

GICC -- 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 INTERMÉDIAIRE

KANLO-ORDECSYS-OU

FÉVRIER 2010

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction : Rappel des objectifs et des résultats attendus.....	3
1.1. Objectifs du projet.....	3
1.2. Résultats attendus.....	4
2. Résumé des résultats de la Phase I	5
3. Adaptation des modèles.....	6
3.1 Récents changements apportés à TIAM.....	6
3.2 Adaptation du modèle climatique GENIE.....	7
4. Coordination des modèles	7
4.1 Utilisation coordonnée des trois modèles.....	7
4.2 Utilisation de TIAM pour simuler les scénarios climatiques.....	9
4.3 L'émulation statistique.....	10
5. Scénarios considérés	14
5.1 Cinq scénarios d'engagements à moyen terme	14
5.2. Après 2030	17
5.3. Le cas particulier de l'ETS européen.....	18
6. Résultats et leur Mise en œuvre sur le site internet.....	20
6.1 Organisation du site Internet.....	20
6.2 Descriptif des résultats de simulation affichés	28
6.3 Résultats des simulations réalisées avec GEMINI-E3.....	29
6.3 Analyse des simulations réalisées avec TIAM	40
6.5 Résumé des résultats des simulations fournies par GENIE	44
7. Conclusion de la phase I.....	48
8. Références.....	48

1. INTRODUCTION : RAPPEL DES OBJECTIFS ET DES RÉSULTATS ATTENDUS

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 qui culmineront 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, 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 ou discutées 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 elle-même).

Dans une seconde phase, le système permettra aussi de suivre, dans l'année qui suivra 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 inclura 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) sont 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) amplifiera l'ensemble des scénarios considérés, et facilitera l'accès interactif aux scénarios par les utilisateurs du site internet. Trois éléments seront particulièrement l'objet de la phase II:

- Le développement d'une méthodologie de prise en compte de l'incertitude (partiellement accompli durant la phase I);
- Le traitement d'un plus grand nombre de scénarios, 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. RÉSUMÉ DES RÉSULTATS DE LA 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, ont très bien encadré 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 permette 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.

La phase II, qui a démarré en 2010, va mettre à la disposition d'un ensemble d'experts et négociateurs agréés un espace collaboratif permettant d'explorer un ensemble élargi de scénarios, correspondant aux engagements pris par les pays signataires de l'accord, en janvier 2010. On développera aussi un espace de discussion des différentes manières de traiter l'incertitude dans les modèles climatiques, macro-économiques ou technico-économiques.

3. ADAPTATION DES MODÈLES

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 les mieux adapter aux objectifs du projet. Dans cette section, nous résumons les principales adaptations des trois modèles.

3.1 RÉCENTS CHANGEMENTS APPORTÉS À TIAM

En plus des ajustements effectués lors de l'harmonisation entre 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 attendu 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*) permettant d'évaluer, dans le cas d'une cible climatique résultant irréalisable par le modèle, les réductions d'émissions additionnelles au potentiel disponible dans le modèle pour rendre faisable la cible climatique en question.

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 à la section 4 décrivant la coordination des modèles.

4. COORDINATION DES MODÈLES

4.1 UTILISATION COORDONNÉE DES TROIS MODÈLES

L'utilisation coordonnée des trois modèles se fait comme suit (figure 1). 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 (aussi appelé compte de référence) 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.

