

Implications politiques

Dans ce dernier chapitre de thèse, nous présentons trois applications de notre modèle d’attribution, liées aux politiques climatiques, inspirées et/ou motivées par les résultats précédemment présentés. La première de ces applications a trait à la question de la géo-ingénierie, que nous avons déjà rapidement évoquée en section 4.2.3, et à sa gouvernance qui pourrait être facilitée par une attribution précise des effets de chaque technique de géo-ingénierie. La seconde application est relative au “*burden sharing*”, c’est à dire au partage de la charge liée à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Nous utiliserons nos méthodes d’attribution afin de discuter de la compatibilité entre la trajectoire du RCP 2.6 et l’objectif d’équité entre pays développés et pays en développement. Enfin, la troisième et dernière application illustrera le concept d’incertitude politique au sein du *Brazilian Proposal*, sur l’exemple particulier de l’augmentation du CO₂ atmosphérique sur la période 1990–2008. Il est important de noter que, en l’état actuel des choses (en particulier, de la version du modèle et des données accessibles), plus que des résultats à part entière, chacune de ces applications est une illustration de la potentialité de notre modèle et/ou de nos méthodes d’attribution.

7.1 Gouvernance de la géo-ingénierie

Contexte La géo-ingénierie est cette troisième voie envisagée pour faire face au changement climatique. Entre *mitigation*, qui cherche à diminuer l’impact des systèmes anthropiques sur le système climatique, et adaptation, qui cherche à diminuer l’impact du changement climatique sur les systèmes anthropiques, la géo-ingénierie consiste à intervenir directement sur le système climatique, afin d’en altérer les propriétés naturelles. Les techniques de géo-ingénierie sont usuellement classées en deux catégories (Royal Society, 2009) : celles d’absorption du dioxyde de carbone (*Carbon Dioxide Removal*, CDR), et celles de gestion du rayonnement solaire (*Solar Radiation Management*, SRM). Schématiquement, les premières agissent sur le taux atmosphérique de CO₂, et les secondes sur le forçage radiatif global. Parmi les

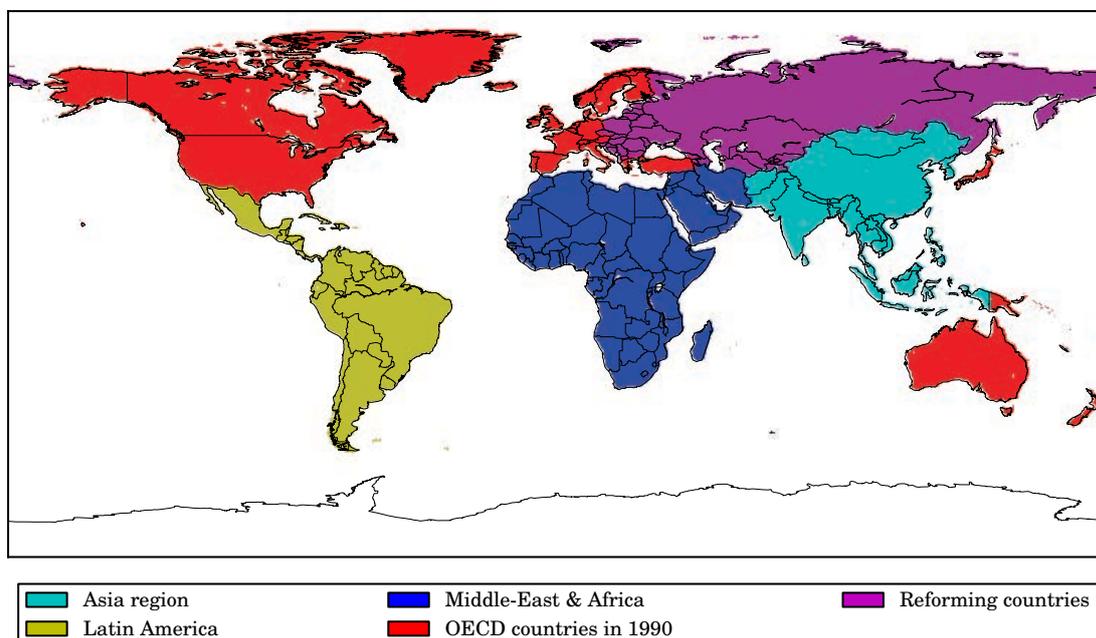
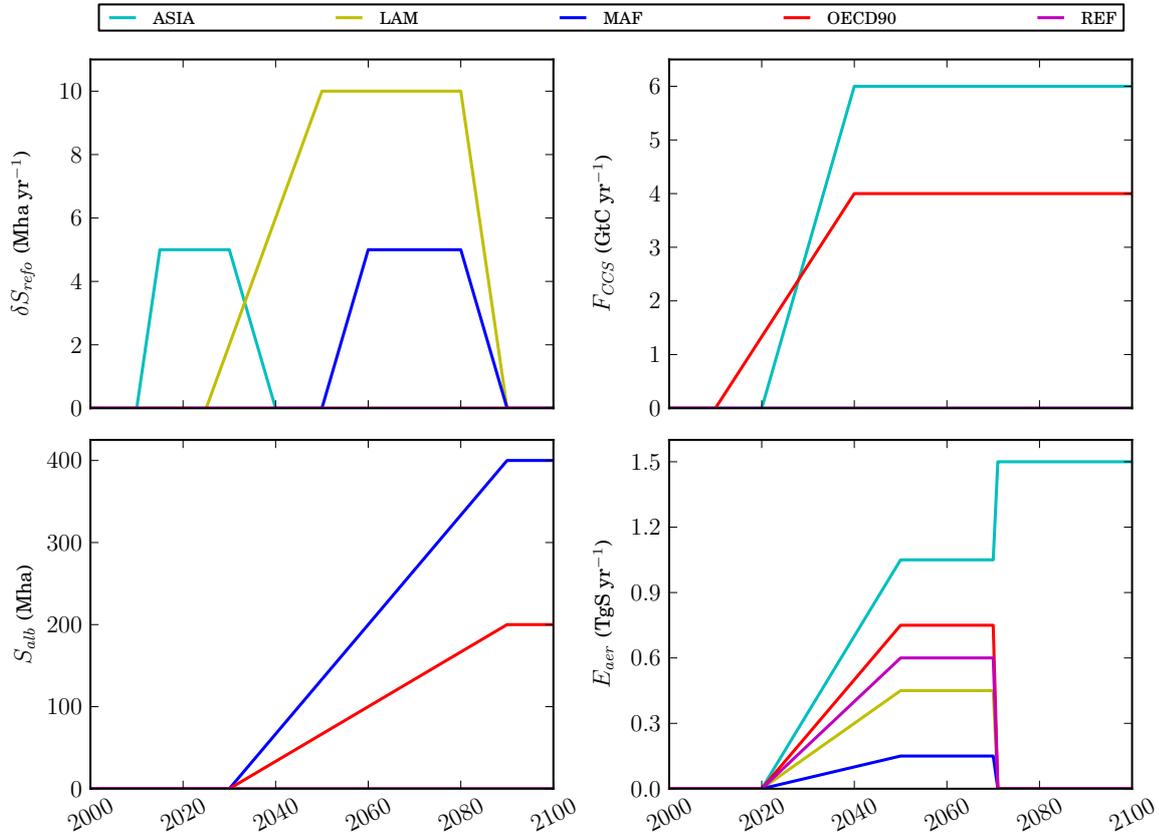


