



FAERE

French Association of Environmental  
and Resources Economists

# Policy Papers

La coopération climatique après l'Accord de Paris - Valeur des émissions négatives et coût de la non-action quand la concentration de CO<sub>2</sub> dépasse 400ppm

Dominique Bureau

PP 2017-07

Suggested citation:

D. Bureau (2017) La coopération climatique après l'Accord de Paris – Valeur des émissions négatives et coût de la non-action quand la concentration dépasse 400ppm. *FAERE Policy Paper*, 2017-07.

**La coopération climatique après l'Accord de Paris  
Valeur des émissions négatives et coût de la non-action  
quand la concentration de CO<sub>2</sub> dépasse 400ppm**

*Dominique Bureau*

**Résumé**

Le souci de participation universelle à l'Accord de Paris a eu un prix en termes d'ambition des efforts. Sans correction des trajectoires envisagées à l'horizon 2030 par les contributions nationales, non seulement notre budget carbone compatible avec l'objectif de contenir le réchauffement climatique en dessous de 2°C sera très largement consommé à cet horizon, mais la rupture à opérer alors et les taux de réduction des émissions à réaliser au-delà rendent la faisabilité même de l'objectif des 2°C problématique.

La promesse des émissions négatives est ici critique. Elle justifie un effort de recherche à la hauteur de l'enjeu. En l'état, l'ampleur des gisements et leurs conditions de déploiement demeurent cependant très incertaines, trop pour se permettre de reporter les efforts d'atténuation des émissions, compte-tenu des contraintes sur les rythmes de décroissance futurs des émissions. En conséquence, le renforcement de l'action précoce d'atténuation doit être crédité d'une valeur d'option significative car, d'un côté l'épuisement de notre budget carbone est irréversible si ces technologies ne sont pas au rendez-vous, de l'autre il serait toujours possible d'ajuster les scénarios d'émissions en cas d'aléa favorable.

Les accroissements importants des coûts d'abattements qui sont associés aux scénarios compatibles avec les objectifs de l'Accord de Paris font que l'on ne peut se permettre d'écart par rapport à la mobilisation des gisements « par ordre de mérite », d'où la nécessité d'un prix uniforme du carbone qui doit, de plus, être établi à un niveau suffisant. La définition de cadres institutionnels permettant de construire des coalitions étendues pour une action renforcée autour de cet objectif constitue donc la priorité, sachant qu'il faut, pour cela, dissuader les comportements de passager clandestin et contourner les attentismes stratégiques.

Ceci doit être conduit en parallèle avec les efforts pour convaincre les Etats-Unis de réintégrer le processus, les deux problèmes étant d'ailleurs liés, au-delà des éléments d'économie politique interne américaine. En effet, l'objectif ultime que l'on attend de leur participation est un renforcement de l'ambition globale, ce qui impose de définir les cadres appropriés pour cela, avec trois volets à considérer : la définition de règles pour la répartition des allocations initiales permettant ensuite la négociation aisée d'un effort global approprié de réduction des émissions, chaque pays se sentant impliqué dans un processus coopératif de type « *I will if you will* »; pour permettre la construction de cette coopération, les compensations nécessaires pour rendre un tel cadre acceptable ainsi que, pour concrétiser les responsabilités par rapport aux émissions passées, les financements légitimes pour l'adaptation des pays en développement subissant des dommages particuliers. ; enfin, pour inciter à la participation, la reconnaissance de la compatibilité des taxes Nordhaus avec l'article XX du Gatt, à l'instar des mesures de protection qui avaient permis l'essor du protocole de Montréal, exemple emblématique mais isolé de coopération réussie pour un bien public global.

JEL Q50, Q54, Q56

Mots-clef : valeur d'option, négociation climatique

## La coopération climatique deux ans après l'Accord de Paris Résumé long pour décideurs

*Le souci de participation universelle à l'Accord de Paris avait eu un prix en termes d'ambition des efforts. Malgré la dynamique de prise de conscience et de mobilisation des acteurs non étatiques qui s'est poursuivie, le renforcement escompté des « contributions nationales » et la montée en régime des financements ne sont pas au rendez-vous alors que la porte des trajectoires compatibles avec l'objectif des 2°C est en train de se refermer.*

*Y remédier nécessite de distinguer les responsabilités par rapport aux émissions passées et la responsabilisation vis à vis des émissions futures. Cette dernière est cruciale car sinon, après le dépassement des 2°C, on ira vers des irréversibilités dans les dommages changeant encore d'échelle. Elle nécessite un prix uniforme du carbone établi dans le cadre d'institutions écartant les comportements de passager clandestin. Évidemment, les attentes des pays du Sud en matière d'adaptation et d'aide à la transition sont aussi légitimes. Mais la logique est là de nature différente, d'éthique des responsabilités et de solidarité.*

### Options cardinales

L'adoption de l'Accord de Paris puis sa ratification rapide ont constitué un succès, permis notamment par le travail du GIEC pour vulgariser la science du climat. Sa négociation a aussi bénéficié d'un *momentum* dans les relations sino-américaines, la Chine reconnaissant la notion de pic d'émissions, alors que ses engagements antérieurs demeuraient exprimés en termes de découplage « relatif ». La distinction de « l'Annexe 1 », qui avait forgé l'absence de ratification du Protocole de Kyoto par les Etats-Unis, est ainsi moins prégnante, ce qui est essentiel car, compte-tenu du poids tendanciel des émissions des pays émergents, il ne peut y avoir de trajectoires de mitigation efficaces sans participation des plus gros émetteurs.

Dans ce nouveau contexte, le revirement de la présidence américaine n'a pu se parer de quelconque légitimité : il s'agit seulement de « dénégation de vérité scientifique qui dérange, de démagogie et de cupidité ». Cependant, la réintégration des Etats-unis dans le processus dépendra d'abord de l'intérêt qu'ils trouveront à la coopération et les efforts en ce sens ne seront vraiment utiles que s'ils permettent d'engager une coopération renforcée par rapport à ce que contient l'Accord de Paris.

En effet, les réductions d'émissions associées à la somme des contributions volontaires (« NDC ») des Etats élaborées dans ce cadre demeurent très insuffisantes au regard des objectifs fixés en termes d'objectif global « bien en-dessous des deux degrés », le dépassement de notre budget carbone compatible avec cette cible étant probable vers 2040, sauf renforcement substantiel de l'action, comme le montrent les « budgets carbone ». Nos choix possibles relèvent alors de quatre options principales :

- renforcer l'action à l'horizon 2030 ;
- devoir, sinon, décarboner à rythme accéléré nos économies entre 2030 et 2050 ;
- ou alors subir et, surtout léguer aux générations futures, les dommages de la non-action, tels que les cernent progressivement les travaux du groupe 2 du GIEC sur les impacts du changement climatique;

- à moins de réussir le pari d'un déploiement massif de nouvelles techniques de capture dans l'air ambiant et stockage du carbone (les « émissions négatives »).

### **Les émissions négatives sauveront-elles la planète ?**

La plupart des scénarios qui, actuellement, étudient comment tenir l'objectif des 2°C combinent un pic de concentrations (« *overshoot* ») dépassant transitoirement la cible, puis de fortes réductions, associées à différentes formes de stockage et de capture de carbone. Les taux de réduction des émissions à réaliser alors rendant leur faisabilité même problématique, la promesse des émissions négatives est critique.

Elle justifie sans conteste un effort de recherche-développement massif dès lors que les marges sur les abattements futurs deviennent insuffisantes pour corriger les dérives des émissions passées. La crédibilité du prix du carbone à long-terme conditionnant l'innovation en ce domaine, la mise en place d'instruments de sécurisation de type « contrats aux différences » permettrait d'ancrer les anticipations à cet égard et limiter les primes de risque exigées par les investisseurs.

Pour autant, l'ampleur des gisements et leurs conditions de déploiement demeurent incertaines, trop pour se permettre de reporter les efforts d'atténuation des émissions, compte-tenu des contraintes par ailleurs sur les rythmes réalistes de décroissance future des émissions. En effet, la possibilité d'« émissions négatives » massives à partir de la biomasse doit être examinée à la lumière de la question de la concurrence pour les usages des sols à l'horizon 2050 compte-tenu des besoins alimentaires. Par ailleurs, les technologies alternatives de capture par des matériaux développés à cet effet relèvent encore du laboratoire plus que du déploiement.

En conséquence, le renforcement de l'action précoce d'atténuation doit être crédité d'une valeur d'option significative car, d'un côté l'épuisement de notre budget carbone est irréversible si ces technologies ne sont pas au rendez-vous, de l'autre il serait toujours possible d'ajuster les scénarios d'émissions en cas d'aléa favorable.

Confronté à des coûts de décarbonation, certes coût-efficaces mais non négligeables, le recours aux instruments économiques, c'est-à-dire la mise en place d'un prix uniforme du carbone, est incontournable pour mobiliser les abattements en premier lieu là où ils sont le moins coûteux. Un tel prix du carbone, justifié par le fait que, fondamentalement les émissions sont excessives parce qu'en l'absence de prix du carbone les agents qui en sont à l'origine ne sont pas responsabilisés aux dommages environnementaux qui résultent de leurs comportements, peut se concevoir selon deux approches équivalentes: l'éco-fiscalité et les mécanismes de droits d'émissions échangeables sous plafond global régulé<sup>1</sup>. Dans le cadre de ceux-ci, l'allocation initiale des quotas introduit un instrument redistributif spécifique, utile pour assurer l'acceptabilité des efforts comme l'avait montré l'expérience du SO<sub>2</sub> dans le secteur électrique. Cette approche préserve par ailleurs la subsidiarité pour les politiques nationales et la fiscalité, tout en permettant d'intégrer à la marge d'autres acteurs (villes ; forêts par exemple) par le biais de mécanismes de projet.

Dans ces conditions, toutes les initiatives pour améliorer le fonctionnement des marchés du carbone et en étendre le champ sont à soutenir. Mais ceci ne suffit pas car, si le couplage de

---

<sup>1</sup> *Cap and Trade*

ces marchés permet de réduire le coût global des efforts, l'idée que les pays seront ainsi enclins à se montrer plus ambitieux est à nuancer.

### **Les obstacles à la coopération**

Chacun a spontanément intérêt à se comporter en « passager clandestin », comptant sur les efforts des autres et limitant les siens, notamment en plaidant pour la différenciation du prix du carbone. De plus, non seulement chaque pays compte sur les efforts précoces des autres, mais essaye de faire en sorte que les efforts futurs seront reportés sur eux, ce qui rend peu crédible un mécanisme de renforcement progressif des efforts. Ainsi, le caractère insuffisant des efforts associés à l'Accord de Paris est mécaniquement la contrepartie du principe de volontariat.