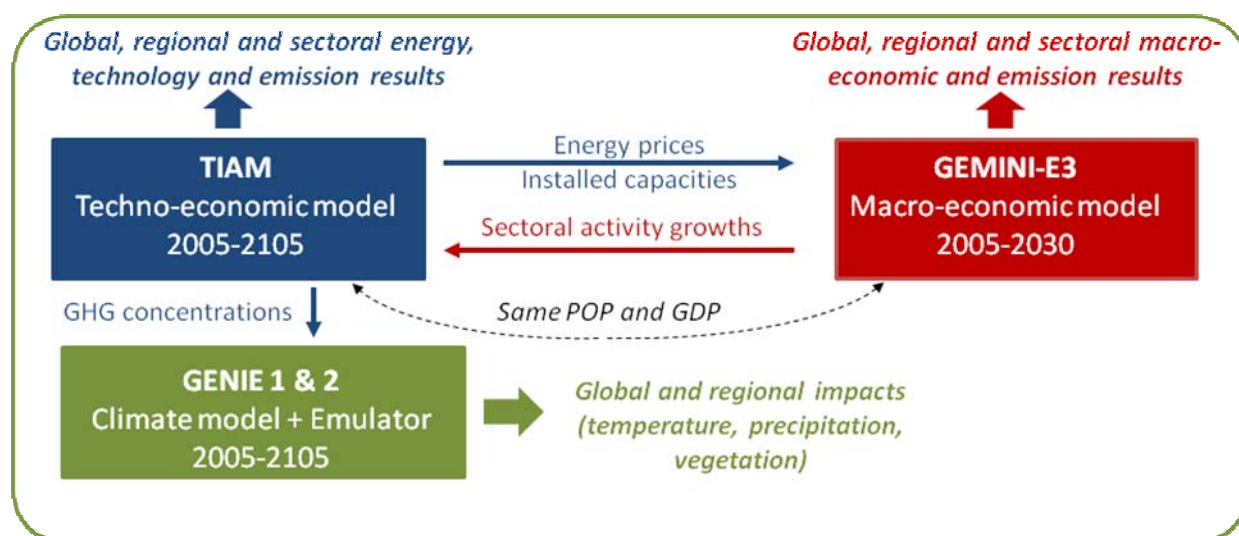


Figure 1. Utilisation coordonnée des trois modèles

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 section 5 pour la description des cinq scénarios simulés dans cette première phase). 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. 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'ÉMULATION 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 Tchebichev. 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 ce 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

doublage du CO₂) de 3.8°C. Les résultats des 24 émulateurs peuvent se décomposer comme suit. Les émulateurs calculent les valeurs moyennes et les écarts-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 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 Tchebichev (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 Tchebichev associés, lance l'ensemble des émulateurs R et restitue les résultats à l'utilisateur. A l'exception des cartes 2D qui doivent pour le moment toutes être générées a priori, les autres étapes sont automatisées et se font en ligne. Il nous reste à déterminer la façon de rendre automatique cette dernière procédure, ce qui sera fait durant la phase II du projet.

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.

5. SCÉNARIOS CONSIDÉRÉS

5.1 CINQ SCENARIOS D'ENGAGEMENTS A MOYEN TERME

L'objectif de ces cinq scénarios, définis avant la tenue du sommet de Copenhague, est 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 doivent 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 3 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. La répartition des efforts de chacun des pays après 2030 fera l'objet d'un choix effectué par l'utilisateur qui pourra définir sa règle à l'aide de différents critères standards de répartition de la charge (population, PIB, émissions historiques, etc.). Cette possibilité sera mise en œuvre dans la deuxième phase de l'étude.

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 4). 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 3 : Emissions de référence passées (tous gaz : panier Kyoto)

	Année	Émissions en Gt CO ₂ -eq	Sources : (cf. Références section 8)
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 4 : 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 non-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. Aux Etats-Unis, 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 Etats-Unis, et seule l'Europe remplit ses engagements de -20% en 2020. En 2020, le réchauffement climatique avéré relance la négociation, les Etats-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 INDUSTRIELS +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 : VERS UN 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.

5.2. APRÈS 2030 : PASSAGE D'UN CONTEXTE DE 'POLITIQUES FRAGMENTÉES' À LA MISE EN PLACE D'UN PRIX UNIQUE DU CARBONE

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.

5.3. LE CAS PARTICULIER DE L'ETS EUROPÉEN

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. La répartition des efforts au sein des pays de l'Union Européenne sera laissée à la discrétion de l'utilisateur du site WEB, qui pourra définir ses propres règles de répartition et évaluer leurs conséquences.

Tableau 5. 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)

6. RÉSULTATS ET LEUR MISE EN ŒUVRE SUR LE SITE INTERNET

Dans cette section, nous décrivons tout d'abord l'architecture du site Internet Synscop développé pour le projet (6.1), puis la nature des résultats présentés sur le site (6.2). Enfin, nous indiquons les principaux résultats obtenus à l'aide des trois modèles (6.3, 6.4, 6.5), sans prétendre à une présentation exhaustive, qui peut être faite en accédant au site lui-même.

