



CONVENTION DE RECHERCHE NO G.3-0006032

**SYSTÈME INTÉGRÉ DE SUIVI ET
D'ÉVALUATION DES NÉGOCIATIONS SUR LE
CLIMAT À PARTIR DE COP-15**

RAPPORT FINAL

KANLO-ORDECSYS-OPEN UNIVERSITY

JUILLET 2011

SOMMAIRE

1. Introduction	7
1.1. Objectifs du projet	7
1.2. Résultats attendus.....	8
Phase I.....	8
Phase II	8
2. Résumé des résultats.....	9
Phase I.....	9
Phase II	9
3. Adaptation des modèles	11
3.1. Récents changements apportés à TIAM.....	11
3.2. Récents changements apportés à GEMINI.....	12
3.3. Adaptation du modèle climatique GENIE	12
4. Coordination des modèles	13
4.1. Utilisation coordonnée des trois modèles	13
4.2 Utilisation de TIAM pour simuler les scénarios climatiques.....	15
4.3. L'émulation statistique.....	15
Genie-1	16
Genie-2	17
Gestion de l'incertitude	18
4.4. Le scénario référence	18
Prix des énergies.....	19
Energie primaire et consommation finale	20
Production électrique.....	21
Emissions de gaz à effet de serre	22
Climat.....	25
5. Méthodologie de prise en compte de l'incertitude.....	29

5.1. Prise en compte de l'incertitude avec GEMINI-E3	29
Differentes sources d'incertitude.....	29
Combiner optimisation stochastique et simulation de Monte-Carlo.....	29
Références	31
Remarques	32
5.2. Prise en compte de l'incertitude avec TIAM.....	32
Sécurité énergétique : une approche par programmation robuste pour représenter la vulnérabilité des approvisionnements énergétiques de l'Europe à travers TIAM.....	32
Problèmes de sécurité énergétique en Europe	33
Prise en compte de l'incertitude grâce à la programmation robuste.....	35
Références	36
Remarque	37
5.3. Prise en compte de l'incertitude avec GENIE	37
Evaluation de l'incertitude des changements climatiques régionaux	38
GENIE-1 : végétation terrestre et réchauffement à l'échelle du continent	38
GENIE-2 : cartes des températures et des précipitations à une échelle plus fine (environ 1,000 km).....	39
Références	40
6. Scénarios considérés durant la Phase I (15 ^{ème} CdP)	41
6.1. Cinq scénarios d'engagements à moyen terme.....	41
Politique 1 : échec des négociations	43
Politique 2 : accord à minima des pays industrialisés	43
Politique 3 : accord à minima des pays industrialisés + Russie	43
Politique 4 : accord international en faveur du climat limité au G20.....	43
Politique 5 : vers un accord international en faveur du climat.....	44
6.2. Mise en place d'un prix unique du carbone après 2030	44
6.3. Le cas particulier de l'ETS européen	45
7. Scénarios considérés durant la Phase II (16 ^{ème} CdP).....	47

7.1. Huit nouveaux scénarios d'engagements post-Copenhague.....	47
Scénario 6 : Echec suite à l'accord de Copenhague	50
Scénario 7 : Accord de Copenhague limité à l'Annexe 1	50
Scénario 8 : Accord de Copenhague (engagements minimaux)	50
Scénario 9 : Accord de Copenhague (engagements maximaux).....	50
Scénario 10 : Accord de Copenhague amélioré	51
Scénario 11 : Accord Tardif (en 2050)	51
Scénario 12 : Coopération optimale pour limiter le réchauffement à 2°C.....	51
Scénario 13 : Accord international pour limiter le réchauffement à 2°C	51
7.2. Une représentation plus fine de l'économie	52
7.3. Le cas de marchés fractionnés du carbone.....	54
Préambule	54
Scénarios climatiques à participation fragmentée	54
Résultats et commentaires.....	58
8. Diffusion et interactivité.....	67
8.1. Le site internet http://synscop15.ordecys.com	67
Section ACCUEIL.....	69
Section OUTILS ET METHODES	70
Section 15 ^{ème} Conférence des Parties	71
Section 16 ^{ème} Conférence des Parties	73
Explorateur de scénarios	73
8.2. Interactivité.....	76
Section ESPACE INTERACTIF.....	76
Liens utiles	79
Médias audio et vidéo	80
8.3. Maintenance du site internet	80
9. Résultats des simulations de la Phase I (15 ^{ème} CdP)	81
9.1. Organisation des résultats	81

Economie.....	81
Emissions.....	81
Energie - Technologie.....	82
Climat.....	82
9.2. Résultats des simulations réalisées avec Gemini-E3.....	82
Scénario 1 : Echech des négociations.....	83
Scénario 2 : Accord à minima au sein des pays industrialisés.....	85
Scénario 3 : Accord à minima au sein des pays industrialisés + Russie.....	87
Scénario 4 : Accord international en faveur du climat limité au G20	89
Scénario 5 : Vers un accord international en faveur du climat	91
Conclusion	93
9.3. Analyse des simulations réalisées avec TIAM	94
Quelques résultats sur les coûts de réduction	94
Emissions de gaz à effet de serre	95
Quelques choix technologiques préférés dans les secteurs de consommation finale	95
Quelques choix technologiques préférés dans le secteur de la production d'électricité	96
Quelques conséquences sur l'énergie primaire.....	97
9.4. Résumé des résultats des simulations fournies par Genie.....	98
9.5. Conclusion de la <i>Phase I</i>	99
10. Résultats des simulations de la Phase II (16 ^{ème} CdP)	100
10.1. Résultats des variantes économiques réalisées avec Gemini-E3	100
Engagements minimaux (<i>CPH Low Forever</i>)	100
Engagements Macimaux (<i>CPH High Forever</i>).....	105
Accord limité aux pays de l'Annexe 1 (<i>CPH Annex1 Forever</i>).....	112
10.2. Résultats des simulations réalisées avec TIAM.....	119
Scénario 6 : Echech suite à l'accord de Copenhague	119
Scénario 7 : Accord de Copenhague limité à l'annexe 1	121

Scénario 8 : Accord de Copenhague (engagements minimaux)	124
Scénario 9 : Accord de Copenhague (engagements mAXimaux)	127
Scénario 10 : Accord de Copenhague amélioré	129
Scénario 11 : Accord TARDIF (en 2050)	131
Scénario 12 : Coopération optimale pour limiter le réchauffement à 2°C	134
Scénario 13 : Accord international pour limiter le réchauffement à 2°C	135
10.3. Résultats des simulations réalisées avec Genie	138
10.4. Conclusion de la Phase II	143
11. Conclusion	144
12. Références	146
13. Annexes	148

1. INTRODUCTION

1.1. OBJECTIFS DU PROJET

Cette recherche-action consiste à exploiter trois modélisations complémentaires déjà opérationnelles (TIAM, GEMINI-E3 et GENIE) pour mettre en place un système intégré de suivi et d'évaluation des négociations dont une phase importante a eu lieu lors de la COP-15 de Copenhague, fin 2009, et qui déboucheront à terme sur un nouveau régime climatique mondial. Le système intégré de suivi et d'évaluation est composé de trois outils, exploitables de manière indépendante ou harmonisée :

TIAM: Un modèle technico-économique "Bottom-Up" mondial, incluant un module climatique et simulant des équilibres économiques partiels (système énergétique) avec possibilité de prise en compte d'incertitudes majeures;

GEMINI-E3: Un modèle macro-économique "Top-Down" mondial, simulant des équilibres macro-économiques avec possibilité de prise en compte d'incertitudes majeures;

GENIE: Un modèle climatique de complexité intermédiaire, simulant les évolutions climatiques dans diverses régions du globe.

Dans une première phase, appelée *Phase I*, en vue d'appuyer les négociations en cours et culminant lors de la COP-15, on construit un ensemble de scénarios représentatifs des différents accords envisagés pour la période post-2012, dont les résultats sont intégrés dans un "émulateur statistique" qui permet de produire, de manière conviviale, des réponses à des questions portant sur les conséquences des politiques négociées, discutées ou initiées dans le cadre de la COP-15. L'exploitation de ce système se fait à partir d'une interface sur internet qui en facilite l'accès à des non spécialistes et peut être particulièrement utile (utilisation possible "en ligne" pendant et après COP-15).

Dans une seconde phase, appelée *Phase II*, le système permet aussi de suivre, dans les années qui suivent COP-15, la mise en œuvre des mesures décidées dans le cadre du protocole de Kyoto (qui dure jusqu'en 2012) et de celles qui suivront (décidées lors de la COP-15 ou immédiatement après COP-15).

Le système d'évaluation et de suivi inclut aussi une prise en compte coordonnée de l'incertitude paramétrique dans les modèles du climat et de l'adaptation technico-économique.

1.2. RÉSULTATS ATTENDUS

PHASE I

Les résultats attendus de la phase I (août 2009-janvier 2010) étaient les suivants :

- La production en ligne de résultats détaillés sur les impacts climatiques, énergétiques et économiques des propositions discutées en vue de COP-15 et pendant COP-15 ;
- L'exploitation coordonnée des modèles développés récemment en vue d'éclairer les négociations de COP-15 et de celles qui suivront;
- La mise en œuvre accessible pour des non-experts à partir d'une interface «*internet*» ;

PHASE II

La phase II (janvier 2010-janvier 2011) a amplifié l'ensemble des scénarios considérés, et facilité l'accès interactif aux scénarios par les utilisateurs du site internet. Trois éléments ont été, particulièrement, l'objet de la phase II :

- Le développement d'une méthodologie de prise en compte de l'incertitude (déjà en partie accompli durant la phase I);
- Le traitement d'un plus grand nombre de scénarios (notamment un certain nombre de scénarios climatiques à participation fractionnée), et la possibilité offerte aux utilisateurs de spécifier leurs propres variantes et d'en observer les conséquences en ligne;
- L'amplification du dialogue entre modélisateurs et acteurs du développement durable par le biais d'une bonne diffusion des résultats de la recherche.

2. RESUME DES RESULTATS

PHASE I

Le projet « SYSTÈME INTÉGRÉ DE SUIVI ET D'ÉVALUATION DES NÉGOCIATIONS SUR LE CLIMAT À PARTIR DE COP-15 » a démarré à la fin de l'été 2009. Un effort intense a alors été fait pour offrir un ensemble de simulations coordonnées ou intégrées pouvant être utiles lors des discussions de Copenhague, en décembre 2009. Cela a abouti, en particulier, à :

1. La mise en place de 3 modèles complémentaires, TIAM, GEMINI-E3 et GENIE pour réaliser des analyses intégrées de scénarios climatiques et techno-économiques.
2. L'élaboration de cinq scénarios qui, de fait, encadrent bien le résultat des négociations de Copenhague;
3. La mise en œuvre d'une méthode d'émulation statistique des modèles GENIE-1 et GENIE-2 qui nous permet maintenant de fournir sans délai des réponses à des requêtes concernant l'effet sur les variables climatiques de différents profils d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre;
4. Le développement d'un site « web » décrivant ces scénarios, donnant une information utile sur les modèles utilisés et permettant l'exploitation interactive des résultats de simulation;
5. La construction d'un système d'exploration des résultats de ces simulations qui permet d'afficher, sous forme comparée pour deux scénarios contrastés, l'évolution dans le temps de différents indicateurs économiques, énergétique, climatiques.

Ce système est déjà à la disposition du public et donc, en particulier, des responsables des négociations climatiques.

PHASE II

Dans la phase II, qui a démarré en 2010, nous avons fait une analyse des décisions prises durant la conférence de Copenhague et mis de nouveaux outils à disposition pour préparer les négociations de la 16^{ème} Conférence des Parties de Cancun. Cela a abouti à :

1. La mise à disposition à un ensemble d'experts et négociateurs agréés un espace collaboratif permettant d'explorer un ensemble élargi de scénarios, d'échanger avec les modélisateurs et entre eux, et enfin de faire d'éventuelles demandes de nouveaux scénarios.
2. L'élaboration de 8 nouveaux scénarios pour préparer les négociations de Cancun.

3. L'ajout de cartes de précipitation dans les résultats climatiques générées à partir du modèle Genie.
4. Le développement de méthodologies de prise en compte de l'incertitude dans les modèles climatiques, macro-économiques et technico-économiques.
5. La diffusion et la promotion des travaux réalisés à travers des événements et publications scientifiques.
6. L'analyse systématique des interactions entre hypothèses technologiques et politiques climatiques, y compris des politiques à participation fractionnée.

Le forum interactif du site internet a été mis en ligne début 2010, les scénarios préparant Cancun ont été mis en ligne fin 2010, les méthodologies de prise en compte de l'incertitude ont été publiées en ligne début 2011, et ont été acceptés pour publication dans des revues internationales.

3. ADAPTATION DES MODELES

Les analyses effectuées dans ce projet sont basées sur l'utilisation coordonnée des trois modèles mentionnés dans l'introduction. Des changements importants ont été apportés aux modèles, plus particulièrement à certaines de leurs données techniques et économiques, afin de mieux les adapter aux objectifs du projet. Dans cette section, nous résumons les principales adaptations des trois modèles.

3.1. RECENTS CHANGEMENTS APPORTES A TIAM

En plus des ajustements effectués pour harmoniser GEMINI-E3 et TIAM (section suivante), les changements suivants ont été réalisés récemment dans TIAM :

- Ajustement de la valeur de la sensibilité climatique (température moyenne globale à l'équilibre résultant d'un doublement de la concentration de CO₂ équivalent) utilisée dans le module climatique de TIAM, pour refléter la valeur obtenue avec GENIE 1 : 3.8°C.
- Mise à jour des capacités installées des centrales solaires photovoltaïques, solaires thermiques (concentration), et éoliennes, ainsi que des installations de production de bioéthanol et biodiesel. Ces caractéristiques du système énergétiques changent rapidement d'une année à l'autre, d'où la nécessité de leur mise à jour régulière.
- Représentation des projets de centrales solaires thermiques (concentration) en construction ou planifiés jusqu'en 2020.
- Mise à jour des caractéristiques des technologies futures dans le secteur de la production d'électricité et le transport (véhicules électriques et hybrides). Ajout de technologies telles que : procédé Fischer-Tropsch à base de biomasse pour la production de diesel, avec capture de CO₂; usine de raffinage de bioéthanol et biodiesel de première génération, dont le rôle attend à court terme est non négligeable.
- Ajustement des potentiels de réduction des émissions de CH₄ et de N₂O de l'agriculture: jusqu'à 20% des émissions peuvent être réduites, supposant de nouvelles pratiques agricoles. Il apparaît que les émissions du secteur agricole jouent un rôle important dans la (non) faisabilité de certaines cibles climatiques sévères.
- Addition de contraintes de croissance annuelle des capacités installées pour refléter les contraintes réelles du marché et du système énergétique empêchant la pénétration soudaine et de grande envergure de nouvelles technologies.
- Ajouter d'un potentiel additionnel et théorique d'atténuation des gaz à effet de serre à coût élevé (*backstop technology*) permettant d'évaluer, dans le cas

d'une cible climatique résultante irréalisable par le modèle, les réductions d'émissions additionnelles au potentiel disponible dans le modèle pour rendre faisable la cible climatique en question.

3.2. RECENTS CHANGEMENTS APPORTES A GEMINI

Aucune modification sur la structure du modèle GEMINI-E3 n'a été apportée. Cependant un travail important d'harmonisation avec les données du modèle TIAM a été réalisé notamment concernant les hypothèses d'environnement économiques (PIB, population, prix des énergies) et technologiques.

3.3. ADAPTATION DU MODELE CLIMATIQUE GENIE

Le changement principal apporté aux modèles de la famille GENIE réside dans l'utilisation d'un émulateur statistique en place du modèle lui-même. Cette émulation est présentée en détail en section suivante décrivant la coordination des modèles.

4. COORDINATION DES MODELES

4.1. UTILISATION COORDONNÉE DES TROIS MODÈLES

L'utilisation coordonnée des trois modèles se fait comme indiqué sur la figure 1.

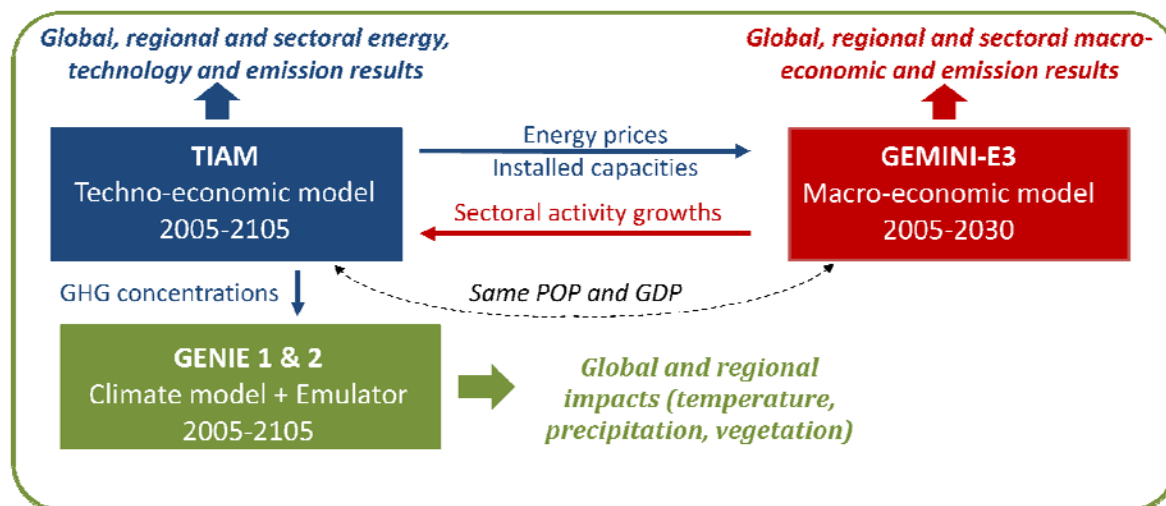


Figure 1. Utilisation coordonnée des trois modèles

Sur la base de l'évolution démographique à l'horizon 2100 – tirée des travaux de l'organisation des Nations Unies et d'hypothèses sur la productivité du travail – nous déterminons un scénario d'évolution du Produit Intérieur Brut (PIB) des économies mondiales pour le 21^{ème} siècle. Ces hypothèses sont introduites dans les modèles TIAM et GEMINI-E3. Avec ces données, le modèle TIAM détermine les prix des énergies, dans le cas d'un scénario de référence (présenté en section 4.4) compte tenu de sa description de l'évolution des ressources énergétiques. Utilisant ces prix de l'énergie, GEMINI-E3 fournit ensuite à TIAM une désagrégation sectorielle de l'évolution du PIB sur la période 2005-2030. Ces productions sectorielles sont ensuite extrapolées sur la période 2030-2100 par TIAM, et servent de base à un scénario de demandes en services énergétiques sur l'horizon 2010-2100. Utilisant ces demandes, TIAM produit une nouvelle série de résultats technico-énergétiques et les émissions de GES sur ce même horizon. Les résultats des deux modèles sont confrontés à chaque étape, et les différences analysées, pour certains paramètres une harmonisation est menée.

C'est le cas des capacités des centrales électronucléaires dont l'évolution est harmonisée. L'objectif de ce travail n'est pas d'aboutir à une harmonisation complète, une certaine liberté étant laissée aux deux modèles, permettant de traduire l'incertitude au niveau des résultats économiques, mais de s'assurer que les hypothèses de simulation sont cohérentes entre les deux modèles. Nous nous assurons ainsi que les émissions mondiales de gaz à effet de serre sont proches entre les deux modèles. Une fois cette harmonisation menée, les émissions de gaz à effet de serre sont utilisées par GENIE qui calcule alors les impacts climatiques de

cette évolution économique. Nous aboutissons alors à un scénario harmonisé de l'évolution climatique et économique.

Le tableau 1 montre l'évolution de référence des Produits Intérieurs Bruts sur la période 2010-2100. La croissance du PIB mondial subirait un ralentissement continu sur la période pour atteindre à la fin du 21^{ème} siècle 0.9% par an. Les pays industrialisés feraient face à des taux de croissance inférieurs à 2% dès la première partie du 21^{ème} siècle consécutif à un vieillissement de la population et à des taux d'augmentation de productivité modestes. A la fin du 21^{ème} siècle le taux de croissance des pays industrialisés se situerait aux alentours de 0.6% par an. Au sein des pays en développement la première moitié de notre siècle serait caractérisée par une plus grande hétérogénéité, la zone asiatique et en particulier la Chine et l'Inde continueraient à avoir une croissance soutenue qui se ralentirait ensuite à la fin de notre siècle. Plus modeste, la croissance des autres pays en développement se maintiendrait en fin de siècle pour se situer au-dessus de la zone Asie. Le tableau 2 présente l'évolution de la croissance économique sur la période 2010-2030 pour l'Europe sur la base des résultats du modèle GEMINI-E3.

Tableau 1 : Evolution du PIB mondial (méthodologie « Market exchange rate »)

	2010- 2020	2020- 2030	2030- 2050	2050- 2075	2075- 2100
Pays Industrialisés	2.0%	1.6%	1.1%	0.7%	0.6%
Etats-Unis	3.1%	2.3%	1.4%	0.7%	0.6%
Europe	2.2%	2.0%	1.2%	0.7%	0.6%
Canada	2.2%	0.9%	0.8%	0.5%	0.6%
Japon	1.5%	0.5%	0.7%	0.6%	0.6%
Australie - N. Zélande	2.3%	1.6%	1.1%	0.6%	0.6%
Russie	5.5%	5.4%	2.3%	1.3%	0.8%
Pays en Développ.	4.0%	3.4%	2.7%	1.5%	1.0%
Chine	6.3%	5.5%	4.1%	1.7%	1.0%
Inde	8.1%	6.9%	4.4%	1.7%	1.0%
Reste de l'Asie	3.6%	2.6%	2.3%	1.5%	1.1%
Mexique	4.3%	3.7%	3.3%	2.1%	1.3%
Am. Centrale et Latine	3.7%	3.0%	3.0%	2.1%	1.3%
Moyen Orient	4.1%	3.2%	2.8%	2.0%	1.3%
Afrique	4.3%	3.4%	3.3%	2.3%	1.4%
Monde	3.2%	2.8%	2.2%	1.3%	0.9%

Source : modèle TIAM

Tableau 2 : Evolution du PIB Européen

	2010- 2020	2020- 2030
Union Européenne	2.2%	2.0%
Allemagne	1.7%	1.5%
Royaume-Uni	2.3%	2.1%
Italie	1.9%	1.7%
France	2.4%	2.1%
Pologne	4.6%	3.9%
Reste de l'Union Européenne	2.1%	2.1%

Source : modèle GEMINI-E3

4.2 UTILISATION DE TIAM POUR SIMULER LES SCÉNARIOS CLIMATIQUES

TIAM vise à évaluer les conséquences à long terme des politiques définies sur l'horizon 2005-2030 (voir les sections suivantes pour la description des scénarios simulés au cours des deux phases du projet). À cette fin, l'analyse de chaque scénario proposé se fait en deux étapes dans TIAM:

- *Étape 1:* Les politiques climatiques définies sur la période 2010-2030 sont implantées dans TIAM, et le modèle évalue les décisions et conséquences (technologies, mix énergétique, échanges internationaux, émissions, etc.) associées à ces politiques sur l'horizon restreint 2010-2030. Aucune cible climatique n'est incluse à cette étape.
- *Étape 2:* Afin d'évaluer les conséquences à long terme de ces politiques, les caractéristiques du système énergétique des différentes régions sur l'horizon 2010-2030 sont *figées aux niveaux obtenus à l'étape 1*, et une cible climatique à long terme, exprimée en forçage radiatif maximal, est imposée en 2100 (pour les scénarios de la phase I uniquement). Un marché mondial du carbone est considéré après 2030, autrement dit, un accord de coopération entre tous les pays pour réduire les gaz à effet de serre est supposé atteint après 2030. Le modèle évalue alors les changements requis au système énergétique après 2030, ainsi que leurs coûts, pour satisfaire la cible climatique imposée. Il est possible que pour certains scénarios pré-2030, la cible climatique soit inatteignable, ce qui signifie alors que les mesures prises avant 2030 sont insuffisantes pour permettre le respect des objectifs climatiques à plus long terme.

4.3. L'EMULATION STATISTIQUE

Pour chaque scénario simulé, les modèles climatiques GENIE-1 et GENIE-2 utilisent comme input la trajectoire de concentration des gaz à effet de serre sur la période 2005-2105, fournie par TIAM. Cette information est exploitée par GENIE et associée à l'ensemble des paramètres techniques du modèle pour

délivrer à l'utilisateur les résultats en termes d'augmentation des températures et de changements de la végétation à l'horizon 2105. L'idéal serait de pouvoir lancer directement les modèles GENIE-1 et GENIE-2 en ligne et d'afficher immédiatement les résultats à l'utilisateur. Malheureusement, cette option n'est pas envisageable, ces modèles très complexes ayant des temps de calcul beaucoup trop importants. GENIE-1 simule environ 3000 ans de "temps réel" en 1 heure CPU alors que GENIE-2 simule environ 12 ans de "temps réel" en 1 heure CPU.

Afin de contourner cette difficulté, nous avons utilisé des représentations simplifiées des modèles GENIE, appelées des émulateurs statistiques, à la place des modèles eux-mêmes. Ces émulateurs statistiques ont l'avantage de pouvoir répondre presque instantanément à une requête donnée. Ils sont une approximation des fonctions de réponse du modèle d'origine (information sur les précipitations, sur les températures, etc.) et se présentent comme des fonctions explicites polynomiales des paramètres d'entrée du modèle (profil de concentration et paramètres techniques). Plus spécifiquement, un émulateur est construit à partir d'un ensemble de simulations. La qualité de l'émulateur est affinée au fur et à mesure de ces simulations en appliquant la méthode des critères bayésiens à chaque nouveau terme ajouté.

Avant de s'intéresser plus spécifiquement aux sorties de chacun des émulateurs, revenons sur les données d'entrées. Comme énoncé précédemment, les émulateurs sont des fonctions explicites des paramètres techniques du modèle et du profil de concentration sur la période 2005-2105. Ce profil de concentration est transmis à l'émulateur sous une forme indirecte. En effet, par souci de simplification, le profil de concentration est approximé par une combinaison linéaire des trois premiers polynômes de Tchebychev. Ce sont par conséquent les trois coefficients de la combinaison linéaire qui sont les inputs des émulateurs et non la véritable courbe de concentration.

GENIE-1

Les résultats de GENIE-1 présentés sur le site web SYNSCOP15 proviennent de 24 émulateurs statistiques qui ont été construits à partir d'une collection de 480 simulations de GENIE-1. Chacune de ces simulations est considérée comme plausible d'un point de vue climatique; Elles ont des valeurs d'entrée différentes pour 25 paramètres physiques, permettant de quantifier l'incertitude du modèle. Pour une description plus détaillée de la conception d'ensemble voir (Holden et al., Climate Dynamics (2009)). L'ensemble des simulations a une sensibilité du climat moyenne (variation de température d'équilibre à un doublement du CO₂) de 3.8°C. Les résultats des 24 émulateurs peuvent se décomposer comme suit. Les émulateurs calculent les valeurs moyennes et les écart-types concernant trois indicateurs :

- Les variations de températures de surface,

- Les variations de carbone dans la végétation,
- Les variations de la couverture végétale en pourcentage,

Ces indicateurs sont calculés pour 4 régions, représentant les 4 grandes masses terrestres :

- La partie hémisphère sud de l'Asie, l'Afrique et l'Océanie,
- La partie hémisphère nord de l'Eurasie et l'Afrique,
- L'Amérique du sud,
- L'Amérique du Nord.

Il existe ainsi un émulateur pour chaque valeur à calculer (par exemple, un émulateur calcule la variation de température moyenne en Amérique du Nord).

GENIE-2

Nous utilisons également des émulateurs statistiques pour GENIE-2 : 19 paramètres clés, atmosphériques et océaniques, en entrée, à différentes valeurs, permettent d'avoir un ensemble de 122 états climatiques plausibles. La sensibilité du climat de cet ensemble n'a pas encore été calculée (10.000 heures CPU sont nécessaires pour exécuter des simulations à l'équilibre), mais a été estimée à 2,1°C d'après les premiers calculs. Cela se situe à la limite inférieure de l'amplitude proposée par le GIEC (2,1 à 4,4°C). Afin de corriger ce biais et de présenter une réponse du climat qui reflète mieux le consensus des modèles du GIEC, nous avons recalé les résultats de GENIE-2 au réchauffement de la moyenne mondiale prévue par GENIE-1.

Pour une trajectoire de concentration donnée, GENIE-2 est utilisé dans SYNSCOP15 pour produire deux cartes 2D détaillées des variations spatiales de température, l'une en valeurs moyennes et l'autre en écart-types. Chaque carte est décomposée en 64x32 cellules. La démarche utilisée pour générer ces cartes s'appuie sur une analyse en composantes principales. Cette technique revient à dégager un nombre minimum d'éléments (ici des simulations) considérés comme représentatifs de l'ensemble. Ces éléments sont appelés les composantes principales (ou CP). Le but est de réduire le nombre élevé de variables qui sont nécessaires à la description d'un ensemble de champs spatiaux, tout en conservant une description complète de la variabilité de la structure spatiale. Généralement, les 5 premières CP suffisent pour capter 90% de la variabilité simulée. Les CP sont des fonctions des paramètres du modèle. On peut donc les utiliser pour émuler la réponse du modèle à un changement d'un des paramètres d'entrée.

Pour une trajectoire de concentration donnée (provenant de TIAM) il faut alors déterminer les cinq coefficients associés à la combinaison linéaire des CP pour reproduire les deux cartes correspondantes. Ces coefficients sont calculés à l'aide de 5 émulateurs statistiques. Chaque émulateur prend comme entrées les 19 paramètres physiques du modèle GENIE-2 et les 3 coefficients des

polynômes de Tchebychev (correspondant à l'approximation de la trajectoire de concentration) et retourne comme résultat le facteur associé à l'une des cinq composantes principales. Une fois les cinq facteurs calculés, il devient très simple de construire les deux cartes de variations de température (moyenne et écart-type).

Du point de vue informatique, les émulateurs sont écrits dans le langage statistique « R ». Une interface développée en langage Python réceptionne les concentrations de TIAM sur la période 2005-2105, calcule les coefficients des polynômes de Tchebychev associés, lance l'ensemble des émulateurs R et restitue les résultats à l'utilisateur.

GESTION DE L'INCERTITUDE

Les incertitudes présentes dans les modèles GENIE-1 et GENIE-2, liées aux prédictions climatiques, ont principalement trois origines distinctes :

1) L'incertitude liée au forçage radiatif (les évolutions des émissions de gaz à effet de serre et des aérosols sont inconnues, tout comme l'évolution future de l'utilisation des sols) est de loin la plus grande source d'incertitude liée aux changements climatiques futurs.

2) L'incertitude paramétrique des modèles. Certains comportements comme la formation des nuages ne peuvent être modélisés de façon globale car cela nécessiterait une trop grande précision spatiale et temporelle. Ils sont donc représentés de façon paramétrique : ce sont des équations relativement simples qui sont conçues pour reproduire à grande échelle un comportement moyen afin d'en mesurer les effets espérés. Les coefficients (paramètres) de ces équations ne peuvent pas toujours être définis de façon certaine ou précise.

3) L'incertitude structurelle du modèle. C'est l'incertitude liée à ce qui n'est pas représenté dans le modèle, soit parce que trop complexe (même si un comportement peut être modélisé, ses effets peuvent ne pas l'être !), soit parce que mal connu.

Les sources d'incertitudes 2) et 3) représentent ce que l'on nomme l'incertitude due à la modélisation. Une autre source d'incertitude provient de l'erreur d'approximation des modèles GENIE-1 et GENIE-2 par des émulateurs statistiques. L'ensemble de ces incertitudes (forçage, modélisation et approximation) est pris en compte dans la construction des émulateurs statistiques. En effet, les émulateurs sont construits sur un ensemble de simulations représentatif des différentes valeurs des paramètres techniques et physiques possibles. Les émulateurs calculent ainsi des critères de performance probabilistes (moyenne et écart-type) pour les différents indicateurs.

4.4. LE SCENARIO REFERENCE

Le scénario de base, scénario référence ou encore scénario BaU (pour *Business as Usual*), correspond à la situation où aucune politique de changement climatique n'est jugée nécessaire. Comme pour les scénarios employés dans les phases I et II du projet et qui seront décrits plus bas, nous utilisons les trois modèles TIAM - GEMINI-E3 - GENIE. Le résultat est une représentation économique et climatique harmonisée et cohérente entre ces trois modèles comme présenté en section 4.1.

En plus des hypothèses économiques présentées dans la section 4.1, nous supposons les valeurs suivantes.

PRIX DES ENERGIES

Le prix du pétrole sur les marchés internationaux atteint près de \$100 le baril en 2030, et à \$140 le baril d'ici la fin du siècle. En plus d'examiner les caractéristiques des réserves et de la dynamique d'extraction, le scénario de référence considère une stratégie de maximisation du profit pour les régions de l'OPEP qui réduisent leur production à 80% de la production qui seraient obtenus dans l'équilibre mondial parfait. Ce taux a été défini lors d'analyses du comportement stratégique des régions de l'OPEP à l'aide du modèle TIAM (Loulou et al., 2009). Le marché du gaz est globalement divisé en trois : le marché américain, le marché Russie-Europe-Afrique et le marché asiatique. Cependant, le développement du gaz naturel liquéfié a tendance à réduire les distinctions entre ces trois marchés. Les prix du gaz ont tendance à suivre l'augmentation du prix du pétrole, tandis que l'Europe, plus proche des fournisseurs africain et russe, bénéficie d'un prix légèrement plus faible que le reste du monde. Le charbon reste à bas prix durant toute la période en raison de ressources abondantes et largement distribuées. Plus de détails peuvent être trouvés dans le tableau suivant.

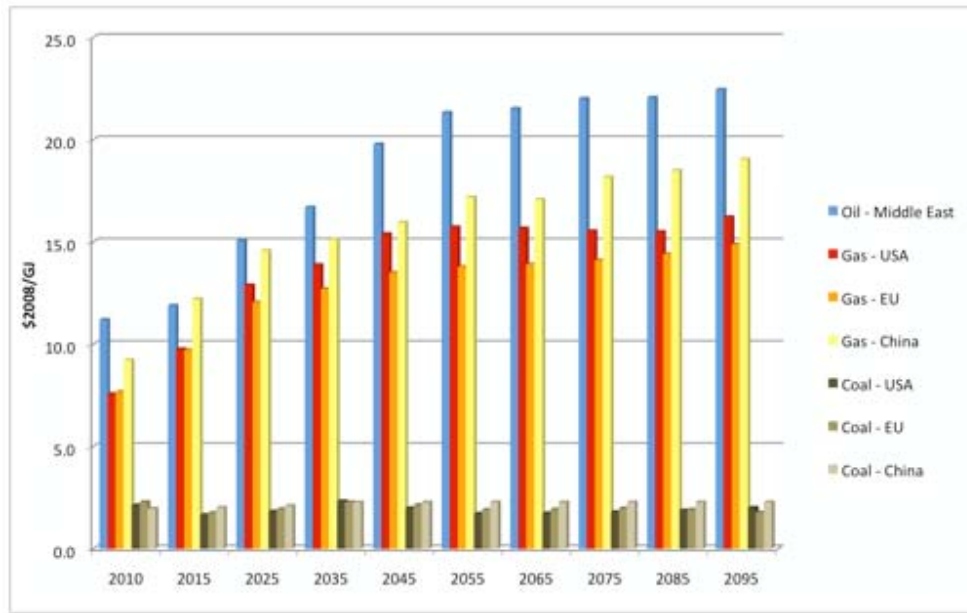


Figure 2 : Prix des énergies en dollars (\$2008) par GJ. source : TIAM

ENERGIE PRIMAIRE ET CONSOMMATION FINALE

Le système énergétique mondial est dominé par les combustibles fossiles, le charbon en particulier en raison des prix du pétrole relativement élevés. Le charbon est utilisé principalement pour la production d'électricité et les activités industrielles, mais aussi pour la production de carburants synthétiques à partir du milieu du siècle. Les carburants de synthèse contribuent à la diminution de la consommation d'énergie provenant du pétrole, tandis que la consommation de pétrole (y compris les combustibles synthétiques) par les secteurs d'utilisation finale ne diminue pas. L'augmentation de la consommation de la biomasse et des biocarburants est aussi motivée par les exigences de l'industrie (biomasse) et des activités de transport (bio-éthanol, bio-diesel). La part de l'électricité dans la consommation finale d'énergie est légèrement augmentée, ce qui illustre une tendance à l'électrification du système énergétique.

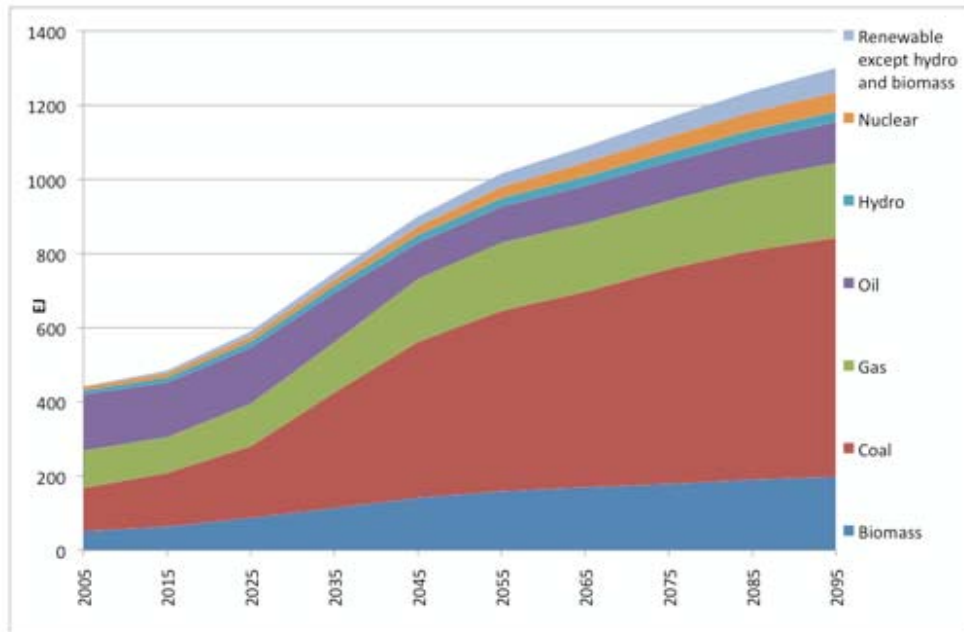


Figure 3 : Energie primaire (FEQ renewable=1) en exajoule. source : TIAM

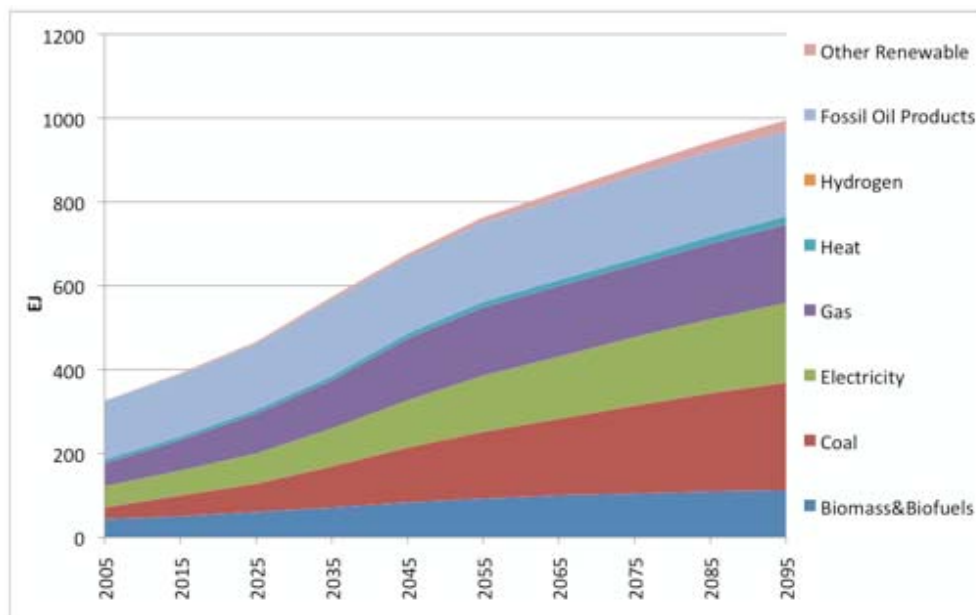


Figure 4 : Consommation finale par secteur (incluant les utilisations non énergétiques) en EJ. source : TIAM

PRODUCTION ELECTRIQUE

La production d'électricité augmente d'un facteur proche de 3.5 entre 2005 et 2100. La part relative des combustibles fossiles diminue (de 67% à 40% de la production totale d'électricité) compensée par l'augmentation de l'énergie nucléaire (de 15% à 24%) et des énergies renouvelables (de 17% à 35%, y compris la biomasse). Parmi les sources d'énergies renouvelables,

l'hydroélectricité reste dominante, mais l'énergie éolienne, notamment, pénètre le marché, en particulier dans les pays en développement. Il convient de souligner que l'électricité d'origine nucléaire est bornée dans TIAM (limite inférieure et supérieure), tout comme le nombre de centrales nucléaires installables qui dépend non seulement de considérations technico-économiques mais aussi de facteurs socio-politiques (acceptabilité, disponibilité du capital, etc.) qui ne sont pas directement représentés dans TIAM.

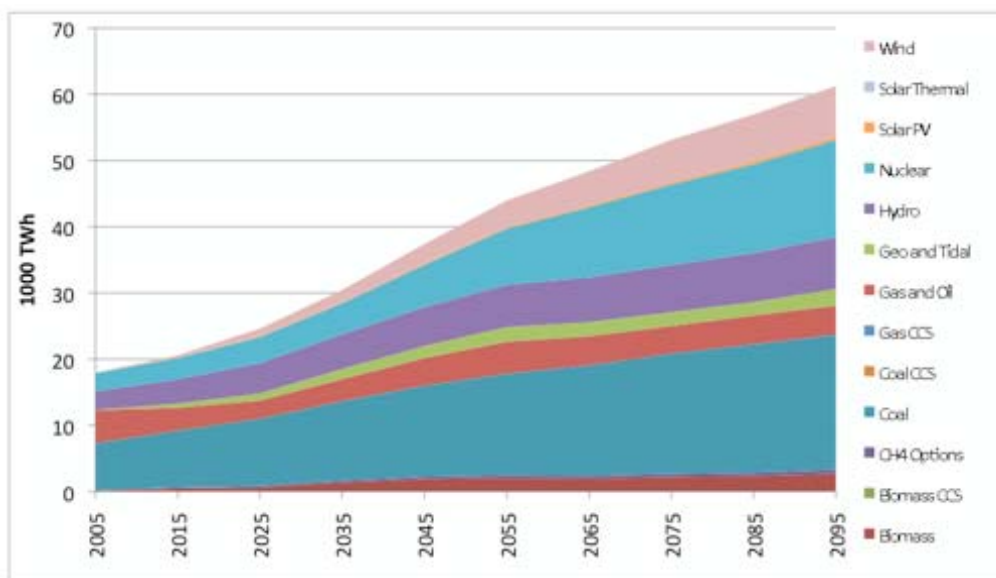


Figure 5. Production électrique (dont auto-production par l'industrie) en millier de TWh (ou PWh). source : TIAM

EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE

Les émissions mondiales de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O) augmenteraient de façon continue au cours de notre siècle pour atteindre en 2100, 25 GtC (gigatonne de carbone) (dont 20 uniquement pour le CO₂). Les émissions des pays industrialisés croitraient modérément jusqu'à la moitié du 21^{ème} siècle pour ensuite se stabiliser à environs 6 GtC. Les émissions de l'Asie augmenteraient le plus fortement sur la période, seraient multipliées par trois et représenteraient en fin de siècle la moitié des émissions mondiales. Au sein de cette zone la Chine représenterait 60% des émissions. La Russie ferait aussi face à un développement important de ses émissions, suivie par le Moyen-Orient. L'Afrique doublerait ses émissions sur la période, alors que les émissions de l'Amérique Centrale et Latine n'augmenterait que de 70%.

La concentration atmosphérique de CO₂ qui résulte de ces émissions atteint 650 ppm à la fin de l'horizon temporel.

Les décisions de choix technologiques et énergétiques et la croissance de la demande en énergie sont les facteurs expliquant ces trajectoires d'émissions.