Comment sortir de cette situation non coopérative, pour faire émerger une ambition commune ? La référence aux conditions dans lesquelles on assure la fourniture de biens publics en général peut ici éclairer. En effet, sauf pour des biens publics très locaux où la négociation intervient entre quelques acteurs parfaitement informés sur les coûts et bénéfices pour tous les autres (avec de plus les instruments de contrôle et de compensation adaptés), le lieu privilégié pour cela est le budget des Etats.

Dans ce cadre, l'action publique s'organise par rapport à deux objectifs : s'assurer que les biens publics sont produits au moindre coût, en recourant aux mécanismes d'enchères des marchés publics ; fixer le niveau approprié de bien public, avec comme problème-clé la révélation des préférences pour celui-ci. A cet égard, le mécanisme de base est de type « vote à la majorité », les principes d'égalité devant l'impôt qui servira à son financement étant fixés à un niveau supérieur, pour écarter les comportements stratégiques au moment de ce choix.

Dans un contexte d'émissions diffuses, où la production des efforts d'abattements est l'affaire de tous, la solution au premier problème réside, comme on l'a vu, en la mise en place d'une tarification du carbone. Pour le second, il faut des cadres de négociation simples, séparant les problèmes du choix du niveau global des efforts, de la répartition des efforts ou du surplus ainsi créé car, tant que l'on ne sait pas qui supportera les efforts, le prix du carbone acceptable est faible (ou le plafond global d'émissions laxiste, selon le moyen que l'on privilégie pour faire émerger un prix du carbone).

En revanche, dès lors qu'une règle de répartition serait pré-établie, même imparfaite comme le sont aussi les mécanismes internes aux Etats, la coopération pour définir l'effort global peut s'enclencher suivant une logique « *I will if you will* ». Si la coopération se fait sur le prix du carbone, par exemple, chacun peut envisager d'appliquer un prix du carbone plus élevé dès lors qu'il s'applique à tous. Et il en va de même si la coopération se fait à propos du quota global, la règle d'allocation<sup>2</sup> étant préalablement posée.

Un tel cadre demeure toutefois insuffisant pour construire la coopération climatique car, en l'absence « d'Etat » pouvant imposer la participation au mécanisme, il faut aussi inciter les pays à rejoindre une coalition qui se fixerait une telle règle. L'obstacle est sérieux car l'élargissement de la coalition accroît le prix du carbone en son sein, ce qui bénéficie à tous

---

<sup>2</sup> Privilégiant sans doute un critère « *output/PIB-based* », pour ne pas pénaliser le développement, mais combiné avec un terme de « *grandfathering* » pour l'acceptabilité au départ.

mais incite les pays en dehors à y rester. Ainsi, il n'existe pas, en théorie, de coalition climatique stable susceptible de poursuivre des objectifs ambitieux de réduction des émissions de gaz à effet de serre sans mécanisme de sanction vis-à-vis des non-participants.

Des sanctions commerciales modérées vis-à-vis des Etats se comportant en passager clandestin peuvent toutefois régler ce problème, à l'instar des mesures de protection commerciale qui avaient permis l'essor du protocole de Montréal sur la couche d'ozone. Le droit « incitatif »<sup>3</sup> à imposer pour cela est limité. La reconnaissance de sa compatibilité avec l'article XX du Gatt est cependant à consolider.

---

<sup>3</sup> dit *taxe Nordhaus*

## Introduction

L'adoption de l'Accord de Paris et sa ratification dans des délais très rapides ont constitué un succès diplomatique incontestable, le mérite étant d'autant plus grand que les troubles fabriqués par les climato-sceptiques ont laissé des séquelles. A cet égard, le travail du GIEC pour actualiser et vulgariser l'état de l'Art scientifique sur le changement climatique, y compris les incertitudes qui demeurent, a constitué un atout précieux.

Par ailleurs, la négociation a bénéficié alors d'un *momentum* dans les relations sino-américaines permettant de mettre fin à la distinction trop stricte entre les engagements des pays développés (« de l'Annexe 1 ») et ceux des pays en développement, qui avait nourri, au-delà des contingences politiques, l'absence de ratification du Protocole de Kyoto par les Etats-Unis. Cette approche ignorait en effet que, compte-tenu du poids tendanciel des émissions des pays émergents, il ne peut y avoir de trajectoires de mitigation efficaces sans effort de leur part. Le fait que la Chine ait reconnu la notion de pic d'émissions, alors que ses engagements à Cancun demeuraient exprimés seulement en termes de découplage « relatif » par rapport à la croissance, a ainsi marqué un changement majeur.

Dans ce nouveau contexte, le revirement de la présidence « Trump » n'a pu se parer d'une quelconque légitimité : il s'agit seulement de dénégation de vérité scientifique « qui dérange », de démagogie et de cupidité. Y remédier est d'autant plus difficile. La réintégration des Etats-unis dans le processus dépendra d'abord de l'intérêt qu'ils trouvent à la coopération et les efforts en ce sens ne seront vraiment utiles que s'ils permettent d'engager une coopération renforcée par rapport à ce que contient l'Accord de Paris. En effet, les réductions d'émissions associées à la somme des contributions volontaires (« NDC ») des Etats élaborées dans ce cadre demeurent très insuffisantes au regard des objectifs fixés en termes d'objectif global « bien en-dessous des deux degrés » car, sans effort supplémentaire, les émissions continueront à croître à l'horizon 2030.

Ainsi, le préambule de l'Accord notait « avec préoccupation que les niveaux des émissions globales de gaz à effet de serre en 2025 et 2030 estimés sur la base des contributions prévues déterminées au niveau national ne sont pas compatibles avec des scénarios au moindre coût prévoyant une hausse de la température de 2 °C, mais se traduisent par un niveau prévisible d'émissions de 55 gigatonnes en 2030 ». Il notait également que « des efforts de réduction des émissions beaucoup plus importants que ceux associés aux contributions prévues déterminées au niveau national seront nécessaires (...) ». Dans cette perspective, il « invitait le GIEC à présenter un rapport spécial en 2018 sur les conséquences d'un réchauffement planétaire supérieur à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les profils connexes d'évolution des émissions mondiales de gaz à effet de serre ».

Nos choix possibles relèvent en fait de quatre options principales : répondre à cet appel et renforcer l'action à l'horizon 2030 ; devoir, sinon, décarboner à rythme accéléré nos économies entre 2030 et 2050 ; ou alors subir et, surtout léguer aux générations futures, les dommages de la non-action, tels que les cernent progressivement les travaux du groupe 2 du GIEC sur les impacts du changement climatique; à moins de réussir le pari d'un déploiement massif de nouvelles techniques de capture dans l'air ambiant et stockage du carbone.

Aucune option n'étant sans coût, risque ou difficulté, les stratégies réelles les combineront sans doute, de manière voulue, ou subie. Il importe donc d'évaluer les arbitrages intrinsèques

associés, et les obstacles à lever pour réaliser les moins coûteuses pour l'ensemble des générations, présentes et futures.

Fondamentalement, les difficultés que l'on observe pour enclencher un processus volontariste au niveau international résultent du fait que la protection du climat est un « bien public global », qui nécessite une coordination sans précédent dans l'histoire des relations internationales. En l'absence de celle-ci, chaque pays -et au sein de chaque pays, chaque acteur ou secteur- a spontanément intérêt à se comporter en « passager clandestin », comptant sur les efforts des autres et limitant les siens, et cherchant d'abord à avoir la meilleure position de négociation au regard de ses intérêts les plus immédiats, ce qui conduit globalement à la poursuite des tendances « Business as Usual ». Le retrait américain en fournit l'illustration extrême. Mais l'enjeu est plus général, le caractère insuffisant des efforts associés à l'Accord de Paris étant simplement la contrepartie de l'universalité d'un Accord comptant essentiellement sur le volontariat. Comment sortir de cette situation non coopérative, pour faire émerger une ambition commune ?

Pour éclairer ces questions, il faut considérer les deux dimensions :

-de la définition des stratégies souhaitables. Jusqu'où doit-on corriger les dérives du passé ? En quoi le problème que nous devons résoudre maintenant diffère-t-il de celui envisagé au moment du rapport Stern (2007)? Comment parier raisonnablement sur les émissions négatives ?

-de la construction de la coopération climatique. Pourquoi les appels à la responsabilité ne peuvent nous sortir de l'attentisme associé aux « NDCs »? Quelles institutions permettraient d'enclencher une dynamique d'engagements réciproques à la hauteur des enjeux? Peut-on attendre du seul « linkage » des marchés de permis un tel relèvement de l'ambition des efforts ?

## **I- Cadre d'analyse**

*Le modèle développé ci-dessous a essentiellement une visée pédagogique, d'explicitation des questions économiques que pose la coopération climatique dans le contexte actuel « post-Accord de Paris ». A cette fin, il est aussi parcimonieux et simple que possible, avec simplement deux périodes et une description très agrégée des dommages. Avant d'en présenter les hypothèses, il convient donc, pour en préciser la portée, de justifier les choix et simplifications qui ont été retenues, ou en sens inverse, les complexités qu'il nous a semblé impossible d'ignorer.*

### ***1-Les enjeux climatiques, trente ans après la création du GIEC***

L'évaluation des politiques de mitigation nécessite de comparer le coût des actions engagées aujourd'hui ou demain pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, avec leurs bénéfices en termes de moindres pertes et dommages de toute nature, pour les générations futures. Le modèle proposé vise à éclairer ces arbitrages et les problèmes de coopération associés. Les faits pris en compte combinent des éléments institutionnels liés au cadre de l'accord de Paris et différentes données techniques et économiques déterminantes pour l'évaluation et la mise en œuvre des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Sur le premier plan, les principales caractéristiques devant retenir l'attention ont été rappelées en introduction : à l'horizon 2030, l'Accord de Paris met essentiellement en œuvre un mécanisme de contributions volontaires, chaque pays choisissant l'ambition des efforts qu'il s'assigne, et les moyens à mettre en œuvre pour cela. Aucune référence n'est faite à un prix uniforme du carbone, contrairement à ce que recommandent beaucoup d'économistes (cf Gollier et Tirole, 2015, par exemple).

La première période du modèle correspond à ce cadre existant. Elle va d'aujourd'hui à 2030, pour étudier le besoin et les conditions d'un renforcement des efforts d'abattement, ainsi que la crédibilité du mécanisme de renforcement progressif avec cliquet qui est envisagé dans l'Accord de Paris.