6.1 ORGANISATION DU SITE INTERNET

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

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

PAGE D'ACCUEIL

Une version en anglais
est aussi disponible

English

ACCUEIL | LE PROJET GICC | ACTUALITÉS

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 de changement climatique discutées durant et suite à la conférence des parties à Copenhague.

En sus de la section présente, ce site compte 3 sections accessibles dans le menu principal (la barre centrale horizontale) et présentées ci dessous :

Outils d'évaluation

Pour évaluer les propositions discutées lors des négociations autour de COP-15, il est important de prendre en compte les interactions entre économie, système énergétique et dynamique climatique. Pour ce faire, nous utilisons trois modèles complémentaires : TIAM, GEMINI-E3 et GENIE présentés dans la section Outils d'évaluation.

Analyse de scénario

Il est possible d'explorer les résultats de différents scénarios, comme les conséquences d'un échec des négociations ou celles d'un accord limité au G20. Ces résultats peuvent être comparés à ceux résultant d'un accord global et volontariste.

Des données climatiques, économiques et énergétiques sont disponibles pour chaque scénario.

L'ensemble des scénarios sera enrichi au fur et à mesure de l'évolution des négociations post COP-15.

Aller à la section Analyse de scénario.

Espace Interactif

Cette section est en cours de développement. Elle permettra sous peu d'explorer de manière interactive un ensemble de scénarios correspondant au suivi de COP15. Pour plus d'information, voir, dans l'onglet "Actualités", l'article avant

Terminé

Quatre sections
principales

OUTILS D'ÉVALUATION



The screenshot shows a web browser window with the URL <http://synscop15.ordecys.com/base.php?code=31>. The page header includes the Synscop15 logo, the GICC logo (Le programme Gestion et Impacts du Changement Climatique), and a language selector for English. Below the header is a navigation menu with four items: ACCUEIL, OUTILS D'ÉVALUATION (highlighted with a blue background), ANALYSE DE SCÉNARIO, and ESPACE INTERACTIF. Underneath the menu is a sub-menu with three options: MODÈLE MACRO-ÉCONOMIQUE (selected), MODÈLE ÉNERGIE-TECHNOLOGIE, and MODÈLE CLIMATIQUE. The main content area is titled 'Modèle macro-économique' and features a section for 'GEMINI-E3'. A black arrow points from the 'OUTILS D'ÉVALUATION' menu item to the 'GEMINI-E3' section. The text in the 'GEMINI-E3' section describes the model's development and its use in evaluating climate policies. Below this, there are sections for 'Régions' and 'Secteurs'.

Modèle macro-économique

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 ayant trait à l'énergie, l'environnement et la croissance économique. Le modèle simule l'économie mondiale sur un horizon allant jusqu'en 2050 avec des pas annuels, il est actuellement calibré sur l'année 2001, et sa base de données est reliée à la banque de données du GTAP. La version actuelle est la cinquième adaptation qui fournit un modèle beaucoup plus détaillée que la première version; elle peut être utilisée sur un ensemble large de questions (cf. la bibliographie du modèle). Une version « EMU » a de plus été mise au point afin d'évaluer les politiques macro-économiques au niveau européen en prenant en compte les contraintes liées à l'utilisation d'une monnaie unique (l'euro).

Régions

La version utilisée pour ce projet décrit 14 régions : la France, l'Allemagne, le Royaume-Uni, l'Italie, l'Espagne, la Pologne, les autres pays de l'Union Européenne, les États-Unis d'Amérique, le Japon, le Canada+ Australie+la Nouvelle Zélande, la Russie, la Chine, le Brésil et le Reste du Monde.

