating the event probabilities, or the distribution of the losses, the premium should therefore increase. Recall that before 1989 no natural disaster in the United States ever caused more than a \$1 billion in insured losses, until hurricane Hugo shattered this record. The worst case scenario was then \$8 billion, until hurricane Andrew in 1992, which caused more than \$15 billion insured

losses. And finally Katrina in 2005 reached the unforeseen level of \$40 billion. One can hardly say what might be the next one. Those doubts about the ability of meteorologists, engineers or actuaries to predict future catastrophic losses, based on past experience, have frightened several insurers.

The puzzle of assessing estimations in a changing environment

Uncertainty was rather large for hurricanes, but it becomes impossible to assess any return period for other risks, such as floods. Some of the most damaging and costly floods have occurred recently in Europe or America (in the Mississippi basin in 1992, in 1998 and 2000 in England, and in Eastern Europe in 1997, 1998, 1999, 2000, and worst of all in 2002). In the late 1990s, Munich Re reported that the largest share of economic losses from all natural hazards were due to floods. Along with the damage from water itself (and sewage) one has to add health hazards (from contamination). Note that floods are an essential (and normal) aspect of ecological systems as a basis of the regeneration of crops and aquatic life. As mentioned in Wisner et al., “the collapse of confidence in engineered flood prevention has allowed an increased interest in a ‘living with the floods’ approach to emerge”. White called floods “known risks” because of their repetitive behaviour patterns. If rivers have “long range memory”, with persistent behaviour, note that prevention plans influence occurrence probabilities.

For instance, as observed by counting the number of articles in the newspapers, the centennial flooding of Paris, where the river Seine should rise 8.62 m above normal, is expected to take place soon (the previous one was in 1910). The first mistake is to forget that the use of the concept of centennial event (related to a return period of 100 years) is related to a stochastic process with no memory: from now, we still have to wait on average 100 years before observing a centennial event. The second one, which is the most difficult to handle for actuaries is that forecasting is possible under the classical assumption that “everything remains unchanged”. But in the river Seine upstream, several dams, reservoir or dykes have been built.

Conclusion

Without taking into account climate change, climate risk – and more specifically natural disasters – is a challenging issue to the insurance industry, since it involves potential extremely large losses. Involving reinsurance markets and alternative risk transfer techniques (such as insurance linked securities) seems one solution to avoid insolvency problems. But, since climate is changing (and is changing fast), not only are potential losses more expensive, but they are also becoming more volatile (and therefore more risky). And, if this uncertainty cannot be reduced (by taking political measures), it might be difficult to find someone ready to pay for it.

Arthur Charpentier