FIGURE 7.1 – Cinq régions utilisées pour les projections suivant les RCP.

techniques de CDR, citons la capture et le stockage de CO₂, que ce soit sur site industriel ou directement depuis l’atmosphère, l’afforestation à grande échelle, ou encore la fertilisation de la pompe biologique océanique. Parmi celles de SRM, citons l’injection d’aérosols dans la stratosphère, ou l’altération de l’albédo des nuages ou des surfaces terrestres.

Bien que l’aspect théorique en soit discuté par la communauté scientifique, plusieurs éléments rendent le déploiement de la géo-ingénierie improbable à court terme : la faisabilité technique non-éprouvée, le rendement énergétique insuffisant, la difficulté à mesurer les effets primaires, les incertitudes quant aux effets secondaires, la nécessité d’une gouvernance globale ; chaque technique étant concernée par un ou plusieurs de ces éléments. Le travail que nous présentons dans cette section trouve sa place dans la discussion liée à la gouvernance de la géo-ingénierie. Bien que certaines puissent être implémentées localement, toutes les techniques de géo-ingénierie ont un impact sur le système climatique global, au même titre que les autres perturbations anthropiques (émissions fossiles, usage des sols, etc.). Ainsi, la méthodologie d’attribution que nous avons appliquée tout au long du chapitre 6 aux *drivers* anthropiques “usuels” peut parfaitement s’appliquer à la géo-ingénierie.

Protocole Nous effectuons une première simulation, servant de référence (*baseline*), suivant le RCP 8.5 (cf. section 4.2). Dans cette simulation, on effectue un exercice d’attribution *online* analogue à ceux réalisés en section 6.2 : attribution

FIGURE 7.2 – Scénario arbitraire des *drivers* régionaux de géo-ingénierie.

aux cinq régions renseignées dans la base de données (IIASA, 2012a) et représentées en figure 7.1, et aux différents forçages anthropiques. Nous effectuons ensuite une seconde simulation, toujours suivant le RCP 8.5 et avec attribution, mais dans laquelle nous ajoutons des scénarios arbitraires de géo-ingénierie. Ces scénarios sont illustrés en figure 7.2. On peut y voir : des périodes de reforestation relativement intense dans les régions asiatiques, d’Amérique latine et africaine (variable δS_{refo}) ; un développement de la CCS dans les pays de l’OCDE et en Asie (F_{CCS}) ; une mise en place de réflecteurs solaires dans le Sahara cofinancée par l’Europe et le Moyen-Orient (S_{alb}) ; et un développement conjoint de l’injection d’aérosols stratosphériques, suivi d’un arrêt global sauf de la part de l’Asie qui continue les injections de manière unilatérale (E_{aer}). Les deux premières perturbations sont déjà explicitement implémentées dans OSCAR. Pour les deux dernières perturbations, on ajoute à OSCAR une modélisation par simple proportionnalité du forçage radiatif. Les coefficients de proportionnalité sont pris égaux à $\alpha_{alb} = 2.6 \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-2} \text{ Mha}^{-1}$ pour les réflecteurs solaires (Gaskill, 2004; Royal Society, 2009), et à $\alpha_{aer} = 1.0 \text{ W m}^{-2} [\text{TgS yr}^{-1}]^{-1}$ pour l’injection de soufre dans la stratosphère (Lenton et Vaughan, 2009).