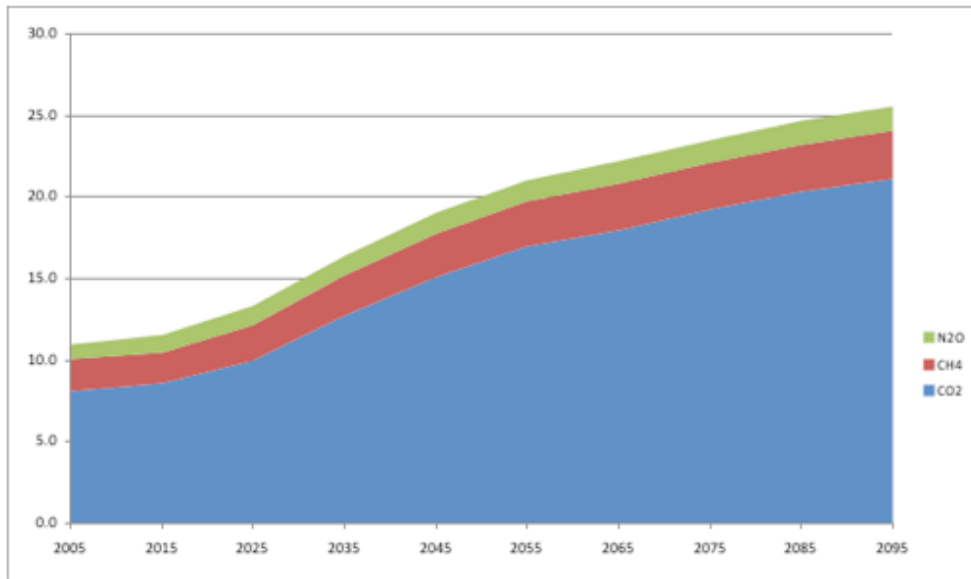


Figure 6. Emissions mondiales de CO₂, CH₄ et N₂O en GtC. source : TIAM

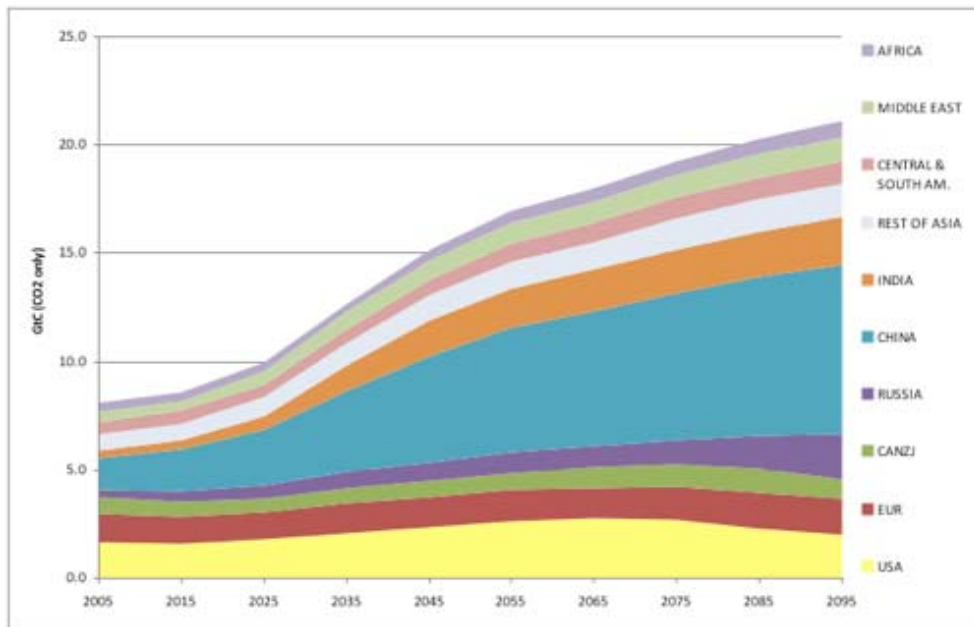


Figure 7. Emissions de CO₂ (uniquement) par régions en GtC. source : TIAM

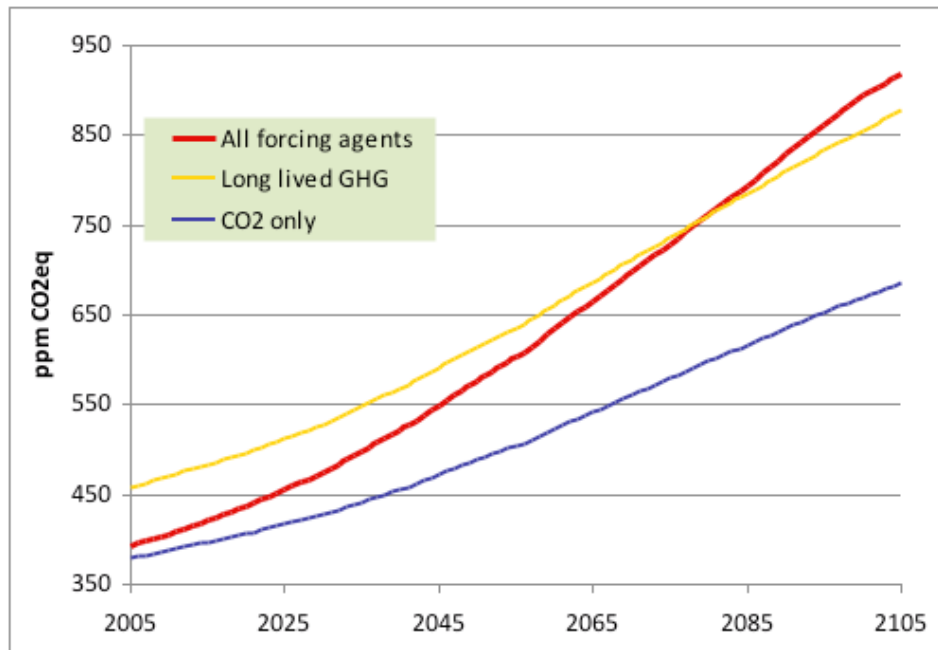


Figure 8. Concentrations atmosphériques de différents éléments en ppm d'équivalent CO2.
source: TIAM

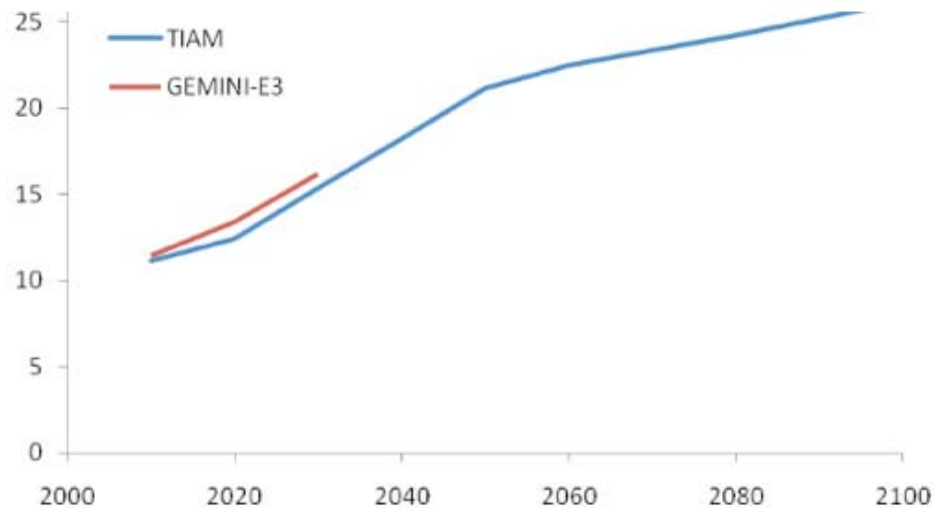


Figure 9. Comparaison des émissions mondiales de ggas à effet de serre des modèles TIAM et GEMINI-E3 en GtC. sources : GEMINI-E3 et TIAM

Les émissions de CO2 (uniquement), par secteur, représentées dans la figure 10 montrent la contribution élevée de l'industrie et de l'électricité aux émissions mondiales, et l'augmentation particulièrement forte de l'industrie et les secteurs en amont (principalement à cause de la croissance de la production de carburants de synthèse), tandis que les émissions des autres secteurs restent à peu près constantes, grâce à une efficacité accrue, la tendance à l'électrification de ces secteurs ou l'utilisation de biocarburants.

NOTE: Il s'agit des émissions de CO₂ (uniquement). Il manque donc le CH₄ et le N₂O pour atteindre les 25 GtC des graphiques précédents.

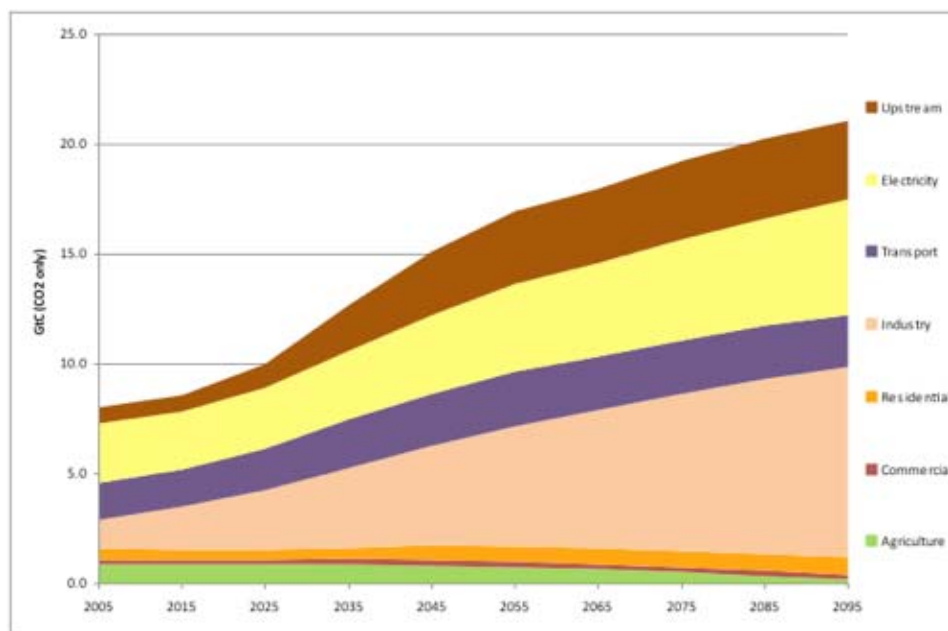


Figure 10. Emissions mondiales de CO₂ (uniquement) par secteur en GtC. source : TIAM

CLIMAT

GENIE montre une tendance bien connue du réchauffement climatique, semblable à celle observée dans de nombreuses simulations précédentes présentées par le GIEC.

Le réchauffement à l'horizon 2100 est concentré sur les zones terrestres, ceci étant dû en grande partie à l'inertie thermique des océans et aux effets de rétroaction positive de la fonte des neiges. Un réchauffement plus intense dans les régions de hautes latitudes est également largement observé.

L'augmentation de la température moyenne de l'air de surface dans le scénario de référence est égal à 3.55 degrés par rapport à l'ère préindustrielle.

Notons que l'augmentation de température dans l'ensemble des résultats de GENIE (ci-dessous) est mesurée par rapport à 2005. L'augmentation de température comparée à l'ère préindustrielle est donc égale à celle observée par GENIE à laquelle on ajoute 0.76°C (augmentation de température entre l'ère préindustrielle et 2005).

Les incertitudes sont plus largement prises en compte dans GENIE-2, en raison de la plus grande complexité (liée à la dynamique) du modèle, comparé à GENIE-1.

Bien qu'en principe notre méthode tienne compte de toutes les sources d'incertitude, il est pratiquement impossible de quantifier «l'incertitude incertaine»¹. La divergence entre les prédictions des modèles complexes, en particulier pour les changements régionaux, est généralement plus grande que celle observée pour des modèles simples (Crucifix 2006 Geophysical Res. lettres). Ainsi, nous nous attendons à avoir des incertitudes plus grandes dans GENIE-2 (écart-type autour de 1 à 2 °C sur la terre pour le scénario de référence).

Notons aussi que le changement du carbone dans la végétation à l'horizon 2105 est de signe incertain, encore une fois du fait de la complexité du modèle (Friedlingstein et al. J. Climate 2006).

Tableau 3 : Augmentation de la température moyenne de l'air de surface comparée à l'ère pré-industrielle à différentes périodes

	2030	2050	2105
Average	1.32	1.88	3.55

¹ Il s'agit des fameux « unknown unknowns »...

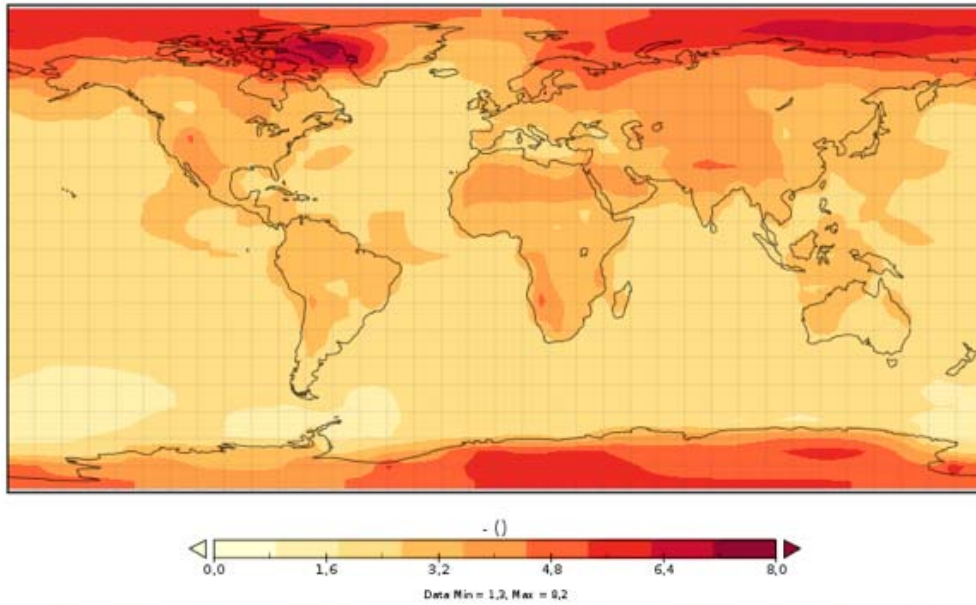


Figure 11: Réchauffement de la température moyenne atmosphérique de surface entre 2005 et 2105 (degrés Celsius). source : GENIE-2

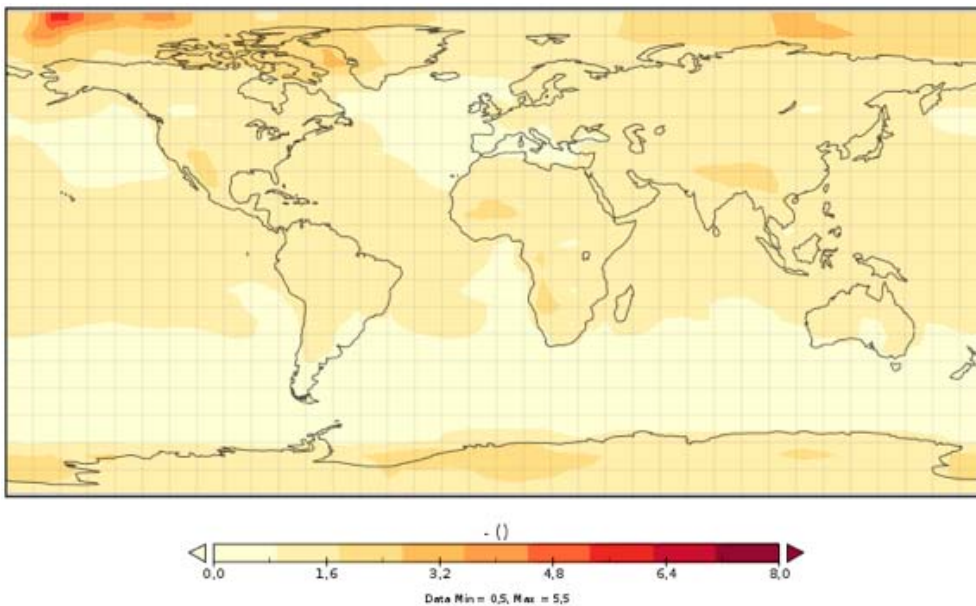


Figure 12 : Ecart-type du réchauffement de la température atmosphérique de surface entre 2005 et 2105 (degrés Celsius). source : GENIE-2

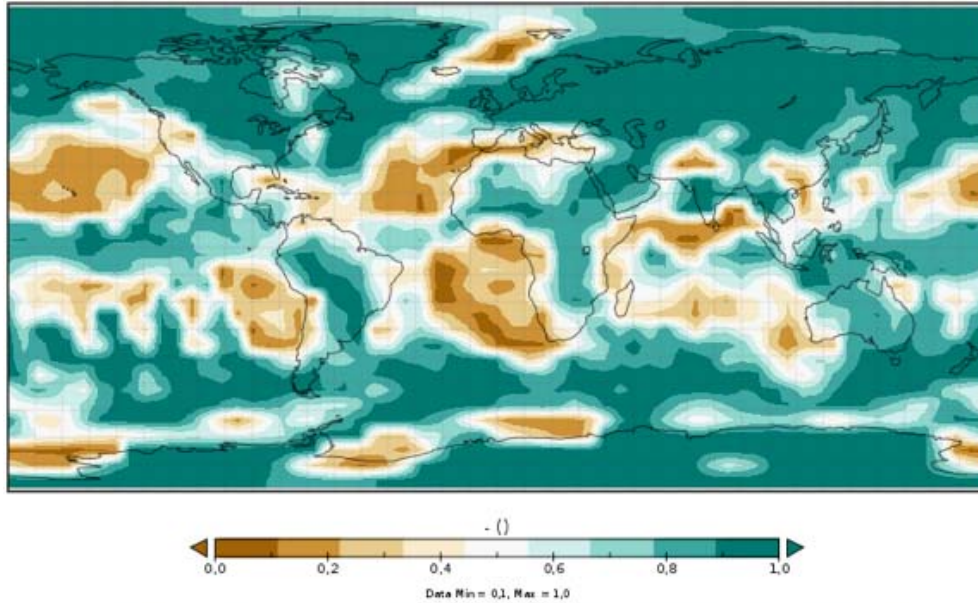


Figure 13 : Augmentation des précipitations (pourcentage des simulations présentant une augmentation des précipitations décennales moyennes centrées sur 2000 et 2100 sur un large ensemble de paramétrisations différentes du modèle GENIE)

Tableau 4 : Changements de trois paramètres climatiques entre 2005 et 2105. source: GENIE-1

Change in surface temperature

	Region 1	Region 2	Region 3	Region 4
Average	3.02	3.75	3.00	3.47
Std Dev	0.42	0.53	0.45	0.48

Change in vegetative carbon

	Region 1	Region 2	Region 3	Region 4
Average	0.11	0.64	0.24	1.50
Std Dev	0.31	0.52	0.69	0.75

Change in fractional vegetation

	Region 1	Region 2	Region 3	Region 4
Average	-0.018	0.035	-0.016	0.014
Std Dev	0.025	0.029	0.025	0.027

Region 1: Southern Hemisphere Asia/Africa/Australasia

Region 2: Northern Hemisphere Eurasia/Africa

Region 3: South America

Region 4: North America

5. METHODOLOGIE DE PRISE EN COMPTE DE L'INCERTITUDE

5.1. PRISE EN COMPTE DE L'INCERTITUDE AVEC GEMINI-E3

DIFFERENTES SOURCES D'INCERTITUDE

Dans le projet SynscOP15 ainsi que dans le programme de recherche EU-FP7 PLANETS (terminé en décembre 2010), nous avons étudié l'impact de différentes sources d'incertitude sur l'évaluation économique de politiques énergétiques d'atténuation à long terme. Nous nous intéressons en particulier à 4 sources d'incertitude : le climat, la technologie, l'économie et l'énergie. Ci-dessous nous présentons une analyse intégrée réalisée à partir de l'usage combiné des modèles TIAM et GEMINI-E3.

COMBINER OPTIMISATION STOCHASTIQUE ET SIMULATION DE MONTE-CARLO

Nous proposons une approche duale, fondée sur l'utilisation combinée de la programmation stochastique et des simulations de Monte-Carlo (MC) pour faire face à ces incertitudes dans une analyse technico-économique impliquant deux modèles complémentaires. Une approche par programmation stochastique est mise en œuvre sur le modèle BOTTOM-UP d'évaluation intégrée TIAM (Loulou et Labriet, 2008) : le modèle propose une politique de réduction des émissions de GES entre aujourd'hui et 2030, suivie par quatre politiques de recours possibles, compatibles avec un objectif de limitation de l'augmentation de la température à 2.1°C en 2100 maximum, selon des hypothèses raisonnables sur le coefficient de sensibilité climatique, le fameux Cs (Andronova et Schlesinger, 2001). Les scénarios élaborés par TIAM tiennent compte de l'incertitude du coefficient Cs, mais reposent sur des hypothèses de prévision parfaite pour un grand nombre de paramètres techniques et économiques qui pourraient également impacter l'évaluation des politiques énergétiques.

Pour tenir compte de l'impact de ces autres sources d'incertitude sur l'évaluation de la politique climatique nous utilisons une simulation MC sur le modèle d'équilibre général calculable GEMINI-E3 (Bernard et Vielle, 2008), spécifiquement conçu pour évaluer les politiques climatiques et qui est géré de manière harmonisée avec TIAM. Nous prenons en compte plusieurs sources d'incertitude relatives à l'environnement économique général et technologique, en utilisant des simulations échantillonnées par des méthodes d'*hypercubes latins* (Iman et Helton, 1988) pour obtenir des fonctions de densité de probabilité (pdf) pour les variables de sortie de GEMINI-E3, telles que le bien-être, la réduction des émissions, etc.

Récemment, des approches basées sur des simulations MC ont été mises en œuvre avec succès sur le modèle EPPA qui est aussi un modèle mondial d'équilibre général calculable (Webster et al., 2008). Les simulations du modèle EPPA utilisent la technique d'*hypercubes latins* pour analyser les impacts de 100 paramètres incertains, y compris les taux de croissance de productivité du travail, les tendances de l'efficacité énergétique, les élasticités de substitution, les coûts des technologies de pointe, la disponibilité des ressources fossiles de carburant, etc. Ces simulations ont servi à évaluer quatre scénarios de politique climatique et a montré que les paramètres de la demande d'énergie, y compris les élasticités de substitution et les tendances d'efficacité énergétique sont les sources d'incertitude qui impactent le plus les politiques climatiques. L'étude précédente utilisant le modèle EPPA (Webster et al., 2002) était axée sur l'incertitude des prévisions des émissions anthropiques. Elle fait état d'une série de changements de température en 2100 comprise entre 0.9 et 4.0°C. Dans (Scott et al., 1999) des simulations de type Monte-Carlo ont été effectués avec le modèle d'évaluation intégrée MiniCAM 1.0 pour analyser les sources d'incertitude et leur importance relative dans le processus politique de décision. Le document conclut que les "objectifs actuels de stabilisation atmosphérique semblent trop ambitieux" et que "une politique adaptative de type *agir, puis apprendre, puis agir* semble offrir de meilleures perspectives pour l'équilibre des coûts/bénéfices incertains des politiques de réduction des GES que ne ferait pas une politique protectrice rigide". Plus récemment, des simulations MC ont été appliquées au modèle MERGE (Kypreos, 2008) pour produire des fonctions de distribution de probabilité des variables économiques et climatiques liées aux différentes politiques possibles. D'autres références concernant les simulations de Monte-Carlo sur des modèles mondiaux d'évaluation pourront être trouvées dans (Manne et Richels, 1994; Reilly et al, 1987; Edmonds et Reilly, 1985).

Dans la présente étude nous identifions quatre classes d'incertitude liées à la technologie, l'économie, l'énergie et le climat. La première regroupe les paramètres technologiques, à savoir le coût et la date de disponibilité de la capture et séquestration du carbone (CSC), l'élasticité de substitution entre les formes d'énergie, l'élasticité de substitution entre les facteurs de production et les facteurs de progrès technique. La deuxième classe regroupe des indicateurs économiques tels que la croissance du PIB des pays émergents. La troisième classe se concentre sur les prix de l'énergie. Enfin, la dernière classe, liée au climat, est résumée par le coefficient de sensibilité du climat (Cs). Rappelons que le Cs est défini comme l'augmentation de la température qui résulterait d'un doublement de la concentration atmosphérique de GES, par rapport au niveau de l'ère préindustrielle. En termes de politiques climatiques, une variation de la valeur supposée de Cs va induire une modification de la cible de concentration de GES à long terme, et en conséquence une modification du calendrier de réduction des émissions de GES, et donc finalement une adaptation du système énergétique mondial. D'un point de vue politique, il faut formuler un planning de réduction des émissions qui sera mis en œuvre dès maintenant et qui sera éventuellement corrigé ou adapté une fois que la valeur

du coefficient Cs sera (mieux) connue. Nous supposons que l'incertitude sur la valeur du coefficient Cs sera résolu en 2030, et nous générons différents plannings de réduction d'émission correspondant à différentes valeurs du coefficient Cs en utilisant la version stochastique du modèle TIAM. Ce faisant, nous obtenons une trajectoire d'émissions jusqu'en 2030 et ensuite des profils différents en fonction de la sensibilité du climat révélé. GEMINI-E3 est exécuté pour un ensemble de scénarios correspondant à des valeurs de l'échantillon pour tous les paramètres incertains. Dans le cas de la valeur du coefficient Cs, la valeur estimée déterminera un agenda des réductions d'émission de GES après 2030, obtenu par interpolation des trajectoires d'émissions produites par la version stochastique du modèle TIAM. Les résultats de simulation représentée par les indicateurs économiques, comme par exemple la perte de bien-être, la consommation d'énergie et le prix du carbone, sont statistiquement analysés en utilisant des modèles de régression LOGIT et standard. Cela permet d'identifier les paramètres les plus sensibles et leur rôle dans la difficulté à atteindre certains objectifs de réduction.

RÉFÉRENCES

- N. Andronova and M. E. Schlesinger. Objective estimation of the probability distribution for climate sensitivity. *J. GEOPHYS. RES.*, 106, 2001.
- A. Bernard and M. Vielle. GEMINI-E3, a General Equilibrium Model of International & National Interactions between Economy, Energy and the Environment. *COMPUTATIONAL MANAGEMENT SCIENCE*, 5(3):173--206, May 2008.
- J. Edmonds and J. Reilly. *Global energy: assessing the future*. New York: Oxford University Press, 1985.
- R. Iman and J. Helton. An investigation of uncertainty and sensitivity analysis techniques for computer models. *RISK ANALYSIS*, 8(1):71--90, 1988.
- S. Kypreos. Stabilizing global temperature change below thresholds: Monte carlo analyses with merge. *COMPUTATIONAL MANAGEMENT SCIENCE*, 5(1):141--170, 2008.
- R. Loulou and M. Labriet. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model Part I: Model structure. *COMPUTATIONAL MANAGEMENT SCIENCE*, 5(1):7--40, 2008.
- A. Manne and R. Richels. The Costs of Stabilizing Global CO2 Emissions: A Probabilistic Analysis Based on Expert Judgment. *ENERGY JOURNAL*, 15(1):31--56, 1994.
- J. Reilly, J. Edmonds, R. Gardner, and A. Brenkert. Monte carlo analysis of the IEA/ORAU Energy/Carbon Emissions Model. *THE ENERGY JOURNAL*, 8(3):1--29, 1987.

M. Scott, R. Sands, J. Edmonds, A. Liebetrau, and D. Engel. Uncertainty in Integrated Assessment Models: Modeling with MiniCAM 1.0. *ENERGY POLICY*, 27(14):597, 1999.

M. Webster, M. Babiker, M. Mayer, J. Reilly, J. Harnisch, M. Sarofim, and C. Wang. Uncertainty in Emissions Projections for Climate Models. *ATMOSPHERIC ENVIRONMENT*, 36(22):3659--3670, 2002.

M. Webster, S. Paltsev, J. Parsons, J. Reilly, and H. Jacoby. Uncertainty in Greenhouse Emissions and Costs of Atmospheric Stabilization. Technical report, Joint Program Report Series, in press, 61 pages. [http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication\\$_\\$id=974](http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication$_$id=974), 2008.

REMARQUES

Le site internet du projet EU-FP7 PLANETS apportera des informations complémentaires intéressantes sur la prise en compte d'incertitude dans les modèles économiques, et notamment Gemini-E3. Voir <http://www.feem-project.net/planets/>

Une version avancée du rapport technique se trouve dans l'annexe du présent rapport, sous le titre : *Combining Stochastic Optimization and Monte-Carlo Simulation to Deal with Uncertainties in Climate Policy Assessment*.

5.2. PRISE EN COMPTE DE L'INCERTITUDE AVEC TIAM

SECURITE ENERGETIQUE : UNE APPROCHE PAR PROGRAMMATION ROBUSTE POUR REPRESENTER LA VULNERABILITE DES APPROVISIONNEMENTS ENERGETIQUES DE L'EUROPE A TRAVERS TIAM

Les réseaux d'approvisionnement énergétique d'une région donnée sont soumis à des événements aléatoires, entraînant la fermeture partielle ou totale d'une route (corridor). Par exemple, un oléoduc peut être soumis à des problèmes techniques qui réduisent sa capacité d'approvisionnement, ou bien encore l'acheminement des navires pétroliers peut être rendu difficile pour des raisons politiques ou matérielles, etc.

Dans le projet SynscOP15 ainsi que dans le cadre du programme de recherche EU-FP7 PLANETS (terminé en décembre 2010), nous nous intéressons à ce type d'incertitude sur les approvisionnements dans une vision de long terme. La formulation se fait grâce à une version du modèle intégré TIAM modifiée pour mettre en œuvre la technique d'optimisation robuste (Ben-Tal et al., 2009). Dans notre cas, l'approche peut être considérée comme une nouvelle interprétation de la programmation par contrainte en probabilités (Charnes et

al, 1958.) sous le nom de programmation par contrainte en probabilités avec distribution robuste ou ambiguë (Calafiore et El-Gahoui, 2006 ; Iyengar et Erdogan, 2006). Nous appliquons cette démarche pour améliorer la sécurité d'approvisionnement du système énergétique européen.

PROBLEMES DE SECURITE ENERGETIQUE EN EUROPE

La sécurité énergétique est désormais considérée comme une priorité dans toute politique énergétique. Aux États-Unis, le ENERGY INDEPENDENCE AND SECURITY ACT de 2007 et la proposition de loi CLEAN ENERGY AND SECURITY ACT de 2009 considèrent la sécurité énergétique comme l'un des piliers de la politique énergétique des États-Unis. En Europe, le Livre vert sur la sécurité énergétique (CE, 2000), le Livre vert sur la stratégie européenne pour une énergie durable, compétitive et sûre (CE, 2006), plusieurs directives (comme par exemple la directive de 2006 sur les stocks pétroliers que chaque État membre est obligé de maintenir ou encore les directives de 2004 et 2005 sur les mesures visant à garantir la sécurité de l'approvisionnement en gaz naturel et en électricité), les propositions actuelles de la nouvelle réglementation sur les projets d'investissement dans les infrastructures énergétiques (2009) et sur la sécurité d'approvisionnement en gaz (2009) ainsi que la politique énergétique du 3 fois 20 (CE, 2007) visent tous à renforcer la sécurité de l'approvisionnement énergétique de l'Union Européenne. Plusieurs raisons expliquent l'importance accordée à la sécurité énergétique :

- L'augmentation rapide de la demande mondiale d'énergie, principalement tirée par les pays émergents comme la Chine et l'Inde (AIE, 2007) peut avoir des conséquences importantes sur le prix et la disponibilité des ressources énergétiques au niveau mondial. Les débats actuels sur la possible imminence du pic pétrolier viennent s'ajouter à ces craintes.
- La dépendance de l'UE à ses importations devrait croître (dans un contexte de scénario référence, type *business as usual*) et les importations d'énergie pourraient atteindre jusqu'à 65% de la consommation de l'UE en 2030 (CE, 2007). En outre, cette dépendance envers les importations, de l'Europe comme de nombreux autres pays importateurs, tend à concerner un nombre de plus en plus restreint de pays fournisseurs (AIE, 2007).
- La crise russo-ukrainienne du gaz de Janvier 2009, entraînant une interruption des livraisons de gaz vers l'UE via l'Ukraine, illustre que les risques de transit ont augmenté.
- L'incertitude sur la stabilité géopolitique ou sur la stratégie d'approvisionnement de certaines régions du monde, comme le Moyen-Orient, le Nigeria ou le Venezuela, est bien sûr préoccupante.

- Les menaces pesant sur la sécurité énergétique résultent de défaillances du système, que ce soit de la part du fournisseur ou de l'importateur. Ces défaillances ont diverses origines, comme des événements naturels, le terrorisme, un problème de qualité, de conditions d'utilisation des installations (pannes de fonctionnement, limitations des capacités de production en raison de sous-investissement) (Grubb et al., 2006). On peut citer comme exemple le *Blackout* de 2003 en Italie et la panne d'électricité qui a touché plusieurs pays européens en 2006.
- Les risques environnementaux doivent être considérés comme ceux impactant directement le système énergétique, ou bien impactant les demandes et/ou capacités de production.

Sur la base de cette description, les risques liés à l'approvisionnement en énergie peuvent être soit géologiques (épuisement possible des ressources), soit économiques (les fluctuations dans le prix), soit techniques (pannes du système pour diverses raisons), soit environnementaux (accidents ou politiques), soit enfin géopolitiques (Behrens et al., 2009). En outre, la gestion des risques est différente s'ils sont externes ou internes à l'Europe. Les risques internes de l'UE signifient généralement faire face aux événements de faible probabilité, comme réaliser des investissements appropriés dans l'approvisionnement, le stockage, la transmission et la distribution de l'énergie (Behrens et al., 2009). Enfin, l'échelle de temps des différents risques varient du court terme (pénurie de l'offre en raison de défaillances techniques, par exemple) au long terme (épuisement des ressources, la tarification, etc.). Les mesures de gestion du risque seront différentes selon l'échelle de temps et la nature des risques (AIE, 2007).

Les mesures ou stratégies proposées pour accroître la sécurité énergétique peuvent être classées en quatre catégories (Behrens et al, 2009; CE, 2007; AIE, 2007; Frogatt et Levi, 2009.)

- Diversification des sources d'énergie, les zones géographiques d'importation, des voies de transport et des fournisseurs. La diversification peut en effet être considérée comme "une assurance générale contre la dépendance lourde et contre des perturbations massives".
- Définition d'un accord commercial entre fournisseurs et consommateurs, par exemple entre l'Union européenne, la Russie et l'Ukraine, pour assurer l'approvisionnement de l'UE en gaz russe transitant par l'Ukraine.
- Des investissements appropriés dans l'approvisionnement, le stockage, le transport et les technologies de distribution pour garantir la qualité du système énergétique, dans l'accroissement des capacités disponibles du système de production et du réseau d'importation, et dans la promotion d'une gestion efficace des perturbations du système énergétique.
- Diminution de la demande totale d'énergie (augmentation de l'efficacité du système énergétique) et la priorité aux sources d'énergie considérées comme moins risquées.

L'impact des politiques climatiques sur la sécurité énergétique est considéré comme positif en ce qui concerne la dimension de la dépendance envers les importations au regard de la diminution de la consommation de combustibles fossiles et de la croissance de sources d'énergie renouvelable domestique. Toutefois, l'augmentation de la production d'énergie nucléaire pose des problèmes de dépendance à l'importation et la disponibilité de la ressource, tandis que la croissance des énergies renouvelables pourrait affecter négativement la fiabilité du système énergétique en raison de leur forte dépendance aux conditions météorologiques et de l'intermittence de la production (Grubb et al., 2006). En effet, il s'agit de trouver une politique énergétique qui soit un compromis entre sécurité énergétique, prise en compte du changement climatique, résilience du système énergétique face aux impacts. Et parfois ces objectifs sont difficiles à faire cohabiter (Brown et Huntington, 2008; AIE, 2007).

PRISE EN COMPTE DE L'INCERTITUDE GRACE A LA PROGRAMMATION ROBUSTE

Pour modéliser la sécurité énergétique mondiale, nous avons introduit dans TIAM une nouvelle contrainte qui porte sur la fourniture totale d'énergie de l'UE et les candidats évidents pour les paramètres aléatoires de l'approvisionnement énergétique sont le facteur de disponibilité de la technologie représentant un canal d'importation, ou corridor. L'exigence selon laquelle la nouvelle contrainte doit être satisfaite pour toutes les réalisations possibles de sa composante aléatoire implique que la partie certaine devrait être choisi de manière à correspondre au pire des cas. Cela correspond à la défaillance simultanée de tous les corridors. Cette exigence drastique exclurait la plupart des solutions, sauf les plus conservatrices, et ne serait pas jugée raisonnable par les planificateurs. Au contraire, on voudrait voir la contrainte incertaine respectée la plupart du temps, au risque de l'avoir violé à de rares occasions. La grande question est de savoir comment traduire cette exigence qualitative en une contrainte quantitative.

La formulation naturelle de cette exigence est de fixer une limite inférieure sur la probabilité que la contrainte soit satisfaite. Cette idée a été proposée dès 1958 par (Charnes et al., 1958), et plus en détail dans (Miller et Wagner, 1965) et (Prékopa, 1970), sous le nom de programmation par contrainte en probabilité (acronyme anglais : CCP). Malheureusement, cette approche s'est avérée incapable de trouver une solution numérique dans un temps raisonnable, sauf dans de rares cas (Ben-Tal et al., 2009). Cette formulation n'est pas directement applicable dans un programme d'optimisation tel que TIAM.

L'optimisation robuste (acronyme anglais RO) est une proposition alternative qui vise essentiellement à surmonter les problèmes numériques posés par le calcul des probabilités. L'idée, semblable à celle de la programmation par contrainte en probabilité, est de s'assurer que la contrainte soit satisfaite pour

un ensemble de réalisations, c'est à dire un "ensemble pertinent des éléments aléatoires, au risque d'échec possible dans certains cas exceptionnels". Mais, contrairement à la CCP, RO définit l'ensemble des réalisations pertinentes de manière explicite, par exemple, comme un polyèdre, plutôt que de manière implicite par le biais d'une condition sur une probabilité. Le paradigme de l'optimisation linéaire robuste remonte à (Soyster, 1973), mais le domaine est resté pratiquement inactif jusqu'à ce que l'idée soit reprise vers 1997, de façon indépendante et pratiquement simultanément, dans les cadres des deux problèmes de programmation en nombres entiers (Kouvelis et G Yu, 1997) et de programmation convexe (Ben-Tal et Nemirovski, 1998) et (El-Ghaoui et Lebret, 1997). L'avantage de la RO est qu'elle reformule la contrainte incertaine en un ensemble de contraintes déterministes, nommé "l'équivalent robuste" qui peut être efficacement traité par des techniques d'optimisation convexe.

Les développements les plus récents sur la RO, telles que présentées dans (Ben-Tal et Nemirovski, 2009) concilie la RO et la CCP dans le cadre du concept de programmation par contrainte en probabilité avec distribution robuste (Calafiore et El-Gahoui, 2006) ou ambiguë (Iyengar et Erdogan, 2006). Ces techniques partagent l'objectif commun d'amener à des formulations facilement traitables. Elles étendent la formulation de la PCC comme suit : la probabilité de satisfaction d'une contrainte ne se mesure pas par rapport à une distribution de probabilité pour chaque paramètre incertain, mais par rapport à une classe de distribution de probabilité qui est décrit par quelques paramètres (par exemple, des variables aléatoires indépendantes avec un support commun et des espérances connues). Cette idée de classe concilie les notions d'ensemble d'incertitude de la RO et de support probabiliste de la CCP. Nous présentons ci-dessous brièvement la RO du point de vue de l'ACCP et nous montrons comment il peut être mis en œuvre dans le problème qui nous intéresse.

RÉFÉRENCES

- A. Behrens, C. Egenhofer, and A. Checchi. Long-term energy security risks for europe: A sector-specific approach. CEPS Working Documents 309, Centre for European Policy Studies, Brussels, Belgium, 2009.
- A. Ben-Tal, L. El Ghaoui, and A. Nemirovski. Robust Optimization. Princeton University Press, 2009.
- A. Ben-Tal and A. Nemirovski. Robust convex optimization. *Mathematics of Operations Research*, 23:769-805, 1998.
- S. Brown and H. G. Huntington. Energy security and climate change protection: Complementarity or tradeoff. *Energy Policy*, 36(9):3510-3513, 2008.
- G. C. Calaffore and L. El-Gahoui. On distributionally robust chance-constrained linear programs. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 130:1-22, 2006.

- A. Charnes, W.W. Cooper, and G.H. Symonds. Cost horizons and certainty equivalents: an approach to stochastic programming of heating oil. *Management Science*, 4:235-263, 1958.
- EC. Towards a European strategy for the security of energy supply. Green Paper COM(2000) 769 final, European Commission, Brussels, Belgium, 27 p, 2000.
- EC. A European strategy for sustainable, competitive and secure energy. Green Paper COM(2006) 105, European Commission, Brussels, Belgium, 20 p, 2006.
- EC. An energy policy for Europe. Green Paper COM(2007) 1 final, European Commission, Brussels, Belgium, 27 p, 2007.
- L. El-Ghaoui and H. Le Bret. Robust solutions to least-square problems to uncertain data matrices. *SIAM Journal of Matrix Analysis and Applications*, 18:1035-1064, 1997.
- A. Froggatt and M.A. Levi. Climate and energy security policies and measures: synergies and conflicts. *International Affairs*, 85(6):1129-1141, 2009.
- M. Grubb, L. Butler, and P. Twomey. Diversity and security in UK electricity generation: The influence of low-carbon objectives. *Energy Policy*, 34(18):4050-4062, 2006.
- IEA. Energy Security and Climate Policy - Assessing Interactions. International Energy Agency, Paris, France, 150 p., 2007.
- G. Iyengar and E. Erdogan. Ambiguous chance constrained problems and robust optimization. *Math. Progr. Series B*, 107(1-2):37-61, 2006.
- P. Kouvelis and G. Yu. Robust Discrete Optimization and its Applications. Kuwer Academic Publishers, London, 1997.
- L.B. Miller and H. Wagner. Chance-constrained programming with joint constraints. *Operations Research*, 13, 1965.
- A. Prékopa. On probabilistic constrained programming. In *Proceedings of the Princeton Symposium on Mathematical Programming*, pages 113-138. Princeton University Press, Princeton, 1970.
- A. L. Soyster. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations Research*, 21:1154-1157, 1973.

REMARQUE

Une version avancée du rapport technique se trouve dans l'annexe du présent rapport, sous le titre : *Energy Security: a robust optimization approach to design a robust European energy supply via TIAM-WORLD*.

5.3. PRISE EN COMPTE DE L'INCERTITUDE AVEC GENIE

EVALUATION DE L'INCERTITUDE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES REGIONAUX

Dans le projet SynscOP15, nous avons utilisé la technique de l'émulation statistique pour quantifier l'incertitude dans les prédictions climatiques fournies par les modèles de complexité intermédiaire du système terrestre GENIE-1 (l'atmosphère y est représentée en 2D, l'océan en 3D) et GENIE-2 (atmosphère et océan en 3D). Les émulateurs produits par cette approche sont des substituts efficaces en terme de temps de calcul pour la résolution de ces modèles.

Les projections du changement climatique à l'échelle régionale sont nécessaires pour l'évaluation de l'incertitude dans de nombreuses applications de modèle d'évaluation intégrée. Nous avons appliqué ici des techniques d'émulation statistique pour générer des estimations du changement climatique et des incertitudes associées qui sont compatibles avec un éventail de résultats possibles des négociations COP-15 (voir les scénarios décrits dans la phase I du présent projet). Ces estimations se nourrissent des trajectoires d'émissions de GES pour le siècle à venir fournies par le modèle TIAM pour chacun des scénarios.

GENIE-1 : VEGETATION TERRESTRE ET RECHAUFFEMENT A L'ECHELLE DU CONTINENT

L'approche retenue pour construire les émulateurs pour le modèle GENIE-1 a été proposée dans (Holden et al, 2010). Elle aborde la conception et l'évaluation d'ensembles de changements climatiques. Afin de mieux quantifier l'incertitude du modèle, nous avons pré-calibré GENIE-1 (Edwards et al, à paraître), permettant à 25 paramètres du modèle de varier chacun sur toute la plage de valeurs plausibles. Il est ainsi facile de reproduire les principales caractéristiques du climat en faisant varier les différents paramètres du modèle. Cette démarche conduit à une large diffusion des points forts de rétroaction à grande échelle, en englobant l'éventail des comportements GCM. Cependant, dans la conception d'un tel ensemble, il n'a pas été possible d'explorer tout l'espace d'entrée des paramètres du modèle avec une approche naïve de type Monte-Carlo; avec une telle approche, seulement 10 des 1000 éléments de l'ensemble amenaient à des évolutions plausibles du climat. Nous avons donc construit des émulateurs de l'état du climat à l'ère préindustrielle avec GENIE-1 et nous les avons utilisés pour effectuer un rejet d'échantillonnage sur une collection de 1.000 jeux de paramètres que les émulateurs prédisaient comme plausibles; 894 d'entre eux se sont avérés conformes d'un point de vue de l'émulateur à l'ère préindustrielle, dont 480 simulations plausibles à l'ère glaciaire. Ces 480 configurations du modèle sont ainsi contraintes à la fois à reproduire le climat préindustriel et à exposer les points forts de rétroaction qui sont compatibles avec un état climatique alternatif bien compris.

Dans le projet SynscOP15, nous avons étendu cette approche en appliquant une évolution incertaine du forçage radiatif pour les 480 configurations de simulations plausibles. Ceci a été réalisé par la décomposition d'un éventail de trajectoires possibles de concentration de CO₂ (de 2000 à 2100) en polynômes de Tchebychev. Les émulateurs ont alors été construits à partir de ces 480 simulations. Ces émulateurs décrivent le changement au cours du siècle de la moyenne régionale (i) de l'augmentation de la température de l'air de surface, (ii) du stockage du carbone terrestre végétatif et (iii) de la couverture végétale fractionnée. Pour chacune de ces trois variables, quatre émulateurs ont été construits décrivant la variation moyenne sur quatre régions à l'échelle continentale : (i) de l'hémisphère Sud Asie / Afrique / Océanie, (ii) de l'hémisphère Nord Eurasie et l'Afrique, (iii) l'Amérique du Sud et (iv) l'Amérique du Nord. Les entrées de ces douze émulateurs régionaux sont les 25 paramètres du modèle et les trois coefficients associés aux polynômes de Tchebychev qui décrivent les trajectoires d'émissions de GES.