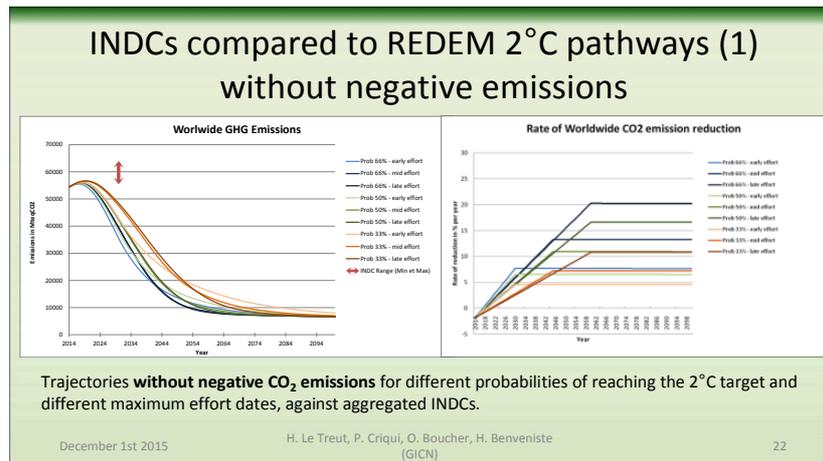
Evidemment, aucun renforcement de l'action n'est sans coût, comme le montre, par exemple, le tableau suivant tiré de l'étude de Rogelj et al. (2016).

Table 1   Key characteristics of 1.5°C scenarios and comparison with 2°C scenarios.	
Key 1.5°C characteristic	Detailed qualification
CO <sub>2</sub> reductions beyond global net zero emissions.	1.5°C-consistent scenarios reach net zero carbon emissions globally by mid-century, 10-20yr earlier than in scenarios consistent with only 2°C, and show net negative emissions in the 2050-2100 period, which is not a requirement for 2°C-consistent scenarios.
Additional GHG reductions mainly from CO <sub>2</sub> .	The mitigation potential of non-CO <sub>2</sub> GHGs is often already exhausted by mitigation action for keeping warming to below 2°C. Therefore, additional reductions in 1.5°C scenarios are mainly from CO <sub>2</sub> .
Rapid and profound near-term decarbonization of energy supply.	1.5°C scenarios require a decarbonization of energy supply that is more rapid and profound than in 2°C-consistent scenarios. Early CO <sub>2</sub> reductions in 1.5°C-consistent scenarios are achieved through early reductions in the power sector (Supplementary Fig. S6).
Greater mitigation efforts on the demand side.	By mid-century, mitigation efforts in the industry, buildings and transport sectors lead to significantly lower emissions from these sectors.
Energy efficiency improvements are a crucial enabling factor for 1.5°C.	Energy efficiency plays a critical role in low stabilization scenarios in general. Most 1.5°C scenarios assume energy use per unit of GDP to decrease at a faster pace than historically observed, for example, owing to dedicated energy efficiency policies. In addition, there are substantial climate-policy-induced demand reductions, which are greater in 1.5°C than in 2°C scenarios owing to the more stringent emissions constraints.
Higher mitigation costs.	Aggregated long-term mitigation costs are higher, for example up to two times when comparing corresponding 1.5°C and 2°C scenario pairs. The effect on near-term costs is greater.
Comprehensive emission reductions need to be implemented in the coming decade.	The window of emissions in 2030 that still keeps the option open to limit warming to below 1.5°C by 2100 is much lower and substantially smaller than the corresponding window for 2°C-consistent scenarios. Diverting investments towards low-carbon technologies in the coming decade is therefore critical.

Source: Rogelj et al (2015)

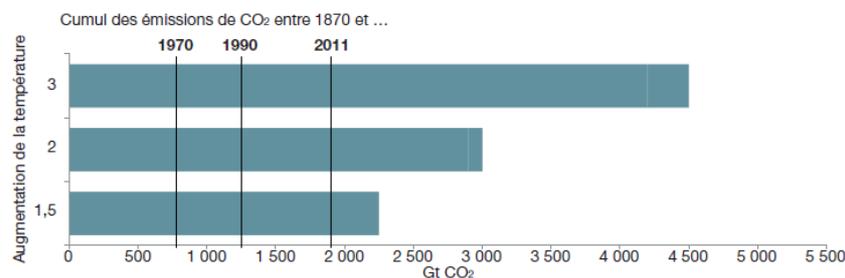
A cet égard, on considérera des coûts d'abattement quadratiques à chaque période, la seconde représentant l'étape ultérieure des trajectoires de décarbonation, soit grossièrement l'horizon 2030-2050. Dans les scénarios antérieurs à cet Accord, il était généralement imaginé que la décarbonation des économies pourrait être quasi-totale à cet horizon. Le réalisme de cette perspective est aujourd'hui questionné.

En effet, comme le montrent (cf. schéma ci-dessous) les travaux du Groupe interdisciplinaire d'évaluation des contributions nationales (2016), il faudrait pour cela, relever l'effort immédiat, avec des scénarios de réduction d'émissions d'abord plus ambitieux que les NDC, puis réaliser des niveaux d'abattements aux limites du techniquement faisable : hors capture du carbone dans l'air ambiant, les émissions sont en effet nécessairement positives ; de plus, on ne peut remplacer instantanément les équipements utilisant des combustibles fossiles. Dans ces conditions, une caractéristique importante du modèle étudié est l'introduction d'une contrainte sur les abattements faisables en seconde période (hors « émissions négatives »).



Les gaz à effet de serre s'accumulent dans l'atmosphère à un rythme s'accroissant, un élément robuste de la prospective climatique est alors le dépassement probable de notre budget carbone compatible avec une cible de hausse des températures limitée à 1,5°C, et même de la cible 2°C vers 2040 sauf renforcement substantiel de l'action, comme le montre le schéma ci-dessous qui, qui suggère une relation (réduite car seul le CO<sub>2</sub> est pris en compte) linéaire entre cumul des émissions de CO<sub>2</sub> (CCE) et augmentation moyenne de température :  $T^{\circ} \approx CCE/1500$

**Budget carbone correspondant à la limite d'augmentation de température avec une probabilité de 50 %**



*Note : le graphique se lit ainsi : avec une probabilité de 50 %, une hausse de la température inférieure à 3°C à l'horizon 2100 implique l'émission cumulée de moins de 4 500 Gt CO<sub>2</sub>. Parmi les GES, uniquement le CO<sub>2</sub> est pris en compte ici.*

*Source : IACE, à partir de Giec, 1<sup>er</sup> et 3<sup>e</sup> groupes de travail, 2014*

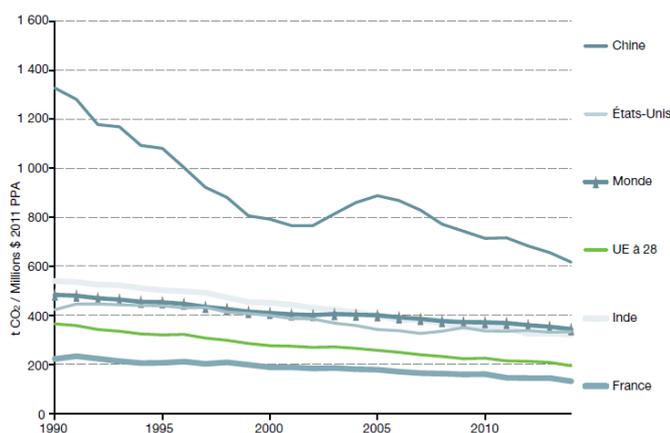
Pour en évaluer les conséquences et concevoir les politiques de décarbonation dans ce nouveau contexte caractérisé par le cumul désormais élevé des émissions passées, le modèle est bouclé par l'introduction d'une fonction représentant le coût des dommages ultérieurs associé aux niveaux de concentration en gaz à effet de serre au terme de cette seconde période. Ce coût correspond donc à la somme actualisée de l'ensemble des coûts induits au-delà (mitigation, adaptation, et dommages résiduels légués aux générations futures).

Le point essentiel est que l'on considère ces dommages comme non linéaires, en ligne avec les travaux du groupe 2 du GIEC (cf. 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2015) qui documentent des accélérations quand on dépasse, selon les impacts, les seuils des 2 ou 3°C. Cette non-linéarité apparaît aussi dans les évaluations récentes des impacts directement économiques, y compris l'évolution de la productivité du travail, comme le montre l'étude de Burke et al.(2015).

Ce schéma suggère une forte différenciation Nord-Sud dans l'exposition des différents pays, que l'on retrouve dans l'étude des impacts spécifiques, tels que les inondations. Il mentionne aussi l'incertitude qui demeure sur ces évaluations d'impact. A celle-ci, il faut ajouter les incertitudes sur les scénarios tendanciels d'émissions et les potentiels d'émissions négatives. Ces caractéristiques sont importantes et donc à intégrer dans la modélisation.

Le dernier élément qui sera pris en compte est illustré par le schéma suivant qui montre que, si l'on peut imaginer une convergence progressive des émissions rapportées au PIB, il faut aussi considérer l'hétérogénéité des structures initiales des structures de production en termes d'efficacité carbone.

**ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub> PAR RAPPORT AU PIB  
DANS LE MONDE ENTRE 1990 ET 2014**



Sources : SOeS d'après EDGAR, World Bank, 2015

## 2-Le modèle

Le modèle retient donc une temporalité à deux périodes, comme chez Beccherlé-Tirole (2011). Les variables de contrôle sont les efforts d'abattement de chaque pays à chaque période, notés respectivement  $X_i, Y_i$  pour le pays  $i$ , conduisant à  $X$  et  $Y$  pour les niveaux

d'abattement totaux respectivement en première et seconde période. Les dommages, supposés intervenir au-delà de la seconde période, étant liés au stock d'émissions accumulées à la fin de celle-ci, on fait l'hypothèse que leur déterminant est une variable de la forme :  $\Delta - X - Y$ , avec  $\Delta$  variable aléatoire (de moyenne  $\bar{\Delta}$ ) reflétant la concentration « dommageable » de gaz à effet de serre en l'absence d'abattements aux deux périodes considérées. Celle-ci est d'autant plus élevée que l'on a accumulé des émissions par le passé. On suppose par ailleurs que l'incertitude sur ce paramètre intègre tous les facteurs évoqués ci-dessus, et c'est par ce biais qu'y seront introduits les potentiels d'émissions négatives.