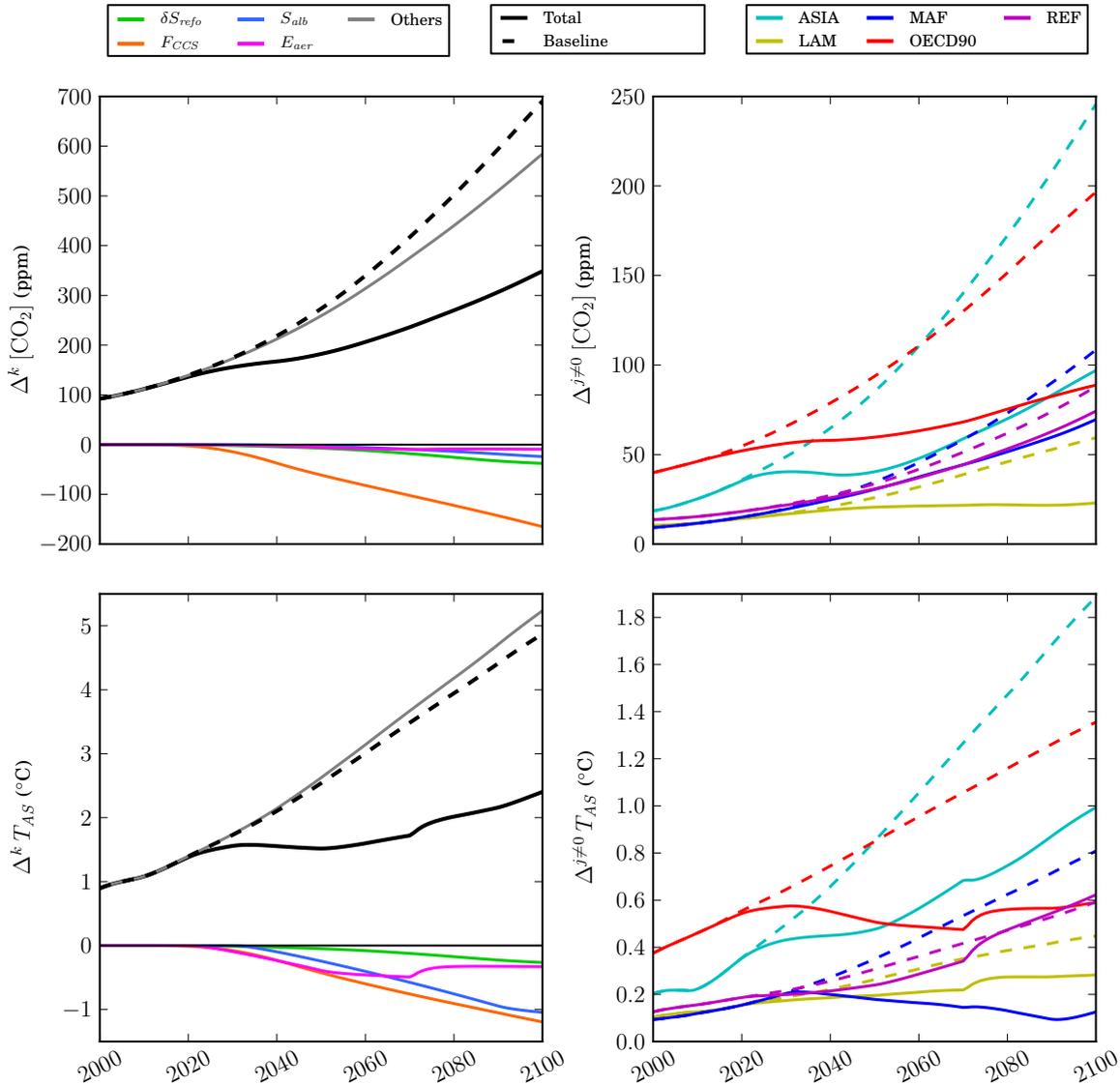


FIGURE 7.3 – Exemple d’attribution des effets de la géo-ingénierie, sur le CO_2 atmosphérique [*haut*] et les températures [*bas*], aux forçages anthropiques [*gauche*] et aux régions [*droite*]. La *baseline* (RCP 8.5) est en tireté. Parmi les forçages, on distingue les forçages “usuels” (gris) et nos quatre techniques de géo-ingénierie (couleur).

Résultats La figure 7.3 montre l’attribution de l’excès de CO_2 atmosphérique et de température de surface aux forçages anthropiques usuels et aux techniques de géo-ingénierie. Ainsi, connaissant les contributions de chaque région à chacune des techniques, on peut attribuer régionalement l’effet de baisse du CO_2 et/ou de la température induit. Dans notre exemple, on voit que la forte CCS mise en place en

Europe et en Asie réduit significativement la contribution absolue de ces régions au CO₂ atmosphérique. Dans le cas de la température, en plus des effets induits par le changement de concentration en CO₂, on peut constater l'attribution du fort effet refroidissant des réflecteurs solaires, et de l'effet des aérosols stratosphériques puis de l'abandon de ceux-ci par l'ensemble des régions sauf l'Asie en 2070.

Discussion Cette section ne vise pas à soutenir le déploiement de la géo-ingénierie. Elle est une illustration de l'intérêt de la méthodologie d'attribution issue du *Brazilian Proposal* appliquée dans le cadre de la géo-ingénierie et de sa gouvernance. On constate en effet que cette méthodologie permet d'isoler la contribution de chaque région, à travers chaque technique, en différents points de la chaîne causale. Ce faisant, elle peut permettre d'établir des trajectoires régionales couplant *mitigation* et géo-ingénierie, ou encore de gérer le financement de telles techniques en lien avec leurs effets estimés sur le cycle du carbone et le climat. Il est même envisageable d'effectuer des attributions croisées, comme nous l'avons fait pour le puits biosphérique en figure 6.20, que ce soit pour les effets primaires ou secondaires.

Il faut cependant admettre que notre modèle n'est pas, en l'état actuel, capable de représenter convenablement l'ensemble des techniques de géo-ingénierie envisagée. Par exemple, dans OSCAR ne sont pas représentés explicitement la fertilisation de la pompe biologique de l'océan, ou même l'injection d'aérosols stratosphériques ou l'impact des changements d'albédo sur le système climatique. Ceci pourrait être pallié par l'implémentation des méthodes d'attribution au sein d'un modèle de complexité intermédiaire, ou par le développement plus poussé d'OSCAR par le biais de calibrations effectuées sur des modèles complexes. Il serait aussi important d'inclure à ces modèles une quantification des effets secondaires attendus (e.g. sur la biodiversité, la qualité de l'air, les rendements agricoles), afin de pouvoir également en estimer les contributions régionales.

7.2 *Burden sharing* : équité dans le RCP 2.6

Contexte Nous l'avons vu, le *Brazilian Proposal* est fondé sur le principe pollueur-payeur ; et derrière ce principe, on retrouve les questions de justice et d'équité. Dans les négociations climatiques, ces questions peuvent prendre plusieurs formes : quels pays ont le plus émis par le passé ? quels pays doivent encore émettre beaucoup pour se développer ? quels pays seront le plus impactés par le changement climatique ? Derrière nombre de ces questions, on retrouve en filigrane celle de l'attribution des causes anthropiques du changement climatique, c'est-à-dire le *Brazilian Proposal*. Si l'on résume celle-ci à l'opposition entre pays "développés" et pays "en développement", comme c'est souvent le cas, nous avons vu dans le chapitre précédent (en section 6.2.2) que, selon nos estimations, la contribution historique des pays développés au changement climatique (évalué en forçage radiatif ou en température) est déjà inférieure à celle des pays en développement. Cependant, il est courant que

cette contribution soit évaluée de façon intensive, par tête (i.e. divisée par la population de chaque région), constituant alors un critère d'équité fondé sur le principe de convergence, tel que défini par [Toth et al. \(2001, table 10.9\)](#). Dans cette section, nous cherchons à savoir si ce critère d'équité est compatible avec un objectif de changement climatique inférieur à $+2^{\circ}\text{C}$, et quels impacts il peut avoir sur les trajectoires d'émissions fossiles futures pour les pays développés et en développement.