GENIE-2 : CARTES DES TEMPERATURES ET DES PRECIPITATIONS A UNE ECHELLE PLUS FINE (ENVIRON 1,000 KM)

La technique développée dans le cadre de SynscOP15 applique une réduction de dimension (une échelle plus fine, ou encore *downscaling*) pour construire des émulateurs des paramètres de sortie de GENIE-2 (Holden et Edwards, 2010). L'approche a été développée comme une alternative à l'extension du modèle (Mitchell et al 1999), une alternative qui nous permet de mieux saisir la non linéarité du comportement spatio-temporel de la valeur des paramètres. Par exemple, une région qui connaît un petit changement dans ses précipitations devrait aussi faire face à une petite incertitude sur cette donnée (même si il est possible d'appliquer d'autres modèles pour capturer des réponses alternatives). Notre approche d'émulation capture naturellement ces différences entre la structure spatiale de la réponse simulée et la structure spatiale de l'incertitude. Notons que nous ne prenons en compte que les 5 premières composantes principales (qui regroupe environ 50% de la variance des précipitations simulées et environ 90% de la variance dans le réchauffement de la surface), mais que le modèle peut parfaitement être étendu pour prendre en compte des composantes principales de moindre influence.

De manière analogue à ce qui a été fait avec l'émulation de GENIE-1, GENIE-2 a été utilisé pour concevoir un ensemble de simulations plausibles des états climatiques à l'ère préindustrielle. Un ensemble de 245 éléments de simulation de trajectoires plausibles du climat futur a ainsi été généré. Nous avons ensuite étendu l'approche GENIE-1 en appliquant l'analyse en composantes principales pour projeter les paramètres de sortie du modèle en 2 dimensions sur un espace à 1 dimension. Nous avons alors produit les cartes sur base de l'espace des paramètres d'entrée (19 paramètres du modèle et 3 paramètres liés au forçage radiatif).

Ces émulateurs ont été construits pour produire des cartes en 2 dimensions de l'augmentation de la température moyenne de l'air de surface et des précipitations, ainsi que d'une estimation de l'incertitude associée.

L'émulation de 122 trajectoires prend de l'ordre de 0,06 secondes, à comparer aux plus de 1000 heures nécessaires au modèle dans son ensemble pour calculer le même ensemble de trajectoire (l'émulation est 60 millions de fois plus rapide). Cette rapidité, gagnée au profit de l'approximation de la solution, ouvre la voie à des nouvelles utilisations des informations climatiques, notamment dans des utilisations harmonisées de modèles climatiques et énergétique ou économiques, tout en fournissant des informations sur la localisation de l'incertitude.

RÉFÉRENCES

Edwards NR, Cameron D and Rougier J (in press). Precalibrating an intermediate complexity climate model. *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-010-0921-0

Holden PB, Edwards NR, Oliver KIC, Lenton TM and Wilkinson RD (2010). A probabilistic calibration of climate sensitivity and terrestrial carbon change in GENIE-1. *Climate Dynamics*, 35, 785-806, doi 10.1007/s00382-009-0630-8

Holden PB and Edwards NR (2010). Dimensionally reduced emulation of an AOGCM for application to integrated assessment modelling. *Geophysical Research letters*, 37, L21707. doi:10.1029/2010GL045137

Mitchell JFB, Johns TC, Eagles M, Ingram WJ and Davis RA (1999). Towards the construction of climate change scenarios. *Clim. Change* 41 547-581, doi:10.1023/A:1005466909820

Rougier J (2007). Probabilistic inference for future climate using an ensemble of climate model evaluations. *Clim. Change*, 81, 247-264. doi: 10.1007/s10584-006-9156-9

6. SCENARIOS CONSIDERES DURANT LA PHASE I (15^{EME} CDP)

6.1. CINQ SCENARIOS D'ENGAGEMENTS A MOYEN TERME

L'objectif de ces cinq scénarios, définis avant la tenue du sommet de Copenhague, était de fournir un jeu contrasté de scénarios de politique de lutte contre le changement climatique, devant servir d'aide à la négociation et/ou d'analyse prospective après COP-15. Ils devaient satisfaire trois contraintes :

- Tout d'abord, prendre pour base les plans climats déjà annoncés et les déclarations des Etats faites avant la tenue du sommet ;
- Ensuite, envisager un ensemble assez large des résultats possibles de la négociation allant d'un échec à un accord ambitieux de la part de l'ensemble des parties de COP-15 ;
- Enfin, le nombre de scénarios ne doit pas être trop important pour ne pas nuire à leur lisibilité et à leur accès.

Les politiques sont définies par rapport à une année de base. Concernant les pays industrialisés, nous avons retenu celles précisées par ces pays dans leur plan climat. Pour les pays en voie de développement, l'année choisie est l'année 2005. Le tableau 5 montre, pour ces différentes années, les émissions de référence.

Les scénarios sont définis sur la période 2009-2030. Après 2030, c'est un objectif global qui est retenu, représentatif d'une cible climatique exprimée en termes de réchauffement moyen.

Pour les pays industrialisés, nous avons retenu leurs propositions à 2020 et 2050 (les propositions de 2050 sont évidemment plus des objectifs théoriques que des propositions réelles), en supposant que l'objectif 2030 est obtenu par un profil de réduction linéaire à partir de 2020, aboutissant à leurs objectifs affichés à l'horizon 2050 (tableau 6). Nous supposons sur la période 2010-2020 qu'aucun marché de permis négociables au niveau international n'est mis en place à l'exception du marché de quotas européen, modélisé dans GEMINI-E3 (dans TIAM, l'Europe est représentée par une seule région, avec un objectif unique pour toute l'Union Européenne). Après 2020, nous supposons qu'un marché de permis négociables est mis en place conduisant à terme à un prix unique du carbone.

Tableau 5 : Emissions de référence passées (tous gaz : panier Kyoto)

	Année	Émissions en Gt CO ₂ -eq	Source
--	-------	-------------------------------------	--------

Union Européenne	1990	4244	UNFCCC excluant LULUCF
États-Unis	2005	7107	UNFCCC excluant LULUCF
Australie	2000	495	UNFCCC excluant LULUCF
Japon	2005	1358	UNFCCC excluant LULUCF
Canada	2006	721	UNFCCC excluant LULUCF
Russie	1990	3326	UNFCCC excluant LULUCF
Chine	2005	6739	WEO 2005 + estimation EPA 2006
Inde	2005	2054	WEO 2005 + estimation EPA 2006
Brésil	2005	1011	Indicateurs OMD UN + EPA 2006
Reste du Monde	2005	11973	IEO 2009 + estimation EPA 2006

Tableau 6 : Engagements de réduction des gaz à effet se serre par pays

	Année de Référence	2020	2050	Remarque
Union Européenne	1990	-20% à -30%	-75%	
États-Unis	2005	-17%	-80%	Waxman-Markey
Australie	2000	-5 à -25%	-60%	
Japon	2005	-15%		
Canada	2006	-20%	-65%	
Russie	1990	-20%	-50%	
Chine		aucun engagement		
Inde		aucun engagement		
Brésil		aucun engagement		

Dans cette première partie de l'étude, le marché spécifique engendré par le Mécanisme de développement propre (MDP) entre les pays Annexe 1 et les pays hors Annexe 1 n'est pas représenté. Autrement dit, les pays participent au marché international de carbone seulement à partir du moment où ils acceptent une cible de réduction. L'attrait d'un mécanisme similaire au MDP sera analysé en détail dans la seconde phase de l'étude.

POLITIQUE 1 : ECHEC DES NEGOCIATIONS

La négociation s'embourbe, la crise continuant les pays préfèrent privilégier leurs intérêts nationaux. Les États-Unis, en proie à la crise et à des problèmes de politique intérieure, abandonnent la politique climatique présidentielle mise en échec au congrès. Le Canada, l'Australie et le Japon rejoignent les États-Unis, et seule l'Europe remplit ses engagements de -20% en 2020. En 2020, le réchauffement climatique avéré relance la négociation, les États-Unis, le Japon, le Canada et l'Australie s'engagent à faire -20% en 2030 par rapport à 2005.

POLITIQUE 2 : ACCORD A MINIMA DES PAYS INDUSTRIALISES

Les pays industrialisés (la Russie exceptée) remplissent leurs engagements en 2020, et mettent en place progressivement à partir de 2021 un marché international de permis d'émission pour remplir en 2030 des engagements compatibles avec leurs objectifs de 2050. La Russie et les autres pays s'abstiennent de tout engagement.

POLITIQUE 3 : ACCORD A MINIMA DES PAYS INDUSTRIALISES + RUSSIE

Accord identique à celui du scénario 2, mais dans lequel la Russie, voulant s'affirmer dans le concert des pays industrialisés, accepte de mettre en œuvre une politique climatique.

POLITIQUE 4 : ACCORD INTERNATIONAL EN FAVEUR DU CLIMAT LIMITE AU G20

La négociation étant difficile au sein de l'UNFCCC, les pays membres du G20 prennent le leadership de la politique climatique. Cet accord traduit aussi l'avènement d'un nouvel ordre mondial et la montée en puissance des grands pays émergents au sein de la gouvernance mondiale. Les pays industrialisés et les grands pays émergents (Chine, Inde et Brésil), s'entendent pour mettre en place à partir de 2020 un marché international de permis d'émission. À partir de 2020, la

Chine et l'Inde se voient attribuer comme quotas 150% de leurs émissions respectives de 2005, et le Brésil 120%. Leur participation au marché international de permis est limitée pendant les premières années (2020) et devient entièrement libre dès 2030. L'Europe opte pour sa cible de 30% en 2020. Un prix unique du carbone est mis en place à partir de 2020 sur la base des quotas ainsi définis. Pour les pays industrialisés, leurs quotas sont égaux à des objectifs compatibles avec leurs objectifs de 2050.

POLITIQUE 5 : VERS UN ACCORD INTERNATIONAL EN FAVEUR DU CLIMAT

Au-delà de toute espérance, la négociation est un succès, les enseignements du GIEC sont entendus, une nouvelle ère s'affirme où les considérations environnementales sont prises en compte, cet accord est le signe d'un nouvel ordre mondial et affirme la reconnaissance des Nations Unies. L'ensemble des pays participe à l'accord, les engagements des pays du G20 sont les mêmes que dans le scénario 4, le Reste Du Monde se voit alloué un quota d'émissions évalué à 120% de leurs émissions de l'année 2005.

6.2. MISE EN PLACE D'UN PRIX UNIQUE DU CARBONE APRES 2030

Les politiques actuelles sont caractérisées par ce qui est communément appelé une fragmentation des politiques climatiques. Les différents pays de l'annexe 1 se sont engagés individuellement dans la mise en place de diverses mesures (taxe, normes, programme incitatif, etc.) qui se traduisent par des prix du carbone (explicites ou implicites) qui ont peu de chance de converger vers un prix unique. Actuellement, seul le marché ETS européen représente une tentative réussie de parvenir à un prix commun du CO₂ dans un ensemble de secteurs économiques de pays différents. Cette fragmentation peut à terme freiner la mise en place de politiques plus ambitieuses en conduisant à des disparités très élevées de prix du CO₂. Conséquemment, elle est source d'inefficacité, il y a donc un réel enjeu à faire converger ces prix vers un prix unique (Tirole, 2009). La convergence de ces prix passe, par exemple, par une généralisation de l'ETS européen aux pays de l'annexe 1 puis aux pays en développement, et à une perméabilité de ce marché au Mécanisme de Développement Propre (AIE, 2009).

Ainsi, les scénarios proposés supposent qu'un marché mondial du CO₂ est mis en place après la période initiale entre les pays s'étant engagés à réduire leurs émissions. Ce marché conduit à un prix unique du CO₂, des échanges de quotas étant mis en place pour échanger alors les droits égaux aux engagements de chacun des pays. L'hypothèse représente le cas le plus favorable permettant d'atteindre au moindre coût les objectifs, elle ne suppose pas obligatoirement un marché global accessible à tous (ménages, entreprise, gouvernement) mais peut très bien s'envisager dans le cadre de plusieurs marchés (ETS mondial, MDP,

marché de carbone entre nations, taxe nationale, etc.) dont la perméabilité et le monitoring s'effectueraient de manière suffisamment efficace pour obtenir un prix mondial unique.

6.3. LE CAS PARTICULIER DE L'ETS EUROPEEN

Le marché de l'ETS européen a fait l'objet d'un traitement spécifique dans GEMINI-E3 (Bernard et Vielle, 2009). Rappelons que dans TIAM, l'Europe est représentée par une seule région, supposant implicitement la coopération entre tous les pays. Dans GEMINI-E3, jusqu'en 2020, nous supposons que l'Europe met en œuvre le paquet énergie-climat, qui se traduit par un prix du carbone au secteur ETS et des prix du CO₂ au sein de chacun des pays pour les secteurs non ETS sur la base des allocations définies dans la directive énergie climat. À partir de 2021 nous supposons donc la participation de l'Union Européenne à un marché mondial du CO₂, la répartition des efforts (« *burden sharing* ») entre les pays membres doit alors être définie et faire l'objet d'une négociation compte tenu de l'objectif global de -75% à l'horizon 2050.

Tableau 7. Résumé des politiques envisagées dans la Phase I

	Politique 1	Politique 2	Politique 3	Politique 4	Politique 5
Cible fixée à partir de:	EU 2020	EU 2020	EU 2020	EU 2020	EU 2020
	USA-CAN-AUS-JPN 2030	USA-CAN-AUS-JPN 2020 et 2030	USA-CAN-AUS-JPN 2020 et 2030	USA-CAN-AUS-JPN 2020 et 2030	USA-CAN-AUS-JPN 2020 et 2030
	RUS Aucune	RUS Aucune	RUS 2020 et 2030	RUS 2020 et 2030	RUS 2020 et 2030
	CHI-IND-BRE Aucune	CHI-IND-BRE Aucune	CHI-IND-BRE Aucune	CHI-IND-BRE 2021 (cst jusqu'en 2030)	CHI-IND-BRE 2021 (cst jusqu'en 2030)
	Reste du monde Aucune	Reste du monde Aucune	Reste du monde Aucune	Reste du monde Aucune	Reste du monde 2021 (cst jusqu'en 2030)
Politique climatique à partir de:	2008 : EU	2008: EU-USA-CAN-AUS-JPN	2008: EU-USA-CAN-AUS-JPN-RUS	2008: EU-USA-CAN-AUS-JPN-RUS	2008: EU-USA-CAN-AUS-JPN-RUS
	2021: USA-CAN-AUS-JPN			2021: CHI-IND-BRE	2021: CHI-IND-BRE-ROW
Accès au marché international de carbone en :	Au sein de EU 2008	Au sein de EU 2008	Au sein de EU 2008	Au sein de EU 2008	Au sein de EU 2008
	EU-USA-CAN-AUS-JPN 2021	EU-USA-CAN-AUS-JPN 2021	EU-USA-CAN-AUS-JPN-RUS 2021	Tous sauf Reste du monde 2021	Tous 2021
Limite sur les échanges de carbone	Aucune	Aucune	Aucune	CHI-IND-BRE 10% de leurs quotas en 2021, 100 % en 2030 (linéaire)	CHI-IND-BRE-Reste monde 10% de leurs quotas en 2021, 100 % en 2030 (linéaire)

7. SCÉNARIOS CONSIDÉRÉS DURANT LA PHASE II (16^{ÈME} CDP)

Nous avons nommé *Phase I* la phase de négociations avant la 15^{ème} CdP. Nous nommons *Phase II*, la phase de négociations commençant après la signature de l'accord de Copenhague et se terminant durant la 16^{ème} CdP.

Pour cela, nous avons réalisé de nouveaux scénarios d'engagements, proposés dans la section 7.1. Ces scénarios seront étudiés sous les aspects économiques énergétiques et climatiques. Nous avons aussi dessinés des scénarios plus détaillés du comportement économique à moyen terme (2030), et qui sont présentés en section 7.2

7.1. HUIT NOUVEAUX SCÉNARIOS D'ENGAGEMENTS POST-COPENHAGUE

Les scénarios analysés dans la deuxième phase du projet ont les objectifs suivants :

- Evaluer les conséquences à long terme des différentes stratégies, y compris les engagements proposés dans l'accord de Copenhague, ainsi que plusieurs scénarios de menace où un accord à long terme est fixé, ou non. Cette analyse se fait avec TIAM.
- Etudier les impacts macro-économiques des possibles politiques entre 2020 et 2030, y compris les répercussions de la mise en place d'un marché d'échange des permis d'émission entre pays possédant, ou non, des objectifs d'atténuation. Cette analyse se fait avec GEMINI-E3.
- Affiner l'estimation de l'impact climatique régional des différentes stratégies. Cette analyse se fait avec GENIE.
- Etudier l'affectation de quotas d'émission (partage de la charge/*burden sharing*) pour atteindre l'objectif de limiter l'augmentation de la température à 2 °C comparé à l'ère préindustrielle.

Le tableau 8 présente les engagements nationaux, avec dans certains cas des valeurs min. et max., tels que proposés par les pays signataires de l'Accord de Copenhague. Les Tableaux 9 et 10 résument les scénarios modélisés dans cette phase du projet.

Il est important de noter qu'au contraire des politiques de la *Phase I*, les scénarios de la *Phase II* n'incluent pas par défaut une contrainte limitant le réchauffement de la température à 2°C en 2100.

Tableau 8 : Engagements nationaux de l'accord de Copenhague

Country or region	Reference year	Objective 2020 with lower and higher pledges when defined by the country
European Union	1990	-20% (unconditional) -30% (if World agreement)
USA	2005	-17% (-30% in 2025 and -42% in 2030)
Australia	2000	-5% (unconditional) - 15% (if World agreement with target less strict than 450 ppm) -25% (if World agreement with target more strict than 450 ppm)
Japan	1990	-25%
Canada	2005	-17% (same as USA)
Russia	1990	-15 to -25%
Ukraine	1990	-20%
Croatia, Belarus	1990	-5 to -10%
Kazakhstan	1992	-15%
China*	2005	CO2/GDP: -40 to -45%
India*	2005	CO2/GDP: -20 to -25%
Brazil*	2020	-36 to -39% of the expected emissions
South Africa*	2020	-34% (-42% in 2025)
Mexico*	2020	-30%
South Korea*	2020	-30%
Indonesia*	2020	-26%
ROW*	-	Depend on countries

*Non-binding commitments

Tableau 9 : les variantes de l'Accord de Copenhague (modélisées par TIAM et GEMINI-E3)

Scenario	2020	2030	2050	2100
Reference	No climate target			
CPH Failure	Lower pledges*	As 2020	No emission target	No emission target
CPH Annex1 Forever	Lower pledges* in Annex 1. Emi limited to Reference in ROW	As 2020	As 2020	As 2020
CPH Low Forever	Lower pledges*	As 2020	As 2020	As 2020
CPH High Forever	Higher pledges*	As defined in GEMINI-E3	As 2030	As 2030
CPH Plus	Higher pledges*	Interpolation	-80% wrt 1990 in Annex 1 - 50% wrt REF in other	As 2050
Only 2050	No emission target	No emission target	-80% wrt 1990 in Annex 1 - 50% wrt REF in other	As 2050

* Refer to lower and higher pledges as defined in the Copenhagen Accord, including the voluntary targets (see Table 1). Annex 1 corresponds to the Annex 1 of the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). It includes USA.

Autres hypothèses :

- Dans le cas d'engagements de pays inclus dans une des régions de TIAM (par exemple l'Afrique du Sud appartient à la région Afrique, au sens de TIAM), des ratios ont été utilisés pour définir l'objectif d'atténuation de la région modélisée dans TIAM.
- Dans TIAM, l'échange de permis d'émission est limité à 10% en 2020 et 20% à partir de 2030 du volume total des réductions engagées + des réductions volontaires.

Tableau 10 : les variantes de l'Accord de Copenhague combinées à une limitation de l'augmentation de la température à 2°C (modélisées par TIAM uniquement)

Scenario	2020	2030	2050	2100
First-best	Full Coop from 2010	Full Coop from 2010	Full Coop from 2010	Full Coop from 2010
CPH Annex1 & Late agreement	Lower pledges* in Annex 1. Emi limited to Reference in ROW	As 2020	Full Coop from 2040	Full Coop from 2040
CPH Low & Late agreement	Lower pledges *	As 2020	Full Coop from 2040	Full Coop from 2040
CPH High & Late agreement	Higher pledges*	As defined in GEMINI-E3	Full Coop from 2040	Full Coop from 2040
CPH Plus & Late agreement	Higher pledges*	Interpolation 2020-2050	-80% wrt 1990 in Annex 1 - 50% wrt REF in other	Full Coop from 2055
Only 2050 & Late agreement	No emission target	No emission target	-80% wrt 1990 in Annex 1 - 50% wrt REF in other	Full Coop from 2055

* Refer to lower and higher pledges as defined in the Copenhagen Accord, including the voluntary targets (see Table 1). Annex 1 corresponds to the Annex 1 of the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). It includes USA.

Autres hypothèses:

- L'objectif climatique à long terme est la limitation de l'augmentation de température à 2°C en 2100, comparé à l'ère préindustrielle, avec dépassement possible de ces 2°C avant 2100 (*overshooting* possible).
- Tous les pays conviennent de coopérer à partir de 2010, 2040 ou 2055, selon les scénarios.
- L'échange de permis d'émission est limité à 10% en 2020 et 20% à partir de 2030 du volume total des réductions engagées + des réductions volontaires. Dès la pleine coopération, les échanges de permis d'émission sont illimités.

SCENARIO 6 : ECHEC SUITE A L'ACCORD DE COPENHAGUE

Ce scénario représente l'échec de négociations sur des engagements à long terme : les pays se conforment à leurs engagements minimaux annoncés avec des objectifs jusqu'en 2030, et arrêtent toute négociation dès 2021. Ce scénario représente une sorte de scénario de menace, illustrant ce qui pourrait arriver si aucun accord à long terme n'est atteint en dehors de l'actuel accord de Copenhague.

L'échange de permis d'émission est possible jusqu'en 2030. Avec TIAM, l'échange de permis d'émission est limité à 10% en 2020 et 20% en 2030 du volume total des réductions engagées + des réductions volontaires.

SCENARIO 7 : ACCORD DE COPENHAGUE LIMITE A L'ANNEXE 1

Ce scénario illustre un accord partiel où seuls les pays de l'Annexe 1 s'engagent dans la réduction des émissions, tel que défini par les engagements minimaux de l'accord de Copenhague, tandis que les autres pays ne contribuent pas à l'effort d'abattement. Dans TIAM, les émissions des pays n'appartenant pas à l'Annexe 1 sont limités à leur niveau du scénario de référence, et ce, afin d'éviter les fuites d'émission (*no carbon leakage*). Dans TIAM, l'échange (achat ou vente) de permis d'émission n'est autorisé qu'au sein des pays de l'Annexe 1, et il y est limité à 10% en 2020 et 20% à partir de 2030 du volume total de permis alloué. Les mécanismes de développement propre ne sont pas pris en considération.

SCENARIO 8 : ACCORD DE COPENHAGUE (ENGAGEMENTS MINIMAUX)

Le scénario représente la version *light* de l'accord de Copenhague, basé sur les engagements minimaux proposés par les pays. Par exemple, l'Europe réduit ses émissions de 20% par rapport à 1990, et cet engagement est maintenu jusqu'en 2100.

Dans TIAM, l'échange de permis d'émission est limité à 10% en 2020 et 20% à partir de 2030, de la réduction d'émissions requises de chaque pays, y compris la réduction volontaire des émissions.

SCENARIO 9 : ACCORD DE COPENHAGUE (ENGAGEMENTS MAXIMAUX)

Ce scénario représente une version avancée de l'accord de Copenhague, basé sur les engagements maximaux proposés par les pays. Par exemple, l'Europe réduit ses émissions de 30% comparé à 1990. Ces engagements courent tout au long du siècle.

SCENARIO 10 : ACCORD DE COPENHAGUE AMELIORE

Ce scénario représente une version simple de la proposition faite par le G8 consistant en une réduction drastique des émissions des pays industrialisés et une réduction importante dans le reste du monde. Après l'accord de Copenhague, des réductions plus importantes sont mises en œuvre (-80% par rapport à 1990 pour les pays de l'Annexe 1 et -50% pour les autres).

SCENARIO 11 : ACCORD TARDIF (EN 2050)

Ce scénario s'intéresse aux conséquences de repousser dans le temps un accord international contraignant : cet accord intervient en 2050, et suit les recommandations du G8. Contrairement au scénario précédent (10: accord de Copenhague amélioré), aucun effort de réduction des émissions n'est fait avant 2050.

SCENARIO 12 : COOPERATION OPTIMALE POUR LIMITER LE RECHAUFFEMENT A 2°C

Ce scénario est un scénario utopique : il tend à représenter l'optimum social mondial permettant de limiter le réchauffement global en 2100 à 2°C. Des politiques d'atténuation sont mises en œuvre au moment et à l'endroit où elles seront les plus efficaces. Ce scénario va principalement servir d'étalon afin de pouvoir évaluer les coûts minima inhérents au respect de la contrainte sur l'augmentation de la température.

La coopération optimale implique l'abandon des mécanismes de marché. Le modèle GEMINI-E3 n'a donc pas pu être employé pour ce scénario.

SCENARIO 13 : ACCORD INTERNATIONAL POUR LIMITER LE RECHAUFFEMENT A 2°C

Ce scénario est le seul en mesure de limiter l'augmentation de température en dessous de 2°C à long terme. Il suppose la mise en œuvre des engagements de l'accord de Copenhague pour l'année 2020, immédiatement suivi par des réductions d'émissions plus importantes entre 2030 et 2050, et enfin, la mise en œuvre d'un traité international impliquant la collaboration parfaite de tous les pays à partir de 2055 ; tous les pays coopèrent et les efforts d'atténuation sont effectués au moment et au lieu où ils sont les plus efficaces : une politique socialement optimale est appliquée à partir de 2055.

7.2. UNE REPRESENTATION PLUS FINE DE L'ECONOMIE

Le modèle économique Gemini-E3 est utilisé pour représenter les comportements économiques des différentes parties jusqu'en 2030. Certains des scénarios définis dans la phase II sont identiques jusqu'en 2030, ils ne se différencient qu'après cette date, ou encore plus tard. Voilà pourquoi il n'y a finalement que trois variantes économiques telles que définies dans la section précédente : engagements minimaux (*CPH Low Forever*), engagements maximaux (*CPH High Forever*), et accord limité à l'annexe 1 (*CPH Annex1 Forever*). Pour plus de détails, voir le tableau suivant pour la correspondance exacte entre scénarios de la phase II et variantes économiques.

Tableau 11 : correspondance entre scénarios de la phase II et variantes économiques modélisées avec GEMINI-E3.

scénario	libellé	variante économique
6	Echec suite à l'Accord de Copenhague	CPH Low Forever
7	Accord de Copenhague limité aux pays de l'Annexe 1	CPH Annex1 Forever
8	Accord de Copenhague (accords minimaux)	CPH Low Forever
9	Accord de Copenhague (accords maximaux)	CPH High Forever
10	Accord de Copenhague amélioré	CPH High Forever
11	Accord tardif (2050)	-> scénario réf.*
12	Coopération optimale pour limiter le réchauff. à 2°C	-> aucun**
13	Accord international pour limiter le réchauff. à 2°C	CPH High Forever

* D'un point de vue économique, et pour le court terme, le scénario 11 *Accord Tardif* est équivalent au scénario *BaU* présenté précédemment.

** Le scénario 12 abandonne les principes d'économie de marché pour faire place à une totale coopération. Il n'y a donc pas de données économiques à court terme pour ce scénario.

Pour chacune de ces variantes, Gemini-E3 a évalué différentes limitations possibles des mécanismes de développements propres et des achats de permis d'émissions. Ainsi, pour chaque variante, nous avons les configurations suivantes :

- Pas de mécanisme de développement propre.
- Mécanisme de développement propre limité à 5% du volume total de permis d'émission alloués.
- Pas de mécanisme de développement propre, achat de permis d'émission limité à 50% du volume total de permis d'émission alloués.
- Mécanisme de développement propre limité à 5% et achat de permis d'émission limité à 50% du volume total de permis d'émission alloués.

Les principaux enseignements que l'on peut tirer de ces simulations sont les suivants :

- A court terme, une grande disparité de prix du CO₂ subsisterait et de ce point de vue la mise en place d'un marché d'émission entre les différents pays ayant contractés des engagements est très souhaitable, car elle permettrait d'atteindre à moindre coût les réductions d'émissions de gaz à effet de serre ;
- Au cours de la première phase cette disparité des prix du CO₂ peut être un frein à l'adoption d'objectifs plus contraignants pouvant laisser à penser que le prix du CO₂ puisse augmenter très fortement et générer ainsi de fortes oppositions à l'adoption d'objectifs plus contraignants ;
- Le recours aux mécanismes de flexibilité et en particulier le CDM est souhaitable notamment au cours de la première période d'engagement car il permettrait de limiter la disparité des prix du CO₂. A plus long terme son usage pourrait être concurrencé par les réductions d'émission à bas coût provenant de la Chine, de l'Inde si ces pays adoptent des engagements contraignants ;
- L'intégration des pays émergents dans l'accord est indispensable pour atteindre des réductions d'émissions significatives et a pour corollaire un prix du CO₂ relativement faible grâce à leurs bas coûts de réduction des gaz à effet de serre ; leur intégration est donc une condition nécessaire à un succès de la lutte contre le changement climatique ;
- La mise en place d'une contrainte sur les achats de permis d'émission négociables a peu d'effet à court terme. Par contre, elle devient effective si les pays émergents intègrent un accord de limitation des gaz à effet de serre. Dans ce cas sa prise en compte peut induire de forts coûts économiques pour les zones qui sont contraintes, son adoption d'un point de vue économique est donc à proscrire.

7.3. LE CAS DE MARCHES FRACTIONNES DU CARBONE

PRÉAMBULE

Cette section a été rajoutée au corps principal du rapport de façon à répondre à certaines recommandations du comité scientifique ayant examiné le rapport intermédiaire, écrit en mars 2010. Cependant, les commentaires et recommandations du comité ne nous ont été fournis qu'en avril 2011, nous laissant peu de temps pour y répondre. Nous avons donc procédé à de nouvelles simulations, en partie pour ce rapport et en partie dans le cadre de travaux en cours au sein du *Energy Modeling Forum* (EMF-24) dont nous sommes membres, et qui se poursuivront en 2011 et 2012. Nous remercions les membres du comité scientifique pour des recommandations pertinentes et qui enrichissent les conclusions tirées de ce projet GICC.

SCÉNARIOS CLIMATIQUES À PARTICIPATION FRAGMENTÉE

Dans ce chapitre, nous examinons donc des situations où la poursuite des objectifs climatiques est fragmentée à divers degrés, soit que la fragmentation soit plus prononcée, soit qu'elle se poursuive plus longtemps dans le temps, parfois jusqu'à la fin du XXI^e siècle. Nous comparons ces scénarios à des situations de coopération parfaite et aussi à un scénario de référence sans cible climatique. En tout, nous obtenons cinq scénarios climatiques. De plus, nous combinons ces cinq scénarios climatiques à 8 hypothèses technologiques contrastées, pour former quarante combinaisons.

LES CINQ SCÉNARIOS CLIMATIQUES

Nous simulons et analysons deux scénarios à participation fragmentée, le premier (G8) étant une approximation et un prolongement des accords du groupe G8 de 2008-2009, l'autre plus pessimiste (PESS) simulant une situation plus fragmentée se prolongeant jusqu'en 2100.

Il apparaît utile de comparer ces deux scénarios à deux scénarios idéalisés supposant une coopération parfaite et immédiate de tous les pays pour atteindre les cibles respectives de 450 et 550 ppmv de concentration en CO₂-équivalents.

Nous simulons aussi un scénario de référence (REF) sans aucune cible ni politique climatique au-delà de l'accord de Kyoto se terminant en 2012.

La fragmentation des politiques entre trois grands groupes de pays résulte de leurs différents degrés de développement (G1 étant le groupe des pays industrialisés), ainsi que de leur propension à adopter ou non une attitude positive vis-à-vis des politiques climatiques (G3 étant le groupe de pays exportateurs d'énergie fossile). Le tableau 12 qui suit décrit ces 5 scénarios en détail.

Tableau 12. Les 5 politiques climatiques

	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
REF	Aucune cible ou politique climatique (sauf Kyoto 2012)		
450 ppm	Coopération mondiale parfaite pour atteindre la cible de 450 ppmv en CO2-equivalent en 2100		
550 ppm	Coopération mondiale parfaite pour atteindre la cible de 550 ppmv en CO2-equivalent en 2100		
G8	Émissions globales en 2050 = 50% des émissions en 1990		
	Émissions libres jusqu'en 2012 (sauf signataires de Kyoto) Émissions réduites progressivement atteignant en 2050 20% des émissions de 1990. Après 2050, réductions de 2% par an jusqu'en 2100 Marché de permis limité au groupe 1 jusqu'en 2020, et aux groupes 1 et 2 après 2020.	Émissions libres jusqu'en 2020. Puis, réductions progressives jusqu'en 2050 de façon à satisfaire la contrainte de réduction de 50% des émissions globales. Après 2050, réductions de 2% par an jusqu'en 2100 Marché de permis limité aux groupes 1 et 2 après 2020.	Aucune contrainte sur les émissions durant tout le XXIe siècle Pas de participation au marché de permis échangeables
PESS.	Émissions libres jusqu'en 2012 (sauf signataires de Kyoto)	Jusqu'en 2020, réductions faibles inspirées des	Aucune contrainte sur les émissions durant tout le XXIe siècle

	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
	Émissions réduites progressivement atteignant en 2050 20% des émissions de 1990. Après 2050, réductions de 2% par an jusqu'en 2100 Marché de permis limité au groupe 1 durant tout le siècle	engagements de Copenhague (voir tableau YY) Après 2020, les réductions commencent à une date seuil dépendant du revenu par habitant de chaque pays du groupe, selon le tableau ZZ. Après cette date seuil chaque pays réduit ses émissions de 2% par an jusqu'en 2100 Aucun échange de permis avec quelque pays que ce soit.	Pas de participation au marché de permis échangeables

La définition précise des trois groupes apparaît dans le tableau suivant.

Tableau 13. Définition des trois groupes de régions

Groupe G1	Pays industrialisés : EUR, JPN, OEE, AUS, CAN, USA
Groupe G2	Autres régions : AFR, CAC, CHI, CSA, IND, MEX, SKO
Groupe G3	Pays fortement exportateurs d'énergie fossile : MEA, ODA, RUS

LES 8 SCÉNARIOS TECHNOLOGIQUES

Comme nous l'avons énoncé, nous avons combiné ces cinq scénarios climatiques à diverses hypothèses concernant la disponibilité de trois principaux groupes technologiques jouant un rôle majeur pour la réduction des émissions de GES, soit :

- la capture et séquestration du CO₂ (CCS) et le nucléaire,
- les énergies renouvelables autres que l'hydroélectricité (RNW), et
- les économies d'énergie finale (traduites par l'intensité énergétique finale (INT)).

Pour chacun de ces trois groupes technologiques, nous distinguons deux niveaux, l'un favorable, l'autre défavorable. Le tableau 14 suivant résume nos hypothèses technologiques.

Tableau 14. Les hypothèses technologiques

	Hypothèse favorable	Hypothèse défavorable
Intensité énergétique finale	<p>LOW Intensity</p> <ul style="list-style-type: none"> • Taux de décroissance moyen au cours du siècle : env. 1.8% 	<p>REF Intensity :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Taux de décroissance moyen au cours du siècle : env. 1.2%/an (hypothèses standard de TIAM WORLD)
Renouvelables (sauf hydro)	<p>ADV RNW :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiels et coûts standard de la base de données de TIAM-WORLD 	<p>REF RNW :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Plantations énergétiques limitées à 50 EJ/an 1 • Coût plus élevé de l'éolien et du solaire
Capture et séquestration du CO ₂ , et nucléaire	<p>CCS ON :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiels standard de la base de données de TIAM-WORLD 	<p>CCS OFF :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aucun potentiel de séquestration du CO₂ au cours du siècle • Pas de nouvelle capacité nucléaire après 2015

¹ Les potentiels des autres sources de biomasse sont identiques à ceux de l'hypothèse ADV RNW (ex.: forêts)

La combinaison des hypothèses sur les 3 groupes technologiques donne donc naissance à 8 scénarios technologiques.

LES QUARANTE COMBINAISONS SIMULÉES

Le tableau 15 présente de façon synthétique les quarante scénarios simulés à l'aide de TIAM-WORLD.

Tableau 15. Les quarante scénarios réalisés, obtenus en combinant les cinq politiques climatiques et les 8 hypothèses technologiques

	ADV RNW				REF RNW			
	REF Intensity		LOW Intensity		REF Intensity		LOW Intensity	
	CCS ON	CCS OFF	CCS ON	CCS OFF	CCS ON	CCS OFF	CCS ON	CCS OFF
REF	1	6	11	16	21	26	31	36
450 CO2e	2	7	12	17	22	27	32	37
550 CO2e	3	8	13	18	23	28	33	38
G8	4	9	14	19	24	29	34	39
PESS	5	10	15	20	25	30	35	40

RÉSULTATS ET COMMENTAIRES

Ces travaux sont récents et encore incomplètement exploités. Étant donné les impératifs de date de terminaison du projet, nous ne présenterons que les résultats principaux sans approfondir les détails énergétiques de chaque scénario. Nous nous attacherons donc uniquement à l'examen des résultats globaux.

Ces résultats sont toutefois très éclairants et permettent de dégager quelques fortes conclusions.

RESULTATS CLIMATIQUES : L'ELEVATION DE LA TEMPÉRATURE GLOBALE MOYENNE

Pour les scénarios 450 et 550, le résultat climatique est dicté d'avance (en termes de concentrations et de forçage radiatif), puisque la cible de concentration est imposée. Ce n'est pas le cas des autres scénarios climatiques. Il est donc nécessaire d'examiner les concentrations et forçages radiatifs atteints par les scénarios REF, G8 et PESS, puis de les convertir en élévations de la température globale moyenne, au moyen des équations du module climatique de TIAM-WORLD.

La figure 14 suivante indique le maximum de l'élévation de température moyenne, qui correspond d'ailleurs à l'élévation de la température en 2100.

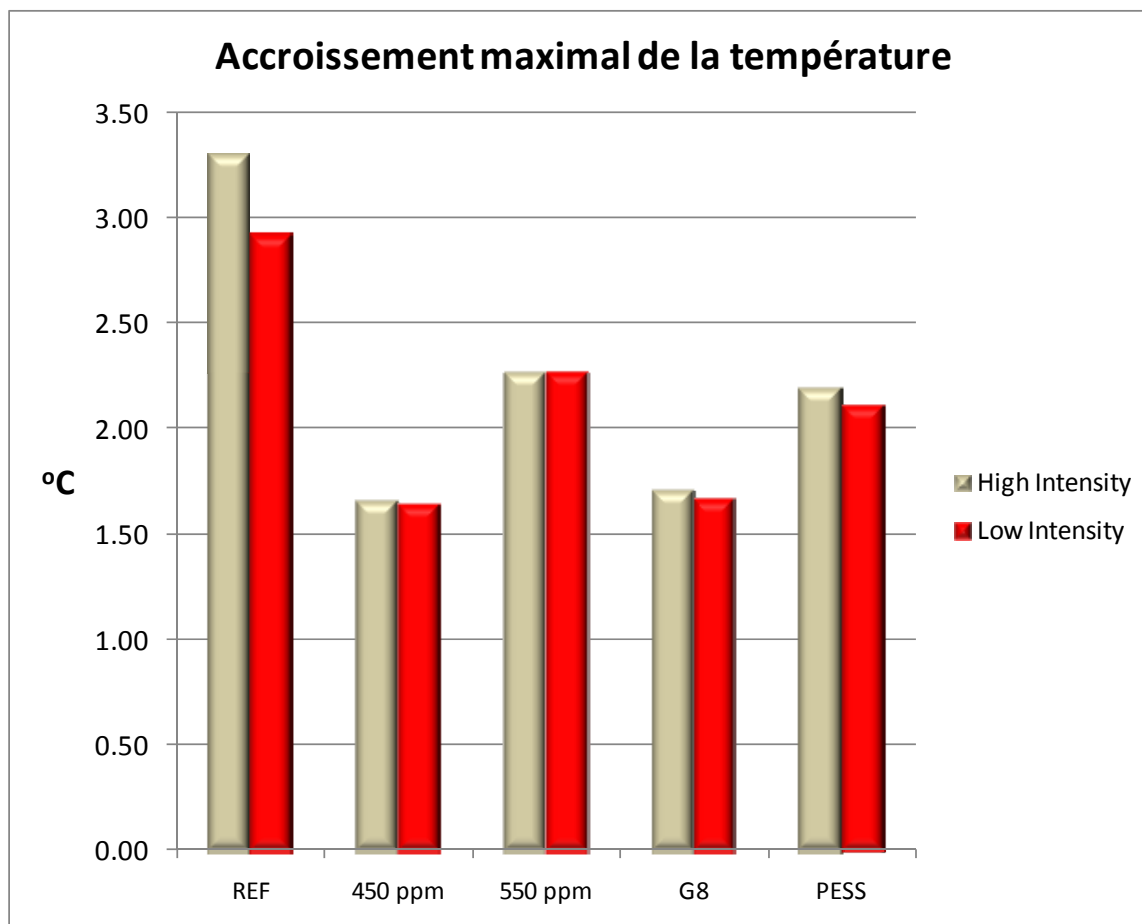


Figure 14. Accroissement maximal de la température globale moyenne des scénarios climatiques sous l'hypothèse d'une sensibilité du climat de 2.9°C. Ce résultat tient compte de toutes les sources de forçage, naturelles aussi bien qu'anthropiques.

COMMENTAIRES :

Nous ne montrons que l'accroissement de température globale correspondant à 10 des 40 scénarios --les scénarios 1 à 5 et 11 à 15. En effet, la seule hypothèse technologique ayant un effet décelable sur les variables climatiques (concentrations, forçage radiatif, élévation de la température globale) est celle de l'intensité énergétique, les autres hypothèses technologiques ayant une influence quasi nulle sur le climat.

La figure 14 montre que les scénarios G8 et PESS sont respectivement proches des scénarios 450 ppm et 550 ppm, du moins en ce qui concerne le climat durant le 21^{ème} siècle. Cette observation est très utile car elle nous permet de comparer les paires de scénarios G8 - 450 ppm et PESS - 550 ppm, sachant que les scénarios de chaque paire ont à peu près le même impact climatique.

Une observation intéressante est que l'accroissement de la température globale moyenne ne dépasse pas 2.25°C sous les 2 scénarios 550 ppm et PESS, et reste en dessous de 1.7°C sous les deux autres scénarios.

Notons aussi que le scénario de référence entraîne un accroissement de température double de celui de la paire 450 ppm - G8.

LES COÛTS COMPARÉS

Le coût global d'un scénario donné est une indication très utile de la difficulté d'atteindre la cible de ce scénario sous les hypothèses technologiques particulières du scénario en question. C'est donc un des premiers résultats à examiner. Rappelons que ce coût est, plus précisément, dans le cas de TIAM-WORLD, la perte de surplus total.

Comme nous l'avons mentionné plus haut, le fait que les scénarios G8 et PESS sont respectivement proches des scénarios 450 ppm et 550 ppm (en ce qui concerne le climat durant le 21^e siècle) rend pertinente la comparaison des coûts respectifs de chaque scénario d'une paire donnée.

LE COÛT DES POLITIQUES CLIMATIQUES

Tout d'abord, le tableau 16 montre le coût global actualisé (au taux de 5% /an) de chaque scénario par rapport à la situation correspondante de référence. Ce coût est donc le coût net de la politique climatique elle-même, dans chaque situation technologique. Il est donné en Milliards de dollars 2005. Ce tableau nous permet d'évaluer le coût de chaque cible climatique, pour chaque situation énergétique donnée.

Tableau 16. Coût actualisé de chaque scénario relatif à son scénario de référence (G\$ 2005)

	ADV RNW				REF RNW			
	REF Intensity		LOW Intensity		REF Intensity		LOW Intensity	
	CCS ON	CCS OFF	CCS ON	CCS OFF	CCS ON	CCS OFF	CCS ON	CCS OFF
Référence	0	0	0	0	0	0	0	0
450 CO2e	40.1	50.1	26.9	34.0	51.6	65.6	32.5	41.8
550 CO2e	7.8	9.3	2.8	3.5	10.3	13.6	2.9	4.1
G8	43.6	57.4	28.4	38.4	62.5	82.8	41.2	56.4
PESS	20.4	24.6	11.8	14.8	27.8	36.5	14.6	19.7

COMMENTAIRES :

Comme nous pouvions aisément le deviner, le scénario fragmenté G8 est plus coûteux que le scénario « optimal » 450 ppm. Ceci n'est pas une surprise, puisque les deux scénarios atteignent à peu près la même cible climatique, mais que G8 consiste en des politiques assez fortement fragmentées et donc moins efficaces que la coopération parfaite de 450 ppm. Cependant, et c'est là une conclusion intéressante, le coût supplémentaire de G8 reste relativement modéré, ne dépassant pas celui de 450 ppm de plus de 35% (maximum atteint dans la dernière colonne du tableau).

Par contre, le coût de PESS est beaucoup plus élevé que celui de 550 ppm, bien que ces deux scénarios aient à peu près les mêmes conséquences climatiques. Le ratio des coûts est dans une fourchette de 2.6 à 4.8, ce qui traduit la plus forte segmentation de PESS, et donc son inefficacité à atteindre une cible climatique somme toute modérée. Le scénario PESS a donc bien mérité son qualificatif de « pessimiste ».