Secteurs

GEMINI-E3 décrit cinq secteurs liés à l'énergie : le charbon, le pétrole brut, le gaz naturel, les produits pétroliers et l'électricité. 14 autres secteurs complètent la description de l'économie : l'agriculture, la sylviculture, les produits minéraux, la chimie, la sidérurgie, les papiers & cartons, le transport maritimes, le transport aérien, les transports

Terminé

Description des trois modèles utilisés

ANALYSE DE SCÉNARIOS

SynsCOP15 - Scénario de référence


http://synscop15.ordcsys.com/base.php?code=35

Les plus visités TOCSIN Back Office Health Gardens Gues... Free Translation and... DCM TNO - Knowledge fo... Topica Email List Dir... PHPfileNavigator

Gmail - Boîte de réception (39... HEC Montréal | Georges Zacco... America's Cup - Wikipedia, th... SynsCOP15 - Scénario de réf...

SynsCOP15

GICC Le programme Gestion et Impacts du Changement Climatique English



ACCUEIL OUTILS D'ÉVALUATION **ANALYSE DE SCÉNARIO** ESPACE INTERACTIF

SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE | HYPOTHÈSES COMMUNES | 1: ECHEC DES NÉGOCIATIONS | 2: ACCORD À MINIMA (OCDE) | 3: ACCORD AU SEIN DE OCDE+RUSSIE | 4: ACCORD AU SEIN DU G20 | 5: ACCORD INTERNATIONAL | EXPLORATEUR DE SCÉNARI

Scénario référence

Comment construire le scénario référence

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 autres scénarios, nous utilisons les trois modèles TIAM - GEMINI-E3 - GENIE. Le résultat est une représentation économique et climatique harmonisée et cohérente entre ces trois modèles. La procédure est décrite ci après dans la figure 1.

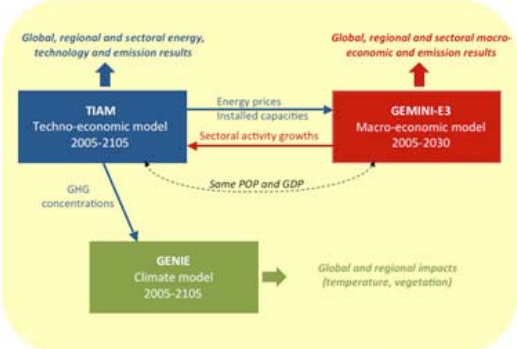


Figure 1: Couplage des 3 modèles

Terminé

Choix de 5 scénarios et explorateur interactif.

Description des résultats de simulations

SynsCOP15 - Scénario de référence

http://synscop15.ordecys.com/base.i

Les plus visités TOCSIN Back Office Heath Gardens Gues... Free Translation and... DCM

Gmail - Boîte ... HEC HEC Montréal ... America's Cup... SynsCOP15 - ...

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.

Année	Agriculture	Commercial	Residential	Industry	Transport	Electricity	Upstream
2005	0.5	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
2015	0.5	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
2025	0.5	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
2035	0.5	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
2045	0.5	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
2055	0.5	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
2065	0.5	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
2075	0.5	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
2085	0.5	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
2095	0.5	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0

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 et présentés par le GIEC.

Le réchauffement à l'horizon 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 hautes latitudes est également largement observé.

Le réchauffement climatique dans le scénario de référence est égal à 4,17 degrés par rapport à l'ère pré-industrielle.

Notez 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 pré-industrielle est donc égale à celle observée par GENIE à laquelle on ajoute 0.76°C (augmentation entre l'ère pré-industrielle 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» et la divergence entre les prédictions des modèles complexes, en particulier pour les changements régionaux, est généralement plus grandes que les modèles simples pourraient le prévoir (Crucifix 2006 Geophysical Res. lettres). Ainsi, nous attendons des incertitudes plus grandes dans GENIE-2 (écart-type autour de 1 à 2 °C sur la terre pour le scénario de référence).