Protocole Pour ce faire, nous effectuons une simulation suivant le RCP 2.6, qui servira ici de prototype de scénario qui pique en-dessous des $+2^{\circ}\text{C}$. Dans cette simulation, il y a attribution sur trois axes : les cinq régions des RCP (cf. [figure 7.1](#)), les forçages anthropiques (séparés en deux catégories : les émissions fossiles de CO_2 et les autres forçages), et la période d'activité anthropique (comme en [section 6.2.3](#)). Les

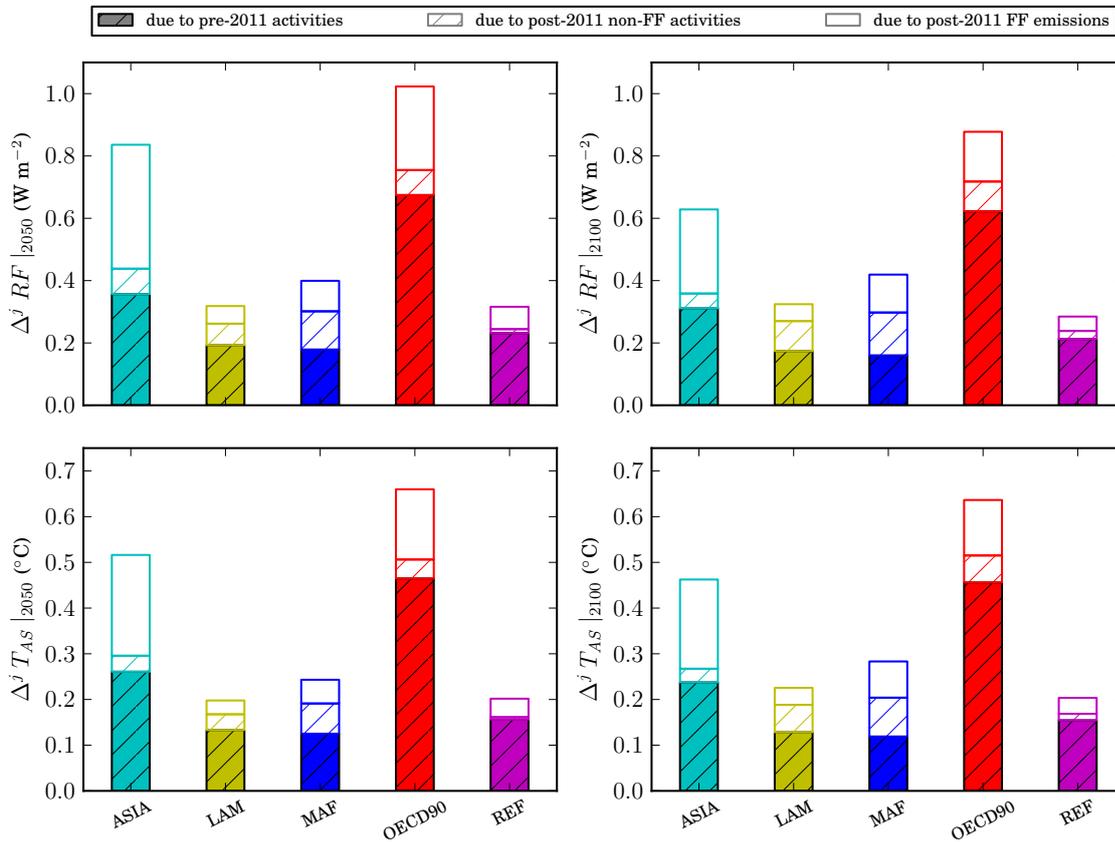


FIGURE 7.4 – Exemple d'attributions du changement climatique dans le RCP 2.6, exprimé en forçage radiatif [*haut*] ou en températures [*bas*], en 2050 [*gauche*] ou en 2100 [*droite*]. Les contributions régionales sont attribuées à l'ensemble des forçages avant 2011 (couleur rayée), aux forçages autres qu'émissions fossiles après 2011 (blanc rayé), et aux émissions fossiles après 2011 (blanc).

périodes sont fixées par groupe de cinq années à partir de 2011 inclus (i.e. 2011–2015, 2016–2020, etc.) jusqu’en 2100, et une dernière période prend en compte l’ensemble des activités ayant eu lieu avant 2011 (exclus). Quatre exemples de résultats d’une telle attribution sont montrés en figure 7.4.

Comme l’on s’intéresse au critère d’équité défini comme le “changement climatique induit par tête”, il nous faut considérer des scénarios de population en plus du scénario climatique. Nous choisissons de travailler avec le scénario “moyen” établi par l’UN/DESA (2012) et illustré en figure 7.5. Nous n’évaluerons par l’incertitude liée à ce scénario de population pour une raison : bien que les trois principaux scénarios proposés par les Nations-Unies varient fortement en valeur absolue, les parts relatives de population de chacune de nos cinq régions ne varient que très peu dans ces trois scénarios (i.e. la variation atteint environ 5% en 2100). On utilisera donc ces projections démographiques pour déterminer des contributions *per capita* au changement climatique. Dans la suite, on agrège les cinq régions des RCP en deux : la région “OECD90” que l’on assimile aux pays développés, et l’ensemble des autres régions, assimilé aux pays en développement.

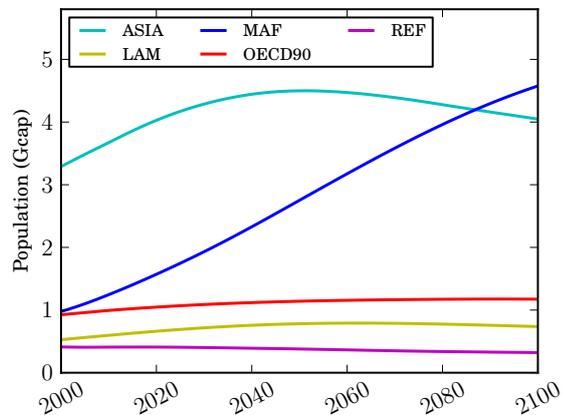


FIGURE 7.5 – Scénario de populations régionales (UN/DESA, 2012).