Suivant la formulation de base de Nordhaus (2015), on fait l'hypothèse, pour la deuxième période, de coûts d'abattement quadratiques par rapport au taux de réduction, les pays ne différant que par leur taille (mesurée par leur part dans le PIB mondial  $\theta_i$ , avec  $\sum \theta_i = 1$ ). En revanche, on abandonne les hypothèses habituelles de dommages linéaires ou de pur plafond catastrophique (difficile à situer), en supposant que les dommages sont quadratiques en fonction de la concentration définie ci-dessus. De plus, on introduit un facteur d'hétérogénéité dans l'exposition des pays (paramètre  $\varepsilon_i$ , avec  $\sum \varepsilon_i = 0$ ). De même, on introduit en première période une différenciation des coûts d'abattement (paramètre  $k_i$  avec  $\sum k_i = 0$ ). Enfin, on suppose que la possibilité de corriger en deuxième période les dérives antérieures d'émissions est limitée par un niveau de réduction maximal réalisable, supposé homogène entre les pays ( $\forall i, Y_i \leq \theta_i A$ ).

Notant  $\delta$  le facteur d'actualisation entre les deux périodes, ces hypothèses conduisent à considérer que chaque pays cherchera à minimiser un coût total (coûts d'abattement des émissions et dommages) des enjeux climatiques (normalisé) de la forme:

$$C_i = \left( \frac{X_i^2}{\theta_i + k_i} \right) + \delta \left[ \left( \frac{Y_i^2}{\theta_i} \right) + \gamma (\theta_i + \varepsilon_i) (\Delta - X - Y)^2 \right]$$

Le paramètre  $\gamma$  définit donc la pente du coût marginal des dommages actualisés en fonction de la « concentration » ( $Z = \Delta - X - Y$ ). Il synthétise donc : des éléments sur la relation entre celle-ci et les dommages à chaque instant futur ; et l'actualisation de ceux-ci (par rapport à la seconde période, puisque l'on y applique par ailleurs le coefficient d'actualisation  $\delta$ ).

On sait que la définition de ces facteurs d'actualisation à long-terme a constitué, sur le plan méthodologique, le principal sujet de controverse de la « Stern Review » (approfondis notamment par C.Gollier, 2013). Ceci reflète que l'évaluation des choix à opérer par les politiques climatiques soulève des arbitrages intertemporels extrêmes par rapport à ce que considère usuellement l'analyse économique, avec de plus des dimensions d'incertitude tout aussi spécifiques.

## II- La réévaluation des objectifs

*Avant d'examiner les obstacles à la coopération, il convient de préciser ce que serait sa cible souhaitable. Ceci permettra en particulier de souligner en quoi l'atteinte prévisibles des seuils correspondants aux budgets carbone pour 1,5°C ou 2°C change la donne, ainsi que les enjeux des émissions négatives dans ce nouveau contexte: pourquoi il faut renforcer la recherche en ce domaine et en rendre possible le déploiement ; mais aussi, pourquoi il faut être prudent avant d'en conclure que les espoirs sur les technologies de capture-stockage*

dans l'air ambiant rendraient moins nécessaires le renforcement immédiat de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

### 1-Optimum et structure de l'ajustement suite à la dérive des émissions passées

Une trajectoire de décarbonation efficace doit premièrement localiser les abattements là où ils sont le moins coûteux. Pour cela, il faut donc, qu'à chaque période, le coût marginal d'abattement soit égal pour tous les pays (ce qui signifie classiquement que le prix du carbone qui permettrait d'en assurer la réalisation doit être uniforme à chaque période). Pour tout scénario  $(X, Y)$ , ceci implique :

$$\forall i, X_i = (\theta_i + k_i)X \text{ et } Y_i = \theta_i Y$$

Le coût global total (pour l'ensemble des pays) vaut alors :

$$C = X^2 + \delta[Y^2 + \gamma(\Delta - X - Y)^2]$$

La politique intertemporelle optimale de réduction des émissions doit ensuite viser à minimiser l'espérance de ce coût, en intégrant : d'une part la contrainte éventuelle sur les abattements en deuxième période qui se résume alors à une contrainte globale  $Y \leq A$ ; d'autre part, l'information disponible sur  $\Delta$  au moment de choisir les niveaux d'abattement en seconde période.

Si l'on suppose cette variable déterministe ( $\Delta = \bar{\Delta}$ ), le scénario optimal vérifie :

$$X = \gamma\delta Z ; Y = \min\left(\frac{\gamma}{1+\gamma}(\bar{\Delta} - X), A\right)$$

Ceci conduit à deux régimes, selon la valeur de  $\bar{\Delta}$  par rapport à la valeur seuil :

$$\Delta_s = A(1 + \gamma + \gamma\delta)/\gamma$$

Dans le cas où la contrainte  $Y \leq A$  n'est pas saturée, le rapport des coûts marginaux d'abattements entre les deux périodes ( $2X/2Y$ ) est égal au coefficient d'actualisation  $\delta$ . Donc la trajectoire de prix du carbone à mettre en place suit la règle de Hotelling, le relèvement progressif du prix du carbone au rythme du taux d'actualisation traduisant le fait que c'est le cumul des émissions qui détermine les dommages (les impacts immédiats étant ici négligés).

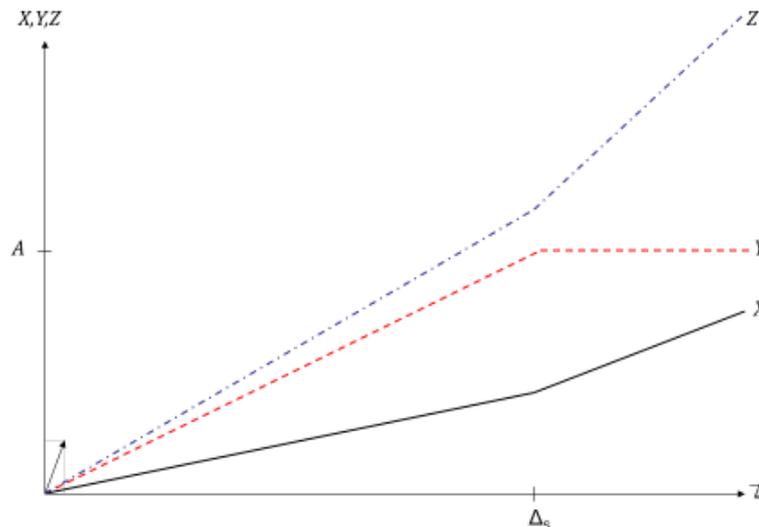
Plus généralement, on obtient, pour les efforts de première et seconde période, pour la concentration en fin de seconde période et le coût total :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } \bar{\Delta} \leq \Delta_s, X^* = \frac{\gamma\delta\bar{\Delta}}{1+\gamma+\gamma\delta} ; Y^* = \frac{\gamma\bar{\Delta}}{1+\gamma+\gamma\delta} ; Z^* = \frac{\bar{\Delta}}{1+\gamma+\gamma\delta} \text{ et } C^* = \frac{\gamma\delta\bar{\Delta}^2}{(1+\gamma+\gamma\delta)} \\ \text{si } \bar{\Delta} > \Delta_s, X^* = \frac{\gamma\delta(\bar{\Delta}-A)}{1+\gamma\delta} ; Y^* = A ; Z^* = \frac{\bar{\Delta}-A}{1+\gamma\delta} \text{ et } C^* = \delta\left[A^2 + \frac{\gamma(\bar{\Delta}-A)^2}{1+\gamma\delta}\right] \end{array} \right.$$

La statique comparative correspondante par rapport à la valeur de  $\bar{\Delta}$  permet de préciser la manière dont devrait être corrigée une dérive des émissions passées ayant accru le stock présent de concentration et par là, sauf renforcement des efforts, les dommages futurs. Si l'on

ne bute pas sur la contrainte de deuxième période, un écart marginal devrait être compensé à hauteur de  $(\gamma\delta/(1 + \gamma + \gamma\delta))$  en renforçant les efforts en première période, de  $(\gamma/(1 + \gamma + \gamma\delta))$  en deuxième période, le solde déterminant le relèvement de la cible de température. Quand la capacité de réduction de deuxième période devient saturée, l'effort de correction en première période doit être encore accru (cf schéma 1 ci-dessous).

Schéma 1 : Efforts optimaux en fonction de  $\bar{\Delta}$



La valeur du coût marginal total à l'optimum (égale à  $2X^*$ ) renseigne par ailleurs sur le niveau de prix de carbone initial souhaitable et donc, par exemple, sur les dépenses que l'on devrait être prêt à consentir pour disposer des technologies de capture dans l'air ambiant : le bénéfice d'une émission négative certaine, qui correspond au prix initial du carbone à mettre en place, est naturellement croissant par rapport à la concentration de référence, avec une pente plus forte lorsque celle-ci dépasse le seuil  $\Delta_s$ . En d'autres termes, la recherche sur ces technologies revêt une importance accrue à mesure que les marges sur les abattements futurs deviennent insuffisantes pour corriger les dérives des émissions passées.

Ces résultats peuvent être illustrés par le calibrage suivant partant des analyses du problème tel que l'on pouvait l'anticiper il y a une dizaine d'années, au moment du rapport Stern. Il était alors raisonnable d'envisager un cumul des émissions à l'horizon 2040 de l'ordre de  $\bar{\Delta} \approx 3150 Gt$ . Par ailleurs, le rapport Stern considérait comme souhaitables des trajectoires de réduction des émissions pour rester en deçà de  $1,5^\circ C$  (soit  $Z^* = 2250 Gt$ ). Si l'on considère un taux d'actualisation annuel de 3% par an pour les quinze premières années, soit  $\delta = 0,63$ , ce choix était optimal pour :  $\gamma = 0,245$ .

Reprenant le problème aujourd'hui, donc à l'horizon 2050, avec les mêmes paramètres mais en intégrant à la fois les émissions passées et les niveaux actuellement atteints par celles-ci, on doit envisager plutôt  $\bar{\Delta} \approx 3850 Gt$ . Dans ces conditions, la cible réévaluée à cet horizon s'établirait à  $Z^* = 2780 Gt$ , correspondant à un accroissement de température de  $1,85^\circ C$  à cet horizon.