LE COÛT DES HYPOTHÈSES TECHNOLOGIQUES

Nous présentons maintenant un autre aspect des coûts globaux actualisés, soit, pour chaque scénario climatique, la différence des coûts entre un scénario technologique et sa contrepartie (par exemple : CCS OFF par rapport à CCS ON), toutes choses égales par ailleurs. Le tableau 17 montre ces comparaisons, exprimées en pourcentage de coût supplémentaire.

COMMENTAIRES

- Le CCS et le nucléaire jouent ensemble un rôle assez important dans tous les cas de politique climatique. En leur absence, l'augmentation du coût global reste dans une fourchette assez serrée d'environ 24% à 28% dans le scénario 450ppm, et d'environ 31% à 36% dans G8, quelles que soient les autres hypothèses technologiques, alors que cette augmentation est beaucoup plus variable dans les scénarios 550ppm (fourchette de 18% à 38%) et PESS (fourchette de 20% à 34%), selon les autres hypothèses technologiques. On peut conclure de ces résultats que ce groupe technologique a une influence presque indépendante des autres groupes technologiques dans le cas d'une cible plus contraignante (scénarios 450ppm et G8), mais que ce n'est pas le cas pour une cible moins contraignante (scénarios 550ppm et PESS.) Ceci s'explique par le fait que dans ces situations le recours au CCS ne devient crucial que lorsque d'autres technologies de réduction sont indisponibles. Par contre, lorsque la cible est sévère, le recours au CCS est important quelles que soient les autres technologies disponibles.

Tableau 17. Surcoût dû à l'hypothèse défavorable sur chaque groupe technologique

	ADV RNW				REF RNW			
	REF Intensity		LOW Intensity		REF Intensity		LOW Intensity	
	CCS ON	CCS OFF	CCS ON	CCS OFF	CCS ON	CCS OFF	CCS ON	CCS OFF
Impact du CCS et Nucléaire								
450 CO2e	24%		26%		27%		28%	
550 CO2e	18%		24%		31%		38%	
G8	31%		35%		32%		36%	
PESS	20%		25%		31%		34%	
Impact de l'intensité énergétique								
450 CO2e	48%	47%			58%	56%		
550 CO2e	178%	165%			248%	231%		
G8	53%	49%			51%	46%		
PESS	72%	66%			89%	85%		
Impact des énergies renouvelables								
450 CO2e	28%	31%	20%	23%				
550 CO2e	31%	46%	5%	17%				
G8	43%	44%	44%	46%				
PESS	36%	48%	24%	32%				

- L'intensité énergétique a naturellement un fort impact sur le coût global, puisqu'elle agit directement sur la demande d'énergie finale. Le coût global augmente d'environ 50% si l'intensité énergétique est plus grande dans le cas de la cible contraignante (scénarios 450 ppm et G8). L'augmentation de coût est beaucoup plus forte dans le cas d'une cible moins contraignante (scénarios 550ppm et PESS), ce qui s'explique par le fait que dans ce dernier cas, la diminution de l'intensité énergétique est à elle seule presque capable d'atteindre la cible climatique. Notons quand même que cette importance accrue de l'intensité énergétique est plus évidente dans le cas de 550 ppm que dans PESS.
- Les énergies renouvelables jouent un rôle sensiblement égal à celui du CCS+nucléaire, entraînant pratiquement les mêmes conclusions que celles énoncées plus haut.

VERS DES STRATÉGIES CLIMATIQUES : LES RÔLES RESPECTIFS DES PRINCIPAUX GROUPES TECHNOLOGIQUES

Nous examinons maintenant la « stratégie » utilisée pour atteindre les cibles climatiques. Cette stratégie est assez complexe, faisant intervenir principalement les trois éléments suivants, de façon synergétique :

- Le recours à la biomasse et aux autres renouvelables, dans les secteurs de l'électricité et de la production de carburants
- Le degré d'électrification de l'économie
- L'utilisation du CCS dans les secteurs de l'électricité et de la production de carburants

Une première constatation est le recours massif à la biomasse. La figure 15 indique que la biomasse est utilisée à son potentiel maximum dans presque tous les scénarios climatiques (l'exception étant le scénario 550 ppm, même si l'utilisation de la biomasse y est majeure). De plus, comme l'indique la figure 16, la biomasse est principalement utilisée pour la production de carburants plutôt que pour produire de l'électricité. La biomasse est donc un choix prioritaire dans la stratégie de réduction des émissions de CO₂. Ceci n'est pas une surprise puisque l'utilisation de la biomasse accompagnée de CCS résulte en des émissions nettes de CO₂ négatives.

L'électrification de l'économie est un deuxième élément dans la stratégie de réduction des émissions de CO₂, élément d'autant plus important que la cible climatique est plus sévère, comme le montre la figure 17. La même figure montre que le recours à l'électricité est plus important lorsque la disponibilité de la biomasse est plus restreinte (c'est-à-dire tous les scénarios avec REF RNW) parce que dans cette situation les réductions d'émissions dans le secteur des carburants renouvelables ont un plus petit potentiel, et donc le recours à l'électricité (solaire et éolienne) s'impose.

Finalement, le CCS est aussi une option significative, mais de façon plus modérée que les renouvelables. La figure 17 indique que la séquestration du CO₂ ne représente jamais plus de 20% des réductions totales de CO₂. Une autre observation (non explicitée dans ces résultats) est que cette option intervient de façon prépondérante dans la production des carburants (par opposition à la production d'électricité), ce qui coïncide avec l'utilisation préférentielle de la biomasse discutée plus haut.

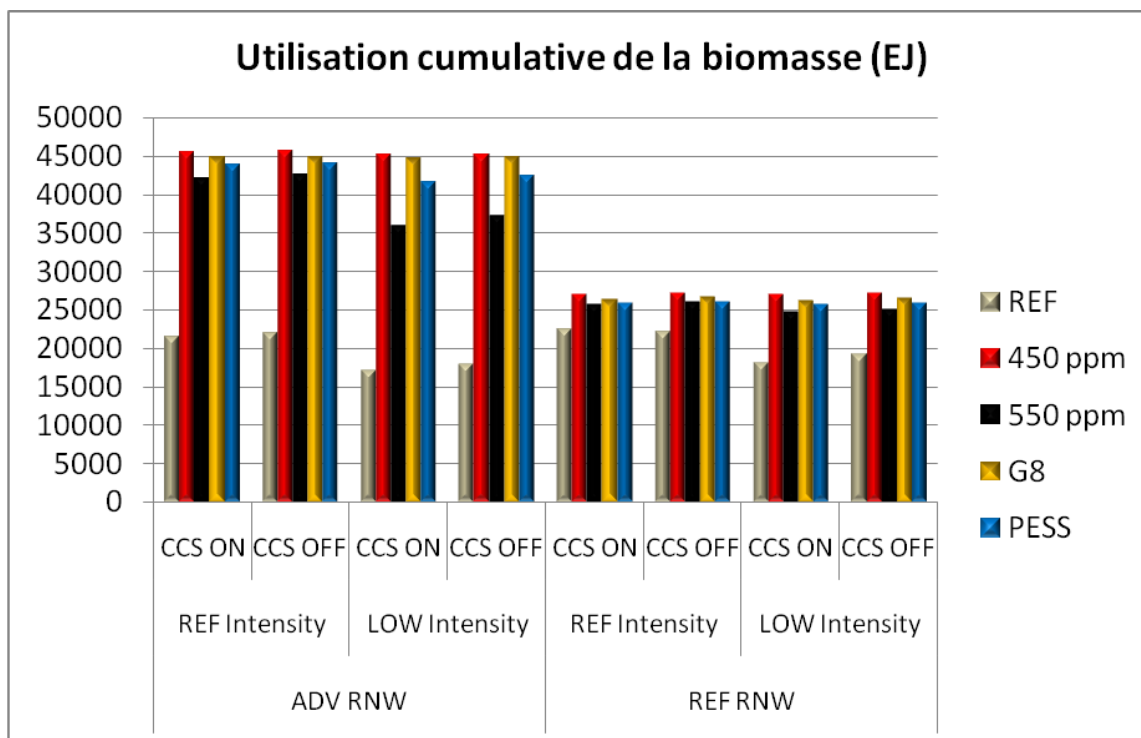


Figure 15 : Biomasse primaire cumulée Durant le 21e siècle (EJ)

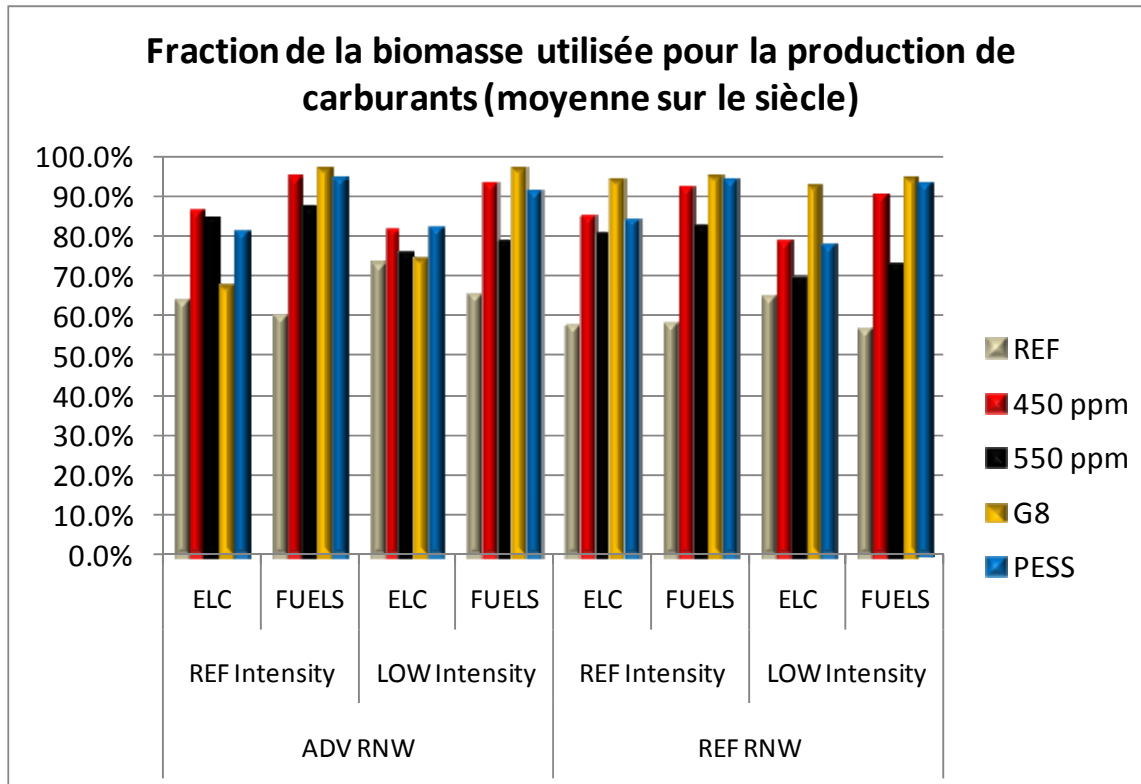


Figure 16 : Fraction de la biomasse utilisée durant le 21e siècle pour produire des carburants (%)

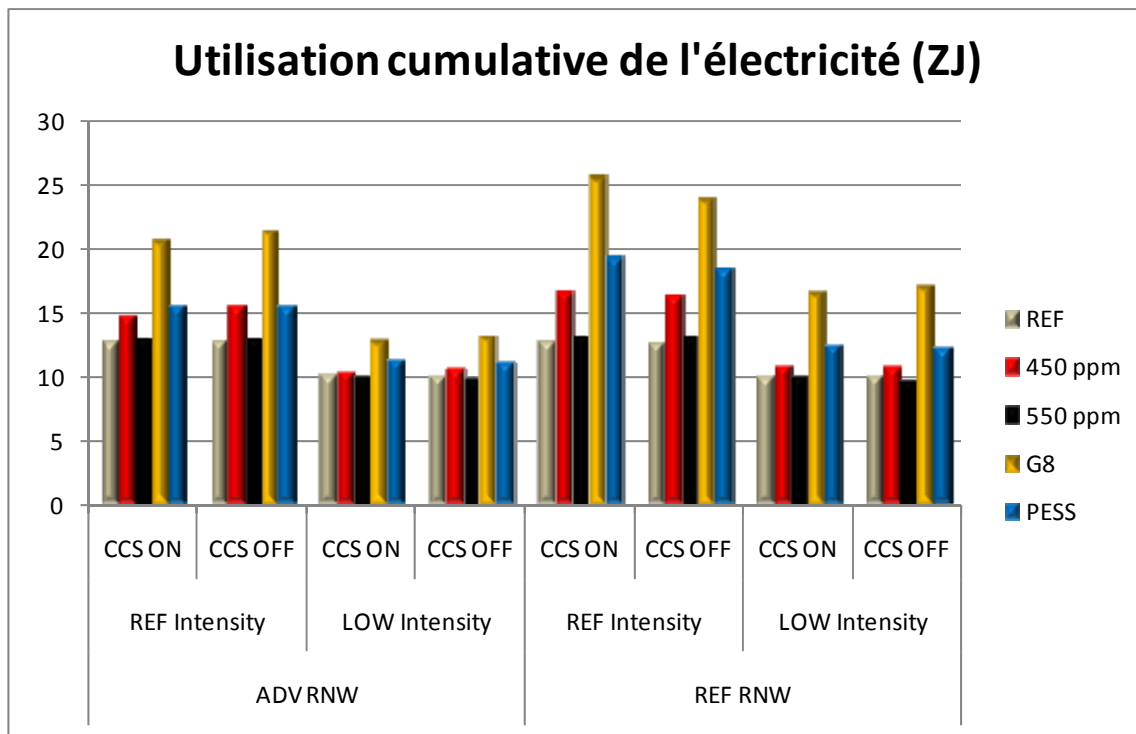


Figure 17 : Électricité consommée durant le 21e siècle (ZJ)

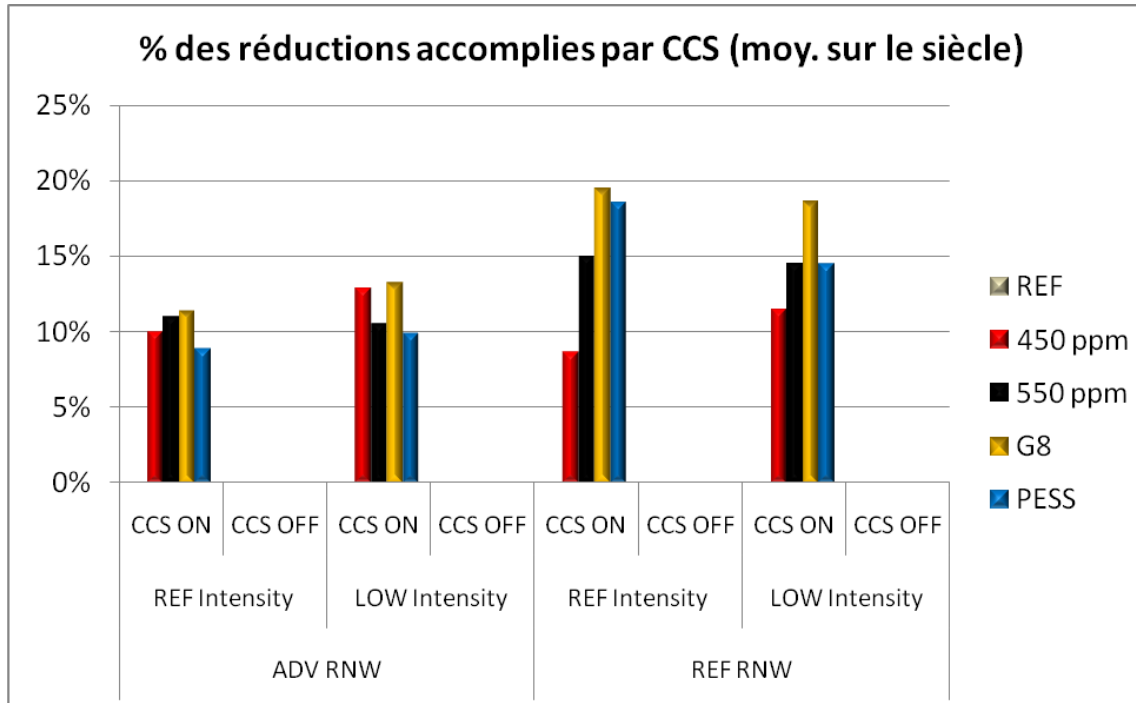


Figure 18 : Fraction des réductions de CO2 accomplies par CCS (% moyen sur le 21e siècle)

CONCLUSION

Volet technologique

- En dehors de l'attrait évident des économies d'énergie, l'atteinte des cibles climatiques fait principalement appel à une combinaison variable de trois entités: la biomasse, les autres renouvelables, et le CCS, et ce dans deux secteurs : la production d'électricité et la production des carburants.
- L'électrification des secteurs consommateurs d'énergie est une autre dimension de la stratégie climatique. Cette option est d'autant plus importante lorsque la cible climatique est sévère et lorsque le potentiel de biomasse est réduit.
- Parmi les 3 groupes technologiques, la biomasse est le choix prioritaire. La biomasse est utilisée à son potentiel maximum dans les scénarios sévères, et majoritairement pour produire les carburants des secteurs industrie et transports. La biomasse est le plus souvent utilisée en combinaison avec le CCS.
- L'électricité d'origine renouvelable (solaire et éolienne) est adoptée massivement en complément de l'utilisation de la biomasse. Lorsque la biomasse est limitée, les autres renouvelables pénètrent plus fortement le secteur électrique ainsi que les usages finals (chauffage solaire passif des locaux).

Volet politique

- Le scénario G8 est intéressant: il permet d'atteindre à peu près la même cible climatique que le scénario idéalisé 450ppm, et son coût excède celui de ce dernier de façon assez modérée. Les caractéristiques du scénario G8 semblent par ailleurs assez réalistes pour qu'il puisse éventuellement donner lieu à un accord international.
- Le scénario PESS est lui aussi susceptible d'un accord, mais il se révèle décevant sur le plan du coût global, étant beaucoup plus onéreux que le scénario idéalisé 550 ppm, pour une cible climatique à peu près équivalente.

8. DIFFUSION ET INTERACTIVITE

Un site web a été développé afin de faciliter l'exploration de simulations réalisées à l'aide des trois modèles retenus et correspondant aux différents scénarios de négociation décrits dans la section précédente.

Ce site est accessible à l'adresse suivante : <http://synscop15.ordecys.com>

Il comporte 5 sections accessibles depuis une barre de menu horizontal. Les quatre premières sont présentées dans la section 8.1 et la cinquième est présentée dans la section 8.2

8.1. LE SITE INTERNET HTTP://SYNSCOP15.ORDECSYS.COM

Cette section présente les fonctionnalités des quatre premiers onglets accessibles dans la barre de menu du site internet (Accueil, Outils et Méthodes, 15^{ème} CdP et 16^{ème} CdP). Les deux derniers menus donnent accès à un « explorateur de scénarios » qui permet de parcourir interactivement l'ensemble des résultats et de comparer les résultats de deux scénarios. Cet exploreur sera également présenté dans cette partie.

L'image ci-dessous est une copie d'écran de la page d'accueil du site internet synscop15.

ACCUEIL | LE PROJET GICC | ACTUALITÉS | ACTIVITÉS POSSIBLES



Bienvenue sur SynsCOP15, un système intégré de suivi et d'évaluation des négociations sur le climat à partir de COP-15

Ce site internet vous permet d'évaluer différents scénarios d'évolution des pratiques d'atténuation des effets du changement climatique, discutées à l'occasion des 15ème et 16ème Conférences des Parties (CdP). Les évaluations sont axées sur les conséquences économiques, climatiques et énergétiques.

Vous pourrez notamment mesurer les conséquences des résultats plus ou moins heureux des négociations, d'un point de vue la mise en place d'une politique ambitieuse, de la limitation des échanges de permis d'émission, ou bien de la mise en place d'une coopération idéale.

Vous ne savez pas par où commencer ? suivez ce lien :

En plus de la présente section d'accueil, ce site compte 4 autres sections accessibles depuis le menu principal qui apparaît dans la barre centrale horizontale. Ces sections sont présentées ci-dessous :

Outils d'évaluation et Méthodes de prise en compte de l'incertitude

Pour évaluer les propositions discutées lors des négociations autour de COP-15, il est important de prendre en compte les interactions entre l'économie, le système énergétique et la dynamique climatique. Pour ce faire, nous utilisons trois modèles complémentaires : TIAH, GEMINI-E3 et GENIE. Nous présentons en complément des techniques permettant de prendre en compte l'incertitude de certains paramètres dans les modèles.

Aller à la section Méthodes et Outils

15ème Conférence des Parties (CdP) : Copenhague

Ce site offre la possibilité d'explorer les résultats de différents scénarios envisagés lors des négociations autour de la 15ème CdP représentant, par exemple, les conséquences d'un échec des négociations ou celles d'un accord limité au G20. Ces résultats peuvent être comparés à ceux qui résulteraient d'un accord global et volontariste.

Des paramètres climatiques, économiques et énergétiques définissent chacun des scénarios.

Aller à la section 15ème CdP

16ème Conférence des Parties (CdP) : Cancun

Ce site offre la possibilité d'explorer les résultats de différents scénarios envisagés lors des négociations préparant la 16ème CdP et représentant, par exemple, les conséquences d'un échec de la mise en place de l'accord de Copenhague ou celles d'un accord limité aux pays de l'Annexe-1. Ces résultats peuvent être comparés à ceux résultant d'un accord limité, ou global et volontariste.

Des paramètres climatiques, économiques et énergétiques définissent chaque scénario.

Aller à la section 16ème CdP

Espace Interactif

Cette section permet d'explorer de manière interactive un ensemble de scénarios correspondant au suivi des Conférences des Parties. Pour cela l'utilisateur peut participer à un forum et interagir avec l'équipe de modélisation du projet.

Aller à la section Espace Interactif

PRÉSENTATION AUDIO-VISUELLE DU SITE



Cliquer sur l'image pour voir la présentation

KANLO CONSULTANTS



Lyon, France

ORDECSYS SARL



Genève, Suisse

OPEN UNIVERSITY



The Open University

Section sciences de la vie et de l'environnement, Angleterre

Projet soutenu par le GICC,
piloté par le MEEDDM



SECTION ACCUEIL

L'onglet « Accueil » donne accès à plusieurs choix :

1. « Accueil » : Présentation du site internet.
2. « Le projet GICC » : Présentation du projet GICC.
3. « Actualités » : Actualités pertinentes du le sujet des politiques climatiques.
4. « Activités possibles » : Listes d'activités possibles avec le site internet SynsCOP15.

Une version en anglais est aussi disponible

SynsCOP15

GICC Le programme Gestion et Impacts du Changement Climatique

English

ACCUEIL | OUTILS ET MÉTHODES | 15ème CdP | 16ème CdP | ESPACE INTERACTIF

ACCUEIL
LE PROJET GICC | ACTUALITÉS | ACTIVITÉS POSSIBLES

ACTUALITÉS
ACTIVITÉS POSSIBLES

BIENVENUE SUR SYNSCOP15, un système intégré de suivi et d'évaluation des négociations sur le climat à partir de COP-15

Ce site internet vous permet d'évaluer différents scénarios d'évolution des politiques d'atténuation des effets du changement climatique, discutées à l'occasion des 15ème et 16ème Conférences des Parties (CdP). Les évaluations sont axées sur les conséquences économiques, climatiques et énergétiques.

Vous pourrez notamment mesurer les conséquences des résultats plus ou moins heureux des négociations, d'un

PRÉSENTATION AUDIO-VISUELLE DU SITE

Cliquez sur l'image pour voir la présentation

SECTION OUTILS ET METHODES

L'onglet « Outils et Méthodes » donne accès pour chacun des modèles utilisés dans nos analyses à une description du modèle en question et une liste de références bibliographiques pertinentes (voir les onglets « Modèle macro-économique », « Modèle énergie – technologie » et « Modèle climatique »).

Les trois autres onglets « Économie & incertitude », « Énergie et incertitude » et Climat et incertitude » décrivent les approches mises en œuvre pour appréhender les différentes sources d'incertitude dans le cadre de ce projet. Ces approches sont présentées dans la partie 5 de ce rapport.

SynsCOP15


GICC

Le programme
Gestion et Impacts
du Changement Climatique

English





ACCUEIL
OUTILS ET METHODES
15ème CdP
16ème CdP
ESPACE INTERACTIF

MODÈLE MACRO-ÉCONOMIQUE
ÉCONOMIE & INCERTITUDE
MODÈLE ÉNERGIE - TECHNOLOGIE
ÉNERGIE & INCERTITUDE
MODÈLE CLIMATIQUE
CLIMAT & INCERTITUDE

Modèle macro
 ÉCONOMIE & INCERTITUDE
 ÉNERGIE & INCERTITUDE
 MODÈLE CLIMATIQUE
 CLIMAT & INCERTITUDE

GEMINI-E3
 ÉCONOMIE & INCERTITUDE
 ÉNERGIE & INCERTITUDE
 MODÈLE CLIMATIQUE
 CLIMAT & INCERTITUDE

ÉCONOMIE & INCERTITUDE | ÉNERGIE - TECHNOLOGIE | ÉNERGIE & INCERTITUDE | MODÈLE CLIMATIQUE | CLIMAT & INCERTITUDE

SITE INTERNET DU MODÈLE GEMINI-E3



GEMINI-E3 est un modèle d'équilibre général calculable, son développement a débuté en 1994 au sein du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) sous la supervision de Alain Bernard. Le modèle est actuellement géré et développé par l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse) au sein du Laboratoire de Recherches en Économie et Management de l'Environnement (REME).

GEMINI-E3 a été dès sa conception conçu pour l'évaluation des politiques climatiques et énergétiques et en particulier l'analyse du protocole de Kyoto aux niveaux microéconomique et macroéconomique. GEMINI-E3 est un modèle dynamique décrivant l'économie mondiale à travers plusieurs régions et secteurs qui intègre de plus une représentation détaillée de la fiscalité indirecte. Il a été utilisé depuis 1995 pour analyser un nombre important de questions avant traités à l'énergie, l'environnement et la croissance économique. Le modèle simule l'économie

70

SECTION 15^{ÈME} CONFÉRENCE DES PARTIES

Cet onglet donne principalement accès aux descriptions et aux résultats des 5 scénarios politiques simulés dans la première phase de l'étude. Les 5 scénarios sont présentés dans les parties précédentes de ce rapport alors que les résultats sont détaillés dans la suite du rapport. Les résultats peuvent être également facilement et rapidement visualisés en cliquant sur le lien « Explorateur de scénarios » (Pour plus d'informations sur cet explorateur voir les sections ci-après). Enfin, l'onglet « 15^{ème} CdP » permet à l'utilisateur de consulter les hypothèses du scénario de référence.



Choix de 5 scénarios et explorateur interactif.

Ci dessous, nous avons reproduit un exemple de résultat que l'utilisateur pourra retrouver sur le site internet.

Les émissions par secteur du CO₂ (uniquement) représentées dans la figure 10 montrent la contribution élevée de l'industrie et de l'électricité aux émissions mondiales, et l'augmentation particulièrement forte de l'industrie et les secteurs en amont (principalement à cause de la croissance de la production de carburants de synthèse), tandis que les émissions des autres secteurs restent à peu près constantes, grâce à une efficacité accrue, la tendance à l'électrification de ces secteurs ou l'utilisation de bio-carburants.

NOTE: Il s'agit des émissions de CO₂ (uniquement). Il manque donc le CH₄ et le N₂O pour atteindre le 25/26 Giga tonnes des graphiques précédents.

Description des résultats de simulations

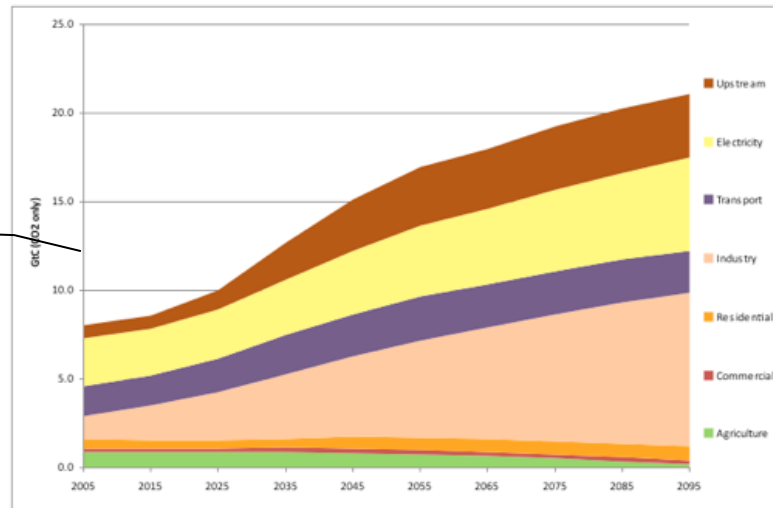


Figure 10. Emissions mondiales de CO₂ (uniquement) par secteur en GtC. source : TIAM

Climat

GENIE montre une tendance bien connue du réchauffement climatique, semblable à celle observée dans de nombreuses simulations précédentes présentées par le GIEC.

Le réchauffement à l'horizon 2100 est concentré sur les zones terrestres, ceci étant dû en grande partie à l'inertie thermique des océans et aux effets de rétroaction positive de la fonte des neiges. Un réchauffement plus intense dans les régions de hautes latitudes est également largement observé.

L'augmentation de la température moyenne de l'air de surface dans le scénario de référence est égal à 3.55 degrés par rapport à l'ère pré-industrielle.

SECTION 16^{ÈME} CONFÉRENCE DES PARTIES

Cet onglet délivre à l'utilisateur des informations similaires à l'onglet « 15^{ème} CdP » pour les scénarios politiques simulés dans la deuxième phase de l'étude.

The screenshot displays the SynsCOP15 website interface. At the top, there is a header with the text "SynsCOP15" on the left, the GICC logo (Le programme Gestion et Impacts du Changement Climatique) in the center, and "English" on the right. Below the header is a banner image divided into three panels: wind turbines, a cloudy sky, and a rocky coastline. A navigation bar below the banner contains five tabs: "ACCUEIL", "OUTILS ET METHODES", "15ème CdP", "16ème CdP", and "ESPACE INTERACTIF". The "16ème CdP" tab is currently selected, and a dropdown menu is open, listing various scenarios: "ACCUEIL", "CHOIX DES SCÉNARIOS", "0: SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE", "6: ECHEC SUITE À LA CDP-15", "7: ACCORD LIMITÉ À L'ANNEXE 1", "8 : ACCORD DE COPENHAGUE (MINIMUM)", "9 : ACCORD DE COPENHAGUE (MAXIMUM)", "10 : ACCORD DE COPENHAGUE AMÉLIORÉ", "11 : ACCORD TARDIF (2050)", "12 : COOPÉRATION OPTIMALE (2°C)", "13 : ACCORD INTERNATIONAL (2°C)", "EXPLORATEUR DE SCÉNARIOS", and "CONCLUSION".

ACCUEIL | CHOIX DES SCÉNARIOS | 0: SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE | 6: ECHEC SUITE À LA CDP-15 | 9 : ACCORD DE COPENHAGUE (MAXIMUM) | 10 : ACCORD DE COPENHAGUE AMÉLIORÉ | 11 : ACCORD TARDIF (2050) | 12 : COOPÉRATION OPTIMALE (2°C) | 13 : ACCORD INTERNATIONAL (2°C) | EXPLORATEUR DE SCÉNARIOS | CONCLUSION

Négociations autour de la 16^{ème} Conférence des Parties

La signature de l'accord de Copenhague (voir détails plus bas) clôt la 15^{ème} Conférence des Parties et nouvelle phase de négociations qui aboutiront à la 16^{ème} CdP de Caucun. Cette section propose d'évaluer les futurs possibles, suite à l'accord de Copenhague:

- Echech des négociations suite à la 15^{ème} CdP

EXPLORATEUR DE SCÉNARIOS

Les deux sections décrites précédemment d'analyse de scénarios (15^{ème} CdP et 16^{ème} CdP) comportent un onglet « explorateur de scénarios » qui offre une certaine interactivité dans l'exploration des résultats comparés de simulations correspondant à différents scénarios.

Pour l'instant cette page n'est disponible qu'en anglais.

SCENARIO EXPLORER

Please choose a topic to view:
Surplus in percentage of Household consumption

Please choose a scenario to view:
Failure of negotiations

Optional choice of a second scenario to view:
Agreement within G20

Comparaison des surplus pour deux scénarios contrastés

Zone de sélection des graphiques à comparer

Par exemple, on peut choisir d'analyser le surplus des différents pays représentés dans les simulations de GEMINI-E3 et comparer ces mesures de variation de bien-être pour deux scénarios contrastés, comme « échec des négociations » et « accord international ».

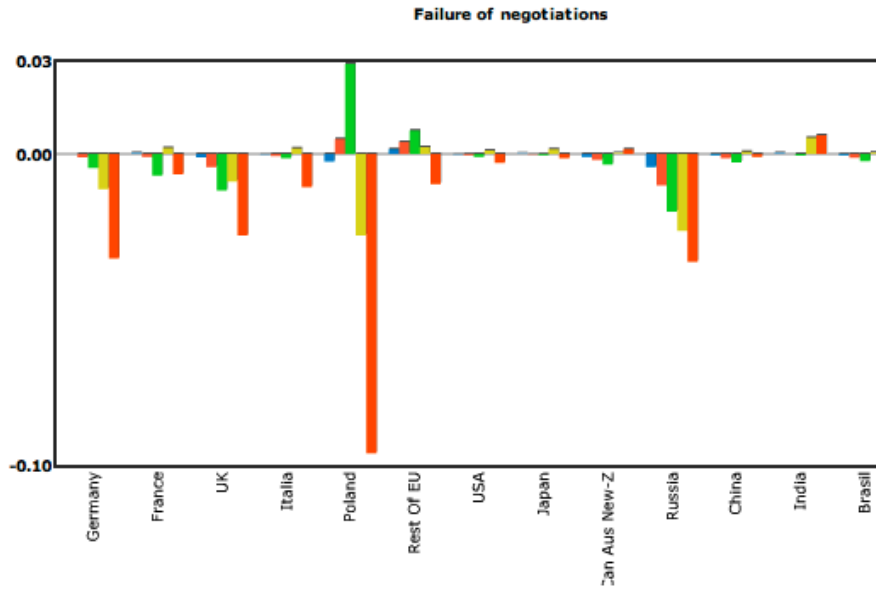
Dans la page, s'afficheront alors dynamiquement deux graphiques représentant l'évolution de ces surplus pour les différents pays et les deux scénarios retenus.

Surplus in percentage of Household consumption

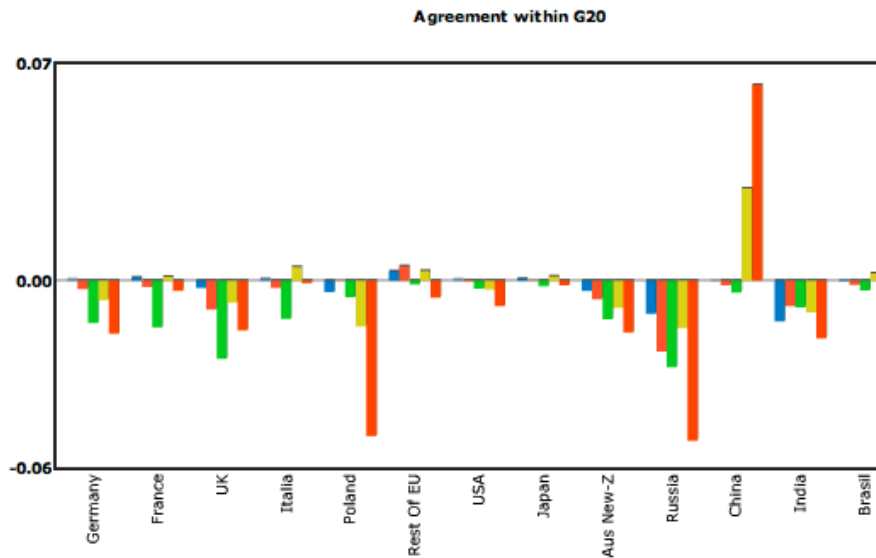
Description: Surplus is defined here as the Compensative Variation of Income (CVI), when comparing the current scenario with the baseline scenario. It is then expressed in percentage of the household's consumption in the baseline scenario.

Failure of negotiations

Comments: The welfare losses incurred by the different countries are very dispersed. One distinguishes three groups of regions: 1) the European countries, which face significant costs arising from their commitments well above other industrialized countries; 2) The energy exporting countries, which face significant costs (one finds in this group Russia and Rest of World). This welfare loss is obviously due to loss of income due to falling energy exports; 3) Finally, the other countries are little affected in this scenario.



Agreement within G20



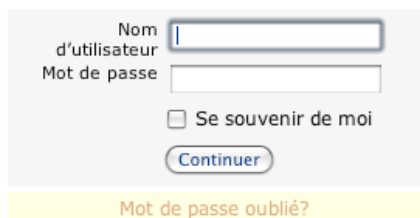
8.2. INTERACTIVITÉ

Le dialogue et les échanges entre des utilisateurs du site internet et les modélisateurs sont facilités grâce à la mise en place d'une section interactive sur le site Synscop15.

SECTION ESPACE INTERACTIF

L'espace interactif représente une des principales améliorations apportées au site internet lors de la phase II du projet. Il est essentiellement constitué d'un forum qui a pour objectif de faciliter les échanges entre les utilisateurs du site eux-mêmes et avec les modélisateurs. Les utilisateurs peuvent accéder au Forum via sa page d'accueil en cliquant sur « Accéder au Forum ». Cette page d'accueil présente également le mode de fonctionnement du forum.

Le forum nécessite une identification sécurisée. Pour s'inscrire, il suffit d'envoyer un courriel à l'adresse contact-us@ordecsys.com avec comme titre « inscription forum synscop15 ». L'utilisateur recevra alors son login et son mot de passe par courriel dans un délai de 48 heures. Ces données permettront ainsi à l'utilisateur de s'identifier à chacune de ses visites.

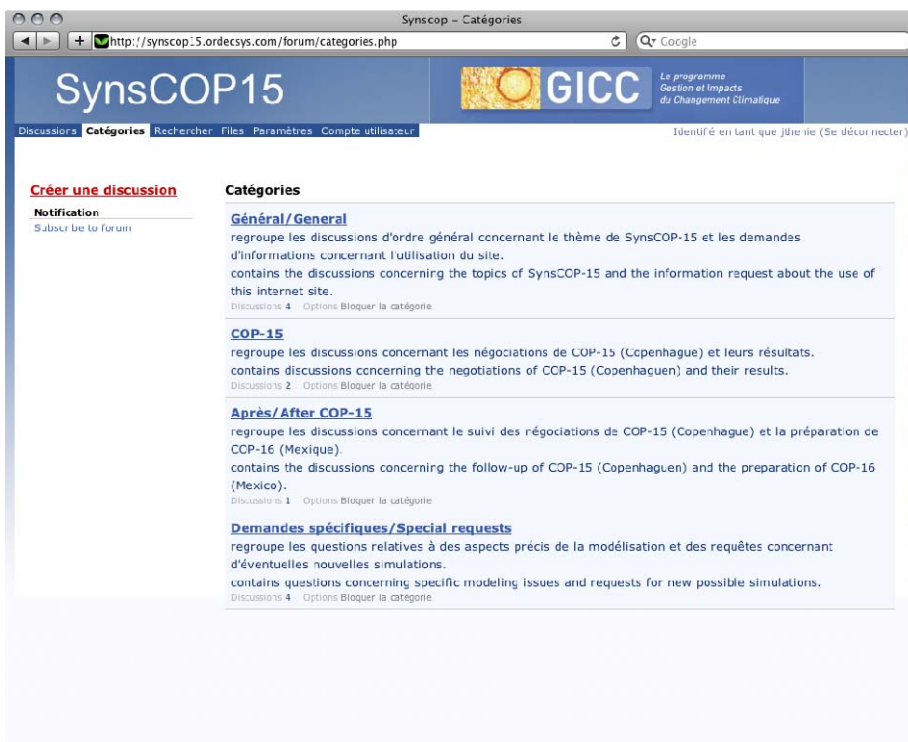


Nom d'utilisateur
Mot de passe
 Se souvenir de moi

Mot de passe oublié?

Une fois authentifié, l'utilisateur accède au menu principal du forum donnant accès à plusieurs catégories de discussions. Il existe 4 catégories actuellement :

- Général : regroupe les questions sur le fonctionnement du forum.
- COP-15 : regroupe les discussions autour de la 15^{ème} Conférence des Parties de Copenhague.
- Après COP-15 : regroupe les discussions autour de la 16^{ème} conférence des parties.
- Demandes spécifiques : regroupe les questions relatives à des aspects précis de la modélisation et des requêtes concernant d'éventuelles nouvelles simulations.



Une fois la catégorie choisie, une liste des discussions s'affiche. Cliquer sur la discussion voulue permet de dérouler les échanges déjà effectués. On peut alors ajouter un commentaire en utilisant le cadre inférieur de la page « ajouter vos commentaires ».

Synscop15 GICC Le programme Gestion et Impacts du Changement Climatique

Discussions Catégories Rechercher Fichs Paramètres Compte utilisateur Identifié en tant que jthenie (Se déconnecter)

Créer une discussion

Général/General: Vers un enrichissement du portefeuille de simulations Bas de la page

1 à 1 sur 1

ahaurie May 4th 2010 éditer retirer la discussion

Après discussion entre les modélisateurs il est apparu que nous devrions produire dans un avenir proche trois ensembles de simulations pour compléter celles qui sont déjà présentées sur ce site:

1. En utilisant les profils d'émission et de concentration déjà fournis par IAM pour 5 scénarios, on utilisera GENTF pour analyser les conséquences climatiques à moyen terme (disons en 2050) ainsi que les possibles variations de températures pour des coefficients de sensibilité au climat différents de celui actuellement retenu.
2. Réaliser, avec IAM une simulation où aucun accord international ne se met en place en 2030 et le système économie-climat continue sur une trajectoire "COP-15 forever"... Voir avec GENIE les conséquences climatiques d'un tel échec à long terme.
3. Réaliser avec GEMINI-E3 une simulation des impacts économiques de différents accords sur des marchés Internationaux de droits d'émission compatibles avec COP-15 et ses suites possibles.

1 à 1 sur 1

Ajouter vos commentaires

Chuchotez vos commentaires à (facultatif)

Entrez vos commentaires

grande saisie

Si l'on souhaite commencer une nouvelle discussion, il faut cliquer sur « créer une discussion » dans l'angle supérieur gauche. On accède alors à la page de création d'une discussion. On en choisit la catégorie, et on peut éventuellement joindre un fichier en copie.

Synscop15 GICC Le programme Gestion et Impacts du Changement Climatique

Discussions Catégories Rechercher Fichs Paramètres Compte utilisateur Identifié en tant que jthenie (Se déconnecter)

Créer une discussion

Options
Retour aux Discussions

Créer une discussion

Choisissez une catégorie pour cette discussion

Général/General

Entrez votre sujet de discussion

Chuchotez vos commentaires à (facultatif)

Entrez vos commentaires

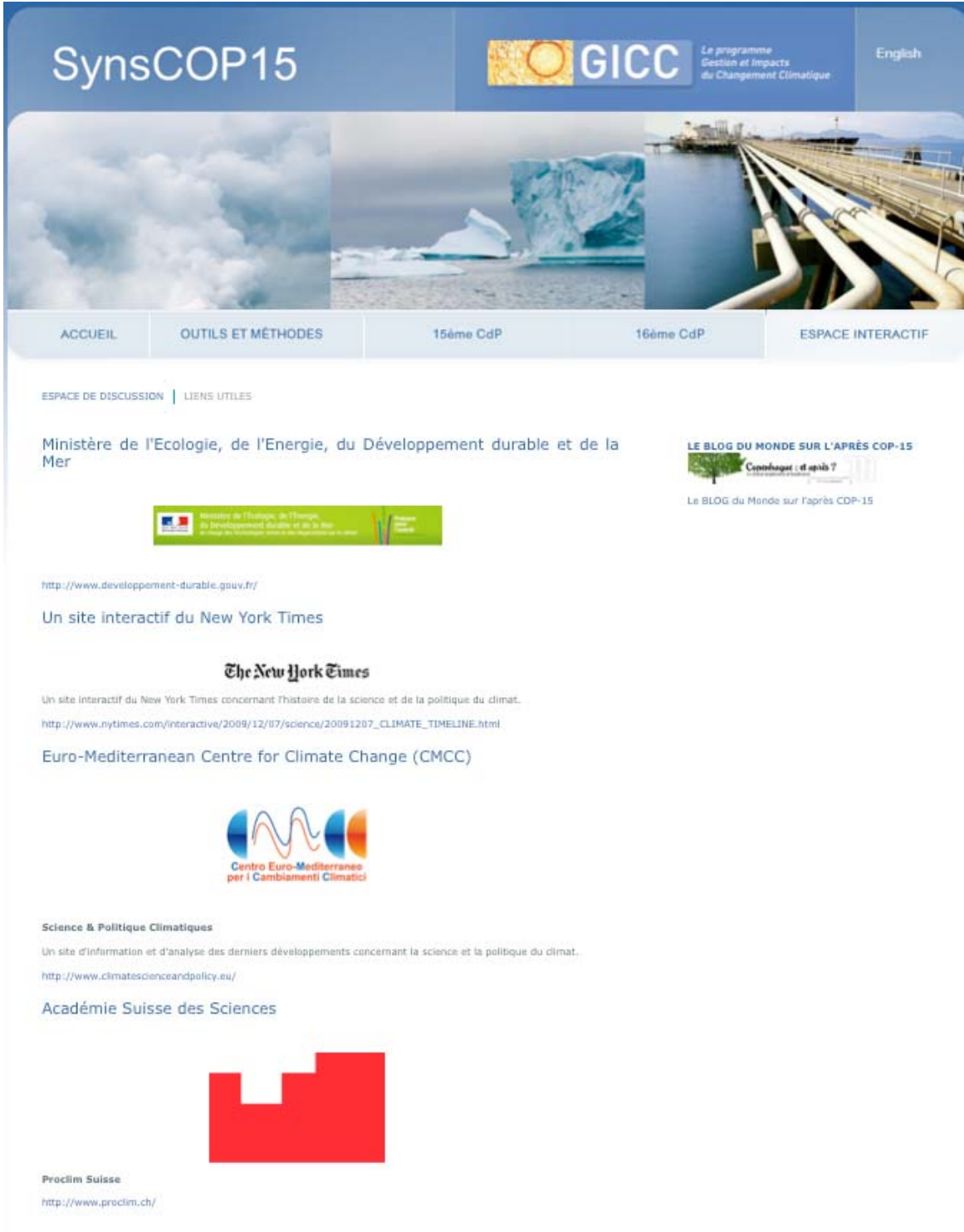
grande saisie

Attachments Parcourir...