Rappelons que, dans cette section, nous cherchons à établir des trajectoires d’émissions fossiles, pour nos deux régions, respectant le RCP 2.6 et “équitable”. La figure 7.6 illustre notre démarche, pour un indicateur du changement climatique et une date arbitraires (*RF* en 2050). On y voit les contributions, absolues et par tête, des forçages anthropiques régionaux précédant 2011 et de ceux suivant 2011. Ainsi, la marge de manœuvre, pour atteindre l’équité, se limite à ces forçages post-2011 que l’on va chercher à redistribuer entre nos deux régions. Dans notre cas, on se limite même au seul forçage des émissions fossiles (de CO_2). La figure 7.6 présente trois variations d’une attribution respectant la trajectoire globale du RCP 2.6. La première montre les contributions exactes issues du RCP 2.6, c’est-à-dire respectant les hypothèses socio-économiques faites par van Vuuren et al. (2011). La seconde illustre le cas où, à la date considérée (dans notre exemple, en 2050), on ré-attribue aux pays en développement l’ensemble des contributions des émissions fossiles post-2011 des pays développés. On constate dans notre exemple que ceci n’est pas suffisant pour atteindre l’équité par tête. La troisième variation montre la quantité de contribution qu’il est nécessaire de ré-attribuer, toujours à cette même date, afin d’atteindre l’équité par tête; dans cet exemple, elle est négative pour les pays développés. Techniquement, dans notre cadre d’attribution, ces transferts de contribution se font sur l’axe j , c’est-à-dire l’axe des contributions régionales.

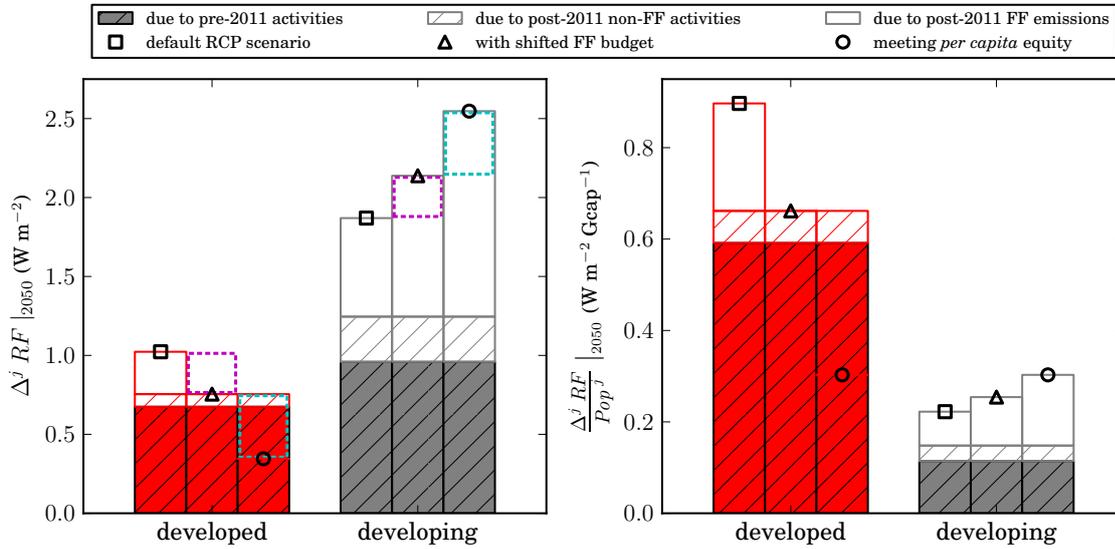


FIGURE 7.6 – Exemple (pour le forçage radiatif en 2050) de contributions au RCP 2.6 des pays développés et en développement, exprimées en valeur totale [*gauche*] et par tête [*droite*]. Trois variations sont présentées : le RCP 2.6 par défaut (carré), un transfert des contributions des émissions fossiles des pays développés à ceux en développement (triangle), et un cas atteignant la même contribution par tête (cercle). Les rectangles colorés et tiretés illustrent les transferts de contribution.

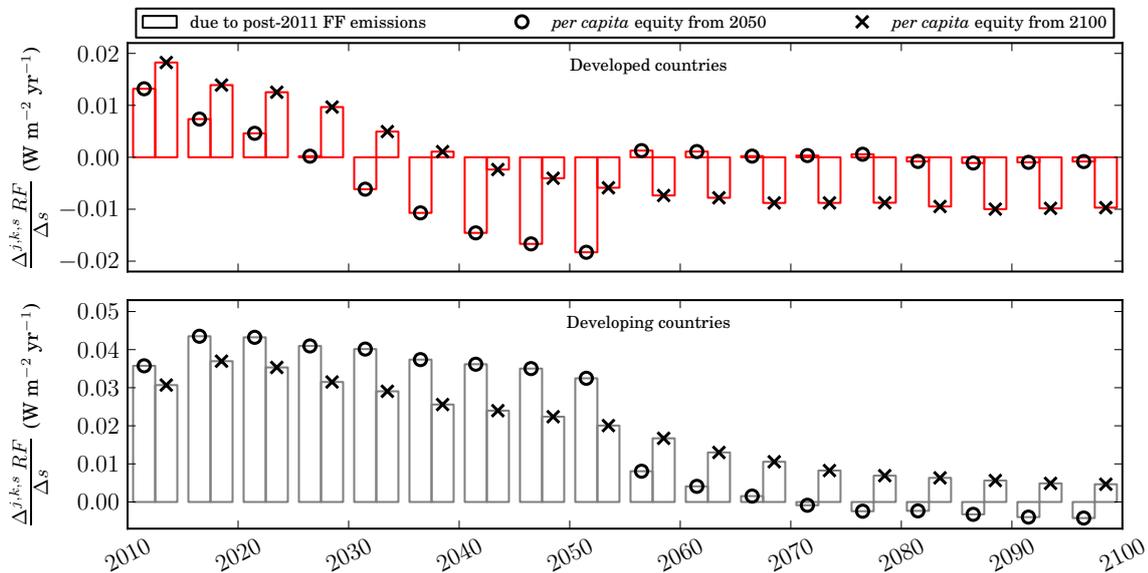


FIGURE 7.7 – Exemple de trajectoires de contributions marginales des émissions fossiles respectant l'équité. La contribution totale des émissions fossiles post-2011 de la figure 7.6 (cas "équitable") est ici ré-attribuée à chaque période d'activité afin d'atteindre l'équité en 2050 (cercle) ou en 2100 (croix).