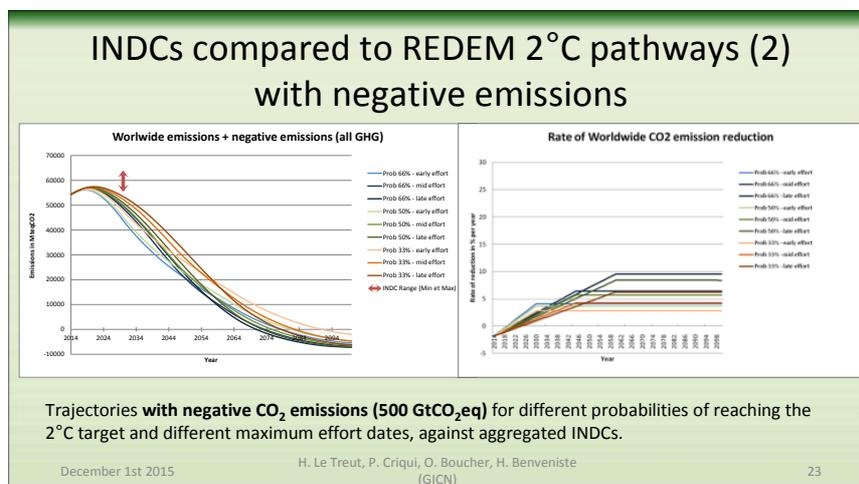
Comme on l'a indiqué, cette analyse coût-bénéfice doit, au travers de la fonction de dommages, considérer des horizons très éloignés, si on les compare à ceux d'autres politiques. La question est donc d'apprécier quel retour sur investissement (taux d'actualisation), on exige pour l'investissement à long terme qu'est la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Suite aux controverses suscitées par le rapport Stern, l'expertise économique en ce domaine a permis de dégager trois idées forces : la définition de ce taux d'actualisation est un choix de société, les indications fournies par les marchés financiers n'étant pas adaptées pour des choix à très long terme ; un paramètre-clé est le degré d'aversion qu'a la collectivité vis-à-vis de l'inégalité entre générations, à combiner avec les perspectives de croissance à long-terme (« règle de Ramsey »), qui explique que les générations présentes sont moins enclines à sacrifier de leur consommation, si elles pensent que les générations futures seront plus riches ; mais les perspectives de croissance à long-terme étant incertaines, il faut considérer avec plus d'attention les scénarios défavorables. Ceci justifie de retenir des taux d'actualisation décroissants, faibles pour les horizons éloignés. Ainsi, les bénéfices à long-terme comptent, alors qu'une approche financière les négligerait.

En pratique, on aboutit cependant à l'idée que le taux d'actualisation à considérer doit être compris entre une et trois fois le taux de croissance *per capita* anticipé à long-terme, la valeur du rapport Stern correspondant plutôt à la borne inférieure (1,3 %). Mais, en sens inverse, on a progressé aussi sur l'identification et la qualification des dommages, ce qui conduirait plutôt à revaloriser à la hausse les coûts des dommages à prendre en compte (Arrow et al., ). Dans ces conditions, l'objectif de 2°C, qui correspond à  $\gamma = 0,185$ , apparaît raisonnable.

Toutefois, ces calculs ne prennent pas en compte les contraintes sur les abattements réalisables. A cet égard, l'estimation « en 2005 » revisitée n'était donc valide que si l'on supposait  $A \geq 550$ , ce qui n'était pas déraisonnable. Mais, dans le contexte actuel, ce n'est plus le cas, ce qui rend encore plus souhaitable le renforcement de l'action en première période sachant que la correction des dérives en seconde sera contrainte.

## 2-Valeur d'option d'un renforcement de l'action précoce et émissions négatives

De fait, la plupart des scénarios qui, actuellement, étudient comment tenir l'objectif des 2°C combinent un pic de concentrations (« overshoot ») dépassant transitoirement la cible, puis de fortes réductions, associées à différentes formes de stockage et de capture de carbone.



Les modalités pour réaliser de tels scénarios demeurent cependant très hypothétiques : la possibilité d'«émissions négatives» massives à partir de la biomasse doit être examinée à la lumière de la question de la concurrence pour les usages des sols à l'horizon 2050 compte-tenu des besoins alimentaires; les technologies alternatives de capture par des matériaux développés à cet effet relèvent du laboratoire plus que du déploiement. Dans conditions, il importe donc d'examiner comment prendre en compte cette incertitude quand on détermine l'effort de réduction à réaliser en 1<sup>o</sup> période : jusqu'où peut-on se satisfaire d'une action précoce limitée au motif des perspectives d'émissions négatives qui, en l'état, demeurent incertaines.

Pour examiner ce point, considérons, de manière générale, l'incertitude sur  $\Delta$ . L'impact sur les choix de première période dépend des hypothèses sur l'information qui sera disponible en seconde 2<sup>o</sup> période.

Si  $Y$  doit être choisi sans en connaître la réalisation, ou si l'on considère une stratégie « myope » qui ignore les possibilités d'ajuster l'effort en seconde période en conséquence, l'objectif est de minimiser, par rapport à  $(X, Y)$ , l'espérance du coût total :

$$\mathbb{E}_{\{\Delta\}}(C) = X^2 + \delta[Y^2 + \mathbb{E}_{\{\Delta\}}((\Delta - X - Y)^2)]$$

Compte-tenu de la formulation quadratique, les conditions nécessaires du premier ordre sont similaires au cas déterministe, la valeur sûre de  $\Delta$  de étant simplement remplacée par son espérance  $\bar{\Delta}$ .

Cependant, il est raisonnable de penser qu'à l'horizon 2030, les modèles climatiques, l'évaluation des dommages climatiques, les perspectives de déploiement des technologies de capture-stockage dans l'air ambiant seront mieux cernées. Les choix d'abattement en seconde période intégreront alors ces éléments quand ils disposeront de marge de manoeuvre.

Si l'on fait l'hypothèse de révélation complète de  $\Delta$ , le niveau d'abattement contingent optimal vérifie alors :

$$Y_c^*(\Delta, X) = \min\left(\frac{\gamma(\Delta - X)}{1 + \gamma}, A\right)$$

Le choix de l'effort de 1<sup>o</sup> période résultera donc du programme :

$$\min_X \left( \mathbb{E}_{\{\Delta\}}(C) \right) = X^2 + \delta D_{\{\Delta\}}(X)$$

avec :

$$D_{\{\Delta\}}(X) = \mathbb{E}_{\{\Delta\}}(Y_c^*(\Delta, X)^2 + \gamma(\Delta - X - Y_c^*(\Delta, X))^2)$$

La valeur optimale de l'effort de 1<sup>o</sup> période vérifie donc :

$$X^{**} = -\frac{\delta}{2} D'_{\{\Delta\}}(X^{**})$$

On notera  $X_{\{\Delta\}}^{**}(\delta)$  la fonction définie ainsi implicitement, par rapport au facteur d'actualisation  $\delta$ , et croissante par rapport à celui-ci.

Par ailleurs, on peut exprimer  $D_{\{\Delta\}}(X)$  de deux manières :

$$(a) \quad D_{\{\Delta\}}(X) = \mathbb{E}_{\{\Delta\}} \left[ \frac{\gamma(\Delta-X)^2}{1+\gamma} - \delta(1+\gamma) \left( A - \frac{\gamma(\Delta-X)}{1+\gamma} \right)^2 \mathbb{1} \left( \Delta \geq \frac{1+\gamma}{\gamma} A + X \right) \right]$$

$$(b) \quad D_{\{\Delta\}}(X) = \mathbb{E}_{\{\Delta\}} \left[ A^2 + \gamma(\Delta - X - A)^2 - \delta(1+\gamma) \left( A - \frac{\gamma(\Delta-X)}{1+\gamma} \right)^2 \mathbb{1} \left( \Delta \leq \frac{1+\gamma}{\gamma} A + X \right) \right]$$

L'écriture de la condition nécessaire d'optimalité appliquée à la formulation (a) montre que: si  $\bar{\Delta} \leq \Delta_s$ ,  $X^{**} \geq \frac{\gamma\delta\bar{\Delta}}{1+\gamma+\gamma\delta}$ . De même, avec la formulation (b) : si  $\bar{\Delta} \geq \Delta_s$ ,  $X^{**} \geq \frac{\gamma\delta(\bar{\Delta}-A)}{1+\gamma\delta}$

En d'autres termes, la valeur optimale des efforts d'abattement en première période est toujours supérieure à ce que donnerait le calcul myope « en équivalent certain ». En effet, les possibilités d'ajustement par rapport aux aléas sont dissymétriques : si l'aléa sur est favorable, il est toujours possible de baisser le niveau d'abattement en deuxième période, par rapport à ce qui était envisagé ; en revanche, dès lors que l'on bute sur la contrainte  $Y \leq A$ , l'aléa défavorable se transmet intégralement sur les dommages. Ce point avait été souligné par Baumstark et Gollier dans le rapport Quinet (2009): renforcer l'action en première période procure une valeur d'option au regard du risque de se trouver sans marge de manœuvre disponible en seconde période.

### ***3-Commentaires : du rapport Stern aux « émissions négatives »***

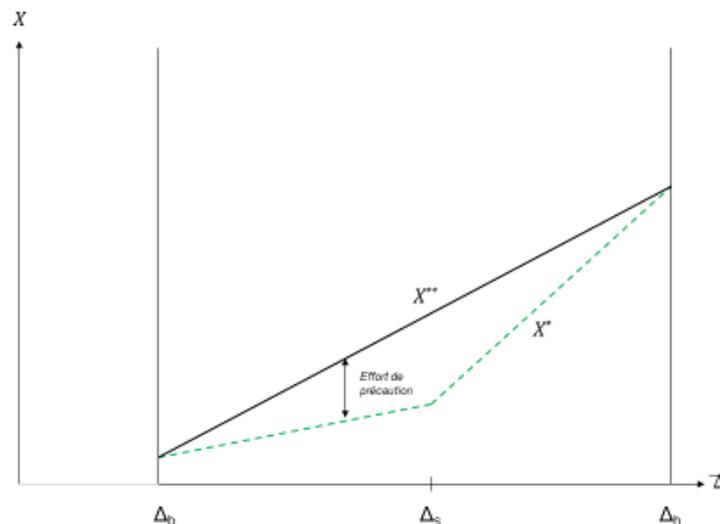
Pour illustrer, considérons le cas où la variable  $\Delta$  ne prend que deux valeurs :  $\Delta_b \leq \Delta_s$  avec une probabilité  $\rho$  ; et  $\Delta_h \geq \Delta_s$  avec une probabilité  $(1 - \rho)$ . On note :

$$X_b^* = \frac{\gamma\delta\Delta_b}{1+\gamma+\gamma\delta} \quad \text{et} \quad X_h^* = \frac{\gamma\delta(\Delta_h-A)}{1+\gamma\delta}$$

On a alors :  $X^{**} = \rho X_b^* + (1 - \rho) X_h^*$  ; et par ailleurs  $\rho = (\Delta_h - \bar{\Delta}) / (\Delta_h - \Delta_b)$

On peut ainsi exprimer l'effort optimal en fonction de  $\bar{\Delta}$  et le comparer à celui de la stratégie myope réduisant  $\{\Delta\}$  à sa moyenne (cf. schéma 2 ci-dessous). L'effort de « précaution » apparaît ainsi maximal pour  $\bar{\Delta} = \Delta_s$ .