Démarrer la discussion [Annuler et revenir en arrière](#)

LIENS UTILES

Dans cet espace, nous proposons quelques liens utiles vers des sites internet pertinents en lien avec notre outil :



The screenshot shows the SynsCOP15 website interface. At the top, there is a header with the title "SynsCOP15", the GICC logo (Le programme Gestion et Impacts du Changement Climatique), and a language selector for "English". Below the header is a banner image with three panels: clouds, an iceberg, and an industrial facility. A navigation menu contains: ACCUEIL, OUTILS ET METHODES, 15ème CdP, 16ème CdP, and ESPACE INTERACTIF. The main content area is titled "ESPACE DE DISCUSSION | LIENS UTILES". It lists several resources:

- Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer**
Logo: 
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/>
- Un site interactif du New York Times**
The New York Times
Un site interactif du New York Times concernant l'histoire de la science et de la politique du climat.
http://www.nytimes.com/interactive/2009/12/07/science/20091207_CLIMATE_TIMELINE.html
- Euro-Mediterranean Centre for Climate Change (CMCC)**
Logo: 
Science & Politique Climatiques
Un site d'information et d'analyse des derniers développements concernant la science et la politique du climat.
<http://www.climate-science-and-policy.eu/>
- Académie Suisse des Sciences**
Logo: 
Proclim Suisse
<http://www.proclim.ch/>

Le site internet comporte de nombreux éléments sonores et visuels. Pour le moment, il est possible d'accéder à différentes présentations, en français ou en anglais :

- Une présentation audio-visuelle du site internet.
- Une présentation du scénario de référence (*Business as Usual*)
- Une présentation du scénario Echec des négociations (15^{ème} CdP)
- Une présentation du scénario Accord à minima au sein de l'OCDE (15^{ème} CdP)

A terme, nous aimerions proposer une présentation pour chaque scénario des 15^{ème} et 16^{ème} CdP.

Enfin, nous envisageons d'accompagner les pages ne présentant pas de présentation audio-visuelle par des accompagnements sonores, qui indiqueraient les éléments principaux de la page, les résultats primordiaux de chaque scénario.

8.3. MAINTENANCE DU SITE INTERNET

Le site internet a été élaboré au fur et à mesure du projet, avec deux mises à jour importantes avant chacune des 15 et 16^{ème} Conférences des Parties. Le site internet a pu servir d'outil d'évaluation et d'aide à la décision durant les Conférence des Parties. Il peut maintenant être utilisé comme un outil de simulation.

Un message apparaît maintenant sur l'accueil du site internet précisant que le site a été élaboré pour une utilisation durant les deux dernières CdP, et qu'il peut maintenant servir d'outil de modélisation, d'évaluation, et qu'il est possible, en contactant les modélisateurs, de commander de nouveaux scénarios, qui pourraient, par exemple, correspondre aux différentes décisions qui pourraient être prises lors de la prochaine Conférence des Parties.

9. RESULTATS DES SIMULATIONS DE LA PHASE I (15^{EME} CDP)

Dans cette section, nous décrivons la nature des résultats présentés sur le site. Puis nous indiquons les principaux résultats obtenus à l'aide des trois modèles sans prétendre à une présentation exhaustive, qui peut être faite en accédant au site lui-même.

9.1. ORGANISATION DES RESULTATS

Pour chacun des scénarios décrits dans le chapitre précédent, le site Internet propose de nombreux résultats regroupés en 4 sections :

ECONOMIE

- Surplus (par pays, de 2010 à 2030) exprimé en pourcentage de la consommation des ménages (cf Bernard et Vielle (2003)) : Le surplus est calculé à partir de la variation de revenu et en ajoutant la variation compensatrice de revenu (CVI), en comparant le scénario en cours avec le scénario référence. Source : GEMINI-E3.
- Achat et ventes de permis d'émission (en millions de tonnes de carbone, par pays, de 2010 à 2030). Source : GEMINI-E3.
- Prix du CO₂ (en euros (€2005) par tonne de CO₂, par pays de 2010 à 2030) : deux prix subsistent jusqu'en 2020 (un prix ETS, un prix hors ETS) puis les deux marchés fusionnent (à partir de 2021). Source : GEMINI-E3.
- Coût de la stratégie: Valeur actuelle nette (VAN) du coût de la stratégie (donnée en % de la VAN du PIB cumulé au cours du siècle). Source : TIAM.

EMISSIONS

- Émissions de gaz à effet de serre (en millions de tonnes d'équivalent carbone, par an, par pays, de 2010 à 2030). Source : GEMINI-E3.
- Les émissions mondiales de CO₂, CH₄ et N₂O en gigatonnes d'équivalent carbone, de 2005 à 2105. Source : TIAM.

ENERGIE - TECHNOLOGIE

- Quantité cumulée de carbone séquestré dans les puits géologiques (en gigatonnes de carbone). Source : TIAM.
- Énergie primaire (en supposant FEQ = 1 pour les énergies non fossiles) (par énergie primaire, en exajoules, de 2005 à 2105). Source : TIAM.
- Production d'électricité (par source de production, en Terawatt-heures (milliards de kWh) de 2005 à 2105). Source : TIAM.

Consommation d'énergie par secteurs d'utilisation finale, y compris à des fins non énergétiques (par énergie, en exajoules, de 2005 à 2105), source : TIAM.

CLIMAT

- Évolution, en valeur, de trois paramètres climatiques entre 2005 et 2105 : température atmosphérique de surface, carbone dans la végétation, couverture végétale. source : GENIE.
- Cartes en 2 dimensions (grille de 64x32) représentant le Réchauffement, en valeur, (moyenne ou l'écart-type) de la température atmosphérique de surface entre 2005 et 2105 (en degrés Celsius). Source : GENIE.

9.2. RESULTATS DES SIMULATIONS REALISEES AVEC GEMINI-E3

Dans tous les cas, jusqu'en 2020, nous supposons que l'Europe met en œuvre le paquet énergie climat, qui se traduit par un prix du carbone au secteur ETS et des prix du CO₂ au sein de chacun des pays pour les secteurs non ETS sur la base des allocations définies dans la directive énergie-climat. A partir de 2021 nous supposons la participation de l'Union Européenne à un marché mondial du CO₂, la répartition des responsabilités (« *burden sharing* ») entre les pays membres doit alors être définie et faire l'objet d'une négociation compte tenu de l'objectif global de -75% à l'horizon 2050. Nous avons choisi d'utiliser des règles classiques d'allocation basées sur différents critères (population, émission, PIB) en faisant varier le poids de chacun des critères. Les scénarios ci-après supposent à ce stade que le « *burden sharing* » entre pays européens est basé sur la population de chacun des Etats membres.

SCENARIO 1 : ECHEC DES NEGOCIATIONS

Le tableau 18 montre le prix du CO₂. Jusqu'en 2020, deux prix du CO₂ coexisteraient un pour le secteur ETS et un autre pour les secteurs non ETS, le prix de l'ETS serait égal à 32 € en 2020 et 73 € pour le secteur non ETS. À partir de 2021 l'adoption par les autres pays industrialisés de réductions des émissions et la mise en place au sein de ces même pays d'un marché de permis d'émission internationale fait chuter le prix qui se fixe à 28 € en 2025 puis remonte à 83 € en 2030.

Tableau 18 : Prix du CO₂ en € 2005 par tonne – Scénario 1

	2010	2015	2020	2025	2030
DEU	2	23	73	28	83
FRA	2	23	73	28	83
GBR	2	23	73	28	83
ITA	2	23	73	28	83
POL	2	23	73	28	83
ROE	2	23	73	28	83
ETS	7	16	32	28	83
USA				28	83
JAP				28	83
CAZ				28	83
RUS					
CHI					
IND					
BRA					
ROW					

Les échanges de permis d'émission seraient bien évidemment conditionnés par le degré d'ouverture du marché, jusqu'en 2020 la Pologne et le reste de l'Union Européenne (ROE) sont les vendeurs nets de permis, puis les Etats-Unis deviennent des offreurs nets de permis compte tenu de leurs possibilités de réduction et de leurs dotations initiales. Les échanges de permis vont des pays industrialisés hors Europe vers les pays de l'Union européenne.

Tableau 19 : Échange de permis d'émission en MT de carbone-équivalent – Scénario 1

	2010	2015	2020	2025	2030
DEU	0	-7	-11	-124	-93
FRA	-3	-8	-14	-3	-7
GBR	-3	-9	-14	-36	-32
ITA	3	3	4	0	-5
POL	3	12	20	-23	-18
ROE	1	9	15	-60	-48
USA				170	126
JAP				25	29
CAZ				51	47
RUS					
CHI					
IND					
BRA					
ROW					

(- achat, + vente)

Les coûts encourus par chacune des zones seraient très contrastés, on peut distinguer trois groupes de régions :

- Tout d'abord les pays européens qui font face à des coûts significatifs consécutifs à leurs engagements bien supérieurs aux autres pays industrialisés ;

-

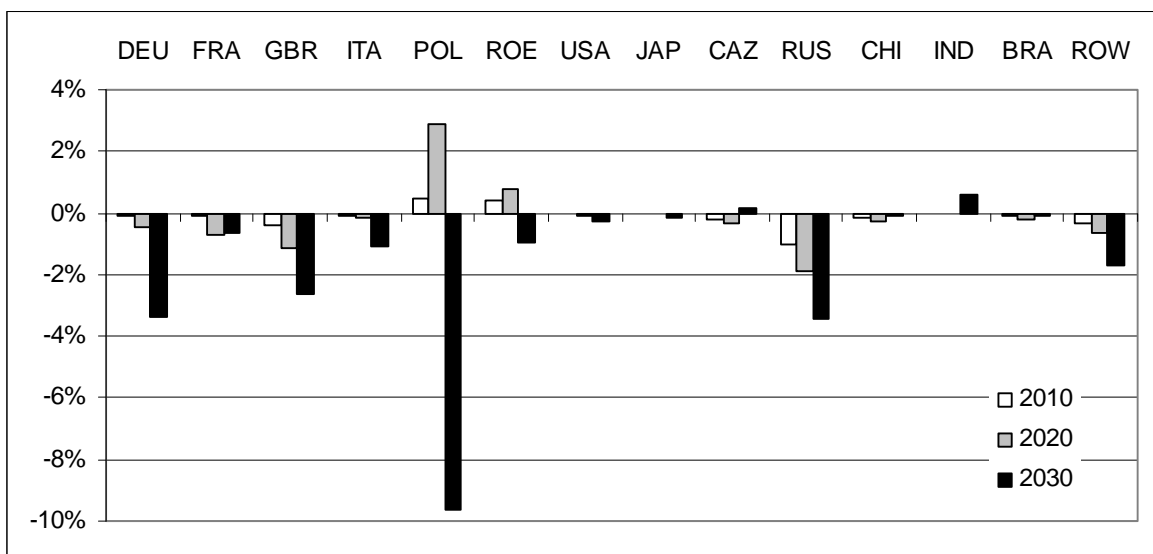


Figure 19 : Surplus en % de la consommation finale des ménages – Scénario 1

- Ensuite les pays exportateurs d'énergie qui font face à des coûts significatifs et parfois élevés. On trouve dans ce groupe la Russie et le Reste du Monde. Cette perte de bien-être est bien évidemment due aux pertes de revenus liées à la baisse des exportations d'énergie ;
- Enfin les autres pays qui seraient peu affectés dans ce scénario.

SCENARIO 2 : ACCORD A MINIMA AU SEIN DES PAYS INDUSTRIALISES

Les pays industrialisés (excepté la Russie) remplissent leurs engagements en 2020, et mettent en place progressivement à partir de 2021 un marché international de permis d'émission pour remplir en 2030 des engagements compatibles avec leurs objectifs de 2050. La Russie et les autres pays ne font rien. La réduction de gaz à effet de serre mondiale passerait à 13% en 2030, le prix du CO₂ augmenterait significativement par rapport au scénario 1 passant ainsi en 2030 à 169 € soit une augmentation de 90%

Tableau 20 : Prix du CO₂ en € 2005 par tonne – Scénario 2

	2010	2015	2020	2025	2030
DEU	3	27	83	84	168
FRA	3	27	83	84	168
GBR	3	27	83	84	168
ITA	3	27	83	84	168
POL	3	27	83	84	168
ROE	3	27	83	84	168
ETS	7	16	33	84	168
USA	6	16	37	84	168
JAP	8	19	34	84	168
CAZ	6	18	44	84	168
RUS					
CHI					
IND					
BRA					
ROW					

Compte tenu de leurs engagements plus importants en matière de lutte contre le changement climatique, les Etats-Unis auraient moins de permis à vendre, les flux d'échange entre pays s'en trouveraient limités même si l'Union Européenne resterait un acheteur net.

L'augmentation du prix du CO₂ pénaliserait les pays mettant en place une politique de lutte contre le changement climatique par rapport au scénario 1, l'extrême dépendance de la Pologne au charbon la pénaliserait très fortement nécessitant à terme d'envisager des compensations au sein de l'Union Européenne sous forme par exemple d'une dotation supplémentaire de droit d'émission.

Tableau 21 : Échanges de permis d'émission en MT de carbone-équivalent. – Scénario 2

	2010	2015	2020	2025	2030
DEU	0	-7	-11	-66	-53
FRA	-3	-8	-14	12	6
GBR	-3	-9	-13	-10	-12
ITA	2	2	4	14	6
POL	3	13	21	0	-3
ROE	1	9	15	6	2
USA				16	7
JAP				12	16
CAZ				15	31
RUS					
CHI					
IND					
BRA					
ROW					

(- achat, + vente)

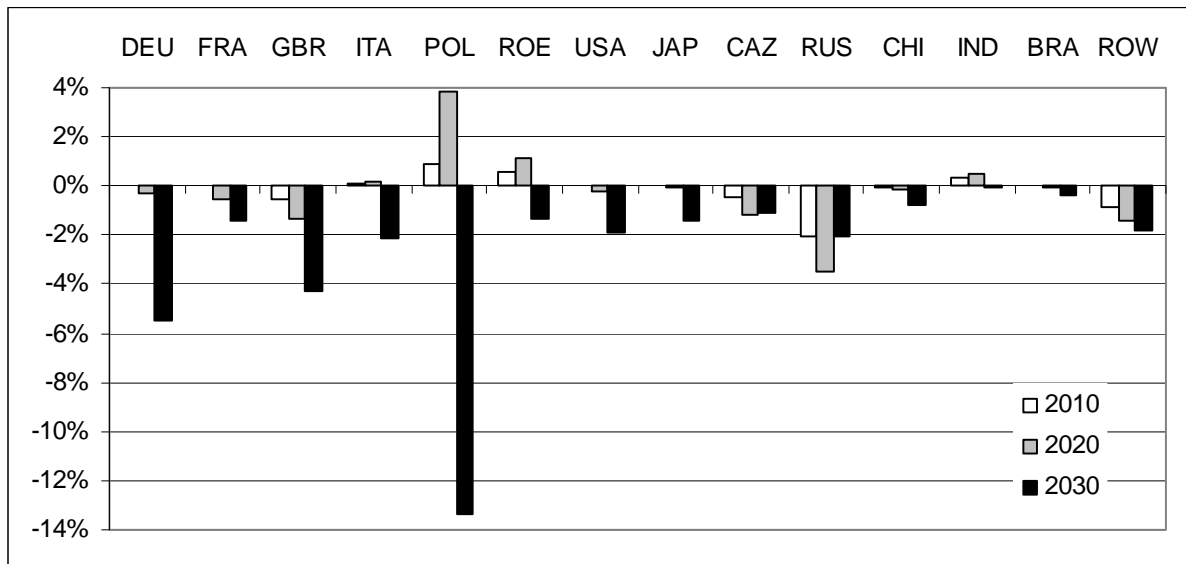


Figure 20 : Surplus en % de la consommation finale des ménages – Scénario 2

**SCENARIO 3 : ACCORD A MINIMA AU SEIN DES PAYS INDUSTRIALISES
+ RUSSIE**

Même scénario qu'en 2, avec en plus l'adhésion de la Russie. La participation de la Russie au marché d'émission permettrait de faire baisser le prix du CO₂ à 131 \$ en 2001, ce qui réduirait le coût de mise en œuvre de la politique climatique pour les pays industrialisés. La Russie bénéficierait de sa participation à la politique climatique grâce à des ventes de permis de plus de 174 Mt de carbone, elle serait en position de quasi-monopole sur ce marché, son gain en terme de surplus est évalué à plus de 7% de sa consommation finale.

Tableau 22 : Prix du CO2 en € 2005 par tonne – Scénario 3

	2010	2015	2020	2025	2030
DEU	3	27	83	64	131
FRA	3	27	83	64	131
GBR	3	27	83	64	131
ITA	3	27	83	64	131
POL	3	27	83	64	131
ROE	3	27	83	64	131
ETS	7	16	33	64	131
USA	6	16	37	64	131
JAP	8	19	34	64	131
CAZ	6	18	44	64	131
RUS				64	131
CHI					
IND					
BRA					
ROW					

Tableau 23 : Échange de permis d'émission en MT de carbone-équival. – Scénario 3

	2010	2015	2020	2025	2030
DEU	0	-7	-11	-83	-70
FRA	-3	-8	-14	7	1
GBR	-3	-9	-13	-17	-20
ITA	2	2	4	8	-1
POL	3	13	21	-7	-10
ROE	1	9	15	-14	-18
USA				-77	-76
JAP				-2	1
CAZ	0	0		0	18
RUS				186	174
CHI					
IND					
BRA					
ROW					

(- achat, + vente)

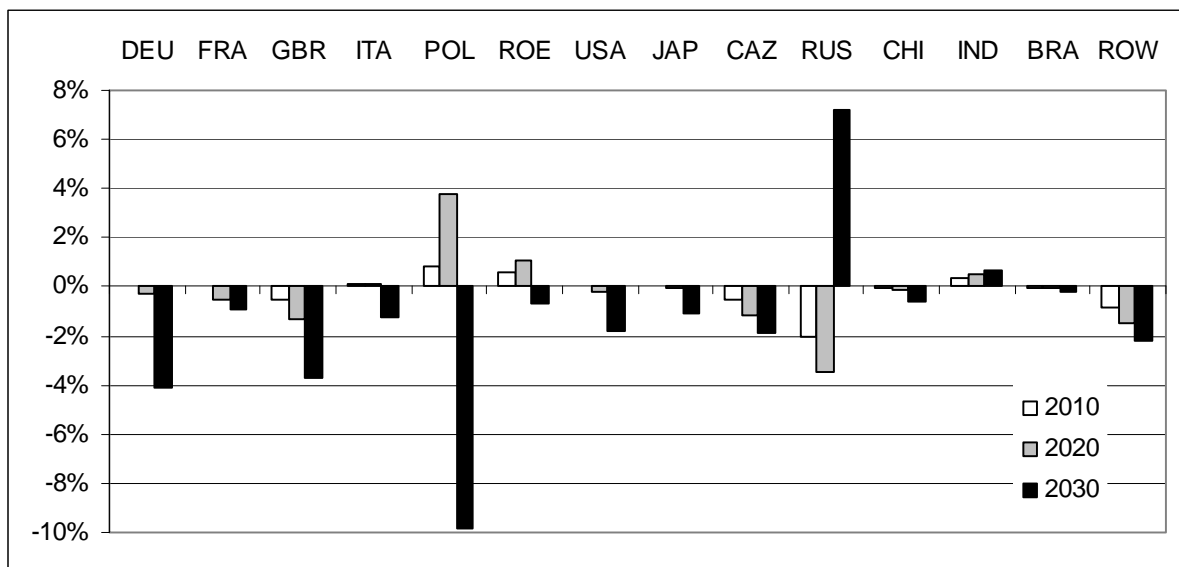


Figure 21 : Surplus en % de la consommation finale des ménages – Scénario 3

SCENARIO 4 : ACCORD INTERNATIONAL EN FAVEUR DU CLIMAT LIMITE AU G20

La baisse du prix du CO₂ limiterait le coût de mise en œuvre de la politique climatique pour les pays concernés, cependant la Russie serait fortement pénalisée, elle ne bénéficierait plus du revenu important provenant des ventes de permis qui s'établirait à 18 millions de tonnes, et ferait face à des baisses de revenu d'exportation d'énergie. Au contraire la Chine bénéficierait de revenu important issu de ventes de permis. L'Inde ne bénéficierait pas de ce marché : au contraire, l'adoption d'un engagement en matière de réduction des gaz a effet de serre la pénaliserait, à l'inverse la Chine. La participation de l'Inde à un tel accord semble donc très hypothétique. La situation du Brésil semble moins problématique, son bien-être étant quasiment inchangé par rapport au scénario précédent. Pour l'Europe, le passage à un objectif de -30% en 2020, conduirait à augmenter très fortement le prix de l'ETS qui passerait de 33\$ à 90\$, la répercussion de ce prix sur le prix de l'électricité et du raffinage conduirait à une baisse de consommation dans le secteur non-ETS permettant de baisser le prix du CO₂ pour ces secteurs par rapport au scénario 3 alors même que l'objectif pour le non-ETS serait plus contraignant. La Pologne subirait de plein fouet le renchérissement du prix du CO₂ dans l'ETS compte tenu de son usage important du charbon dans la production d'électricité.

Tableau 24 : Prix du CO₂ en € 2005 par tonne – Scénario 4

	2010	2015	2020	2025	2030
DEU	5	31	71	19	39
FRA	5	31	71	19	39
GBR	5	31	71	19	39
ITA	5	31	71	19	39
POL	5	31	71	19	39
ROE	5	31	71	19	39
ETS	12	35	90	19	39
USA	6	16	37	19	39
JAP	8	19	33	19	39
CAZ	6	18	44	19	39
RUS				19	39
CHI				19	39
IND				19	39
BRA				19	39
ROW					

Tableau 25 : Échange de permis d'émission en MT de C-équiv. – Scénario 4

	2010	2015	2020	2025	2030
DEU	-1	-7	-10	-166	-152
FRA	-3	-8	-15	-24	-33
GBR	-3	-8	-13	-61	-65
ITA	2	2	3	-18	-28
POL	4	13	20	-43	-45
ROE	0	9	15	-119	-128
USA				-453	-482
JAP				-50	-55
CAZ				-52	-40
RUS				61	18
CHI				889	985
IND				29	20
BRA				9	5
ROW					

(- achat, + vente)

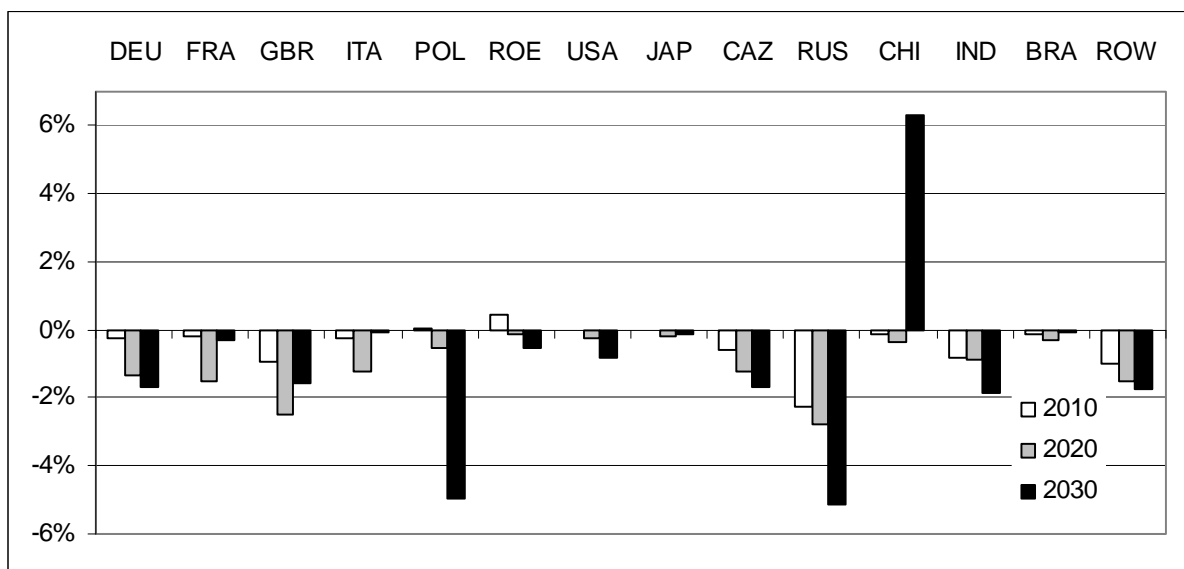


Figure 22 : Surplus en % de la consommation finale des ménages – Scénario 4

SCENARIO 5 : VERS UN ACCORD INTERNATIONAL EN FAVEUR DU CLIMAT

Les émissions baisseraient en 2030 de 31%, le prix du CO₂ serait égal à 23 \$ en 2030 du fait de la participation de l'ensemble des pays. La Chine resterait un vendeur important de permis, mais serait concurrencée par le reste du monde, deuxième plus important vendeur. Pour autant, ces ventes de permis ne conduiraient pas à un surplus positif pour le Reste du Monde, même si son surplus s'améliorerait par rapport au scénario 4.

Tableau 26 : Prix du CO2 en € 2005 par tonne- Scénario 5

	2010	2015	2020	2025	2030
DEU	5	31	71	13	23
FRA	5	31	71	13	23
GBR	5	31	71	13	23
ITA	5	31	71	13	23
POL	5	31	71	13	23
ROE	5	31	71	13	23
ETS	12	35	90	13	23
USA	6	16	37	13	23
JAP	8	19	33	13	23
CAZ	6	18	44	13	23
RUS				13	23
CHI				13	23
IND				13	23
BRA				13	23
ROW				13	23

Tableau 27 : Échange de permis d'émission en MT de C-équiv. – Scénario 5

	2010	2015	2020	2025	2030
DEU	-1	-7	-10	-183	-180
FRA	-3	-8	-15	-30	-41
GBR	-3	-8	-13	-69	-77
ITA	2	2	3	-19	-30
POL	4	13	20	-50	-56
ROE	0	9	15	-141	-159
USA				-569	-654
JAP				-64	-76
CAZ				-75	-61
RUS				16	-51
CHI				743	781
IND				-22	-57
BRA				-1	-7
ROW				463	668

(- achat, + vente)

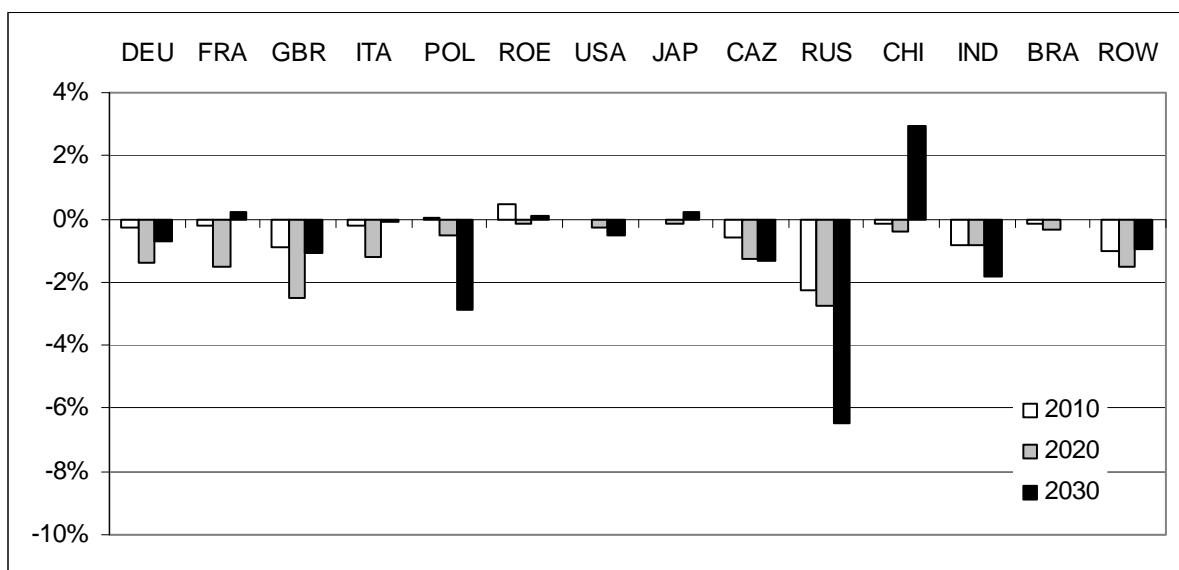


Figure 23 : Surplus en % de la consommation finale des ménages – Scénario 5

CONCLUSION

Le prix du CO₂ dépend de façon très importante du degré de participation des pays à un accord climatique. Dans nos simulations il passe ainsi en 2030 de 168 \$ au maximum à 23 \$ au minimum. Les potentiels de réduction élevés se situent dans les pays en voie de développement et en particulier en Chine et dans le Reste du Monde. Les pays industrialisés ont en règle générale tout intérêt à une participation accrue pour bénéficier des possibilités de réduction à faible coût des pays en voie de développement. La participation des PVD à un accord climatique nécessite de les différencier en différents types. Si la Chine semble toujours bénéficier d'une participation à un accord climatique, l'attrait pour l'Inde et les pays du Reste du Monde (ROW) est moins évident, le Brésil n'encourant pas un coût élevé pour sa part. Enfin la Russie est toujours fortement pénalisée sauf dans le scénario 3 où du fait de la non participation des PVD elle peut vendre à un prix élevé des permis d'émission aux autres pays industrialisés. Un élément clé de ces simulations est bien la dotation initiale en matière de droits d'émission, dont on comprend qu'elle représentera un enjeu central de toute négociation, car si le coût mondial d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre reste modéré, sa répartition entre les pays peut conduire à des coûts parfois très importants.

9.3. ANALYSE DES SIMULATIONS RÉALISÉES AVEC TIAM

Nous proposons ici de reprendre les principaux résultats des scénarios (pouvant être aussi appelés politiques) de la phase I. Pour plus de détails, il convient de consulter directement le site Internet, où les figures par scénario ainsi que des comparatifs de scénarios sont disponibles.

QUELQUES RÉSULTATS SUR LES COÛTS DE RÉDUCTION

Quel que soit le scénario envisagé, la limite de l'augmentation future de la température à un maximum de 2°C requiert des changements drastiques dans tous les secteurs, énergétiques et non-énergétiques, en tenant compte des caractéristiques du système énergétique et des options de réduction des gaz à effet de serre disponibles dans TIAM. Ainsi, tandis que les émissions nettes de CO₂ deviennent négatives grâce à la capture et la séquestration du carbone provenant de centrales à base de biomasse ou de procédés Fischer-Tropsch (carburants synthétiques), les émissions autres que le CO₂ et pour lesquelles le potentiel d'atténuation est limité, par exemple les émissions provenant de l'agriculture, constituent une limite à la réalisabilité des cibles de réduction.

Bien que sévère, la cible de 2°C reste réalisable quelles que soient les politiques implantées sur l'horizon 2005-2030. Les politiques correspondant à de faibles efforts d'atténuation à moyen terme, eux-mêmes correspondant à un nombre limité de pays participant à l'accord climatique, résultent en une augmentation du coût total actualisé des stratégies sur tout l'horizon (2.3% de la valeur actualisée du PIB cumulé sur tout l'horizon, dans le cas de l'optimum social (Coopération de tous les pays dès 2010 en vue d'atteindre collectivement la cible de 2°C), 2.5% dans le cas de la politique 1 à moyen terme suivie de la coopération totale, 2.8% dans le cas de la politique 5). Autrement dit, les stratégies à mettre en œuvre après 2030 pour compenser le manque d'action avant 2030, doivent compenser les réductions 'perdues' en première partie du siècle, ce qui résulte en un surcoût global.

Le prix du carbone dans le marché international reflète également la sévérité de la cible, ainsi que l'avantage à inclure le plus possible de pays dans le marché international. Le prix en 2050 double quasiment entre la situation théorique de la coopération entre tous les pays dès 2010, et le cas de l'échec des négociations à court terme (de 750 \$₂₀₀₀/tCO₂ dans le cas l'optimum social à presque 1400\$₂₀₀₀/tCO₂ dans le cas de la politique 1). La participation des pays en développement à l'accord international contribue évidemment à apporter un potentiel additionnel de mesures de réduction des GES, et à meilleur coût étant donné les caractéristiques des systèmes énergétiques de ces pays.

La relaxation de la cible climatique à 2.5°C (au lieu de 2.0°C) a un effet drastique sur la réduction des coûts des stratégies à mettre en œuvre (0.7% du PIB cumulé actualisé) ainsi que des prix du carbone à moyen terme (145\$₂₀₀₀/tCO₂ en 2050 dans le cas de l'optimum social). Le prix du carbone à long terme reste toutefois à peu près le même dans toutes les stratégies (environ 1000\$/tCO₂).

EMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) atteignent leur valeur maximale en 2025 dans le cas de la politique 1, mais 2015 dans le cas de la politique 5. La conséquence, permettant de compenser le délai dans la mise en œuvre des mesures de réduction des GES, est que le système énergétique devient libre de toute émission de CO₂ dix ans plus tôt dans le cas de la politique 1 (2045) par rapport à la politique 2 (2055).

QUELQUES CHOIX TECHNOLOGIQUES PRÉFÉRÉS DANS LES SECTEURS DE CONSOMMATION FINALE

Dans tous les scénarios climatiques, une augmentation importante de la consommation d'électricité est observée, remplaçant principalement le charbon dans les industries intensives en énergie et le gaz dans les secteurs résidentiel et commercial. Dans le transport, la pénétration des biocarburants est accélérée par rapport au scénario de référence (la production de ces carburants inclut la capture et séquestration du CO₂) tandis que les véhicules hybrides (de type *plug-in*) et à hydrogène (piles à combustible) pénètrent dans la seconde moitié du siècle.

Les différents scénarios politiques à moyen terme ne modifient pas les changements technologiques à long terme, ni la *nature* des changements technologiques à moyen terme, mais ils modifient nettement leur *rythme* d'implantations : les scénarios d'accords limités entre pays résultent en l'accélération des changements technologiques observés au milieu du siècle (2040-2060) : la consommation d'électricité en 2050 est plus élevée de 40% dans le cas de la politique 1 par rapport au cas de la politique 5.

À noter également la diminution des demandes en services énergétiques des secteurs finaux, jusqu'à 20% pour certains d'entre eux, sous l'effet de l'augmentation de leur prix implicite dans les scénarios climatiques. Aucune différence n'est toutefois notée entre les différents scénarios.

Enfin, on notera qu'aucun rebond de la consommation de pétrole, particulièrement dans le transport, n'est observé dans les pays qui ne participent pas à l'accord

climatique. Un tel rebond aurait pu avoir lieu dû à la diminution du prix du pétrole en présence de cibles climatiques sévères.

QUELQUES CHOIX TECHNOLOGIQUES PRÉFÉRÉS DANS LE SECTEUR DE LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

La production d'électricité joue un rôle central dans les stratégies d'atténuation des GES. La capture et la séquestration du carbone fait partie des options technologiques préférées à moyen terme, jusqu'à ce que les énergies renouvelables deviennent meilleur marché. Il est intéressant de noter la préférence des centrales au gaz avec capture, malgré leur coût plus élevé que les centrales au charbon avec capture. Une raison vraisemblable réside dans les émissions résiduelles de ces centrales, moins élevées dans les centrales au gaz. Cette préférence n'est observée que dans le cas des cibles climatiques sévères ; ainsi, les centrales au charbon avec capture sont préférées dans le cas de la cible de 2.5°C.

La pénétration des centrales à base de biomasse avec capture représente également une option technologique importante, puisqu'elle correspond à des émissions totales négatives. De telles émissions négatives sont indispensables pour satisfaire la cible visée, compensant les émissions des activités économiques pour lesquelles les options d'atténuation sont plus coûteuses (transport) ou insuffisantes disponibles (agriculture)

Ici aussi, les différentes politiques à moyen terme ne modifient pas les changements technologiques à long terme, ni la nature des changements technologiques à moyen terme. Toutefois, les politiques correspondant à des accords limités entre pays résultent en l'accélération des changements technologiques observés au milieu du siècle (2040-2060) : la production d'électricité de source renouvelable en 2050 est plus élevée de 10% dans le cas de la politique 1 par rapport au cas de la politique 5. Celle de sources fossiles avec capture est plus élevée de presque 15%.

La quantité de carbone séquestré dans les puits géologiques reste de l'ordre de 400 GtC dans tous les scénarios, ce qui est relativement optimiste mais néanmoins de l'ordre de grandeur habituellement observé (60-600 GtC)². Quand à la génération de source nucléaire, elle reste la même dans tous les scénarios. Il faut rappeler que dans TIAM, la pénétration des centrales nucléaires est contrôlée par des bornes visant à représenter les facteurs politiques et sociaux limitant la capacité nucléaire maximale autorisée dans chaque région (acceptabilité sociale, risques financiers, etc.)

QUELQUES CONSÉQUENCES SUR L'ÉNERGIE PRIMAIRE

Les modifications apportées au bilan énergétique primaire reflètent les changements technologiques observés dans les différents secteurs : augmentation de la biomasse, augmentation du gaz à mi-siècle, puis des énergies renouvelables. De faibles « fuites » d'émissions à moyen terme sont observées dans le cas des accords partiels, correspondant à une augmentation de l'extraction du gaz (dont la consommation augmente dans les scénarios climatiques) dans les pays non participant à l'accord climatique.

² IPCC (2005). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp

9.4. RÉSUMÉ DES RÉSULTATS DES SIMULATIONS FOURNIES PAR GENIE

Le scénario de référence promet un réchauffement climatique de 4.2°C (relatif à l'ère préindustrielle), alors que les scénarios politiques amènent tous à la même concentration des gaz à effet de serre en 2105. Les trajectoires d'émissions durant le siècle ne sont pas assez différentes pour générer des écarts importants entre les politiques, d'un point de vue climatique. A l'horizon 2105, c'est la contrainte de cible climatique imposée aux scénarios politiques qui dirige la trajectoire de concentration, non pas le fait que l'accord sur le climat soit international dès maintenant. Ce résultat confirme ceux obtenus dans de nombreuses études de ce type.

Nous présentons ici un bilan pour les 5 scénarios politiques : le réchauffement climatique est de 2.1°C dans chaque cas. Les cinq scénarios ont des concentrations similaires de gaz à effet de serre en 2105.

GENIE-2 montre une tendance bien connue du réchauffement climatique, semblable à celles observées dans de nombreuses simulations précédentes et présentées par le GIEC. Le réchauffement à 2100 est concentré sur les terres, en grande partie dû à l'inertie thermique des océans, et aux effets de rétroaction positive de la fonte des neiges. Un réchauffement plus intense dans les régions de haute latitude est également observé. Bien qu'en moyenne la quantité de carbone dans la masse végétale semble croître, l'ensemble des simulations montre que ce changement est de signe incertain (peut-être un changement négatif, soit une diminution de la quantité totale de carbone dans le végétal, comparée à 2005). Ce qui corrobore les résultats des modèles plus complexes (Friedlingstein et al. 2006). Le changement de signe est susceptible d'être guidé par l'augmentation des taux de respiration en basse latitude (en grande partie de la décomposition accrue) et par le stress hydrique, compensant l'effet fertilisant du CO₂ et la photosynthèse.

Bien que les prévisions de réchauffement soient similaires dans les deux modèles, GENIE-2 montre une plus grande dispersion (incertitude) des résultats que celle prédite par GENIE-1. Cela en raison de la plus grande complexité (prise en compte de la dynamique 3D) du modèle GENIE-2 comme l'ont montré des travaux récents (Crucifix 2006). Nous estimons que les variations calculées par GENIE-2 (écart-type autour de 1 ~ 2 ° C pour la température atmosphérique de surface pour le scénario de référence) sont les plus représentatives de l'incertitude réelle.

9.5. CONCLUSION DE LA PHASE I

Cette première phase du projet a atteint tous ses objectifs, et a de plus permis de progresser méthodologiquement dans la conception de la seconde phase. Les développements méthodologiques et théoriques du projet sont essentiellement tous achevés : mise au point des modèles, coordination de leur fonctionnement, émulation statistique, création d'un site Internet efficace. Ces développements méthodologiques ont été appliqués avec succès à cinq scénarios couvrant un assez large éventail de politiques au niveau international.

10. RESULTATS DES SIMULATIONS DE LA PHASE II (16^{EME} CDP)

10.1. RÉSULTATS DES VARIANTES ÉCONOMIQUES RÉALISÉES AVEC GEMINI-E3

ENGAGEMENTS MINIMAUX (*CPH LOW FOREVER*)

PAS DE MECANISME DE DEVELOPPEMENT PROPRE

Les échanges de permis d'émissions négociables sont dans un premier temps limités aux pays de l'Union Européenne jusqu'en 2020, puis le marché de permis négociables est étendu à l'ensemble des pays ayant contracté des engagements contraignants. En conséquence et jusqu'en 2020 plusieurs prix du CO2 subsistent :

- Deux au sein de l'union européenne (un pour le marché de l'ETS et un autre pour les autres secteurs ne participant pas à l'ETS) ;
- et un au sein de chaque zone géographique des autres pays de l'annexe 1.

La disparité des prix du CO2 fait apparaître tout l'intérêt de la mise en place d'un système international d'échange de permis, le Japon et l'Union Européenne font face à des prix du CO2 élevés, au contraire au sein de la Russie le prix du CO2 est très faible. Les Etats-Unis et la zone CAZ se situent dans une zone intermédiaire. En 2021 l'arrivée dans l'accord des pays émergents (Chine, Inde et Brésil) fait chuter le prix du CO2 et permet ainsi aux pays de l'annexe 1 l'achat de permis à bas coût, le prix du CO2 se situe ainsi à 12 € en 2030. Si les échanges de permis sont limités avant 2021, après cette date ces échanges représentent des montants importants allant jusqu'à représenter 25% des allocations initiales. La Chine est le principal pourvoyeur de permis ses ventes représentent 65% des ventes totales, vient ensuite l'Inde.

Concernant le coût de la mise en œuvre du scénario, deux périodes doivent être distinguées : 2010-2020 et 2021-2030. Avant l'intégration des pays émergents dans l'accord, les pays qui adoptent des engagements contraignants font face à un coût en terme de bien-être à l'exception de la France, de l'Italie, de la Pologne et de la zone ROE. Ces deux derniers pays bénéficient notamment des ventes de permis d'émission négociables liées à la règle retenue pour allouer les permis (basée sur la population) qui les avantage. Après 2021, la baisse du prix du CO2 permet de limiter le coût d'implémentation des réductions d'émission pour les pays de l'annexe 1, et génère pour la Chine et l'Inde (vendeurs nets) de substantiels revenus qui conduisent à des

gains en terme de bien-être. Au contraire le Brésil est pénalisé par l'introduction d'un prix du CO2. Le Reste du Monde qui n'adopte aucune contrainte d'émission fait face à un coût suite à des baisses de revenu liées aux exportations d'énergie (la zone Reste du Monde comprenant en effet des pays du Moyen Orient).