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

Tableau 3 : Changements de trois paramètres climatiques entre 2005 et 2105. source: GENIE-1

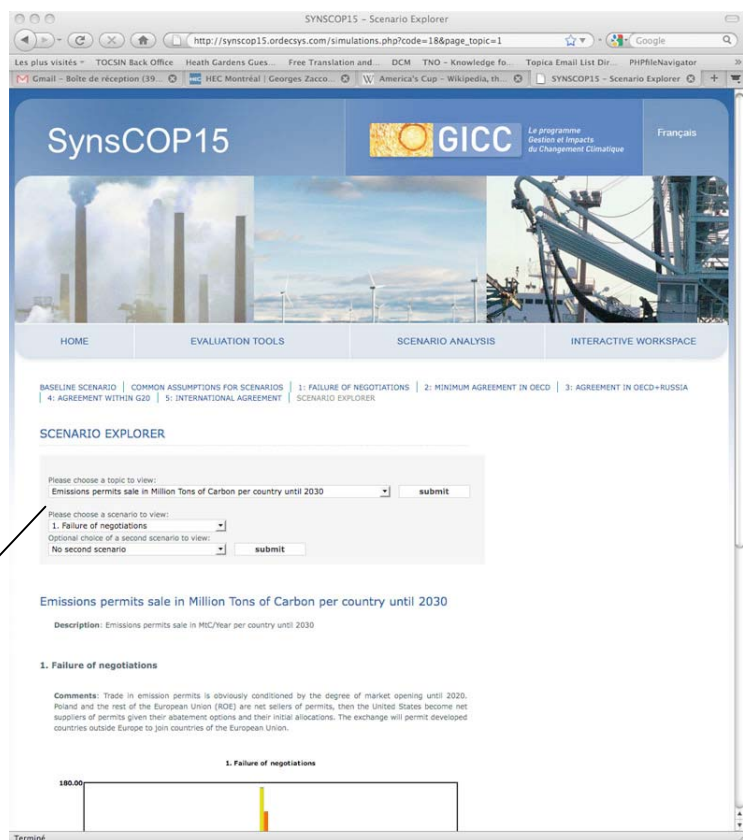
Change in surface temperature

Terminé

EXPLORATEUR DE SCÉNARIOS

La section « Analyse de scénarios » comporte 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.



Zone de sélection des graphiques à comparer

Par exemple, on peut choisir d'analyser les 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 ».

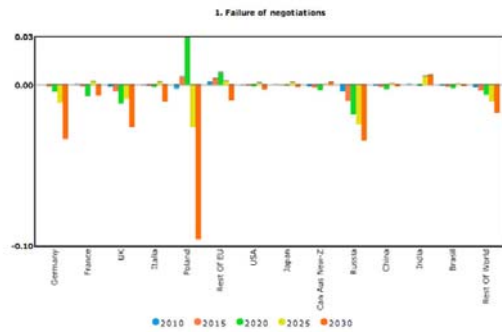
Dans la page, s'afficheront alors dynamiquement deux graphiques représentant l'évolution de ces surplus pour les différents pays et les deux scénarios retenus.

Comparaison des surplus pour deux scénarios contrastés

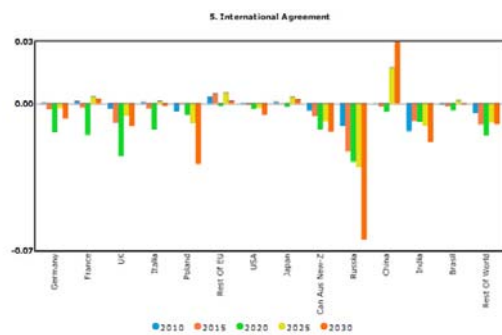


1. Failure of negotiations

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.



5. International Agreement



Comparaison des surplus pour les deux scénarios.

ESPACE INTERACTIF

L'espace interactif est en cours de développement; ce sera la réalisation principale de la phase-2 du projet. Une base de données de résultats de simulation sera exploitée pour fournir, par interpolation, des réponses à un ensemble d'interrogations par l'utilisateur, structuré en requêtes concernant un ensemble de clés de classification.

Liens intéressants et texte des accords de Copenhague.



Dans cet espace, on a déjà inclus une page de liens intéressants et une page décrivant les accords de Copenhague.

6.2 DESCRIPTIF DES RÉSULTATS DE SIMULATION AFFICHÉS

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

ÉCONOMIE

- 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.

ÉMISSIONS

- 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.

ÉNERGIE – 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.