Nous venons de voir que la troisième variation de la figure 7.6 montre la ré-attribution de la contribution des émissions fossiles de l'ensemble de la période 2011–2050 (date de notre exemple, pouvant varier). Afin d'établir une trajectoire de contributions compatibles avec notre critère d'équité, il reste à distribuer cette contribution totale en contributions par période ; c'est-à-dire qu'il faut maintenant distribuer les contributions régionales sur l'axe s . Ceci se fait de manière itérative, pour chacune de nos périodes de cinq années après 2011, en ayant préalablement établi une trajectoire d'équité par tête pour chaque région. Pour cet exercice, nous choisissons des trajectoires de contributions régionales par tête partant de leur valeur historique en 2011, et atteignant linéairement une valeur commune (pour les pays développés et en développement) soit en 2050, soit en 2100 ; évaluées soit en forçage radiatif, soit en température. La figure 7.7 illustre, dans le cas du forçage radiatif, les trajectoires des contributions ainsi obtenues lorsque l'équité par tête est atteinte en 2050, et lorsqu'elle l'est en 2100. La discontinuité en 2050, pour le cas de convergence en 2050, s'explique par la rupture de pente abrupte de la trajectoire d'équité (i.e. la dérivée temporelle de l'équité est discontinue en 2050). Pour faire disparaître cette non-linéarité, on pourrait envisager des trajectoires exponentielles ou sigmoïdales, plutôt que linéaires. Finalement, puisque nous connaissons les contributions marginales des émissions fossiles à l'échelle globale et en moyenne sur chaque période, nous pouvons transformer ces trajectoires de contributions régionales au forçage radiatif (ou à la température) en trajectoires d'émissions fossiles.

Résultats La figure 7.8 présente les trajectoires d'émissions fossiles régionales ainsi obtenues. Sont représentées les trajectoires par défaut du RCP 2.6, celles où les émissions des pays développés sont complètement ré-allouées aux pays en développement, ainsi que quatre trajectoires qui atteignent l'équité par tête, en 2050 ou en 2100, évaluée en forçage radiatif ou en température. Les émissions fossiles des pays développés obtenues dans chacun des quatre scénario d'équité deviennent négatives plus tôt que les émissions de référence du RCP 2.6. On constate que plus l'équité doit être atteinte tôt, plus les émissions des pays développés doivent décroître rapidement et être intensément négatives. Pour ces pays, lorsque la température est utilisée comme indicateur du changement climatique, les trajectoires compatibles avec l'équité sont plus basses qu'avec le forçage radiatif. Ceci s'explique par l'inertie du réchauffement : alors qu'une certaine quantité d'émissions négatives est nécessaire aux pays développés pour balancer le forçage radiatif de leurs émissions passées, une quantité supérieure est nécessaire pour balancer, en plus, le réchauffement engagé (*committed*) mais pas encore effectif. Enfin, concernant les pays en développement, il est intéressant de noter que seuls les deux scénarios atteignant l'équité en 2100 ne requièrent pas d'émissions négatives de leur part.

Discussion Il est frappant de constater que, tout en respectant un scénario ne dépassant les deux degrés de réchauffement, un objectif d'équité par tête implique des émissions négatives très intenses pour les pays développés, quelle que soit la date au

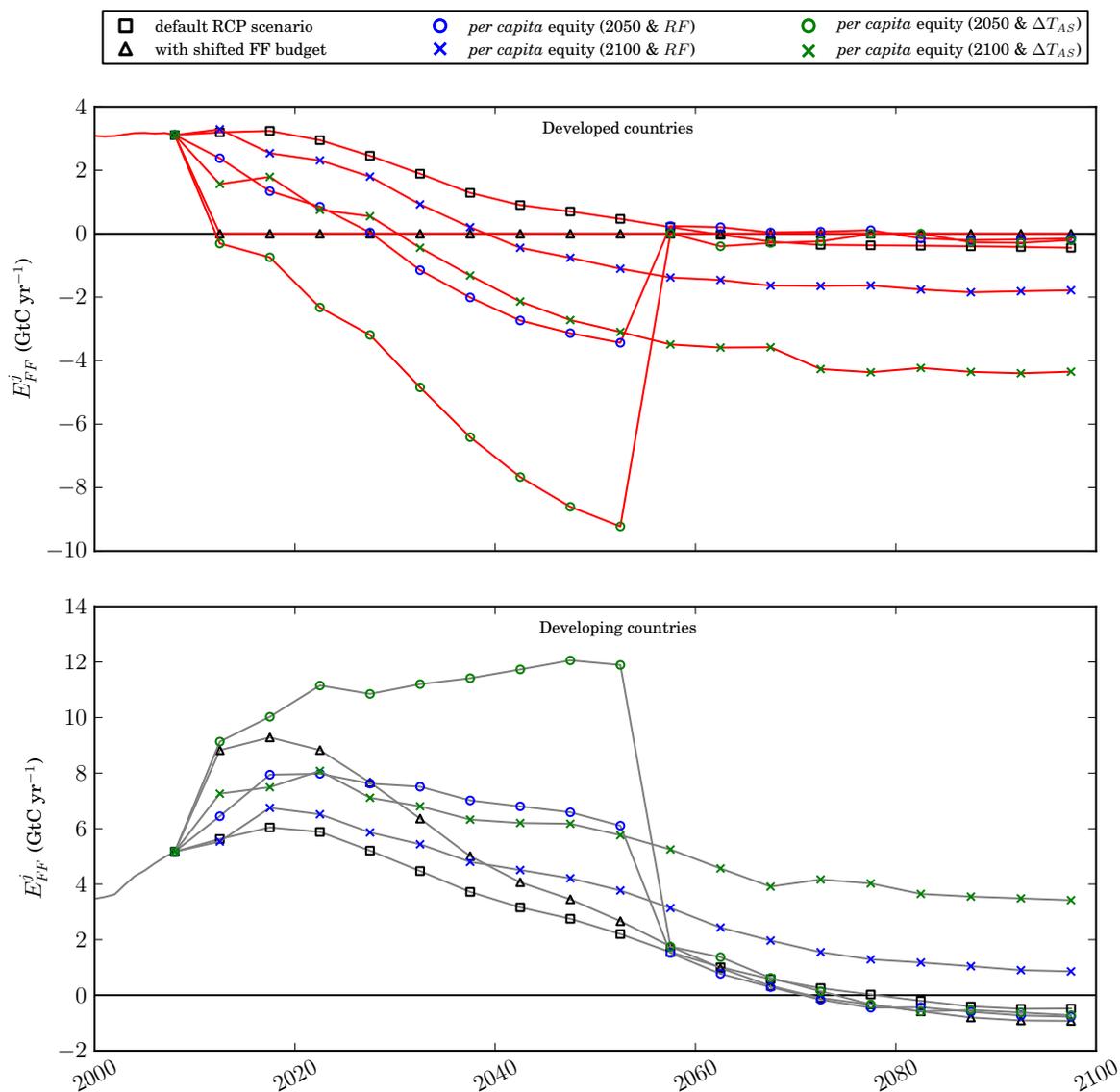


FIGURE 7.8 – Trajectoires d'émissions fossiles compatibles avec le RCP 2.6 et atteignant une équité par tête. Cette équité est atteinte soit en 2050 (cercle), soit en 2100 (croix) ; elle est exprimée soit en forçage radiatif (bleu) soit en température (vert).