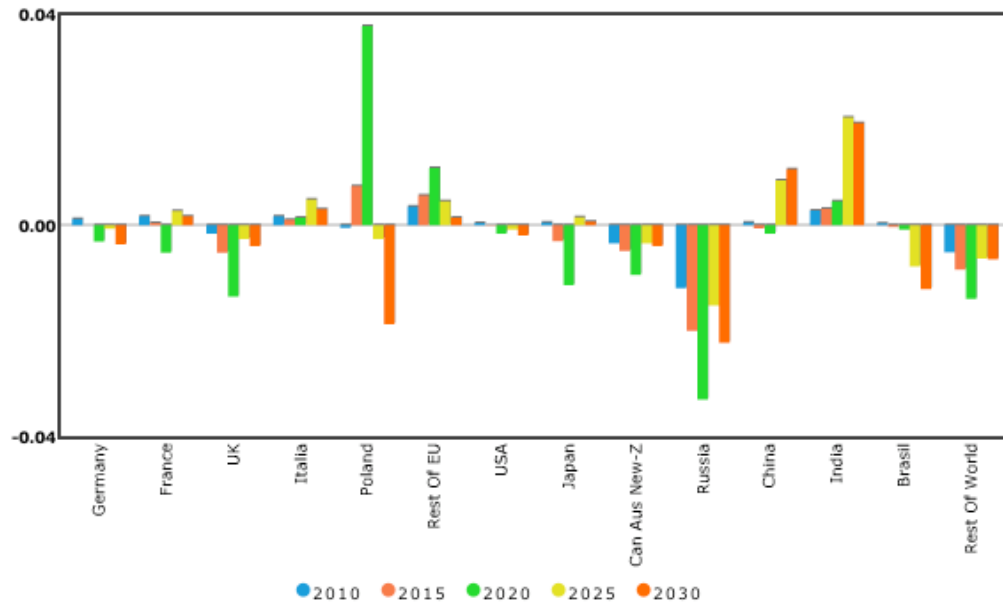
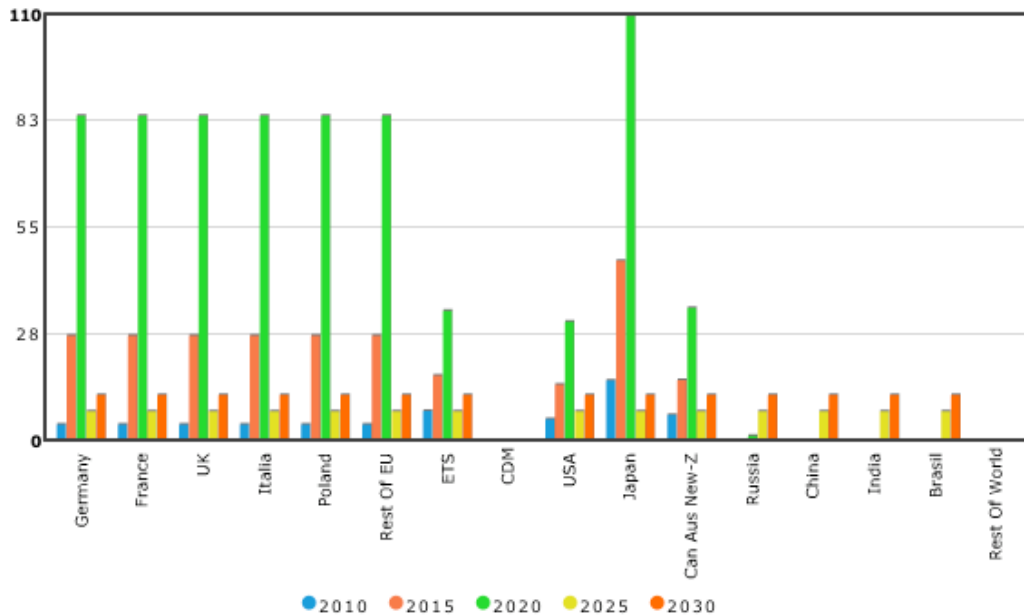


Figure 25 : Prix du CO2 en euros par tonne de CO2, 2005 Euros (CPH Low, pas de MDP)



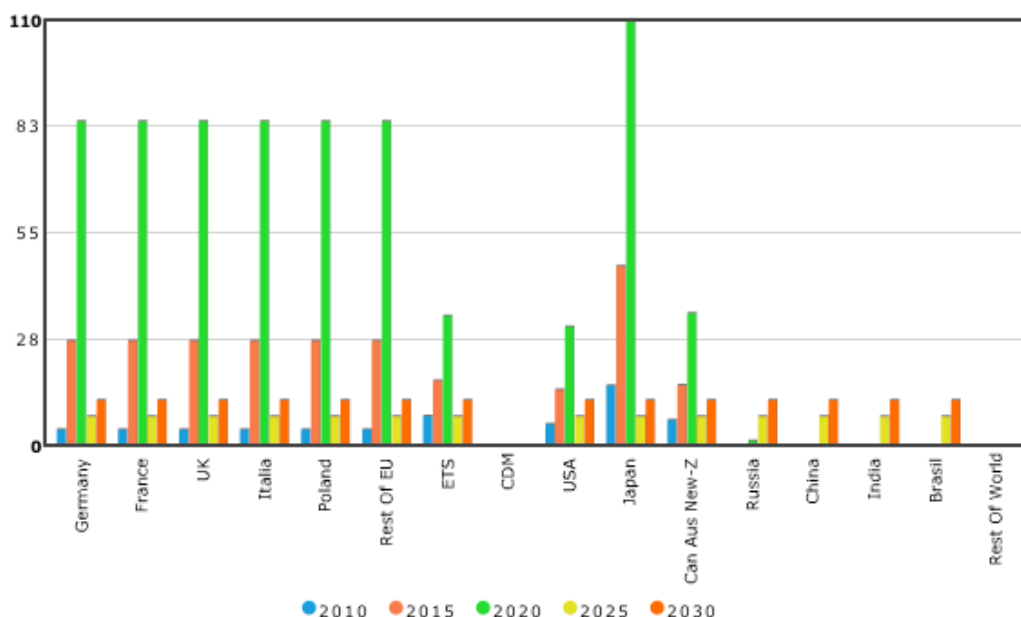


Figure 25 : Prix du CO2 en euros par tonne de CO2, 2005 Euros (CPH Low, pas de MDP)

MECANISME DE DEVELOPPEMENT PROPRE LIMITE A 5%

L'utilisation du Mécanisme de Développement Propre (MDP) permet de limiter significativement pour la première période (2010-2020) le prix du CO2. Le recours au MDP est limité dans un premier temps uniquement au secteur n'appartenant pas à l'ETS. Pour le marché de l'ETS l'impact est donc nul, le prix du CO2 reste inchangé. Au terme de la simulation (2030) le prix du CO2 baisse de 25% par rapport à un scénario sans MDP. Le prix du MDP serait sur la période 2010-2020 inférieur à 1 € (Il faut noter que nous ne supposons pas de coût administratif de mise en place du MDP). La Chine serait sur cette première période le principal vendeur de permis. Puis l'entrée dans l'accord des pays émergents réduirait l'attrait du MDP, en effet la Chine, l'Inde et le Brésil adoptant des engagements contraignants ne peuvent alors plus vendre de MDP, seule la zone Reste du Monde peut alors continuer à profiter du MDP. Le prix du MDP augmente alors de façon très importante (l'offre étant réduite) pour s'établir alors à 14 € en 2030 soit un prix supérieur au prix du CO2 échangé sur le marché international et égal à 9 €.

L'utilisation du MDP permet de limiter pour les pays de l'annexe 1 le coût de mise en œuvre d'une contrainte climatique en première période, pour les vendeurs nets de permis elle limite cependant les revenus qu'ils peuvent tirer de la vente de permis, c'est le cas pour la Pologne et la Russie. Pour les vendeurs de MDP, il y a toujours un gain à vendre même si ce gain est assez limité compte tenu du faible prix du MDP en première période. En seconde période la vente de MDP par le Reste du Monde réduit le gain que peuvent tirer la Chine et l'Inde de la vente des permis. Au contraire la vente

de MDP par le Reste du Monde limite les pertes de revenus liées à la baisse des exportations d'énergie.

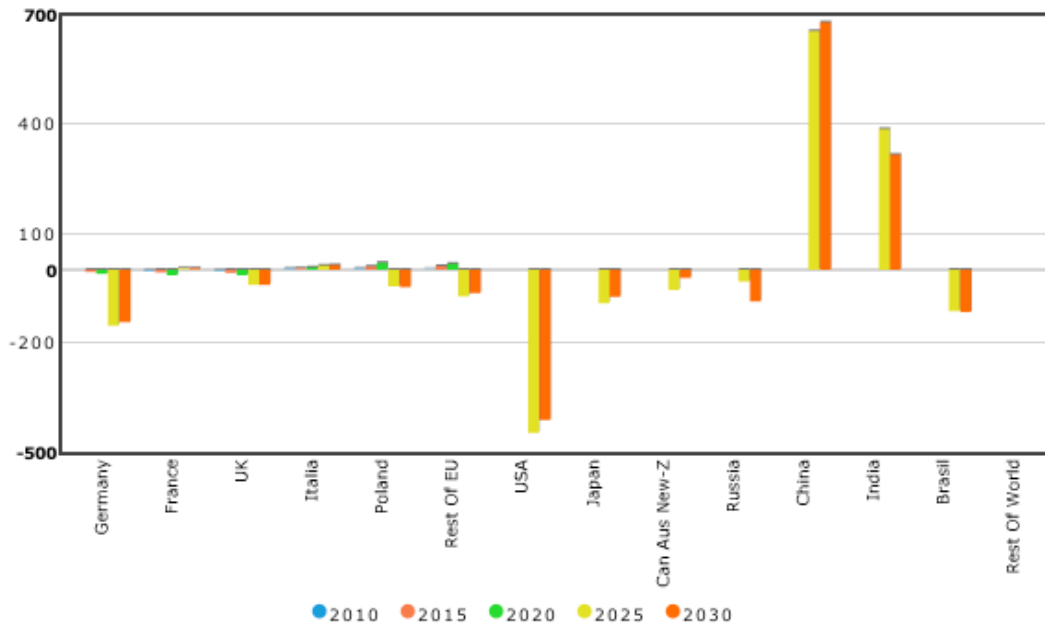


Figure 26 : permis d'émission vendus en million de tonnes de carbone par pays de 2010 à 2030

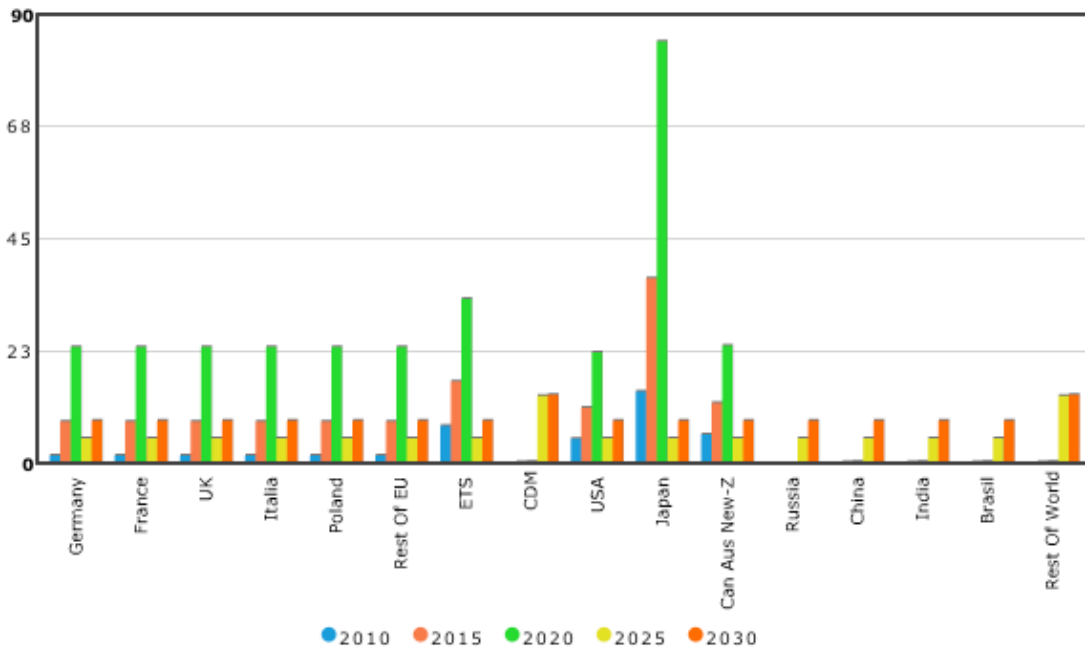


Figure 27 : prix du CO2 (+MDP) en euros par tonne de CO2 (2005 Euro)

PAS DE MDP ET ACHAT DE PERMIS LIMITE A 50%

Dans ce scénario, seule l'Allemagne a des achats de permis représentant plus de 50% de sa dotation initiale et ceci à partir de 2021. En 2025 ses achats de permis représentent 78% de son allocation et 73% en 2030. La mise en place d'un plafond maximum d'achat limité à 50% nécessite pour l'Allemagne d'imposer un prix du CO2 très supérieur à celui du marché international : celui-ci est égal à 33€ en 2030 pour un prix du CO2 international égal à 11 €.

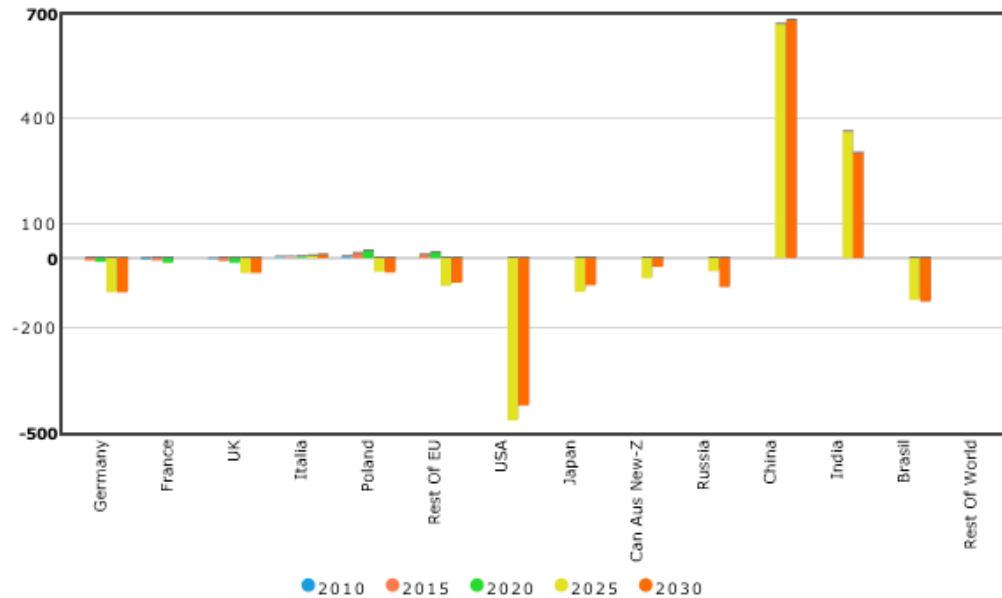


Figure 28 : permis d'émissions vendus en million de tonnes de carbone, par pays de 2010 à 2030

MDP LIMITE A 5% ET ACHAT DE PERMIS LIMITE A 50%

Dans ce scénario, seule l'Allemagne a des achats de permis représentant plus de 50% de sa dotation initiale et ceci à partir de 2021, en 2025 ses achats de permis représentent 78% de son allocation et 73% en 2030. La mise en place d'un plafond maximum d'achat limité à 50% nécessite pour l'Allemagne d'imposer un prix du CO2 très supérieur à celui du marché international celui-ci est égal à 28€ en 2030 pour un prix du CO2 international égal à 8 €.

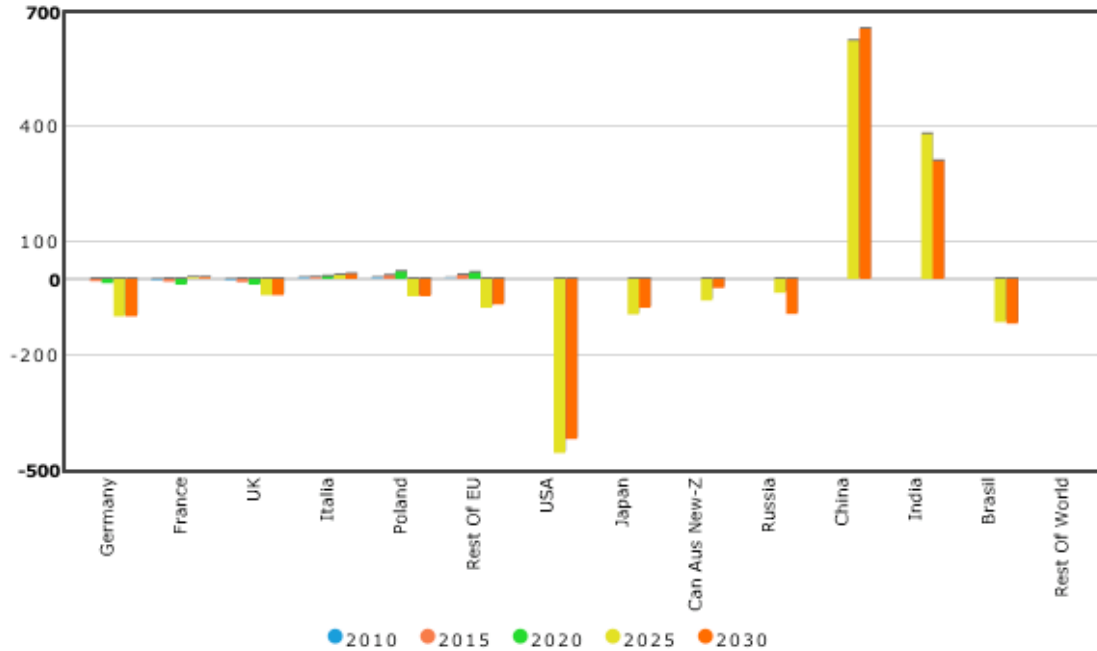


Figure 29 : permis d'émissions vendus en million de tonnes de carbone, par pays de 2010 à 2030

ENGAGEMENTS MACIMAUX (*CPH HIGH FOREVER*)

PAS DE MECANISME DE DEVELOPPEMENT PROPRE

Les échanges de permis d'émissions négociables sont dans un premier temps limités aux pays de l'Union Européenne jusqu'en 2020, puis le marché de permis négociables est étendu à l'ensemble des pays ayant contracté des engagements contraignants. En conséquence et jusqu'en 2020 plusieurs prix du CO2 subsistent :

- Deux au sein de l'union européenne (un pour le marché de l'ETS et un autre pour les autres secteurs ne participant pas à l'ETS) ;
- et un au sein de chaque zone géographique des autres pays de l'Annexe 1.

La disparité des prix du CO2 fait apparaître tout l'intérêt de la mise en place d'un système international d'échange de permis, le Japon et l'Union Européenne font face à des prix du CO2 élevés, au contraire au sein de la Russie le prix du CO2 est très faible. Les Etats-Unis et la zone CAZ se situent dans une zone intermédiaire. Il faut noter que l'adoption d'un objectif de -30% en 2020 par l'Union Européenne augmente très fortement le prix du CO2 pour les secteurs ETS, il passe ainsi de 33 € en 2020 (pour un objectif de 20%) à 93 € dans ce scénario. L'augmentation du prix du CO2 dans les secteurs ETS se propage au reste de l'économie notamment via une

augmentation du prix de l'électricité et des produits pétroliers raffinés, ce renchérissement du prix des énergies au sein des secteurs non ETS réduit les émissions de CO2 et permet au prix du CO2 pour ces secteurs de s'établir à 73 € alors qu'il était de 84 € dans le scénario d'un accord de Copenhague avec engagements minimums.

En 2021, l'arrivée dans l'accord des pays émergents (Chine, Inde et Brésil) fait chuter le prix du CO2 et permet ainsi au pays de l'annexe 1 l'achat de permis à bas coût, le prix du CO2 se situe ainsi à 33 € en 2030. Si les échanges de permis sont d'ampleur limités avant 2021, après cette date ces échanges représentent des montants importants allant jusqu'à atteindre 50% des allocations initiales. La Chine est le principal pourvoyeur de permis, ses ventes représentent 70% des ventes totales, vient ensuite l'Inde.

Concernant le coût de la mise en œuvre du scénario, deux périodes doivent être distinguées : 2010-2020 et 2021-2030. Avant l'intégration des pays émergents dans l'accord, le passage à un objectif de -30% conduit toujours à un coût de mise en œuvre pour les pays de l'Annexe 1 au contraire du scénario avec engagement minimums. Après 2021, la baisse du prix du CO2 permet de limiter le coût d'implémentation des réductions d'émission pour les pays de l'annexe 1, ce coût augmente cependant assez fortement pour la Pologne et la Russie. Au contraire les ventes de permis génèrent pour la Chine et l'Inde de substantiels revenus qui conduisent à des gains en terme de bien-être. Le Brésil est pénalisé par l'introduction d'un prix du CO2, et le Reste du Monde qui n'adopte aucune contrainte d'émission ne fait face à un coût suite à des baisses de revenus liées aux exportations d'énergie (la zone Reste du Monde comprenant en effet des pays du Moyen Orient).

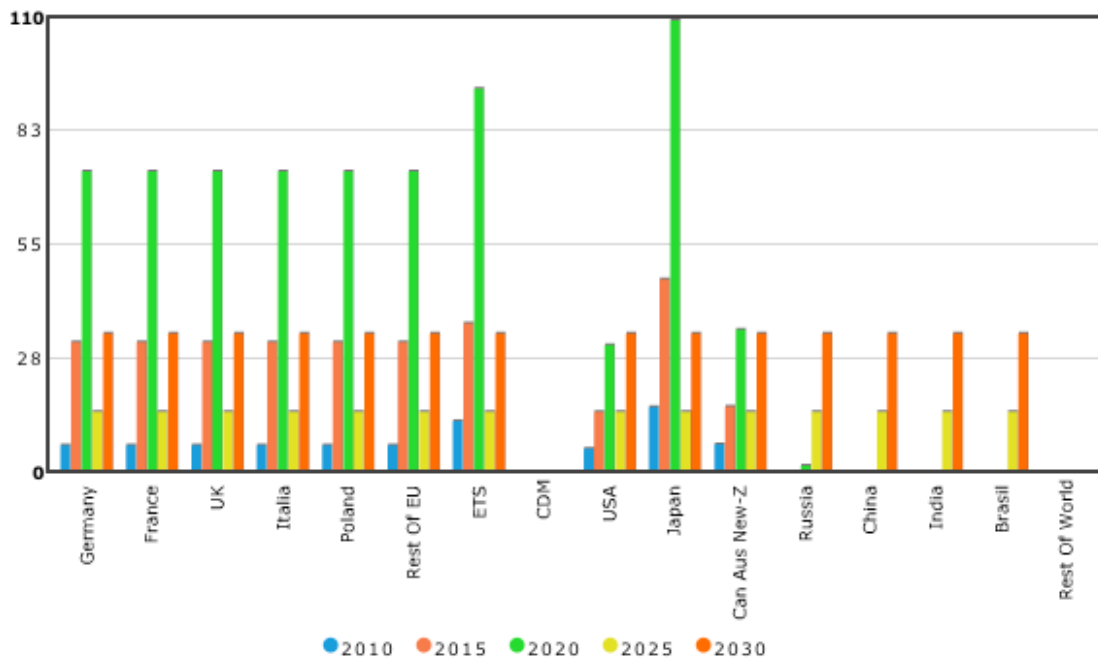


Figure 30 : prix du CO2 en euros par tonne de CO2 (2005 Euro)

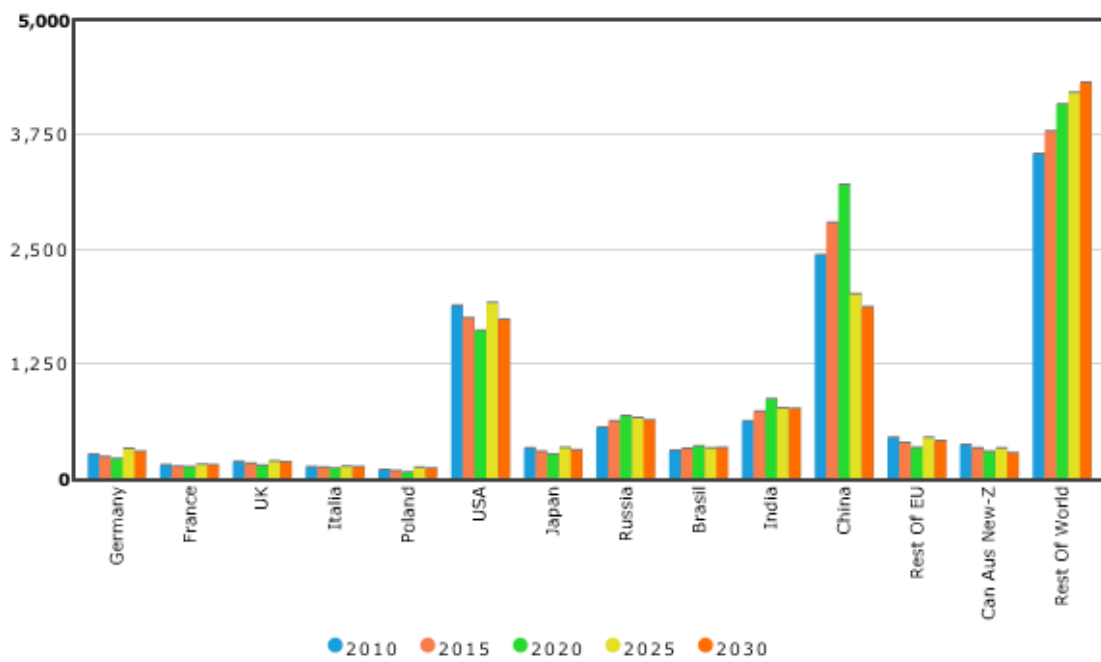


Figure 31 : émissions de GES en million de tonne de carbone, par pays de 2010 à 2030

MECANISME DE DEVELOPPEMENT PROPRE LIMITE A 5%

L'utilisation du Mécanisme de Développement Propre (MDP) permet de limiter significativement pour la première période (2010-2020) le prix du CO₂. Le recours au MDP est limité dans un premier temps uniquement au secteur n'appartenant pas à l'ETS. Pour le marché de l'ETS l'impact est donc nul, le prix du CO₂ reste inchangé. Au terme de la simulation (2030) le prix du CO₂ baisse de 25% par rapport à un scénario sans MDP. Le prix du MDP serait sur la période 2010-2020 inférieur à 1 € (Il faut noter que nous ne supposons pas de coût administratif de mise en place du MDP). La Chine serait sur cette première période le principal vendeur de permis. Puis l'entrée dans l'accord des pays émergents réduirait l'attrait du MDP, en effet la Chine, l'Inde et le Brésil adoptant des engagements contraignants ne peuvent alors plus vendre de MDP, seule la zone Reste du Monde peut alors continuer à profiter du MDP. Le prix du MDP augmente alors de façon très importante (l'offre étant réduite) pour s'établir alors à 10 € en 2030 à comparer au prix du CO₂ échangé sur le marché international qui s'établit à 25 €.

L'utilisation du MDP permet de limiter pour les pays de l'annexe 1 le coût de mise en œuvre d'une contrainte climatique en première période, pour les vendeurs nets de permis elle limite cependant les revenus qu'ils peuvent tirer de la vente de permis, c'est le cas pour la Pologne et la Russie. Pour les vendeurs de MDP, il y a toujours un gain à vendre même si ce gain est assez limité compte tenu du faible prix du MDP en première période. En seconde période la vente de MDP par le Reste du Monde réduit le gain que peuvent tirer la Chine et l'Inde de la vente des permis. Au contraire la vente de MDP par le Reste du Monde limite les pertes de revenus liées à la baisse des exportations d'énergie.

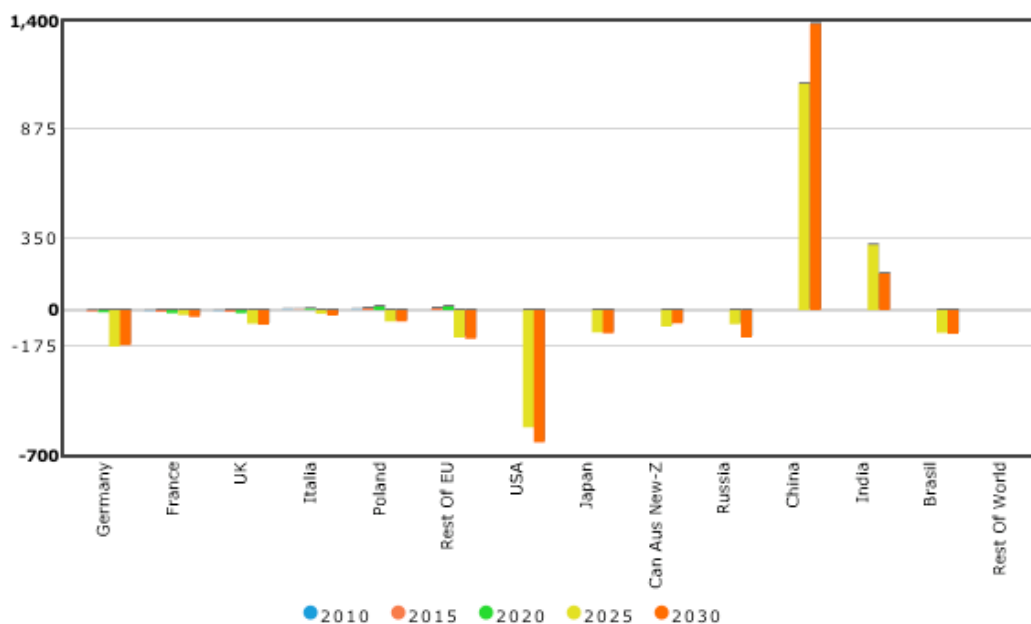


Figure 32 : permis d'émissions vendus en million de tonnes de carbone, par pays de 2010 à 2030

PAS DE MDP ET ACHAT DE PERMIS LIMITE A 50%

Dans ce scénario six pays ont des achats de permis supérieur de 50% à leurs allocations : l'Allemagne a des achats de permis représentant plus de 122% de sa dotation initiale en 2030, la Pologne est dans une situation comparable avec des achats de permis représentant 84% de son allocation, viennent ensuite la Grande Bretagne (63%), le Japon (57%) et le Brésil (56%) et les USA (54%).

La mise en place d'un plafond maximum d'achat limité à 50% conduit donc à une disparité des prix et ceci même après l'instauration d'un marché mondial de permis négociables. La limitation des achats de permis, déprime la demande mondiale et le prix du permis passe ainsi de 33 € à 25 € en 2030.

L'introduction d'une contrainte sur les achats de permis pénalise bien évidemment les pays qui y sont soumis, de même elle réduit le montant des revenus des pays vendeurs de permis (Chine et Inde) et au contraire bénéficie aux pays acheteurs nets non contraints dont le prix d'achat diminue.

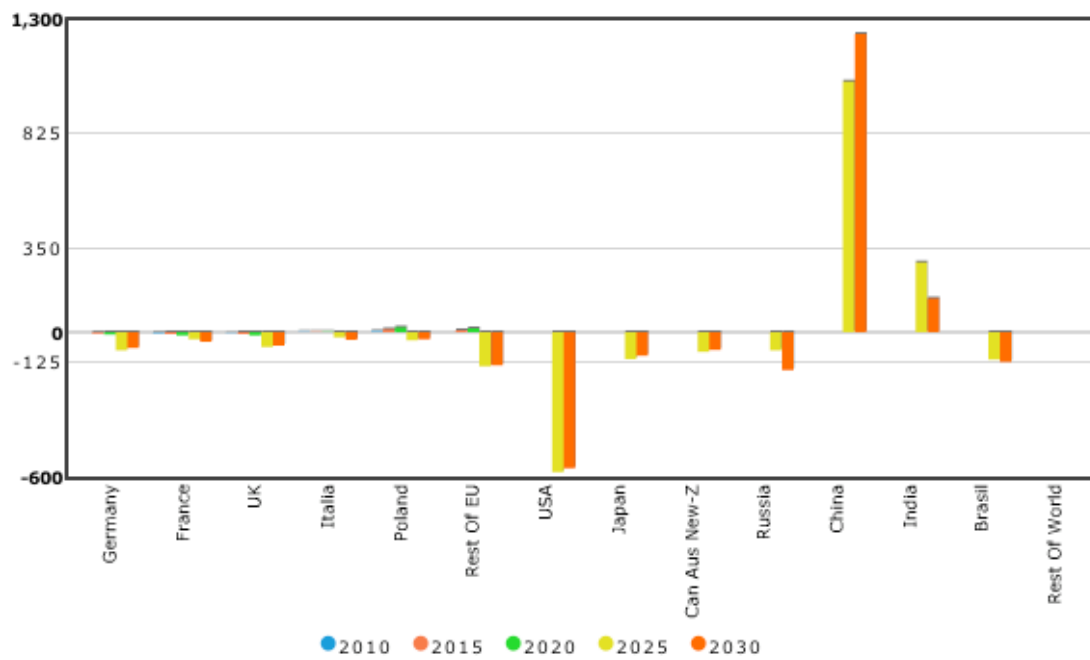


Figure 33 : Permis d'émissions vendus en million de tonnes de carbone, par pays de 2010 à 2030

MDP LIMITE A 5% ET ACHAT DE PERMIS LIMITE A 50%

Dans ce scénario, sept pays ont des achats de permis supérieur de 50% à leurs allocations : l'Allemagne à des achats de permis représentant plus de 128% de sa dotation initiale en 2030, la Pologne est dans une situation comparable avec des achats de permis représentant 92% de son allocation, viennent ensuite la Grande Bretagne (64%), le Japon (58%) et le Brésil (53%), les USA (58%) et le Reste de l'Union Européenne (ROE) (51%).

La mise en place d'un plafond maximum d'achat limité à 50% conduit donc à une grande disparité des prix et ceci même après l'instauration d'un marché mondial de permis négociables. La limitation des achats de permis, déprime la demande et le prix du permis passe ainsi de 25 € à 18 € en 2030.

L'introduction d'une contrainte sur les achats de permis pénalise bien évidemment les pays qui y sont soumis, de même elle réduit le montant des revenus des pays vendeurs de permis (Chine et Inde) et au contraire bénéficie aux pays acheteurs nets non contraint dont le prix d'achat diminue.

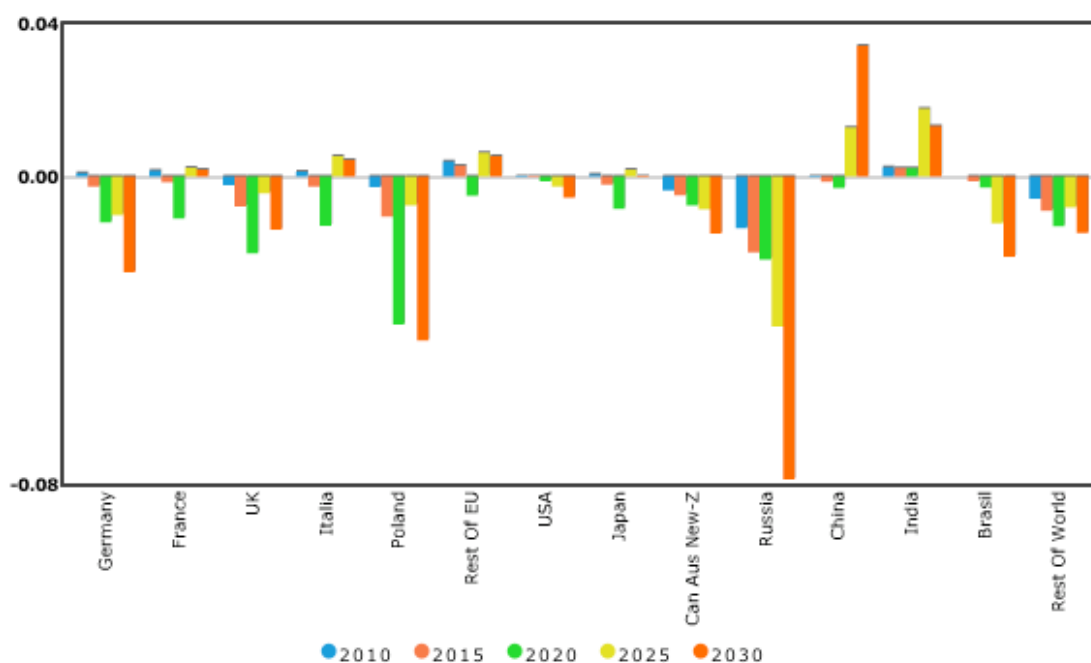


Figure 34 : surplus en pourcentage de la consommation des ménages

PAS DE MECANISME DE DEVELOPPEMENT PROPRE

Les échanges de permis d'émissions négociables sont, jusqu'en 2020, limités aux pays de l'Union Européenne. Puis le marché de permis négociables est étendu à l'ensemble des pays ayant contracté des engagements de réduction. En conséquence, plusieurs prix du CO2 subsistent jusqu'en 2020 :

- Deux au sein de l'union européenne (un pour le marché de l'ETS et un autre pour les autres secteurs ne participant pas à l'ETS) ;
- Un au sein de chaque zone géographique des autres pays de l'Annexe 1.

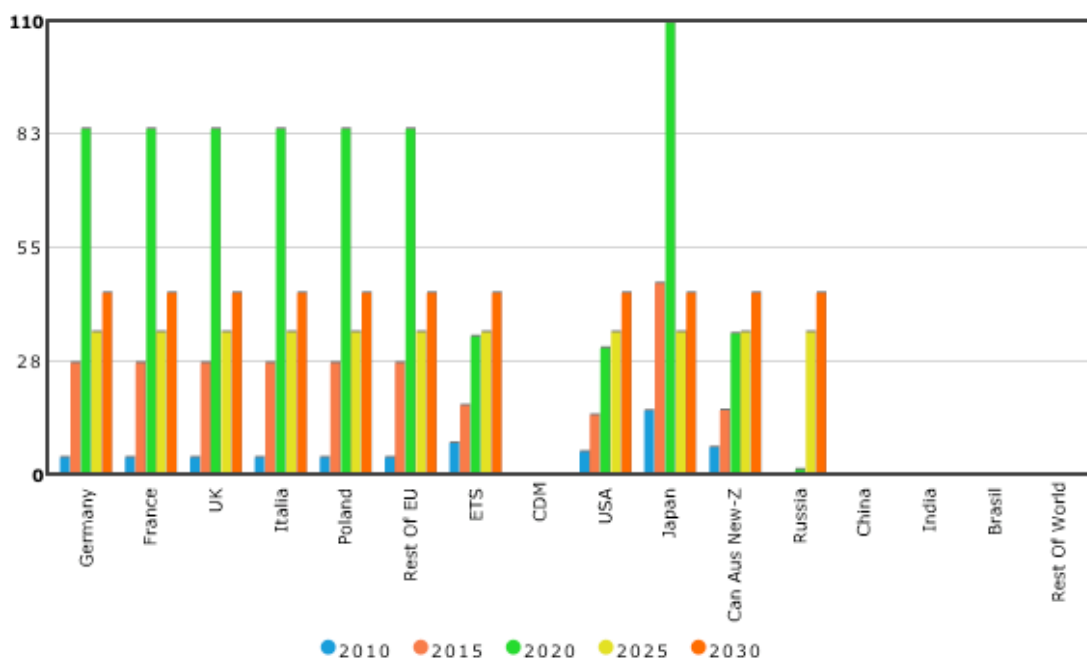


Figure 35 : Prix du CO2 en euros par tonne de CO2 (2005 Euro)

La disparité des prix du CO2 fait apparaître tout l'intérêt de la mise en place d'un système international d'échange de permis.

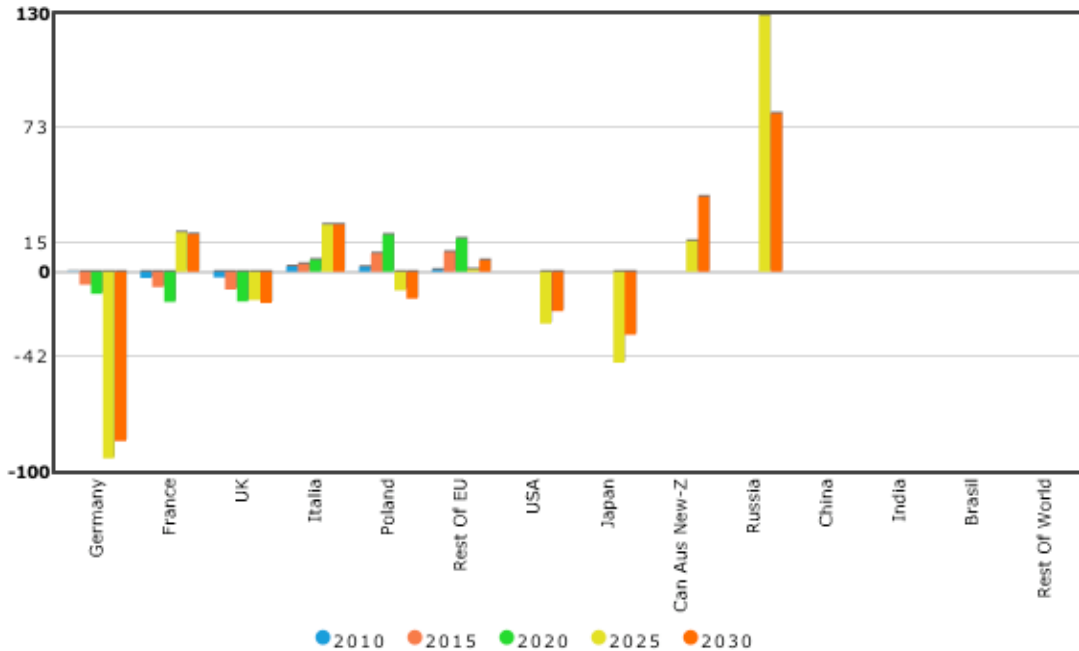


Figure 36 : permis d'émissions vendus en million de tonnes de carbone, par pays de 2010 à 2030

Le Japon et l'Union Européenne font face à des prix du CO2 élevés, au contraire de la Russie pour qui le prix du CO2 est très faible. Les Etats-Unis et la zone CAZ se situent dans une zone intermédiaire. La mise en place d'un marché à partir de 2021 fait converger le prix du CO2 à 34€ en 2025 et 44€ en 2030. Les échanges de permis apparaissent limités si on les compare aux dotations initiales, au moins sur la première période pour laquelle le marché est mis en place uniquement au sein de l'Union Européenne. Ainsi sur la période 2010-2020, la Pologne est le principal vendeur de permis. Puis l'extension du marché aux autres pays de l'Annexe 1 change considérablement la donne : la Russie est dans cette configuration quasiment en situation de monopole sur la vente des permis. L'Allemagne achète 42% de son allocation en 2030, défavorisée par la règle d'allocation des émissions retenue au sein de l'Union Européenne (et basée dans ces propres simulations d'évolution des populations).

L'importance du coût supporté par les pays est déterminé par l'adoption ou non d'une contrainte en matière d'émissions de gaz à effet de serre.

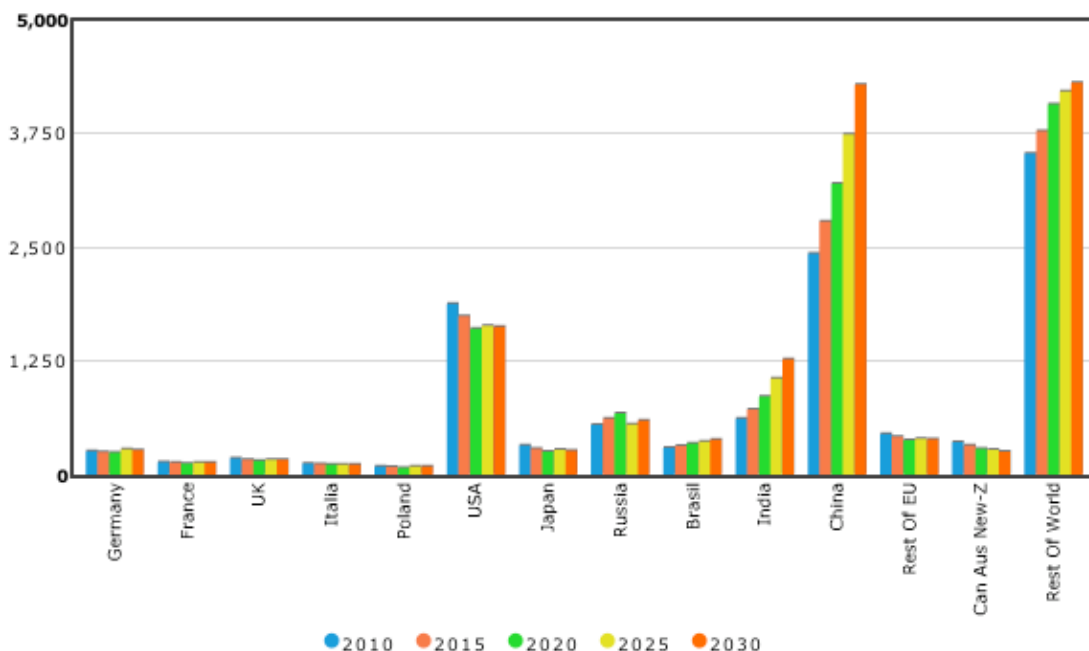


Figure 37 : émissions de GES en million de tonne de carbone, par pays de 2010 à 2030

Tous les pays qui adoptent des engagements contraignants font face à terme (c'est à dire en 2030) à un coût en termes de bien-être exceptée la France, l'Italie et la zone ROE.