Schéma 2 : comparaison entre effort optimal et stratégie myope



Ce schéma permet tout d'abord de revenir sur les controverses de la « *Stern review* ». En effet, on peut supposer qu'à cette époque, le scénario le plus probable était de type  $\Delta_b$ , mais qu'un scénario de type  $\Delta_n$  était possible. Ses développements consacrés aux scénarios de décarbonation soulignaient en effet le risque de buter sur des contraintes de faisabilité, le rapport observant en particulier que, quand le pic des émissions était reporté de dix ans, le taux de décroissance des émissions ensuite devait être doublé pour atteindre la cible visée. Dans ces conditions, le renforcement de l'action précoce, par rapport à ce que recommandait le calcul en équivalent certain, pouvait se justifier par la valeur d'option associée, plutôt que par la référence à un taux d'actualisation excessivement bas.

Aujourd'hui, la référence la plus probable est de type  $\Delta_n$ . Mais des émissions négatives pourraient nous ramener dans la configuration  $\Delta_b$ . Pour autant, leur caractère incertain et les contraintes sur les abattements possibles en seconde période font donc qu'il faut demeurer prudent dans l'évaluation de la réduction de l'effort de première période que ceci autorise : renforcer l'action précoce permet d'éviter d'être pris au dépourvu si les émissions négatives ne sont pas au rendez-vous.

### III- Les chemins d'une ambition renforcée

*La capacité de l'Accord de Paris pour enclencher une action en ligne avec ce qui serait socialement souhaitable a été au cœur des débats suivant son adoption. Les uns pointaient que formellement l'Accord comporte peu de choses nouvelles tangibles et que le processus de renforcement de l'ambition reste bien incertain, chaque Etat ayant intérêt à ne pas dévoiler ses capacités d'abattements. Les autres, au contraire, mettaient en avant l'importance des symboles, d'une vision partagée entre gouvernements et parties prenantes, et de la dynamique ainsi enclenchée, considérés comme des préalables à la mise en place d'une instrumentation économique plus crédible pour renforcer l'action.*

*Cependant, le risque climatique est, du point de vue économique, un problème « d'externalité globale » : les émissions sont excessives parce qu'en l'absence de prix du carbone, les agents qui en sont à l'origine, ne sont pas responsabilisés aux dommages environnementaux qui*

*résultent de leurs comportements. De plus, pour que les efforts de réduction pèsent le moins sur la croissance, la tarification du carbone doit être uniforme. Mais cela nécessite des compensations crédibles pour les pays du Sud qui ainsi réaliseraient une part relative des efforts trop importante eu égard à leur développement. Cette condition vaut d'ailleurs pour toute action climatique renforcée, ce qui rend la question incontournable.*

*Dans cette perspective, des mécanismes de coopération pour faire émerger des taux de taxes carbone minimaux ont été proposés (Cramton et al., 2015). Gollier et Tirole privilégient eux les mécanismes de cap and trade, notamment parce que l'allocation initiale des quotas introduit un instrument redistributif spécifique bien utile, si l'on se réfère à l'expérience du SO<sub>2</sub> dans le secteur électrique. De plus, ils préservent la subsidiarité pour les politiques nationales, tout en permettant d'intégrer à la marge d'autres acteurs (villes ; forêts par exemple) par le biais de mécanismes de projet. Ceux-ci soulignent cependant que le choix entre les deux approches est du second ordre, les deux visant fondamentalement la même émergence d'un prix du carbone, et nécessitant des transferts ou des choix d'allocation des quotas équitables. L'examen des problèmes de coopération dans ce modèle permet de mettre en perspective ces discussions.*

### ***1- La coopération différée : comportement de « passager clandestin » et attentisme stratégique***

En l'absence de coopération, pour tout contexte  $(\Delta, X)$  en seconde période, chaque pays égalise son coût marginal d'abattement à la réduction marginale des seuls dommages qu'il subit directement, soit :

$$\frac{Y_i}{\theta_i} = \gamma(\theta_i + \varepsilon_i)(\Delta - X - Y) \quad (\text{si } Y_i \leq \theta_i A)$$

Notant  $= \sum \theta_i^2$ , l'indice d'Herfindhal pour la concentration des PIB entre les  $n$  pays (donc  $H \geq 1/n$ , in fine  $H \approx 10\%$ ), et supposant que la différenciation des expositions n'est pas corrélée aux PIB (i.e  $I_{\theta\varepsilon} = \sum \theta_i \varepsilon_i = 0$ ), l'équilibre de Nash, contingent à  $(\Delta, X)$  vérifie alors:

$$Y_c^N(\Delta, X) = \frac{\gamma H}{1 + \gamma H} (\Delta - X)$$

Evidemment, cet effort est inférieur à ce qui serait socialement souhaitable, car les pays n'internalisent pas les réductions de dommages qu'ils apportent aux autres. Plus précisément, le rapport entre les deux vaut :

$$\frac{Y_c^N}{Y_c^*} = \frac{H(1 + \gamma)}{1 + \gamma H}$$

La réduction de l'effort est d'autant plus forte que la répartition des PIB est dispersée. Toutefois, à la différence du cas où les dommages sont linéaires, ce rapport dépend aussi de  $\gamma$  : si les dommages deviennent catastrophiques, le jeu tend vers un jeu de coordination face à un point de rupture. L'écart se réduit alors, chaque pays se sentant plus « pivot ». En l'espèce, on considérera que l'on en reste loin, le « dilemme du prisonnier » prévalant en l'absence de mécanisme de coopération.

Si les pays coopèrent en deuxième période, on aura plutôt:  $Y_i = \theta_i Y_c^*(\Delta, X)$ , ce qui assure l'efficacité de la répartition des efforts. Dans ce cas, si l'on note  $(\theta_i + \alpha_i)$  le poids de chaque pays dans la négociation (donc  $\sum \alpha_i = 0$ ), le coût total de seconde période (effort d'abattement et dommages résiduels) net des transferts associés à la coopération qui est supporté par chaque pays sera égal : au coût dans l'équilibre de Nash ; diminué de la part de réduction de coût total global permis par la coopération correspondant au poids du pays dans la négociation.

Afin de simplifier l'analyse, on fait l'approximation que l'effort d'abattement reste négligeable à l'équilibre de Nash. L'espérance du coût de deuxième période vaut alors, pour chaque pays :

$$\mathbb{E}_{\{\Delta\}}(C_{2,i}) \approx (\theta_i + \alpha_i)D_{\{\Delta\}}(X) + (\varepsilon_i - \alpha_i)\gamma\mathbb{E}_{\{\Delta\}}((\Delta - X)^2)$$

De plus, on suppose (pour clarifier l'exposé) que les éléments de différenciation des pays ne sont pas corrélés aux PIB (soit  $I_{\theta k} = \sum \theta_i k_i = 0$  ;  $I_{\theta \alpha} = \sum \theta_i \alpha_i = 0$ ) et que ceux de deuxième période (sur l'exposition et les pouvoirs de négociation) ne le sont pas avec ceux sur les coûts d'abattements en première période (soit  $I_{k\varepsilon} = \sum k_i \varepsilon_i = 0$  ;  $I_{k\alpha} = \sum k_i \alpha_i = 0$ ).

Si l'on suppose donc que la porte pour un renforcement de l'action précoce en première période s'est refermée mais que les pays anticipent que, compte-tenu de la dégradation des conditions climatiques qui se produira ainsi à l'horizon 2030, une négociation sérieuse interviendra alors, leur choix d'effort en première période vérifiera :

$$\forall i, \frac{2X_i}{\theta_i + k_i} = -(\theta_i + \alpha_i)\delta D'_{\{\Delta\}}(X) + 2(\varepsilon_i - \alpha_i)\delta\gamma(\bar{\Delta} - X)$$

On obtient alors pour l'effort global de première période :

$$X^N = X_{\{\Delta\}}^{**}(\delta H)$$

L'impact de la non coopération en première période sur l'effort d'abattement global de première période est ainsi équivalent à une réduction du poids accordé au futur du facteur  $H$ , soit une division par 10(environ) de celui-ci. Ce coefficient de réduction global recouvre en fait deux mécanismes :

-par rapport aux dommages, l'impact du comportement non coopératif déjà décrit ci-dessus à propos de la seconde période, chaque pays ne prenant en considération que les seuls dommages qui le concernent directement pour déterminer sa contribution à l'effort,

-par rapport à la répartition des efforts entre la première et la seconde période, un comportement attentiste à la « Beccherlé-Tirole », suivant lequel chaque pays tend à reporter l'effort sur les autres, chacun anticipant que, s'il réduit ses efforts en première période, ceci sera substantiellement compensé en seconde période puisque les pays coopéreront alors, la correction étant partagée entre les différents pays.

Dans ces conditions, non seulement chaque pays compte sur les efforts des autres, mais essaye en plus, de les reporter sur les autres en deuxième période : la non-action généralisée en première période constitue alors une tendance très forte ! Cet attentisme stratégique rend

peu crédible le mécanisme de renforcement progressif des efforts envisagé par l'Accord de Paris, fondé là encore sur le seul volontariat.

Cette réduction de l'effort global par rapport à ce qui serait souhaitable est associée à des coûts marginaux d'abattements différenciés vérifiant :

$$\forall i, \frac{X_i}{(\theta_i + k_i)} = \frac{(\theta_i + \alpha_i)}{H} X^N + (\varepsilon_i - \alpha_i) \delta \gamma (\bar{\Delta} - X)$$

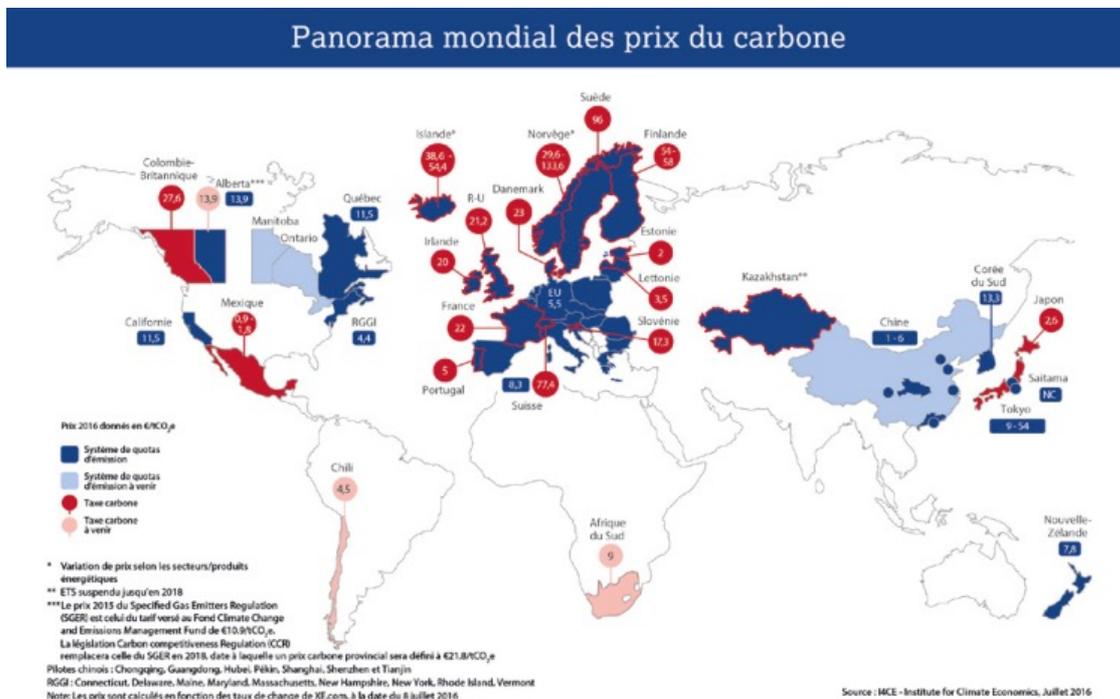
Par exemple, dans le cas de base de Nordhaus, où le seul élément de différenciation entre pays réside dans la distribution des PIB, les coûts marginaux à l'équilibre de Nash sont proportionnels à la taille des pays.