6.3 RÉSULTATS DES SIMULATIONS RÉALISÉES 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.

SCÉNARIO 1 : ÉCHEC DES NÉGOCIATIONS

Le tableau 5 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 6 : 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					

Tableau 7 : 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					

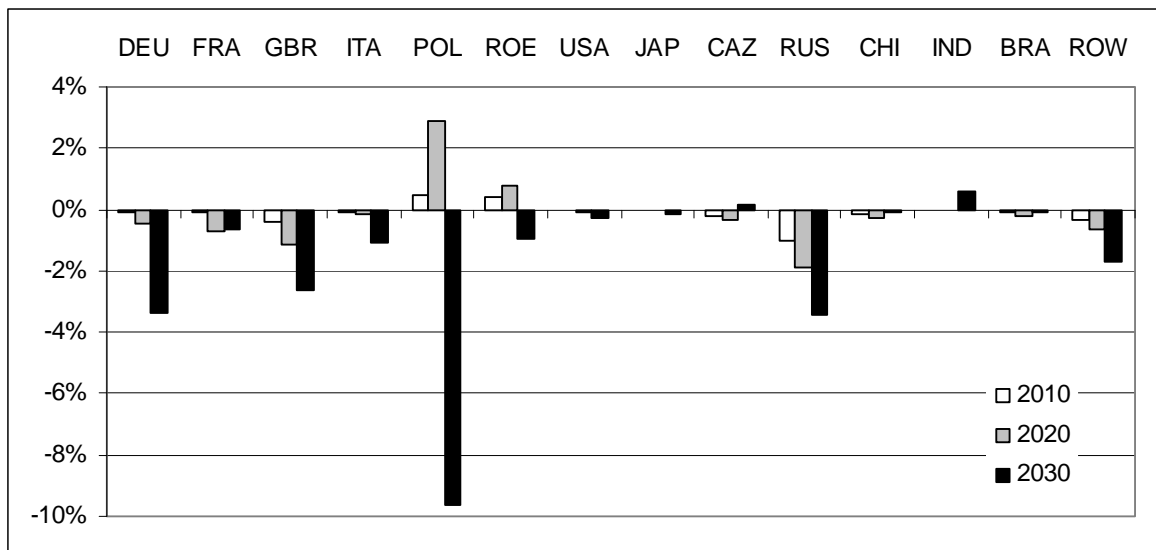
(- achat, + vente)

Les 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.

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 ;
- 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.

Figure 2 : Surplus en % de la consommation finale des ménages – Scénario 1



SCÉNARIO 2 : ACCORD A MINIMA AU SEIN DES PAYS INDUSTRIALISÉS

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 8 : 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.

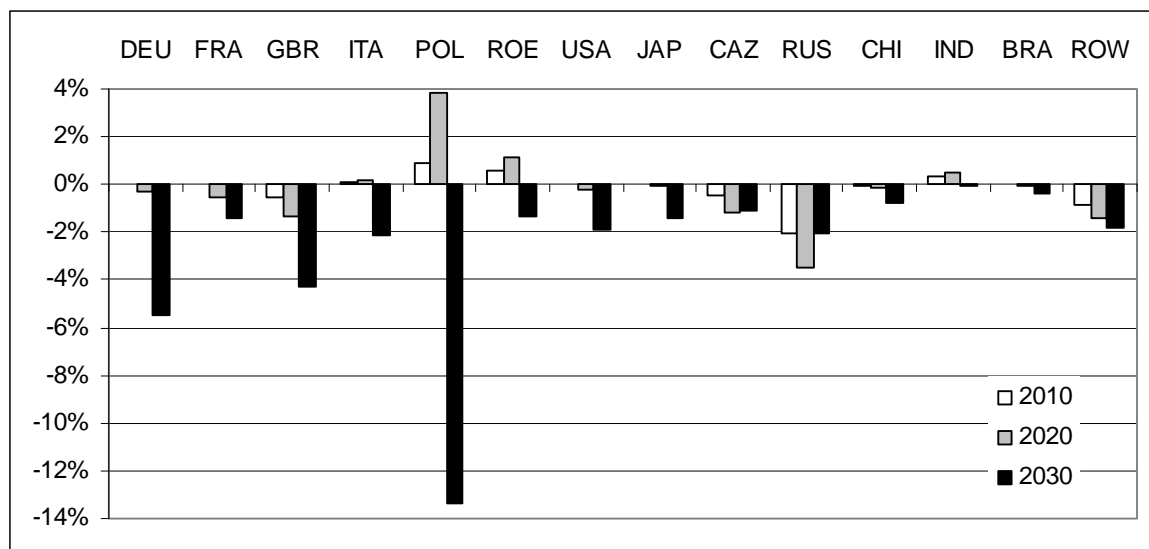
L'augmentation du prix du CO₂ pénaliserait les pays mettant en place une politique de lutte contre le changement climatique par rapport au scénario 1, l'extrême dépendance de la Pologne au charbon la pénaliserait très fortement nécessitant à terme d'envisager des compensations au sein de l'Union Européenne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