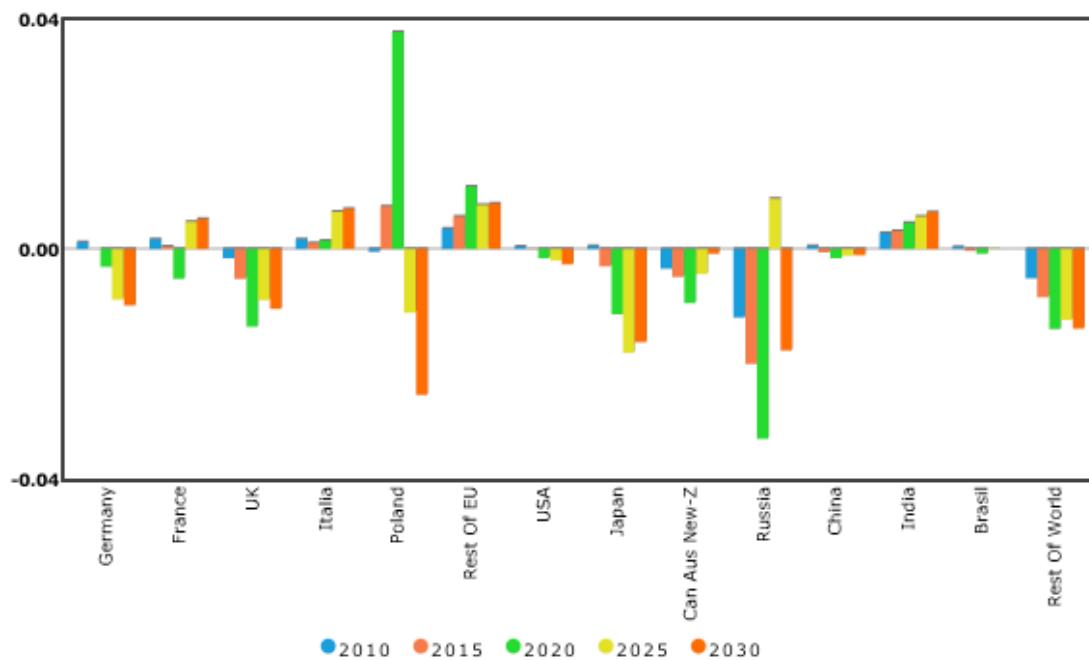


Figure 38 : surplus en pourcentage de la consommation des ménages

Concernant la France, elle bénéficie de son faible niveau d'émission de CO2 dans le scénario de référence provenant principalement du faible niveau d'émission de CO2 de son secteur électrique. La règle d'allocation des émissions au sein de l'Union Européenne lui permet ainsi d'être vendeur net de permis d'émissions négociables. Les autres pays de l'Annexe 1 font face au contraire à un coût en terme de bien-être. Celui-ci est important pour la Pologne, le Japon et l'Allemagne du fait d'achat de permis négociables et d'un *Deadweight loss of Taxation* significatif. On notera aussi que la Russie fait face à un coût élevé malgré des revenus importants tirés de la vente de permis et dû principalement à baisse des exportations d'énergie fossile et à une spécialisation industrielle défavorable axée sur des industries intensives en énergie qui sont fortement pénalisées par l'instauration d'un prix du CO2. La période transitoire (2010-2020) fait apparaître pour la Pologne un gain important en 2020, du fait de ses ventes de permis, ce gain est ensuite annulé consécutivement à la concurrence de la Russie sur ce marché.

Pour les pays n'adoptant pas d'engagement contraignant, ils bénéficient en règle générale de gains liés aux termes de l'échange provenant d'une baisse des prix mondiaux de l'énergie sauf les pays exportateurs d'énergie fossile qui sont pénalisés par la contraction de la demande d'énergie.

MECANISME DE DEVELOPPEMENT PROPRE LIMITE A 5%*

L'utilisation du Mécanisme de Développement Propre (MDP) permet de limiter significativement pour la première période (2010-2020) le prix du CO2.

Le recours au MDP est limité dans un premier temps uniquement au secteur n'appartenant pas à l'ETS. Pour le marché de l'ETS l'impact est donc nul, le prix du CO2 reste inchangé. Au terme de la simulation (2030) le prix du CO2 baisse de 25% par rapport à un scénario sans MDP. Le prix du MDP serait sur toute la période inférieur à 1 € (Il faut noter que nous ne supposons pas de coût administratif de mise en place du MDP).

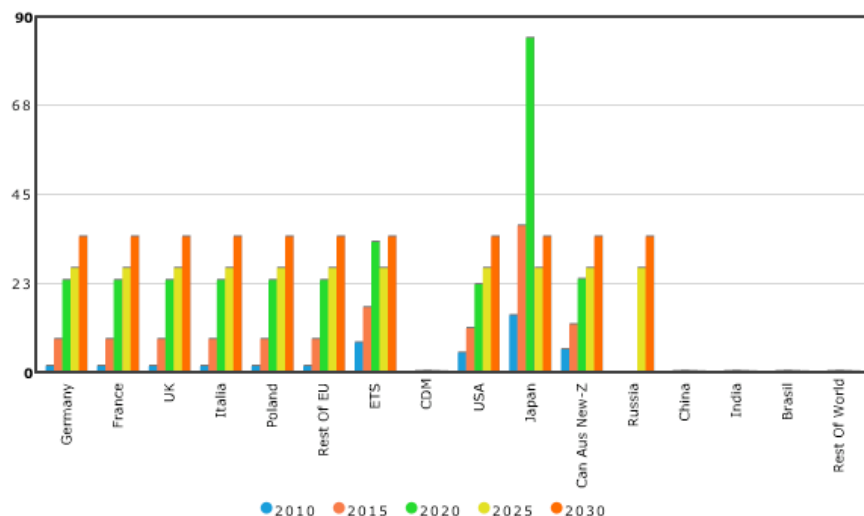


Figure 39 : prix du CO2 (+MDP) en euros par tonne de CO2 (2005 Euro)

La Chine serait le principal vendeur de permis, elle représenterait 80% des ventes, les Etats-Unis achèterait 40% des permis.

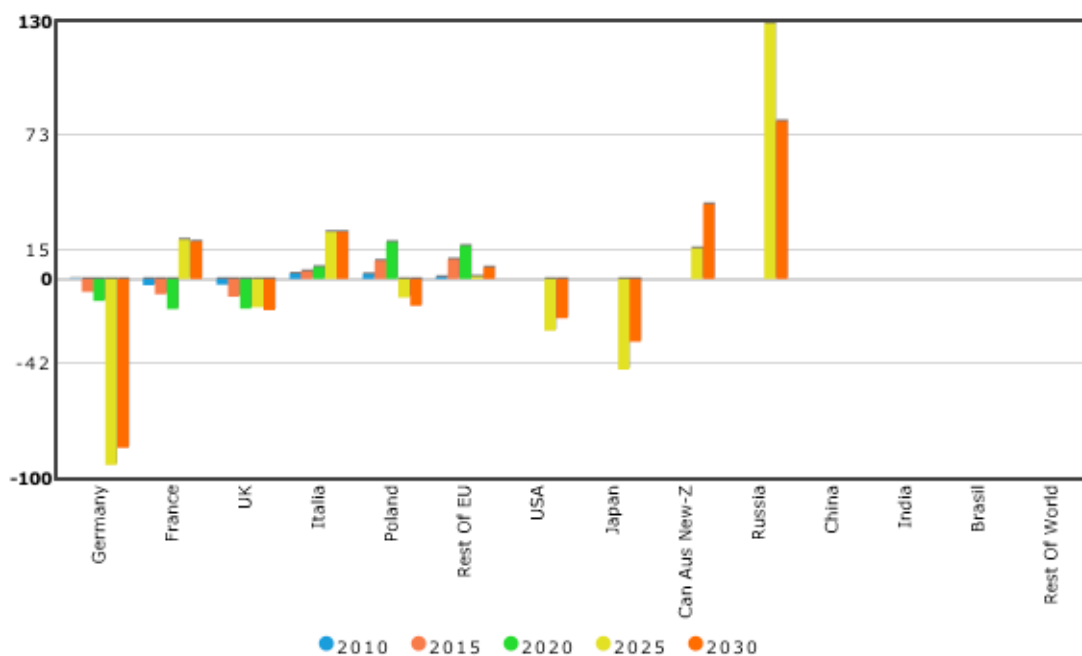


Figure 40 : permis d'émissions vendus en million de tonnes de carbone, par pays de 2010 à 2030

L'utilisation du MDP permet de limiter pour les pays de l'annexe 1 le coût de mise en œuvre d'une contrainte climatique, pour les vendeurs nets de permis elle limite cependant les revenus qu'ils peuvent tirer de la vente de permis, c'est le cas pour la

Pologne et la Russie. Pour les vendeurs de MDP, il y a toujours un gain à vendre même si ce gain est assez limité compte tenu du faible prix du MDP.

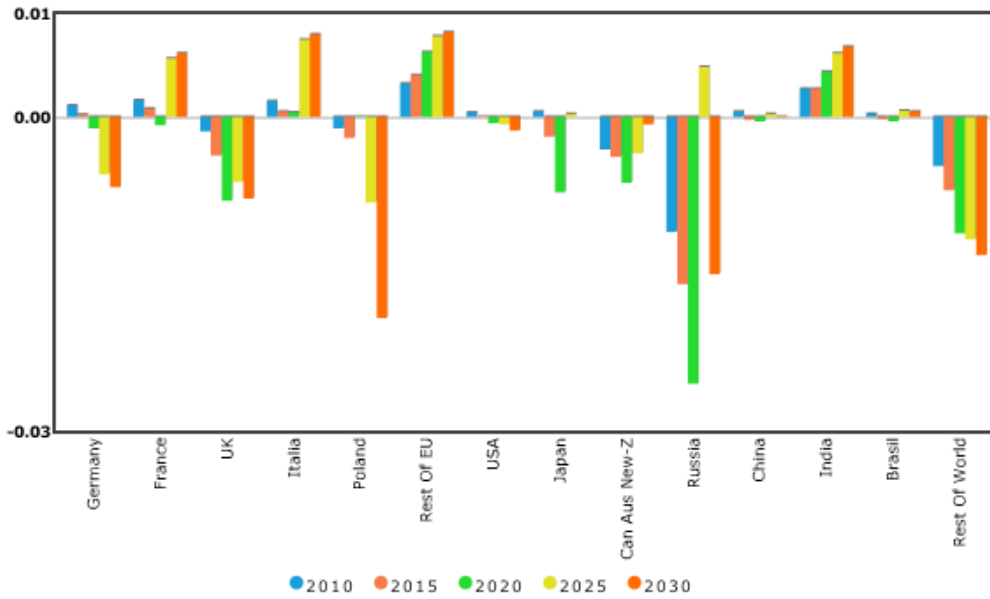


Figure 41 : surplus en pourcentage de la consommation des ménages

Figure 42 : émissions de GES en million de tonne de carbone, par pays de 2010 à 2030

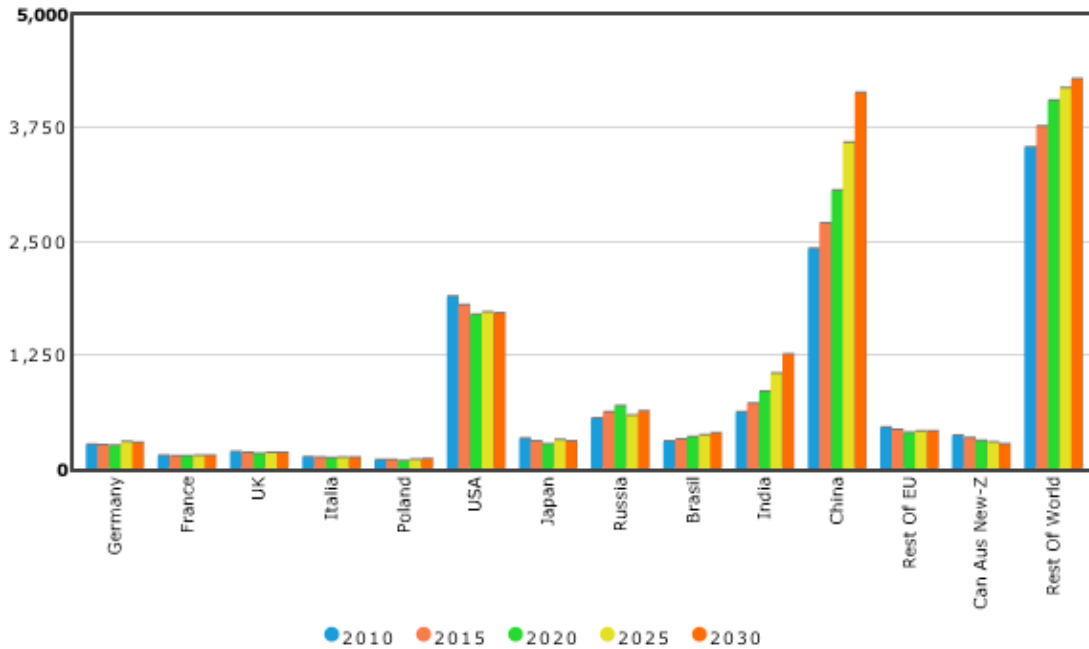


Figure 42 : émissions de GES en million de tonne de carbone, par pays de 2010 à 2030

LIMITATION SUR L'ACHAT DE PERMIS

La contrainte des 50% n'étant pas atteinte, les résultats des scénarios avec contrainte sont identiques à ceux sans contrainte d'achat sur le marché des permis d'émission, soit ceux décrits ci dessus.

10.2. RÉSULTATS DES SIMULATIONS RÉALISÉES AVEC TIAM

SCÉNARIO 6 : ECHEC SUITE À L'ACCORD DE COPENHAGUE

Le scénario représente l'échec de négociations sur des engagements à long terme : les pays se conforment à leurs engagements minimaux annoncés avec des objectifs jusqu'en 2030, et arrêtent toute négociation dès 2021. Ce scénario représente une sorte de scénario de menace, illustrant ce qui pourrait arriver si aucun accord à long terme n'est atteint en dehors de l'actuel accord de Copenhague.

L'échange de permis d'émission est possible jusqu'en 2030. Il est limité à 10% en 2020 et 20% en 2030 du volume total des réductions engagées + des réductions volontaires.

Le système énergétique des différents pays ne diffère pas, à long terme, du système énergétique de référence : certains effets des efforts d'atténuation à court terme sur le système énergétique restent visibles pendant environ 10 ans après la fin de l'accord sur le climat (par exemple l'accroissement de la production d'électricité éolienne en substitution de l'électricité produite à partir du charbon), mais ils disparaissent dans le long terme. Les mesures mises en œuvre dans le cadre de l'Accord de Copenhague ne sont pas assez profondes pour modifier le système énergétique de manière définitive. Une telle conclusion pourrait être bien différente en cas de réduction des émissions dans la première moitié du siècle, permettant par exemple la pénétration des nouvelles technologies dans un volume suffisant pour provoquer une diminution de leurs coûts et donc les rendre rentables, même sans aucune contrainte climatique.

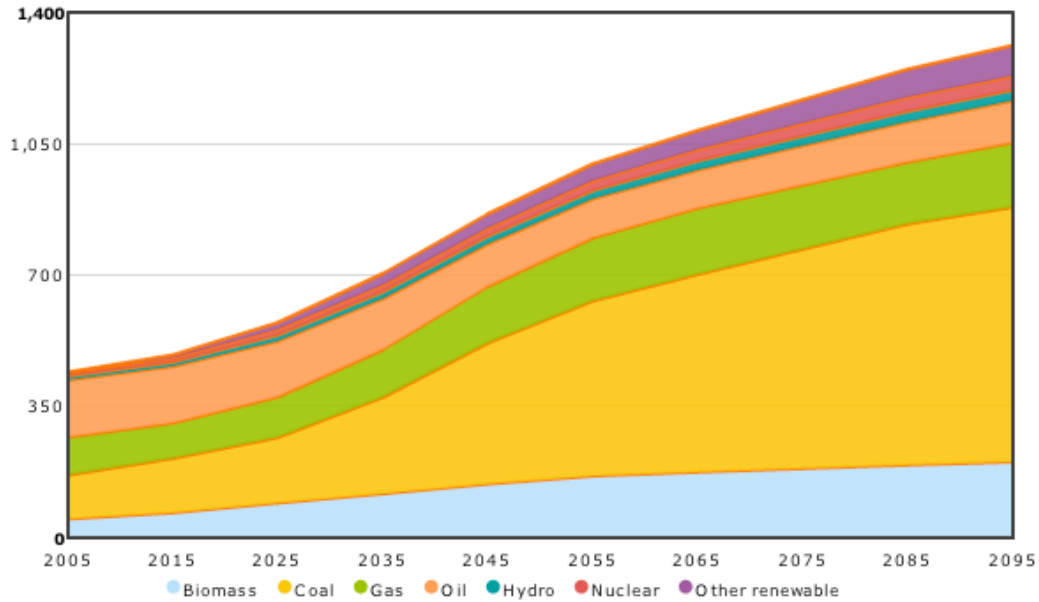


Figure 43 : énergie primaire (en supposant FEQ=1 pour les énergies autres que fossiles) en EJ

Malgré le retour à un système énergétique similaire à celui de référence, les émissions cumulées sur le long terme sont légèrement plus faible (5 à 7%) que les émissions du scénario de référence en raison des impacts à long terme des mesures forestières : par défaut dans TIAM, les plantations décidées dans la première moitié du siècle génèrent un important puits de carbone, qui reste constant en volume durant plusieurs décennies (ici, jusqu'en 2100), dû à la durée de vie moyenne d'un arbre. La réalité pourrait être bien différente si les pays ne sont pas incités à gérer d'une manière plus durable leurs forêts (par exemple si ils abattent ces arbres).

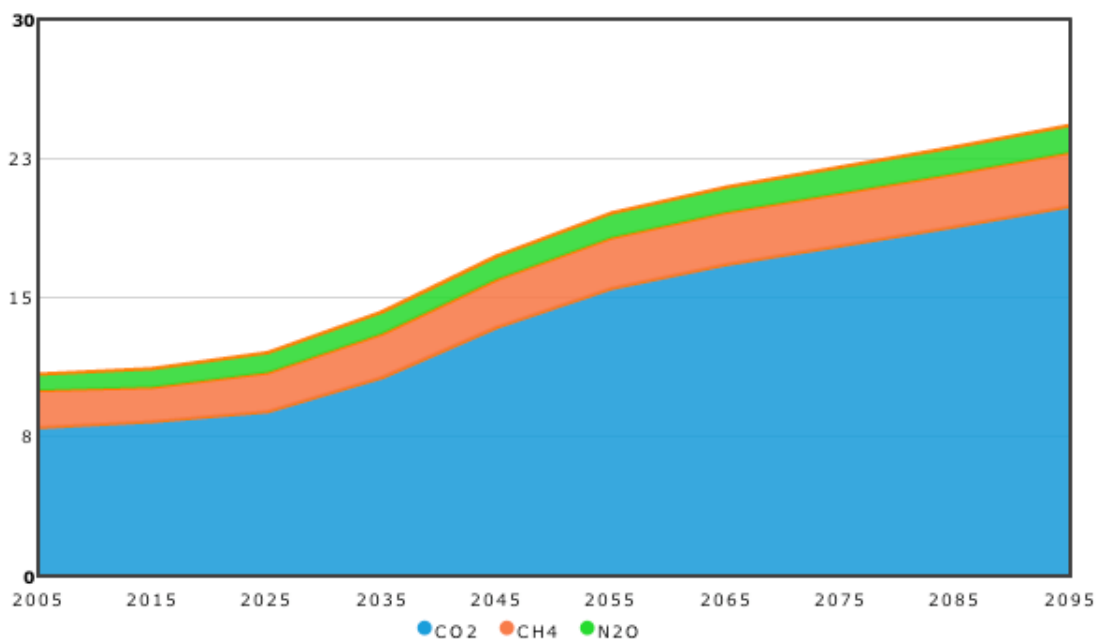


Figure 44 : émissions de CO2, CH4, et N2O en GtC de 2005 à 2105

Coût de la stratégie : Valeur actuelle nette (VAN) du coût de la stratégie exprimé en % de la VAN du PNB cumulé sur l'ensemble du siècle : **0.055%**

Quantité totale de carbone séquestré en puits géologiques : **4 GtC**

SCÉNARIO 7 : ACCORD DE COPENHAGUE LIMITÉ À L'ANNEXE 1

Ce scénario illustre un accord partiel où seuls les pays de l'Annexe 1 s'engagent dans la réduction des émissions, tel que défini par les engagements minimaux de l'accord de Copenhague, tandis que les autres pays ne contribuent pas à l'effort d'abattement. Dans TIAM, les émissions des pays n'appartenant pas à l'Annexe 1 sont limités à leur niveau du scénario de référence, et ce, afin d'éviter les fuites d'émission (*no carbon leakage*). En outre, dans TIAM l'échange (achat ou vente) de permis d'émission n'est autorisé qu'au sein des pays de l'Annexe 1, et il y est limité à 10% en 2020 et 20% à partir de 2030 du volume total de permis alloué. Les mécanismes de développement propre ne sont pas pris en considération.

Dans les pays de l'Annexe 1, les émissions sont réduites de 17% en 2020 et 18% après 2030 comparées aux émissions de 2005 (elles augmentent de près de 30% dans le scénario de référence). Cette réduction reste visible à l'échelle mondiale : les émissions augmentent de 7% en 2020, de 27% en 2030 et de plus de 160% à la fin du siècle

comparé à 2005 (en place de 14%, 37% et plus de 170% dans le scénario de référence).

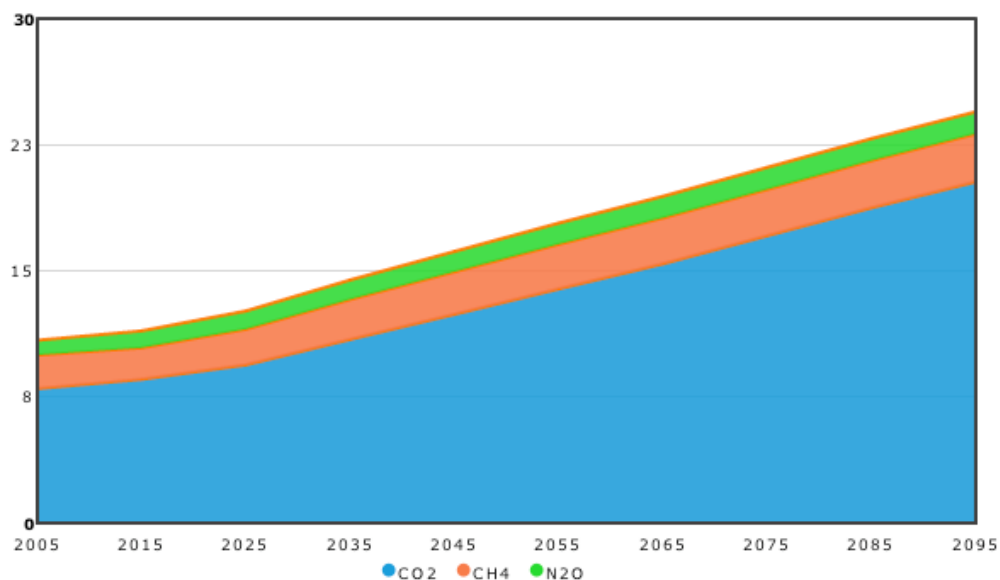


Figure 45 : émissions de CO2, CH4, et N2O en GtC de 2005 à 2105

Les changements énergétiques majeurs dans les pays de l'Annexe 1 concernent la génération d'électricité : le charbon est remplacé par des énergies renouvelables, principalement l'éolien.

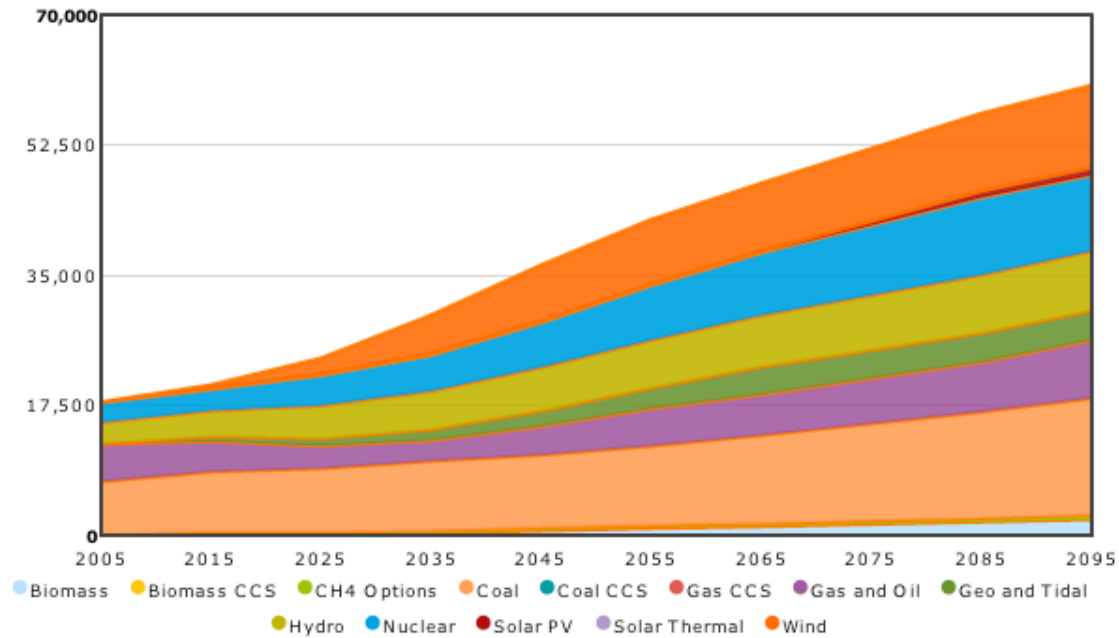


Figure 46 : génération d'électricité en milliard de kWh

La production d'énergie finale n'est presque pas modifiée ; en d'autres termes, les engagements sont trop petits pour induire des changements importants dans le système énergétique, sauf dans la production d'électricité. Le système énergétique des pays hors Annexe 1 n'est pas vraiment affecté, mis à part l'échange d'énergie entre pays : par exemple, les pays qui exportent (dans le scénario référence) du charbon vers les pays de l'Annexe 1 vont déplacer leurs exports vers les pays hors Annexe 1. Les pays de l'Annexe 1 qui n'exportaient pas d'énergie (dans le scénario référence) vont commencer à le faire, et vont exporter vers des pays en dehors de l'Annexe 1. Par exemple les Etats-Unis vont pouvoir dégager des marges pour l'export du fait de la baisse de la consommation domestique d'énergie. Suivant cette dynamique, la Chine importera plus de charbon (que dans le scénario référence) et utilisera moins ses propres mines.

Coût de la stratégie : Valeur actuelle nette (VAN) du coût de la stratégie exprimé en % de la VAN du PNB cumulé sur l'ensemble du siècle : **0.043%**

Quantité totale de carbone séquestré en puits géologiques : **7 GtC**

.....
 AJOUT D'UNE CONTRAINTE LIMITANT L'AUGMENTATION DE LA
 TEMPERATURE A 2°C

Afin d'évaluer si l'augmentation de température peut être limitée à long terme, un accord partiel (limité aux pays de l'annexe 1), est mis en œuvre à l'horizon 2030 et il est supposé qu'un traité international impliquant la collaboration parfaite de tous les pays est approuvé et appliqué à partir de 2040 : tous les pays, y compris les pays hors Annexe 1, coopèrent et les efforts d'atténuation sont effectués là où ils sont les plus efficaces. Dans ce cas, la contrainte limitant l'augmentation de la température à 2°C ne peut être respectée, étant donné les options d'atténuation disponibles dans le modèle. En d'autres termes, la réduction des émissions par les pays en voie de développement ne peut pas être retardée après 2040, en particulier dans le cas où les pays industrialisés ne s'engagent pas pour une réduction rapide et en profondeur (ce qui semble être le cas dans les négociations en cours, si les pays en voie de développement ne font pas d'importants efforts d'atténuation).

SCÉNARIO 8 : ACCORD DE COPENHAGUE (ENGAGEMENTS MINIMAUX)

Le scénario représente la version *light* de l'accord de Copenhague, basé sur les engagements minimaux proposés par les pays. Par exemple, l'Europe réduit ses émissions de 20% par rapport à 1990, et cet engagement est maintenu jusqu'en 2100.

L'échange de permis d'émission est limité à 10% en 2020 et 20% à partir de 2030, de la réduction d'émissions requises de chaque pays, y compris la réduction volontaire des émissions.

Ce scénario, tout comme le scénario suivant (9 : Accord de Copenhague - engagements maximaux), met l'accent sur les conséquences des engagements de l'accord de Copenhague, en supposant qu'ils sont maintenus tout au long du siècle.

Les engagements minimaux n'aboutissent pas à une réduction absolue des émissions de CO₂, mais un ralentissement de l'augmentation (environ 15% de réduction par rapport au scénario référence en 2100). Les prix du CO₂ varient de \$50 à \$240 (\$₂₀₀₀) la tonne en fonction des pays à la fin du siècle. Il est plus élevé dans les pays en voie de développement comme la Chine, l'Inde, le Moyen-Orient, le Mexique, en raison de la difficulté à se conformer aux objectifs imposés à ces régions, compte tenu de l'augmentation prévue des émissions dans ces pays, les options d'atténuation disponibles dans le modèle TIAM et l'échange de permis assez limité pour ces pays.

Les principales modifications du système énergétique sont les suivantes :

- Remplacement des centrales classiques au charbon pour la production d'électricité par des centrales à énergies renouvelables (éolien, solaire ainsi que la biomasse associée à la capture et la séquestration du carbone) ou bien par l'ajout aux centrales traditionnelles (charbon, gaz, biomasse) de technologie de capture et de séquestration de carbone; rappelons ici que les centrales

fonctionnant à partir de la biomasse et équipées de technologie de capture et séquestration du carbone ont un rendement négatif en terme d'émissions de GES.

- Remplacement du charbon dans les secteurs d'utilisation finale (consommé principalement par le secteur industriel) par des combustibles moins émetteurs, principalement le gaz. L'utilisation directe de la biomasse est préférée à sa transformation en biocarburants.
- Le gaz, l'hydrogène et l'électricité remplacent près de 20% du pétrole consommé dans les transports, tandis que l'utilisation des biocarburants est en baisse (voir point précédent).
- Consommation d'électricité inchangée : les engagements ne se traduisent pas par une électrification des usages finaux.

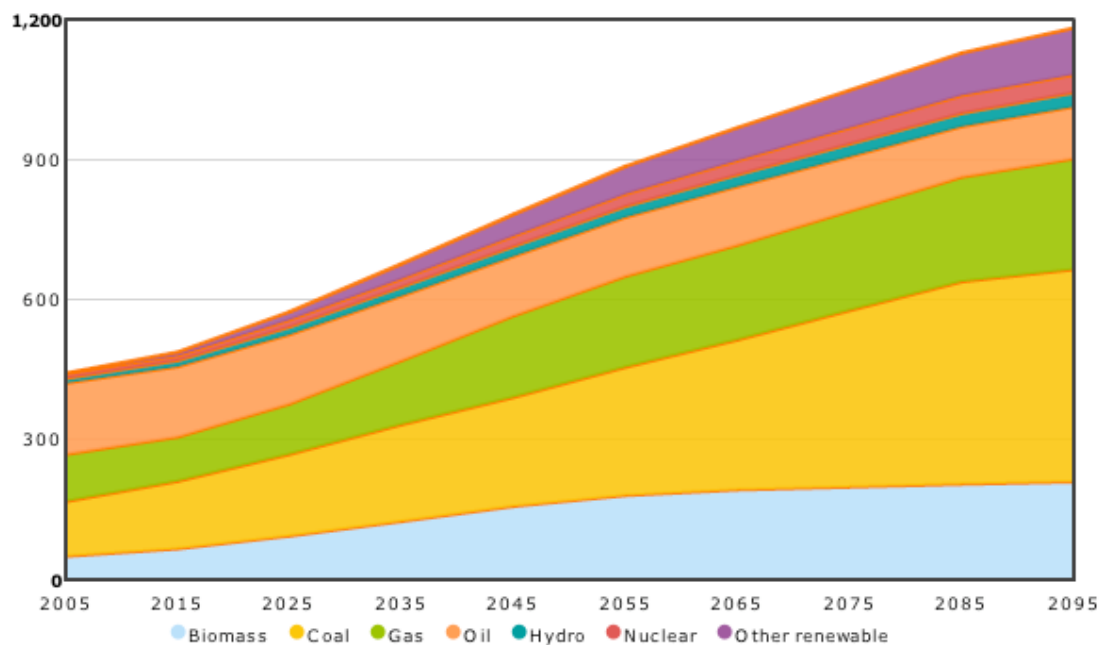


Figure 47 : énergie primaire (en supposant FEQ=1 pour les énergies autres que fossiles) en EJ

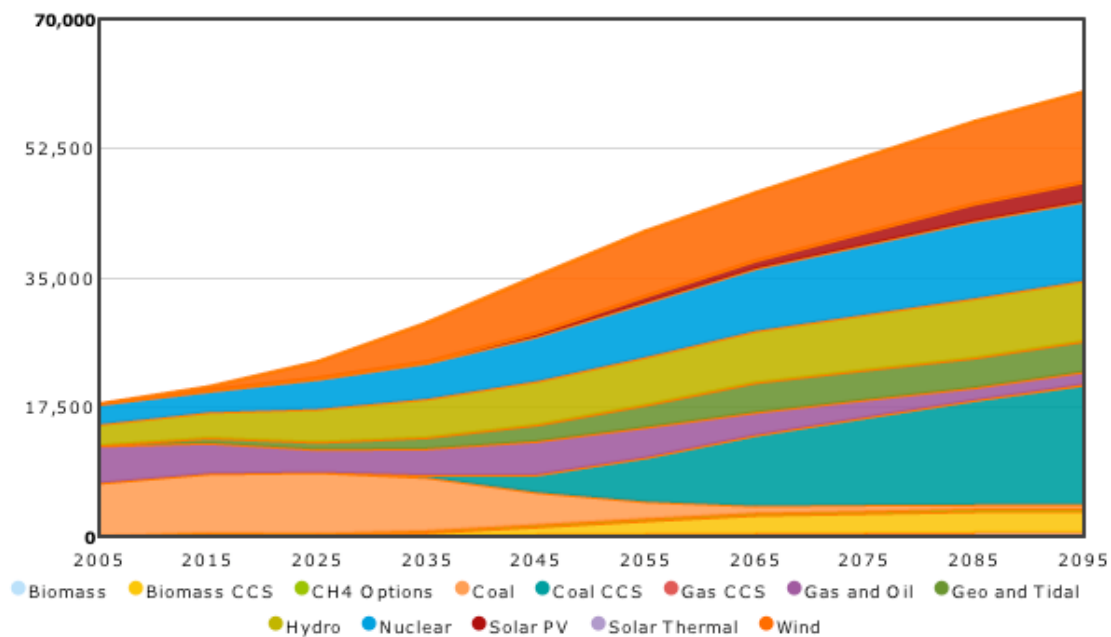


Figure 48 : génération d'électricité en milliard de kWh

Coût de la stratégie : Valeur actuelle nette (VAN) du coût de la stratégie exprimé en % de la VAN du PNB cumulé sur l'ensemble du siècle : **0.309%**

Quantité totale de carbone séquestré en puits géologiques : 248 GtC

AJOUT D'UNE CONTRAINTE LIMITANT L'AUGMENTATION DE LA TEMPERATURE A 2°C

Afin d'évaluer si l'augmentation de température peut être limitée à long terme, il est supposé que les engagements de Copenhague sont maintenus jusqu'en 2040, date à laquelle un traité international impliquant la collaboration parfaite de tous les pays est approuvé et appliqué : tous les pays, y compris les pays hors Annexe 1, coopèrent et les efforts d'atténuation sont effectués là où ils sont les plus efficaces. Dans ce cas, la contrainte limitant l'augmentation de la température à 2°C ne peut être respectée, étant donné les options d'atténuation disponibles dans le modèle. L'augmentation de la température en 2100 comparé à l'ère préindustrielle serait comprise entre 2.15°C et 2.20°C. En d'autres termes, l'accord de Copenhague doit être immédiatement suivi par des réductions plus importantes pour réussir à limiter la température à long terme à 2°C.

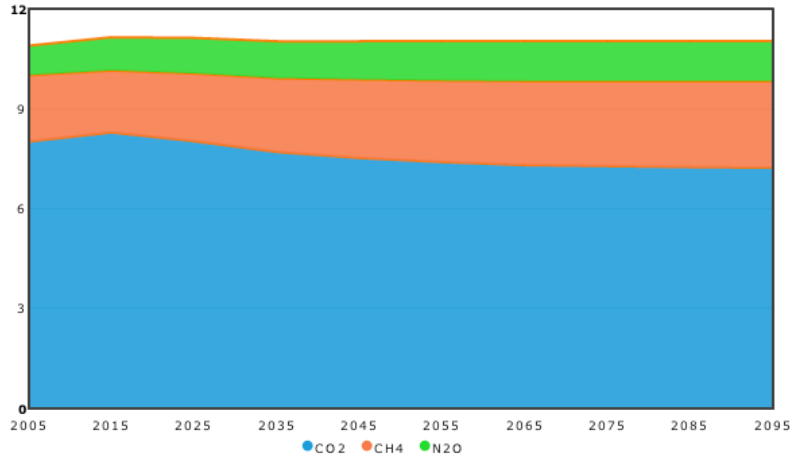
SCÉNARIO 9 : ACCORD DE COPENHAGUE (ENGAGEMENTS MAXIMAUX)

Ce scénario représente une version avancée de l'accord de Copenhague, basé sur les engagements maximaux proposés par les pays. Par exemple, l'Europe réduit ses émissions de 30% comparé à 1990. Ces engagements courent tout au long du siècle.

Ce scénario (tout comme le scénario précédent) met l'accent sur les conséquences des engagements de l'accord de Copenhague, en supposant qu'ils sont maintenus au cours du siècle. La combinaison de ce scénario avec des objectifs climatiques à long terme, tel que décrit ci-dessous, complète l'analyse.

Les contributions annoncées les plus élevées permettent une réduction absolue des émissions de CO₂ (stabilisation entre 2005 et 2030, puis une diminution d'environ 10% d'ici la fin du siècle).

Figure 49 : émissions de CO₂, CH₄, et N₂O en GtC de 2005 à 2105



Le prix du carbone varie entre \$50 et \$280 (\$₂₀₀₀) la tonne selon les pays à la fin du siècle. L'intervalle est similaire au précédent scénario, mais des prix élevés sont observés dans plus de régions, y compris par exemple les États-Unis et la Russie. Cela reflète la difficulté à se conformer aux objectifs imposés dans ces régions, étant donné l'augmentation attendue des émissions dans ces pays, les options d'atténuation disponibles et l'échange de permis limité.

Le système énergétique se modifie suivant les mêmes tendances que le scénario précédent, mais de façon plus rapide :

- Dans le secteur de la production électrique, les changements surviennent 10 ans plus tôt.
- Dans les secteurs de demandes utiles, les changements se produisent plus tôt, mais sont également plus profonds. Par exemple, la consommation finale de charbon est réduite de plus de 70% à la fin du siècle comparé au scénario référence (la réduction n'est que de 55% dans le cas du scénario précédent prenant en compte les engagements minimaux de Copenhague). Toujours comparé au scénario référence, l'utilisation du gaz a plus que doublé (une augmentation de seulement 80% dans le cas du scénario précédent).
- Tout comme avec les engagements minimaux, cet accord ne conduit pas à une électrification des secteurs d'usages finaux.

Coût de la stratégie : Valeur actuelle nette (VAN) du coût de la stratégie exprimé en % de la VAN du PNB cumulé sur l'ensemble du siècle : **0.514%**

Quantité totale de carbone séquestré en puits géologiques : **313 GtC**

AJOUT D'UNE CONTRAINTE LIMITANT L'AUGMENTATION DE LA TEMPERATURE A 2°C

Afin d'évaluer si l'augmentation de température peut être limitée à long terme, il est supposé que les engagements de Copenhague sont maintenus jusqu'en 2040 (sans anticipation des pays d'objectifs plus stricts dans le long terme), date à laquelle un traité international impliquant la collaboration parfaite de tous les pays est approuvé et appliqué : tous les pays, y compris les pays hors Annexe 1, coopèrent et les efforts d'atténuation sont effectués là où ils sont les plus efficaces. Dans ce cas, la contrainte limitant l'augmentation de la température à 2°C ne peut être respectée, étant donné les options d'atténuation disponibles dans le modèle. L'augmentation de la température en 2100 comparé à l'ère préindustrielle serait comprise entre 2.15°C et 2.20°C. En d'autres termes, l'accord de Copenhague doit être immédiatement suivi par des réductions plus importantes pour réussir à limiter la température à long terme à 2°C.

SCÉNARIO 10 : ACCORD DE COPENHAGUE AMÉLIORÉ

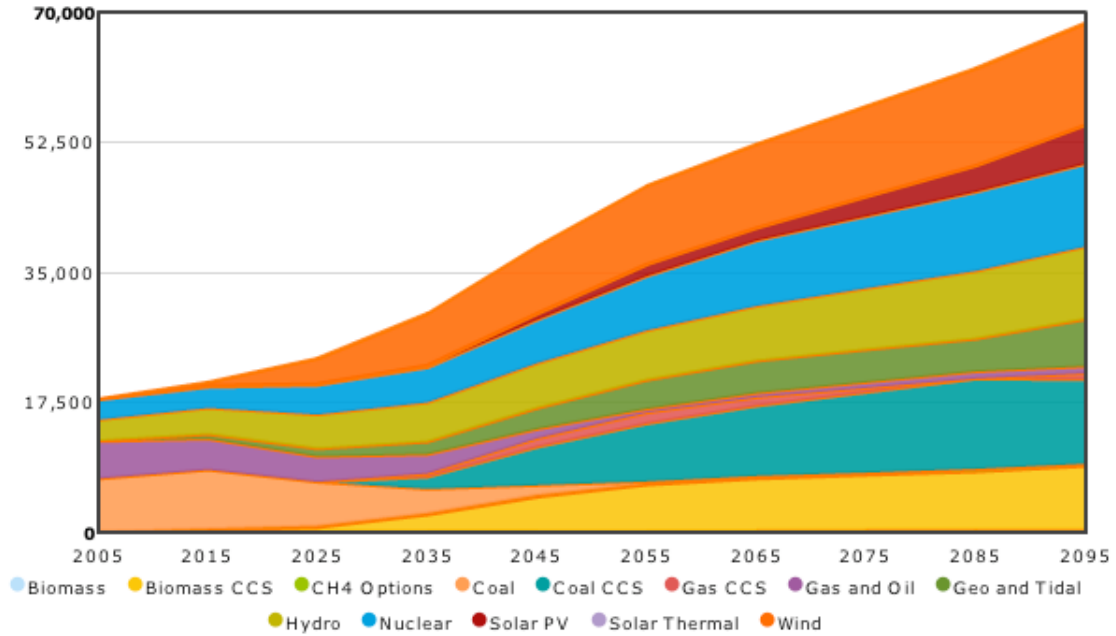
Ce scénario représente une version simple de la proposition faite par le G8 consistant en une réduction drastique des émissions des pays industrialisés et une réduction importante dans le reste du monde. Après l'accord de Copenhague, des réductions plus importantes sont mises en œuvre (-80% par rapport à 1990 pour les pays de l'Annexe 1 et -50% pour les autres).

Les objectifs de réduction des émissions sont de 15% en 2030 et 43% en 2050 par rapport à 2005, de toute évidence plus élevés que les engagements de Copenhague, même les plus volontaires. Les prix du CO₂ varient de 50 à 900\$2000 la tonne selon les pays à la fin du siècle, le prix le plus élevé étant observé au Moyen-Orient et au Japon (en dehors de ces deux pays, le prix du CO₂ atteint 340\$2000 la tonne dans de nombreux pays (Europe, Chine, USA, Russie, etc.). Ces prix reflètent la difficulté qu'ont les pays à se conformer aux objectifs qui leur sont imposés, étant donné l'augmentation attendue des émissions dans ces pays, les options d'atténuation disponibles et la limitation dans l'échange de permis d'émissions.

Sans surprise, les objectifs de réduction plus sévères pour 2050 provoquent des changements profonds dans le système énergétique :

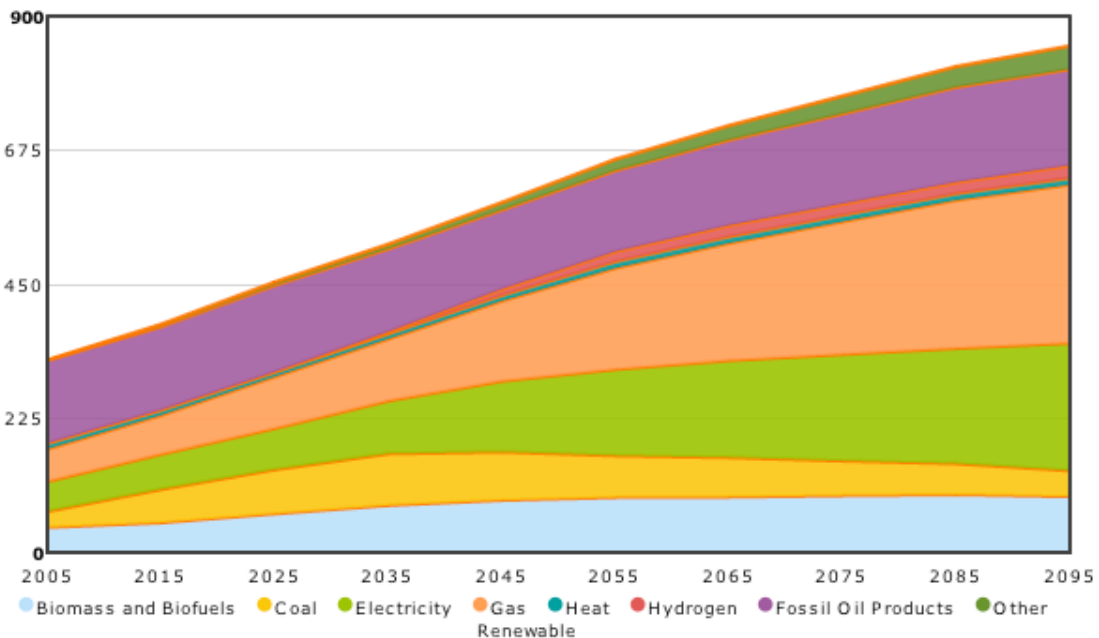
- Le solaire, l'éolien et la biomasse associée à la capture et séquestration du carbone jouent un rôle beaucoup plus élevé dans la production d'électricité (que dans le scénario référence). Le charbon, avec capture et séquestration du carbone, joue également un rôle plus important, mais seulement comme une mesure transitoire jusqu'à ce que l'énergie solaire et la biomasse avec CSC prennent des parts plus élevées sur le marché.