cours du XXI^e à laquelle cette équité est atteinte. Les valeurs d'émissions négatives que nous obtenons sont bien supérieures aux émissions envisagées par défaut dans le RCP 2.6, même dans le cas le moins contraignant (pour les pays développés) d'une équité en forçage radiatif à l'horizon 2100. Avec des émissions négatives allant de -2 à -9 GtC yr^{-1} , et devant démarrer entre 2015 (i.e. immédiatement) et 2040, nos résultats montrent qu'une définition de l'équité fondée sur les contributions

par tête implique des flux négatifs très sûrement irréalistes. De plus, ces émissions négatives nettes sont à mettre en regard de nos travaux sur les émissions plancher, en section 4.2.3 : le flux brut d'émissions négatives est vraisemblablement plus élevé que ce que nous montrons ici. Il apparaît donc que la question climatique ne peut être traitée avec une approche telle que celle de l'équité par tête si nous voulons éviter un réchauffement supérieur à $+2^{\circ}\text{C}$.

7.3 Incertitude politique du *Brazilian Proposal*

Contexte Nous avons vu en section 5.1.3 que le *Brazilian Proposal* est affecté par deux formes d'incertitudes : celle liée aux données d'entrée, c'est-à-dire à notre connaissance des forçages anthropiques nationaux, et celle liée au système climatique, c'est-à-dire à notre connaissance des réponses du système aux forçages anthropiques. Dans cette section, nous introduisons une nouvelle forme d'incertitude : l'incertitude politique. Elle est liée aux choix politiques nécessaires à l'obtention d'un résultat quantitatif dans le cadre du *Brazilian Proposal* : des choix tels que la date à partir de laquelle l'attribution débute (e.g. UNFCCC, 2002), ou comment les puits de carbone doivent être attribués (e.g. Ciais et al., 2013). La distinction entre incertitudes scientifiques et politiques est la même que celle, relative au choix, évoquée par Müller et al. (2009). L'amélioration des techniques d'observation et/ou de modélisation permet de lever les deux premiers types d'incertitude, alors que la prise de décision (politique) permet de lever le troisième. Ainsi, la quantification de l'incertitude politique va nous permettre, dans un cadre de décision incertain (ou en l'absence de prise de décision politique) d'estimer les contributions régionales au changement climatique qui sont indiscutables même sur le plan politique.

Protocole Dans cette section, nous illustrons cette notion d'incertitude politique sur une valeur particulière : l'augmentation du CO_2 atmosphérique sur la période 1990–2008. Nous limitons notre étude à ce cas particulier en raison d'un manque conséquent de données. Nous considérons ici trois choix politiques relatifs au *Brazilian Proposal*. Le premier est la date à partir de laquelle les forçages anthropiques sont attribués. Nous prenons deux cas extrêmes : le début de la simulation (1700) et la date de référence pour le Protocole de Kyoto (1990). Avant ces dates, les forçages sont bien pris en compte, mais ils ne sont attribués à aucune des régions. Le second choix est l'attribution des puits de carbone aux émetteurs ou aux absorbeurs, tel que nous l'avons présenté en section 6.3.2. Le troisième porte sur l'attribution des forçages anthropiques aux producteurs ou aux consommateurs ; choix introduit par Peters (2008). L'attribution aux producteurs repose sur les inventaires nationaux d'émissions, tels que nous les utilisons depuis le début de cette thèse. L'attribution aux consommateurs consiste à corriger ces inventaires par les émissions "incorporées" dans les exportations et les importations, afin d'attribuer aux importateurs la part des émissions locales due à la production de biens exportés. Nous ne disposons que des données des émissions de CO_2 fossile incorporées aux commerce international de