La répartition des efforts est donc inefficace. La cause en est fondamentalement attribuable aux comportements de passager clandestin, qui incitent chaque pays à différencier (à la baisse) son prix du carbone de celui des autres.

Ceci souligne à quel point ne faut pas être dupe des arguments mis en avant pour justifier une différenciation des prix du carbone...

## 2- Le couplage des marchés de CO2 ne suffit pas

Pour renforcer l'ambition en première période, une solution souvent mise en avant consiste à coupler les marchés du carbone existants ou en cours de développement (cf. état des lieux ci-dessous).



L'idée, suggérée par Ranson et Stavins (2015) qui en analysent par ailleurs de manière détaillée la faisabilité, est que ce couplage permettant de réduire le coût global des efforts, les pays seront plus enclins à se montrer plus ambitieux. Si le premier point justifie à lui seul de favoriser toutes les initiatives pour développer une tarification uniforme du carbone, l'impact mécanique sur l'ambition est plus incertaine. Ceci peut être illustré en examinant l'impact de l'introduction d'un marché compétitif du carbone dans le modèle, ici un marché de « certificats de réduction » puisque le modèle est formulé en jeu d'abattements.

Le fonctionnement d'un tel marché est résumé par la donnée d'un objectif global d'abattement  $X$ , réparti entre les pays selon les allocations  $((q_i), \sum q_i = X)$ . Si on note  $p$  le prix de marché des certificats d'abattements, on a alors pour chaque pays :

$$\mathbb{E}_{\{\Delta\}}(C_i) = \frac{X_i^2}{(\theta_i + k_i)} - p(X_i - q_i) + \delta[(\theta_i + \alpha_i)D_{\{\Delta\}}(X) + (\varepsilon_i - \alpha_i)\gamma\mathbb{E}_{\{\Delta\}}((\Delta - X)^2)]$$

Dans ce contexte, chaque pays choisit un niveau d'abattement fonction du prix des certificats, tel que  $\forall i, \frac{2X_i}{(\theta_i + k_i)} = p$  ; d'où le prix d'équilibre :  $p = 2X$ . La mise en place du marché de certificats est bénéfique pour tous, le gain, par rapport à l'allocation rigide, valant  $(X_i - q_i)^2 / (\theta_i + k_i) \geq 0$  pour chaque pays (donc d'autant plus élevé que le pays considéré participe aux échanges, comme acheteur ou comme vendeur).

On peut approcher l'impact du couplage de marchés sur l'ambition des efforts en évaluant ce que serait l'issue du choix non coopératif des  $q_i$ . L'équilibre de ce jeu, dans lequel chaque pays fixe son objectif en anticipant qu'il pourra le réaliser éventuellement dans le cadre d'échanges de certificats d'effort, vérifie :

$$\mathbb{E}_{\{\Delta\}}(C_i) = X(2q_i - (\theta_i + k_i)X) + \delta[(\theta_i + \alpha_i)D_{\{\Delta\}}(X) + (\varepsilon_i - \alpha_i)\gamma\mathbb{E}_{\{\Delta\}}((\Delta - X)^2)]$$

$$\text{avec } \sum q_i = X$$

Les conditions nécessaires du premier ordre s'écrivent :

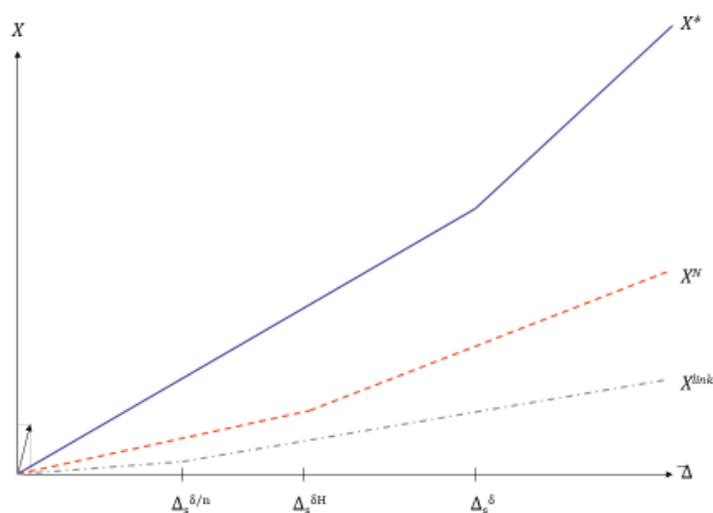
$$0 = 2(X + q_i - (\theta_i + k_i)X) + \delta[(\theta_i + \alpha_i)D'_{\{\Delta\}}(X) - 2(\varepsilon_i - \alpha_i)\gamma(\bar{\Delta} - X)] , \text{ donc}$$

$$X^{link.} = X_{\{\Delta\}}^{**}(\delta/n) \leq X^N$$

Dans ce contexte, le fait d'introduire en première période la flexibilité d'un marché, pour réduire le coût nécessaire pour atteindre les objectifs des contributions nationales, ne conduit donc pas spontanément à un relèvement de l'ambition de celles-ci. Au contraire, sauf dans le cas de pays de taille identique où l'effort global est inchangé, on aurait plutôt une réduction de celui-ci.

Le schéma 3 ci-dessous illustre ce résultat dans le cas où  $\Delta$  est déterministe. Il montre qualitativement le même profil coudé des efforts en première période en fonction de la concentration de gaz à effet de serre de référence. Mais les niveaux d'effort sont évidemment très inférieurs en l'absence de coopération. Corrélativement, le coude intervient pour des niveaux plus faibles de la concentration de référence, la réduction des efforts de première période accélérant la confrontation avec la contrainte de faisabilité des abattements en deuxième période.

Schéma 3 : Efforts de première période



Ainsi, lorsqu'il devient prévisible que la coopération en deuxième période devra demander à toutes les parties tout l'effort réalisable, l'effet d'attentisme stratégique disparaît, puisque chaque pays anticipe que l'on ne pourra demander alors aux autres pays plus d'effort que ce qu'ils pourront donner. Mais, évidemment, en l'absence de coopération en première période, chaque pays continue à balancer le coût d'un effort supplémentaire en première période avec les bénéfices qu'il en retire directement, d'où le sous-effort.

Certes, le résultat concernant la réduction des contributions nationales en cas de « linkage » est obtenu sous l'hypothèse d'absence de corrélation des différents facteurs d'hétérogénéité des pays. Par exemple, le résultat serait plus favorable si les gisements d'abattements en première période sont corrélés négativement avec les PIB. En effet, dans ce cas, l'effort non coopératif de première période est encore réduit, le comportement de passer clandestin se trouvant accru par la divergence de localisation entre les gisements d'abattements peu coûteux et les niveaux d'internalisation des dommages. L'introduction d'un marché supprimerait ce facteur de sous-effort.

Cependant, la raison fondamentale à l'origine de la réduction de l'effort demeure, car elle tient à la concurrence imparfaite à la Cournot qui détermine les niveaux de contributions : relever ses efforts serait possible compte-tenu de leur moindre coût ; mais pas forcément souhaitable du point de vue du calcul que fait chaque pays, compte-tenu de l'impact que cela a sur le prix des permis. La flexibilité apportée par le marché de permis est sans conteste bénéfique pour minimiser les coûts d'abattement à niveau d'effort global donné, mais elle ne constitue pas un instrument pour écarter les comportements de passer clandestin.

### 3-« Arrêtons de tourner autour du pot »

Pour relever l'ambition de l'action précoce, des mécanismes explicites de coopération sont nécessaires. Evidemment une négociation « Coasienne » parfaite entre les cent soixante quinze parties de l'Accord est impossible compte-tenu de ce qu'elle exigerait de symétrie d'information sur les coûts d'abattements et les dommages, et de transferts compensateurs à mettre en place. Il faut donc des cadres de négociation plus simples, qui séparent si possible

les problèmes du choix du niveau des efforts et de la répartition de ceux-ci. En effet, tant que celle-ci n'est pas définie, chaque pays tend à privilégier sa position de négociation dans leur répartition. En conséquence, l'ambition globale est limitée : le prix du carbone acceptable par les parties est faible ou le plafond global d'émissions laxiste, selon le moyen que l'on privilégie pour faire émerger un prix du carbone.

En revanche, si une règle de répartition est pré-établie, la coopération pour définir l'effort global peut s'enclencher suivant une logique « *I will if you will* ». Si la coopération se fait sur le prix du carbone, par exemple, chacun peut envisager d'appliquer un prix du carbone plus élevé dès lors qu'il s'applique à tous. Et il en va de même si la coopération se fait à propos du quota global, chaque pays comparant alors les bénéfices qu'il retire d'un renforcement de l'ambition avec la part des efforts qu'il en supportera.

Dès lors, des institutions simples peuvent suffire pour organiser la coopération au sein d'un « club climatique » : typiquement un mécanisme de vote à la majorité sur l'effort global, la répartition de celui-ci en termes d'objectifs nationaux de réduction (avant échanges) résultant alors simplement de la règle préétablie. Ce type de mécanisme<sup>4</sup> retient particulièrement l'attention car il se rapproche le plus des procédures qui sont utilisées, notamment au sein des Etats, pour choisir les niveaux de biens publics dans les contextes où l'on bute sur le caractère décentralisé de l'information sur les bénéfices qu'ils procurent.