Figure 50 : génération d'électricité en milliard de kWh



- Dans les secteurs d'usage, la substitution du charbon par le gaz dans le secteur industriel est plus élevée, tandis que l'électricité augmente sa part principalement dans le bâtiment, en remplacement du gaz dont la consommation a été transférée au secteur industriel.

Figure 51 : consommation d'énergie par le secteur de la demande finale incluant les usages non-énergétiques, exprimée en EJ



- Dans les transports, la pénétration de l'hydrogène et de l'électricité est accélérée, et préféré à gaz qui a été utilisé comme une option d'atténuation dans les scénarios précédents. Les biocarburants ne sont pas utilisés comme une

option d'atténuation, l'utilisation de la biomasse à d'autres fins énergétiques lui étant préféré.

- Pour conclure, on observe une augmentation de l'électrification du système énergétique (la consommation d'électricité augmente de près de 13% par rapport au scénario de référence).

Coût de la stratégie : Valeur actuelle nette (VAN) du coût de la stratégie exprimé en % de la VAN du PNB cumulé sur l'ensemble du siècle : **0.915%**

Quantité totale de carbone séquestré en puits géologiques : **413 GtC**

AJOUT D'UNE CONTRAINTE LIMITANT L'AUGMENTATION DE LA TEMPERATURE A 2°C

Afin d'évaluer si l'augmentation de température peut être limitée à long terme, il est supposé que les engagements de Copenhague sont maintenus jusqu'en 2055 (sans anticipation des pays d'objectifs plus stricts dans le long terme), date à laquelle un traité international impliquant la collaboration parfaite de tous les pays est approuvé et appliqué : tous les pays, y compris les pays hors Annexe 1, coopèrent et les efforts d'atténuation sont effectués là où ils sont les plus efficaces. Dans ce cas, la contrainte limitant l'augmentation de la température à 2°C est respectée, étant donné les options d'atténuation disponibles dans le modèle. Plus de détails dans le scénario 13 : accord International.

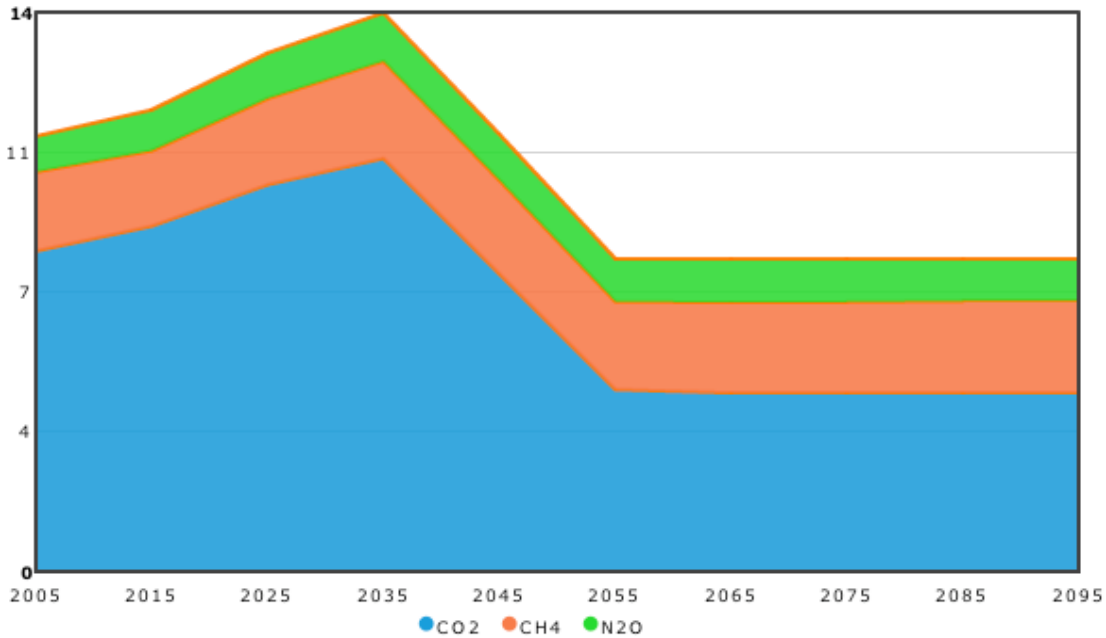
SCÉNARIO 11 : ACCORD TARDIF (EN 2050)

Ce scénario s'intéresse aux conséquences de repousser dans le temps un accord international contraignant : cet accord intervient en 2050, et suit les recommandations du G8. Contrairement au scénario précédent (10: accord de Copenhague amélioré), aucun effort de réduction des émissions n'est fait avant 2050.

Comme indiqué dans le scénario précédent, (10 : Accord de Copenhague amélioré), les objectifs sont des réductions des émissions de 43% en 2050 par rapport à 2005. À long terme, les prix du CO2 restent proches des prix observés dans le scénario précédent, mais sont légèrement plus faibles, principalement en raison de la disponibilité d'un plus grand potentiel de réduction des émissions.

Le comportement du système énergétique après 2050 est très proche du scénario précédent dû au fait que les objectifs d'émission sont les mêmes à partir de 2050 (plus de détails sont fournis dans la description des résultats du scénario 10). La seule différence concerne une plus grande contribution des centrales à charbon avec CSC dans le scénario courant (et une moindre contribution des centrales à énergie renouvelable).

Figure 52 : émissions de CO₂, CH₄, et N₂O en GtC de 2005 à 2105



Coût de la stratégie : Valeur actuelle nette (VAN) du coût de la stratégie exprimé en % de la VAN du PNB cumulé sur l'ensemble du siècle : **0.711%**

Quantité totale de carbone séquestré en puits géologiques : **388 GtC**

AJOUT D'UNE CONTRAINTE LIMITANT L'AUGMENTATION DE LA TEMPERATURE A 2°C

Afin d'évaluer si l'augmentation de température peut être limitée à long terme, il est supposé que les engagements de Copenhague sont maintenus jusqu'en 2055 (sans anticipation des pays d'objectifs plus stricts dans le long terme), date à laquelle un traité international impliquant la collaboration parfaite de tous les pays est approuvé et appliqué : tous les pays, y compris les pays hors Annexe 1, coopèrent et les efforts d'atténuation sont effectués là où ils sont les plus efficaces. Dans ce cas, la contrainte limitant l'augmentation de la température à 2°C ne peut pas être respectée, étant donné les options d'atténuation disponibles dans le modèle.

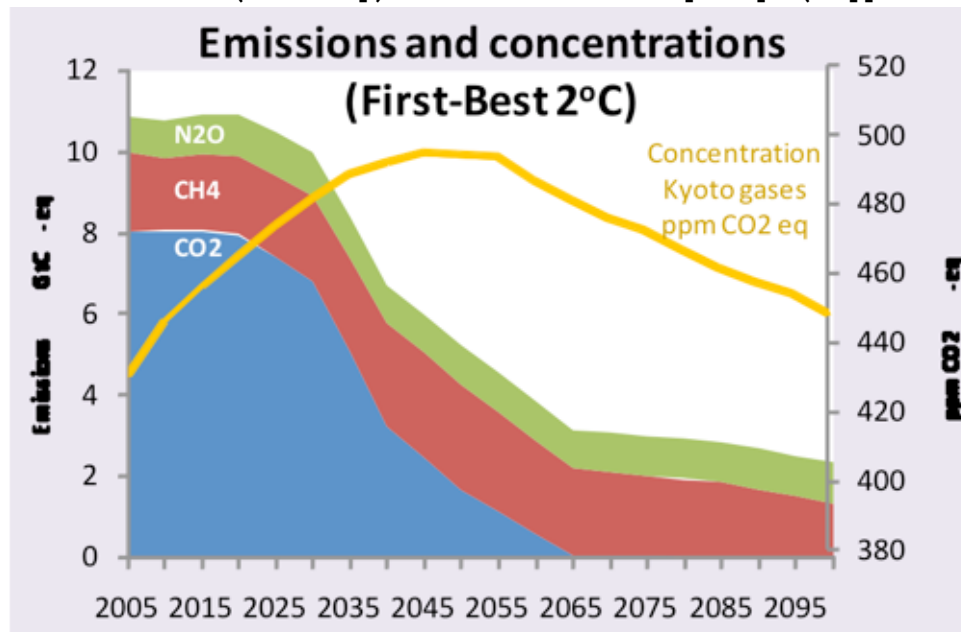
SCÉNARIO 12 : COOPÉRATION OPTIMALE POUR LIMITER LE RÉCHAUFFEMENT À 2°C

Ce scénario est un scénario utopique : il tend à représenter l'optimum social mondial permettant de limiter le réchauffement global en 2100 à 2°C. Des politiques d'atténuation sont mises en œuvre au moment et à l'endroit où elles seront les plus efficaces. Ce scénario va principalement servir d'étalon afin de pouvoir évaluer les coûts minima inhérents au respect de la contrainte sur l'augmentation de la température. La coopération optimale implique l'abandon des mécanismes de marché. Le modèle GEMINI-E3 n'a donc pas pu être employé pour ce scénario.

Même avec une coopération entière et immédiate de toutes les parties (solution socialement optimale), respecter la limitation de l'augmentation de la température à 2°C comparé à l'ère préindustrielle est difficile.

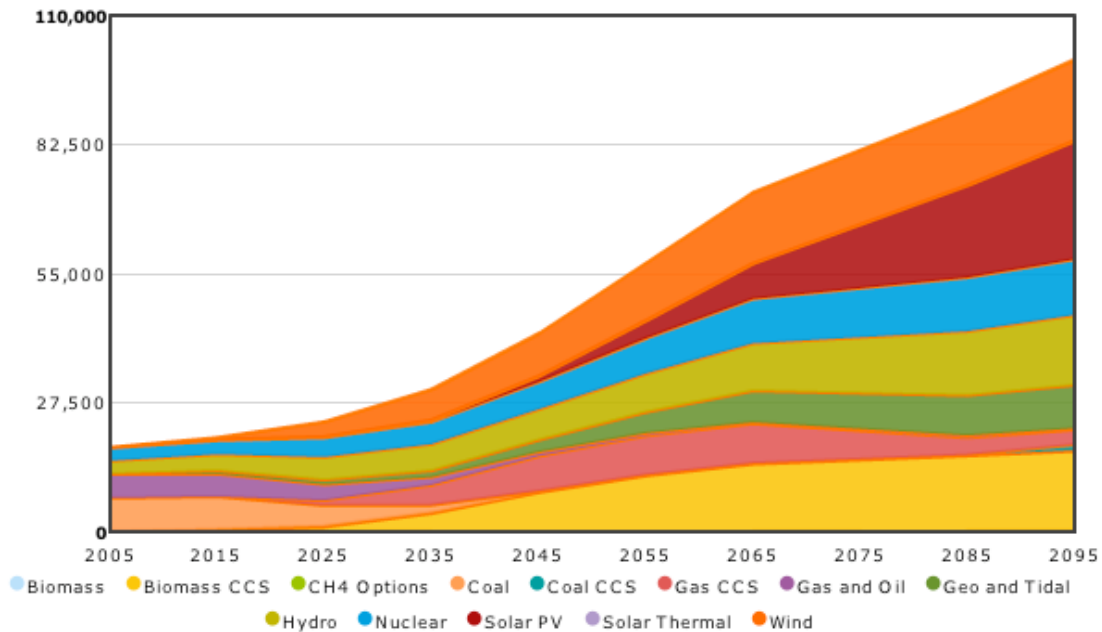
Le pic de concentration de GES dans l'atmosphère intervient aux environs de 2045, puis le système devient neutre en CO₂ en 20 ans.

Figure 53 : émissions (en GtC-eq.) et concentration atmosphérique (en ppm CO₂-eq.)



Il y a une très forte électrification du système énergétique, et l'électricité est presque entièrement décarbonisée d'ici à 2050. L'approvisionnement en énergie renouvelable représente environ 60% de la production d'électricité d'ici 2050 et 75% d'ici 2100, et toutes les formes d'énergie renouvelables sont présentes dans le portefeuille énergétique.

Figure 54 : génération d'électricité en milliard de kWh



Tout comme cela est reconnu par de nombreux modèles, les émissions négatives générées par les centrales à biomasse et les bioraffineries couplées aux technologie de capture et séquestration du carbone jouent un rôle crucial afin de compenser l'utilisation des combustibles fossiles (principalement dans l'industrie et les transports), mais aussi pour compenser les émissions non énergétiques, principalement dues à l'agriculture. Le prix du CO2 atteint \$900 (\$₂₀₀₀) la tonne en 2100.

Coût de la stratégie : Valeur actuelle nette (VAN) du coût de la stratégie exprimé en % de la VAN du PNB cumulé sur l'ensemble du siècle : **1.76%**

Quantité totale de carbone séquestré en puits géologiques : **409 GtC**

SCÉNARIO 13 : ACCORD INTERNATIONAL POUR LIMITER LE RÉCHAUFFEMENT À 2°C

Ce scénario est le seul en mesure de limiter l'augmentation de température en dessous de 2°C à long terme. Il suppose la mise en œuvre des engagements de l'accord de Copenhague pour l'année 2020, immédiatement suivi par des réductions d'émissions plus importantes entre 2030 et 2050, et enfin, la mise en œuvre d'un traité international impliquant la collaboration parfaite de tous les pays à partir de 2055 ; tous les pays coopèrent et les efforts d'atténuation sont effectués au moment et au lieu

où ils sont les plus efficaces : une politique socialement optimale est appliquée à partir de 2055.

Un des intérêts de ce scénario est de le comparer avec le scénario précédent (scénario 12 : coopération optimale pour limiter le réchauffement à 2°C) et d'évaluer les impacts de la «déviation» par rapport à celui-ci, pour lequel une pleine coopération commenceraient dès 2012.

Une décarbonisation accélérée du système énergétique est observée autour de 2040-2060 pour compenser les émissions plus élevées au cours de la première moitié du siècle. Cette décarbonisation accéléré est permise, entre autres, par l'utilisation plus importante de centrales à énergie renouvelable et au gaz associé à la technologie de CSC au cours de la première période (comparé au scénario précédent), puis par le remplacement du charbon par le gaz dans des secteurs d'usage.

Figure 55 : énergie primaire (en supposant FEQ=1 pour les énergies autres que fossiles) en EJ

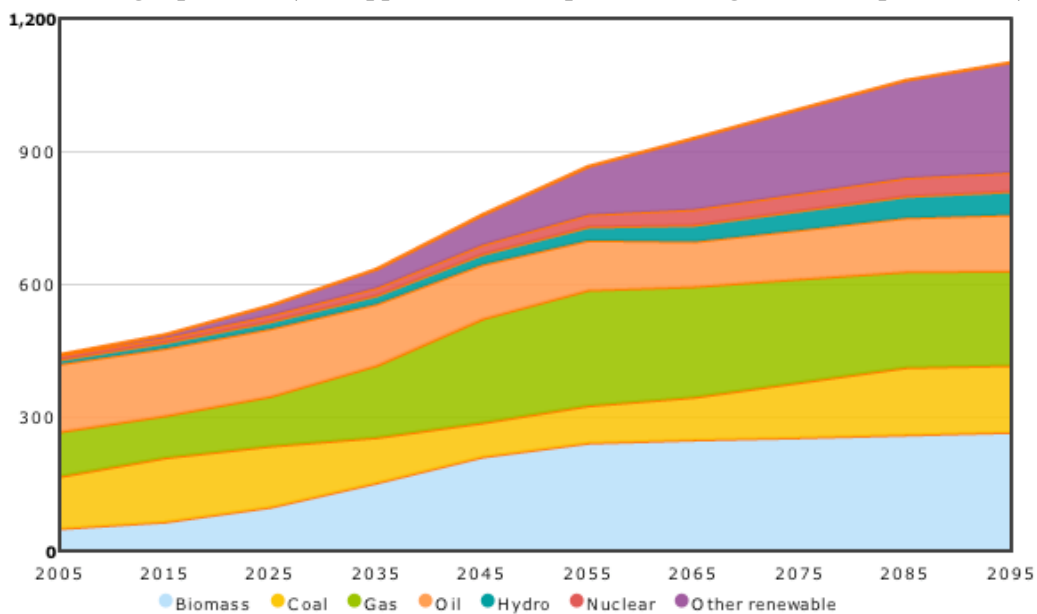


Figure 56 : génération d'électricité en milliard de kWh

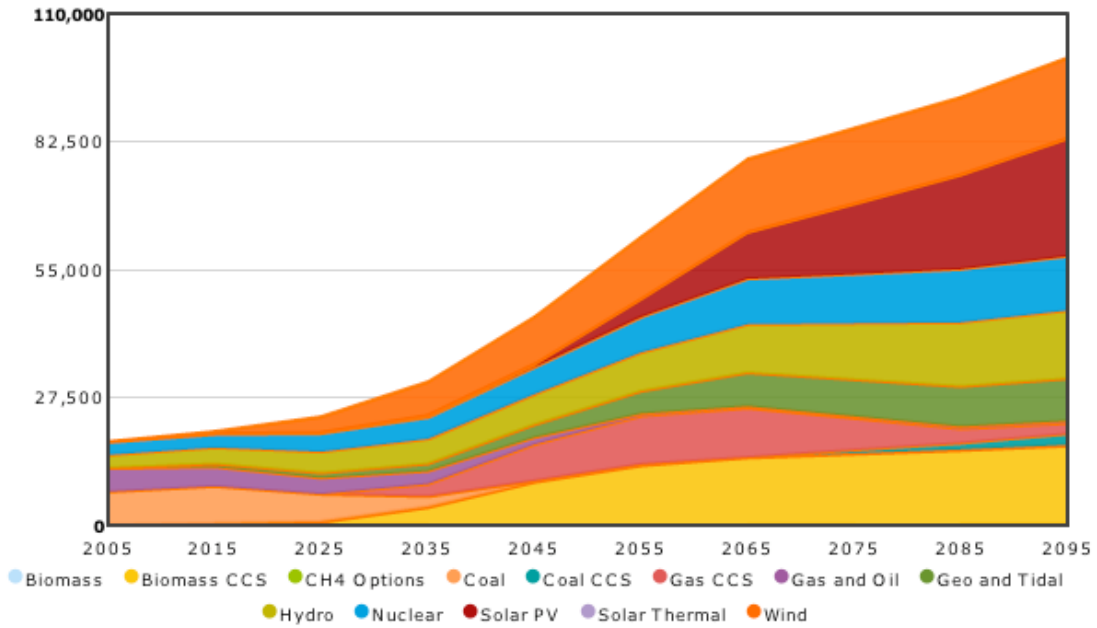
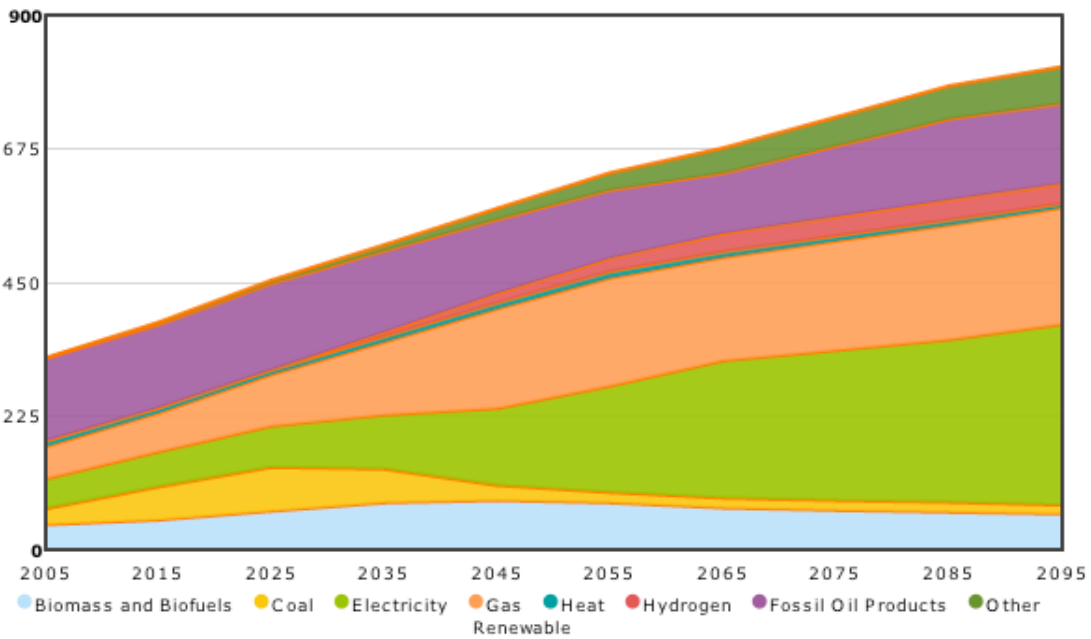
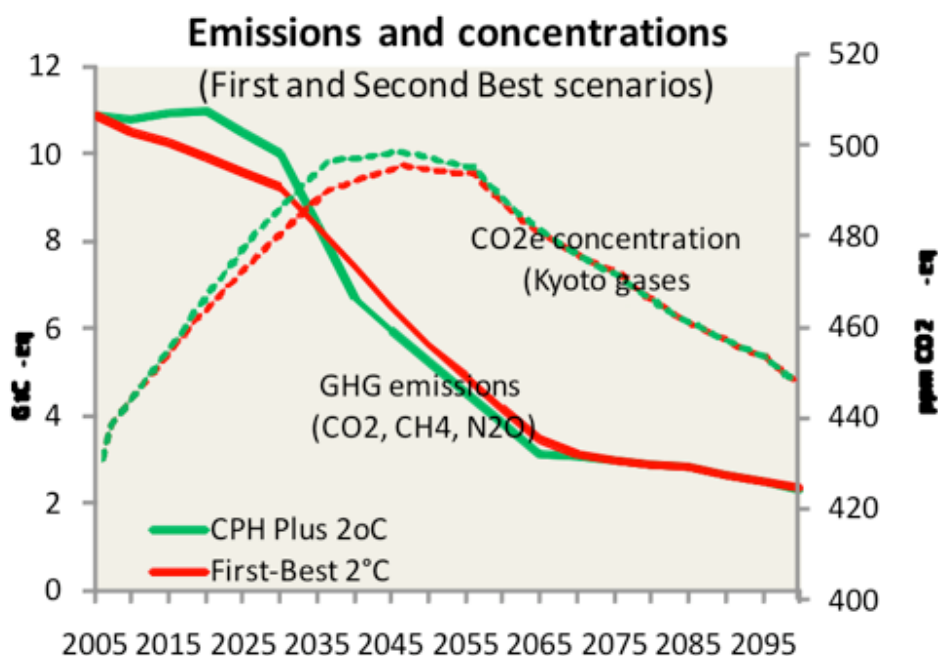


Figure 57 : consommation d'énergie par le secteur de la demande finale incluant les usages non-énergétiques, exprimée en EJ



Le prix du carbone atteint \$380 (\$₂₀₀₀) la tonne en 2050 (\$320 la tonne dans le scénario précédent) et près de \$900 la tonne en 2065 (resp. \$750 la tonne). Les prix à la fin du siècle sont très semblables dans les deux scénarios.

Figure 58 : émissions (en GtC-eq.) et concentration atmosphérique (en ppm CO2-eq.)



Coût de la stratégie : Valeur actuelle nette (VAN) du coût de la stratégie exprimé en % de la VAN du PNB cumulé sur l'ensemble du siècle : **1.82%**

Quantité totale de carbone séquestré en puits géologiques : **417 GtC**

10.3. RÉSULTATS DES SIMULATIONS RÉALISÉES AVEC GENIE

Avertissement : Sauf mention contraire, les résultats de GENIE indiqués ci-dessous, dans les annexes, et sur le site internet sont mesurés par rapport à 2005. Il faut donc ajouter 0.76°C pour obtenir les réchauffements relatifs à la période préindustrielle.

Les estimations par GENIE-2 de l'augmentation de la température moyenne de l'air de surface, ainsi qu'une mesure de l'incertitude associée, sont résumées ci-dessous. Un ensemble d'émulations a été calculé pour chaque scénario d'où nous avons tirés les moyennes et écart-types de l'augmentation de la température de l'air de surface (aussi appelé réchauffement climatique) comparée à l'ère préindustrielle.

Tableau 28 : augmentation de la température moyenne de l'air de surface (en °C) comparée à l'ère préindustrielle à différentes périodes pour les scénarios de la Phase II

	2030	2050	2100
Echec suite à l'Accord de Copenhague	1.30±0.25	1.83±0.46	3.45±1.05
Accord limité à l'Annexe 1	1.31±0.25	1.84±0.46	3.39±1.04
Accord de Copenhague (engagements minimaux)	1.30±0.22	1.80±0.49	2.93±0.94
Accord de Copenhague (engagements maximaux)	1.30±0.22	1.75±0.49	2.73±0.92
Accord de Copenhague amélioré	1.30±0.23	1.70±0.50	2.44±0.90
Accord tardif (en 2050)	1.32±0.23	1.83±0.53	2.61±0.92
Coopération optimale pour limiter le réchauffement à 2°C	1.28±0.26	1.66±0.55	2.04±0.89
Accord international pour limiter le réchauffement à 2°C	1.30±0.26	1.68±0.55	2.05±0.90

Le réchauffement climatique a été calculé comme la variation de la température moyenne mondiale sur 10 ans entre les périodes 2030, 2050 et 2100, comparée à l'ère préindustrielle. En raison de la faible sensibilité du climat du modèle GENIE-2 (le paramètre de sensibilité du climat est ici égal à 2° C), une mise à l'échelle a été réalisée afin que les résultats moyens de GENIE correspondent à ceux de TIAM (sensibilité du climat de 3,5° C). Cela a été fait pour corriger la faible polarisation du modèle GENIE-2 comparé à l'ensemble des modèles du GIEC. Afin de montrer le réchauffement par rapport à l'ère préindustrielle, un ajustement de 0.76°C a été ajouté pour tenir compte de réchauffement historique.

La figure 59 suivante illustre les impacts prévus du changement climatique en fonction de l'augmentation de la température moyenne de surface, ainsi que l'intervalle plausible de réchauffement à plus ou moins 1σ autour de la moyenne pour trois scénarios de la phase II (Accord limité à l'Annexe 1, Accord de Copenhague (engagements maximaux) et Coopération optimale pour limiter le réchauffement à 2°C). Notre analyse montre que les pire effets possibles (>3°C de réchauffement) devraient être évités si les engagements actuels sont remplis. Mais elle montre aussi que les risques encourus et les impacts prévus sont malgré tout très importants, risques en partie dûs à la très grande incertitude qui subsiste.

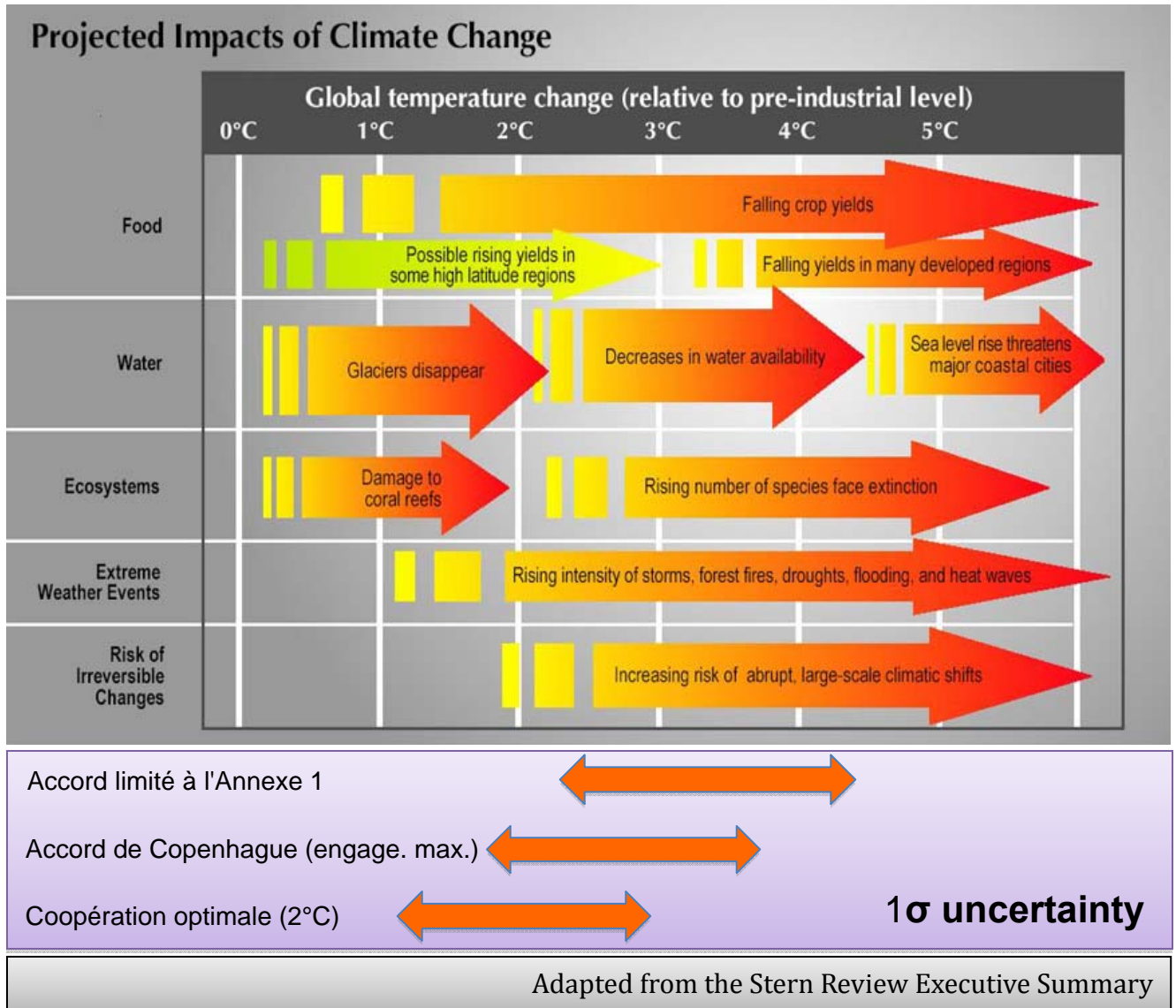


Figure 59 : impacts prévus du changement climatique en fonction de l'augmentation de la température de l'air de surface, et représentation de l'intervalle à plus ou moins 1σ de l'augmentation de température prévue pour trois scénarios en 2100.

Pour chacun des trois scénarios illustrés, la répartition spatiale du réchauffement émulé est illustrée ci-après.

Afin de fournir des estimations de la distribution spatiale de l'incertitude, nous avons calculé le réchauffement vraisemblable - à plus ou moins un σ - maximum (minimum) en ajoutant (soustrayant) les valeurs de la carte représentant l'écart-type à chacune des valeurs des cartes représentant la moyenne, et ce pour les trois scénarios illustrés. Cela donne une idée de la représentation spatiale de l'intervalle vraisemblable du réchauffement.

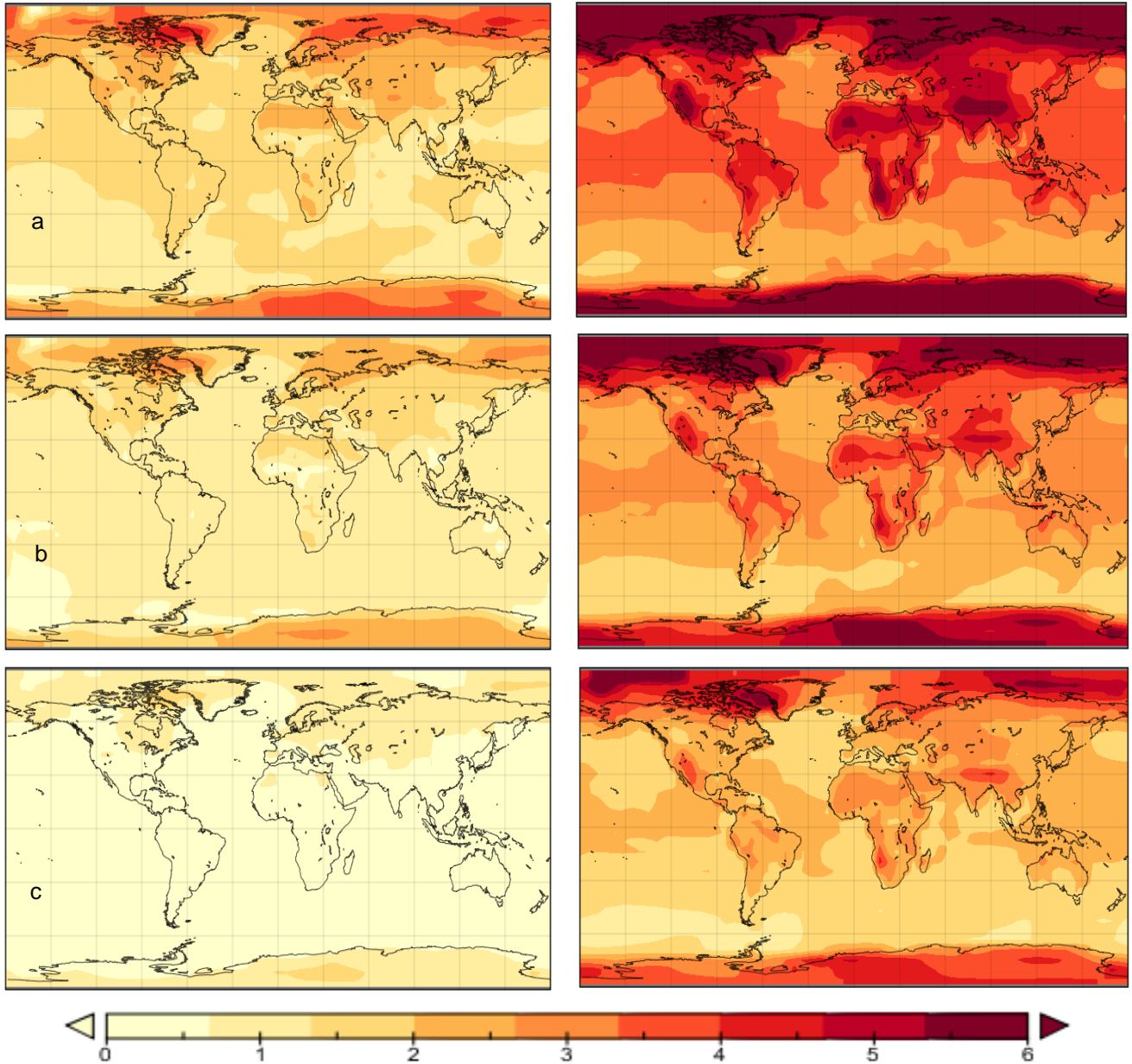
Si l'on considère que les variables aléatoires suivent des lois normales, il y aurait environ 16% de probabilité que le réchauffement soit supérieur à un écart-type de la moyenne.

Dans la pratique, les distributions ne sont pas normales, mais plutôt biaisée, avec une longue queue de distribution (représentant les réchauffements supérieurs). Cela implique que la probabilité de réchauffement supérieur à un écart-type au-dessus de la moyenne est susceptible d'augmenter par rapport à une distribution normale, tandis que la probabilité d'un plus grand refroidissement est susceptible de réduire.

Le réchauffement terrestre devrait être plus grand que le réchauffement au dessus des océans (refroidi par l'inertie thermique des océans). Ces cartes mettent aussi en évidence que même dans le plus conservateur des scénarios (Coopération optimale pour limiter le réchauffement à 2°C), nos simulations suggèrent qu'il existe une forte probabilité de températures supérieures à celles attendues dans le cadre du scénario le moins conservateur (Accord Limité à l'annexe 1).

Réchauffement climatique minimum

Réchauffement climatique maximum



- a) Accord limité à l'Annexe 1
- b) Accord de Copenhague (engagements maximaux)
- c) Accord optimal pour limiter le réchauffement à 2°C

Figure 60 : représentation spatiale des réchauffements climatiques inférieurs (1 écart-type en dessous de la moyenne) à gauche et supérieur (1 écart-type au dessus de la moyenne) à droite pour 3 scénarios de la Phase II.

10.4. CONCLUSION DE LA PHASE II

Cette deuxième phase du projet a atteint tous les objectifs fixés. Premièrement, nous avons proposé et mis en œuvre différentes méthodologies de prise en compte de l'incertitude pour chacun des trois modèles. Ces travaux qui sont présentés partiellement sur le site internet ont donné lieu à des publications scientifiques. Ensuite, nous avons enrichi la base de données du site internet avec huit nouveaux scénarios d'engagements post-Copenhague. Ces scénarios, qui couvrent un large éventail de politiques au niveau international, intègrent une représentation plus fine de l'économie par rapport aux scénarios de la phase I et considèrent également le cas de marchés fractionnés du carbone. Enfin, nous avons mis en place sur le site internet un espace interactif accessible à tous les acteurs du climat. Cet espace doit permettre à terme i) de faciliter et d'amplifier le dialogue entre modélisateurs et acteurs du développement durable par le biais d'une bonne diffusion des résultats de la recherche, et ii) d'offrir la possibilité aux utilisateurs de spécifier leurs propres variantes et d'en observer les conséquences en ligne. Le réseau du MEDDTL avec ses nombreuses connexions auprès des négociateurs/acteurs du climat doit permettre une large diffusion et utilisation de cet outil.

11. CONCLUSION

Les travaux réalisés dans le cadre du projet Synscop-15 ont permis d'atteindre les deux objectifs suivants: 1) mettre à disposition des acteurs du climat, des outils et modèles d'évaluation de politiques environnementales globales et 2) exploiter ces outils sur un ensemble de scénarios couvrant un large éventail de politiques au niveau international afin d'en simuler les impacts économiques, énergétiques et climatiques.

Afin d'atteindre ces deux objectifs, un ensemble de scénarios politiques a été défini en collaboration avec les membres du MEDDTL. Les évaluations de ces politiques ont ensuite été réalisées à partir de trois modèles, économique GEMINI-E3, énergétique TIAM et climatique GENIE, modèles qui sont reconnus par la communauté scientifique et couramment exploités dans ce genre d'étude. Enfin, un site internet interactif <http://synscop15.ordecys.com/> permettant à la fois une large diffusion des résultats des simulations ainsi qu'une évaluation rapide et simple de nouvelles politiques environnementales a été spécialement conçu. Ce site a pour vocation de faciliter et d'amplifier le dialogue entre, d'un côté, les modélisateurs et la communauté scientifique, et de l'autre, les acteurs du développement durable et politiques. Les différentes fonctionnalités qu'offre ce site internet sont les suivantes.

Premièrement et comme indiqué ci-dessus, il permet de consulter une base de données conséquente contenant les impacts économiques, énergétiques et climatiques pour un ensemble de scénarios d'engagements post-Copenhague. Les diverses scénarios politiques étudiés jusqu'à présent couvrent un large éventail de politiques au niveau international et sont compatibles avec les différents accords en vigueur.

Deuxièmement, le site internet met l'accent sur la nature incertaine des résultats produits par les diverses modèles. Plusieurs méthodologies ont ainsi été proposées et mises en œuvre afin de mesurer et d'appréhender l'impact des différentes sources d'incertitudes présentes dans chacun des trois modèles. Ces travaux qui sont résumés sur le site internet ont donné lieu à des publications scientifiques.

Enfin, la dernière fonctionnalité du site internet et non la moindre est la mise en ligne d'un espace interactif accessible à tous les acteurs du climat. Cet espace offre la possibilité aux utilisateurs de spécifier leurs propres variantes de scénarios politiques et d'en observer les conséquences en ligne. Évidemment, l'intérêt d'un tel service va bien au delà du terme du projet Synscop15. Ainsi et afin d'assurer la pérennité et l'exploitation du site Synscop15 au terme du contrat en cours, la société ORDECSYS s'engage à maintenir le site internet et les différents modélisateurs (ENERIS pour TIAM, Open University pour GENIE et ORDECSYS/EPFL pour GEMINI-E3) se proposent de répondre à toutes questions et requêtes mises sur le forum. De plus, ces équipes répondront favorablement à des demandes de nouvelles simulations portant

sur des scénarios politiques non explorés, moyennant une rétribution qui sera à définir en fonction du travail requis.

Pour conclure, un dernier point essentiel à discuter est la diffusion de ces outils web auprès des acteurs du climat afin d'en assurer une large utilisation. Premièrement, nous pensons que le MEDDTL avec ses nombreuses connexions auprès des négociateurs/acteurs du climat peut fortement y contribuer. Ainsi, nous suggérons que le MEDDTL organise une réunion de clôture du projet à laquelle serait conviée les différents négociateurs/acteurs du climat. Cette réunion serait l'occasion de présenter les résultats des premières simulations et les différentes possibilités offertes par le site internet interactif. Deuxièmement, nous projetons de mettre à profit nos engagements en cours et à venir dans le cadre de projets de recherche européens sur le climat pour publiciser le site Synscop15. En effet, les sociétés ORDECSYS et ENERIS ainsi que l'Open University sont impliqués dans un certain nombre de projets environnementaux dans lesquels Synscop15 peut être exploité. Par exemple, nous pouvons citer le projet **FP7 Ermitage** ayant en particulier pour objectif de faciliter l'évaluation de politiques environnementales grâce à l'utilisation couplée de modèles économiques, énergétiques, climatiques, etc., au travers d'une plate forme internet dédiée. Il ne fait aucun doute que ces deux projets sont complémentaires et que l'expérience accumulée dans le cadre de Synscop15 sera exploitée.

12. RÉFÉRENCES

Agence Internationale de l'Énergie (2009) « How the energy sector can deliver on the climate agreement in Copenhagen », Technical Report, 2009.

Bernard A., et Marc Vielle (2003) Measuring the Welfare Cost of Climate Change Policies: A Comparative Assessment Based on the Computable General Equilibrium Model GEMINI-E3, *Environmental Modeling and Assessment*, Volume 8, Number 3, pp 199-217, September.

Bernard, A., et Marc Vielle (2009) « Assessment of European Union transition scenarios with a special focus on the issue of carbon leakage » A., *Energy Economics*, Vol 31, Supplement 2, December, pp S274-S284.

Crucifix, M., (2006) Does the Last Glacial Maximum constrain climate sensitivity? *Geophysical Research Letters* 33: L18701

EPA (2006) « Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020 » *Office of Atmospheric Programs EPA Report 430-R-06-003*.
IEO 2009, « International Energy Outlook 2009 », Energy Information Administration *EIA/DOE*.

Friedlingstein, P., et al. (2006) Climate-carbon cycle feedback analysis: results from the C4MIP model Intercomparison. *Journal of Climate* 19 3337-3353

Labriet, M., Loulou R. and A. Kanudia (2009). Modeling Uncertainty in a Large scale integrated Energy-Climate Model. In: *Environmental Decision Making under Uncertainty*, J.A. Filar and A.B. Haurie (eds), pp.51-77.

Labriet, M. and R. Loulou (2008), How Crucial is Cooperation in Mitigating World Climate? Analysis with World-MARKAL. *Computational Management Science*, Vol. 5, Issue 1, pp. 67-94.

Loulou, R., M. Labriet and A. Kanudia (2009), Deterministic and Stochastic Analysis of alternative climate targets under differentiated cooperation regimes. *Energy Economics*, Volume 31, Supplement 2, International, US and EU Climate Change Control Scenarios: Results from EMF22, p.S131-143.

Loulou, R. and M. Labriet (2008), ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model Part I: Model structure. *Computational Management Science*, Vol. 5, Issue 1, pp.7-40.

Loulou R. (2008), ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model Part II: Mathematical formulation. *Computational Management Science*, Vol. 5 (1-2), 41-66.

Loulou, R., M. Labriet, A. Haurie, A. Kanudia (2009), OPEC Oil Pricing Strategies in a Climate Regime: a Two-Level Optimization Approach in an Integrated Assessment Model. *Environmental Modeling and Assessment*, submitted, under revision.

Tirole, J., (2009), Politique climatique : une nouvelle architecture internationale, Rapport du Centre d'Analyse Stratégique.

Vaillancourt, K., Labriet M., Loulou R. and JP Waaub (2008), The role of nuclear energy in long-term climate scenarios: An analysis with the World-TIMES model. *Energy Policy*, Vol.36, Issue 7, pp.2296-2307.

WEO (2007), World Energy Outlook 2007, International Energy Agency, Paris.

13. ANNEXES

Cette annexe contient, sous forme de trois fichiers PDF envoyés séparément, les trois rapports techniques qui ont été rédigés concernant la prise en compte de l'incertitude dans les modèles. Ce sont des versions préliminaires d'articles acceptés pour publication dans des revues internationales et pour lesquels il a été mentionné que le programme GICC finance tout ou partie de la recherche réalisée.

Les trois articles sont les suivants:

1. Energy Security: a robust optimization approach to design a robust European energy supply via TIAM-WORLD, par Frédéric Babonneau, Amit Kanudia, Maryse Labriet, Richard Loulou, Jean-Philippe Vial. À paraître dans *Environmental Modeling and Assessment*, 2011

fichier: securityenergysupply.pdf

2. Combining Stochastic Optimization and Monte-Carlo Simulation to Deal with Uncertainties in Climate Policy Assessment, par Frédéric Babonneau, Alain Haurie, Richard Loulou, Marc Vielle, à paraître dans *Environmental Modeling and Assessment*, special issue on "Modeling Uncertainty in Energy Policy and the Economics of Climate Change".

fichier: Stochastic Programming and Monte Carlo.pdf

3. Dimensionally reduced emulation of an AOGCM for application to integrated assessment modelling, par P. B. Holden and N. R. Edwards, *Geophysical Research Letters*, V. 37, 5 pp, 2010

fichier: GENIE emulation.pdf