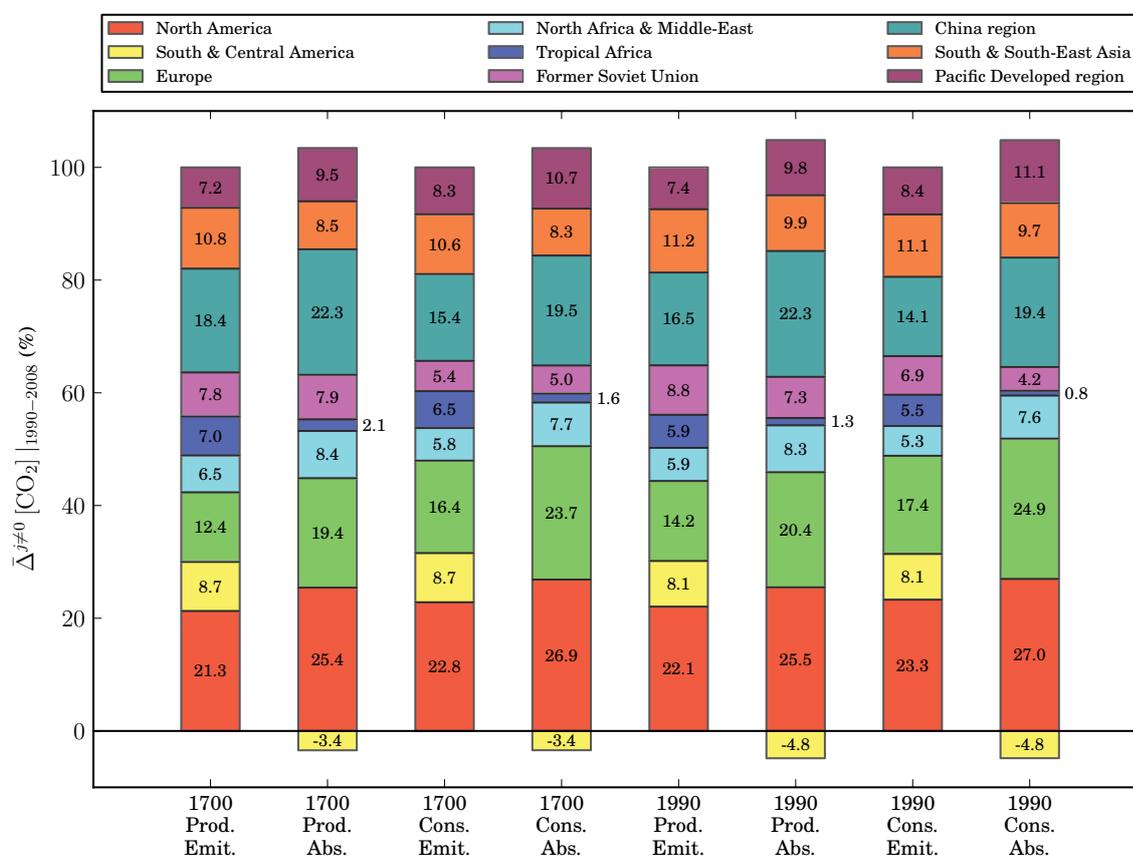


FIGURE 7.9 – Huit alternatives de contributions relatives à l'excès de CO₂ sur 1990–2008, dépendant de nos trois choix politiques.

1990 à 2008 (Peters et al., 2011). Nous effectuons alors une simulation attributive pour chacune des huit combinaisons de choix possibles.

Résultats Les contributions relatives de nos neuf régions historiques à l'augmentation du CO₂ atmosphérique, sur la période 1990–2008, sont montrées en figure 7.9, pour chaque combinaison de choix. On constate que, même en fixant les forçages anthropiques et la paramétrisation du modèle, le choix politique peut largement influencer sur les contributions régionales. Ici, une attribution aux absorbeurs favorisera les régions possédant un fort puits biosphérique, une attribution aux consommateurs favorisera les régions exportatrices, et une attribution en 1990 favorisera les régions ayant significativement émis avant cette date. C'est cette variation de contribution que nous appelons l'incertitude politique du *Brazilian Proposal*. La figure 7.10 résume cette incertitude, et la compare à l'incertitude scientifique, prise égale à 35 % (cf. discussion en section 5.1.3 et travaux de Höhne et al. (2011)). Ainsi, nous pouvons conclure que, malgré l'incertitude, l'Amérique du Nord, l'Europe et la Chine

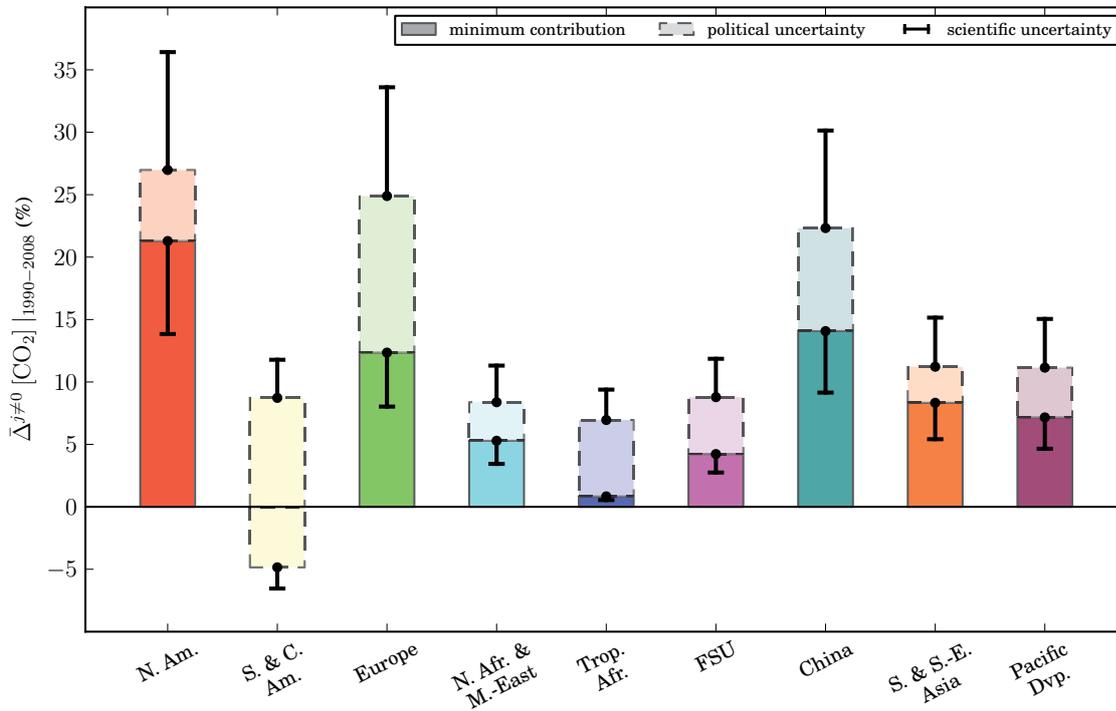


FIGURE 7.10 – Illustration des incertitudes politique et scientifique, dans le cas de l’augmentation du CO_2 atmosphérique sur la période 1990–2008. L’incertitude scientifique est simplement prise égale à 35 %.

sont bien les principaux contributeurs à l’augmentation du CO_2 sur la période considérée. Il est également notable qu’on ne puisse définir de contribution minimale pour l’Amérique du Sud, puisque sa contribution peut devenir négative si les puits sont attribués aux absorbeurs.

Discussion Bien que partiel en termes de choix politiques considérés, de données utilisées, ou de variables considérées, l’intérêt de cet exemple est d’illustrer le concept d’incertitude politique. La figure 7.10 nous montre en effet que les contributions de l’Amérique du Nord, de l’Europe et de la Chine sont au minimum de 21 %, 12 % et 14 % respectivement. Bien qu’il faille ajouter les incertitudes scientifiques à ces chiffres, ceux-ci sont indiscutables d’un point de vue politique ; ou plutôt, ceux-ci se passent des discussions politiques. Ces estimations à minima sont concrètement la contribution que chaque région ne peut nier : la contribution sur laquelle elle n’a aucune marge de manœuvre dans les négociations internationales.