Evidemment, le choix de la règle de répartition doit être apprécié au regard de deux objectifs : conduire à un niveau d'effort global proche de l'optimum ; déterminer a priori une répartition des bénéfices de la coopération entre les parties suffisamment équitable pour qu'ils puissent s'accorder sur ce mécanisme. De plus, il faut considérer les incitations à rejoindre ou non le club climatique. Enfin, d'un point de vue de justice climatique, des instruments complémentaires peuvent être justifiés pour réparer les dommages créés à certains pays .

Lorsque les pays ne diffèrent que par leur PIB ( $\theta_i$ ) et que les dommages y sont aussi proportionnels, la règle d'allocation des quotas à considérer est une répartition de l'objectif proportionnelle aux PIB. En effet, le choix de  $X$  sous cette condition est unanime et correspond à l'optimum. Une telle règle est donc efficace pour la fixation du plafond global. De plus, elle semble aussi équitable, les coûts des efforts d'abattement et les dommages étant proportionnels aux PIB, si bien que les différentes approches possibles de l'équité, en fonction des « besoins » ou des « moyens », sont congruentes..

Pour autant un tel cadre demeure insuffisant pour construire la coopération climatique car il faut aussi inciter à participer à une coalition qui se fixerait une telle règle, avec un problème de passager clandestin qui demeure à ce niveau. En effet, comme le souligne avec force Nordhaus (2015), l'élargissement de la coalition accroît le prix du carbone en son sein, ce qui bénéficie à tous mais incite les pays en dehors à y rester. Ainsi, il n'existe pas, en théorie, de coalition climatique stable susceptible de poursuivre des objectifs ambitieux de réduction des émissions de gaz à effet de serre sans mécanisme de sanction vis-à-vis des non-participants. Nordhaus montre cependant qu'un traité climatique international combinant tarification du carbone et utilisation de sanctions commerciales modérées vis-à-vis des Etats se comportant en passager clandestin peut, en revanche, fonctionner, le droit de douane « incitatif » à leur imposer pour cela étant de plus limité.

---

<sup>4</sup> Imparfait. Pour une analyse des mécanismes optimaux, cf Martimort et Sand-Zantman, 2014

Par ailleurs, l'efficacité et l'équité de la répartition des efforts au prorata des PIB suppose des hypothèses favorables. En effet, en cas d'hétérogénéité sur les gisements d'abattements et les niveaux d'exposition, le processus de vote est soumis à un biais potentiel d'agent médian. Par ailleurs, le choix du niveau d'effort global sera contesté par ceux qui considèrent supporter ainsi une part excessive des efforts par rapport aux bénéfices qu'ils en retirent, de même que la fixation harmonisée d'un prix du carbone demeurera difficile à mettre en œuvre sans mécanisme complémentaire de transfert si elle implique trop de divergence entre la structure géographique des efforts et celle des dommages évités, par exemple.

Des règles d'allocation des efforts un peu plus élaborées peuvent cependant permettre de redonner au processus de vote son efficacité. En effet, l'existence d'une règle d'allocation des quotas compatible avec un vote unanime des pays sur le quota global vaut encore dans le cadre du modèle plus général. Celle-ci s'écrit :

$$\begin{cases} q_i = \beta_i X + \lambda_i \bar{\Delta} \\ \beta_i = \theta_i + (k_i + (1 + \gamma)\alpha_i - \varepsilon_i)/2 \\ \lambda_i = \gamma(\varepsilon_i - \alpha_i) \end{cases}$$

Elle comporte donc deux termes, le premier naturellement linéaire par rapport au quota global, le second ajustant la répartition de l'effort en fonction du niveau de référence des concentrations de gaz à effet de serre. Dans ces conditions, il n'apparaît pas nécessaire de connaître la valeur précise de ce niveau de référence pour s'accorder sur une telle règle, qui peut en effet y être contingente, avec une relation simple, linéaire par rapport à l'espérance de sa distribution.

Une telle règle est intéressante en ce sens où son adoption permettrait ensuite d'avoir une coopération facilitée pour déterminer la cible de réduction ( $X$ ). Encore faut-il cependant qu'elle soit acceptable au sein d'une coalition. Sinon, sa mise en œuvre nécessite d'être complétée par des transferts.

L'examen de la règle efficace remarque que le premier terme de la règle d'allocation des quotas est essentiellement lié aux PIB ( $\theta_i$ ), ce qui est équitable dès lors que les dommages et les coûts d'abattement y sont essentiellement reliés. La répartition du coût des efforts correspondant à la mobilisation des gisements d'abattements spécifiques des différents pays (paramètres  $k_i$ ) est aussi assez raisonnable, l'effort correspondant étant réparti *ex ante* entre le pays qui dispose de gisements particuliers et les autres, soit la mécanique habituelle pour les allocations initiales dans un marché de permis combinant « *output-based* » et « *grandfathering* ». Mais les autres termes sont plus délicats car ils relèvent nettement de la « *Realpolitik* », la négociation sur l'objectif de réduction ne pouvant déboucher sur un choix efficace que si tous s'y retrouvent, avec ce que cela implique de compensations.

Dès lors, la règle de répartition des efforts ne peut, par exemple, en demander trop aux pays les moins exposés aux dommages. En pratique, ceci peut être relativisé par le fait que beaucoup des dommages potentiels sont liés aux niveaux de richesse, notamment tout ce qui concerne l'impact des événements extrêmes sur l'immobilier et les infrastructures. Dans cette perspective, le message qui en découle est donc plutôt que les pays concernés doivent accepter de compenser les efforts des autres sachant qu'ils en seront les principaux bénéficiaires.

Pour autant, on ne peut ignorer d'autres impacts plutôt corrélés négativement aux PIB, sur les rendements agricoles, du fait de tensions accrues sur la ressource en eau, ou liés à la montée des océans sur les villes littoral des pays les plus pauvres. Certes l'intérêt de ceux-ci est sans doute d'abord que la coopération climatique se renforce, donc que le type de règle défini ci-dessus soit mis en œuvre. Mais il faut alors l'accompagner d'instruments de financement de l'adaptation spécifiques pour ces pays, pour que l'ensemble soit efficace, juste et équitable, les pays à l'origine des dommages assumant leur responsabilité historique.

## Conclusion

Le souci de participation universelle à l'Accord de Paris a eu un prix en termes d'ambition des efforts. Sans correction des trajectoires envisagées à l'horizon 2030 par les contributions nationales, non seulement notre budget carbone compatible avec l'objectif de contenir le réchauffement climatique en dessous de 2°C sera très largement consommé à cet horizon, mais la rupture à opérer alors et les taux de réduction des émissions à réaliser au-delà rendent même la faisabilité de l'objectif des 2°C bien incertaine.

La promesse des émissions négatives est ici critique. Elle justifie un effort de recherche à la hauteur de l'enjeu. En l'état, l'ampleur des gisements et leurs conditions de déploiement demeurent cependant très incertaines, trop pour se permettre de reporter les efforts d'atténuation des émissions, compte-tenu des contraintes sur les rythmes de décroissance futurs des émissions. Le renforcement de l'action précoce doit ainsi être crédité d'une valeur d'option significative car, d'un côté l'épuisement de notre budget carbone est irréversible si ces technologies ne sont pas au rendez-vous, de l'autre il serait toujours possible d'ajuster les scénarios d'émissions en cas d'aléa favorable.

A cet égard, les accroissements de coûts d'abattements qui sont associés aux scénarios compatibles avec les objectifs de l'Accord de Paris montrent que l'on ne peut se permettre d'écart par rapport à la mobilisation des gisements « par ordre de mérite », donc la nécessité d'un prix uniforme du carbone établi au niveau approprié. Dans ces conditions, la définition de cadres institutionnels permettant de construire des coalitions étendues pour une action renforcée autour de cet objectif constitue la priorité, sachant qu'il faut pour cela dissuader les comportements de passager clandestin et contourner les attentismes stratégiques.

Ceci doit être conduit en parallèle avec les efforts pour convaincre les Etats-Unis de réintégrer le processus, les deux problèmes étant d'ailleurs directement liés, au-delà des éléments d'économie politique interne. L'objectif ultime que l'on attend de leur participation est un renforcement de l'ambition globale, ce qui impose de définir les cadres appropriés pour cela, avec trois volets à considérer : la définition de règles pour la répartition des allocations initiales permettant ensuite la négociation aisée d'un effort global de réduction des émissions ambitieux, chaque pays se sentant impliqué dans un processus coopératif de type « *I will if you will* » ; les compensations nécessaires pour rendre un tel cadre acceptable et les transferts légitimes en direction des pays subissant des dommages dont ils ne sont pas responsables ; et la reconnaissance de la compatibilité des taxes Nordhaus avec l'article XX du Gatt, à l'instar des mesures de protection qui avaient permis l'essor du protocole de Montréal, exemple emblématique mais isolé de coopération réussie pour un bien public global.



## **Bibliographie (éléments)**

Arrow K. et al. (2014), « Global warming : improve economic models of climate change », Nature, 508, 173-175

Beccherle J. et J.Tirole (2011), « Regional initiatives and the cost of delaying binding climate change agreements », Journal of Public Economics

Burke M., Hsiang S. et E.Miguel (2015), « Global non-linear effect of temperature on economic production », Nature, 527,235-239

Cramton P., Ockenfels A. et S.Stoft (2015), « An international carbon-price commitment promotes cooperation », Economics of energy and environmental policy

Giec-IPCC (2014), « Fifth Assessment AR5 », [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

GICN (2015), « INDC's and 2°C trajectories », mimeo

Gollier C. (2013), « Pricing the planet's future. The economics of discounting in an uncertain world », Princeton university press

Gollier C. et J.Tirole (2015), « Negotiating effective institutions against climate change », Economics of energy and environmental policy

Nordhaus, W. (2015), “Climate Clubs: Overcoming Free-riding in International Climate Policy”, American Economic Review 2015, 105(4): 1339–1370.

Martimort D. et W.Sand-Zantman (2014): “Le marché peut-il réussir l'arbitrage entre incitations et participation?”, Revue économique, 4/vol.65

Quinet A. et al. (2009), “La valeur tutélaire du carbone”, la documentation française

Ranson M. et R.Stavins (2015), « Linkage of greenhouse gas emissions trading systems: learning from experience », Climate Policy

Rogelj J. et al. « Energy system transformations for limiting end-of-century warming below 1.5°C », Nature climate change

SES et I4CE (2017), « Chiffres-clefs du climat. France et monde », Ministère de la transition écologique et solidaire, Paris

Stern N.(2007), « The economics of climate change », Cambridge University Press