Tableau 9 : Échanges de permis d'émission en MT de carbone-équival. – 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 3 : Surplus en % de la consommation finale des ménages – Scénario 2



SCÉNARIO 3 : ACCORD A MINIMA AU SEIN DES PAYS INDUSTRIELS +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 2030, 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 10 : Prix du CO₂ en € 2005 par tonne – Scénario 3

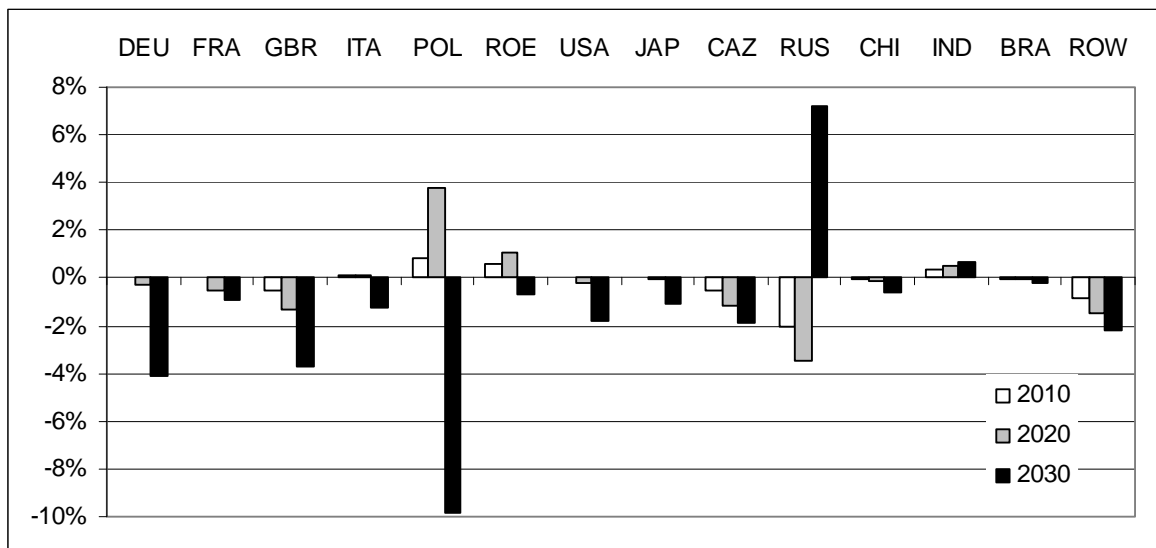
	2010	2015	2020	2025	2030
DEU	3	27	83	64	131
FRA	3	27	83	64	131
GBR	3	27	83	64	131
ITA	3	27	83	64	131
POL	3	27	83	64	131
ROE	3	27	83	64	131
ETS	7	16	33	64	131
USA	6	16	37	64	131
JAP	8	19	34	64	131
CAZ	6	18	44	64	131
RUS				64	131
CHI					
IND					
BRA					
ROW					

Tableau 11 : Échange de permis d'émission en MT de carbone-équivalent. – 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 4 : Surplus en % de la consommation finale des ménages – Scénario 3



SCÉNARIO 4 : VERS UN ACCORD INTERNATIONAL EN FAVEUR DU CLIMAT LIMITÉ 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 12 : Prix du CO₂ en € 2005 par tonne – Scénario 4

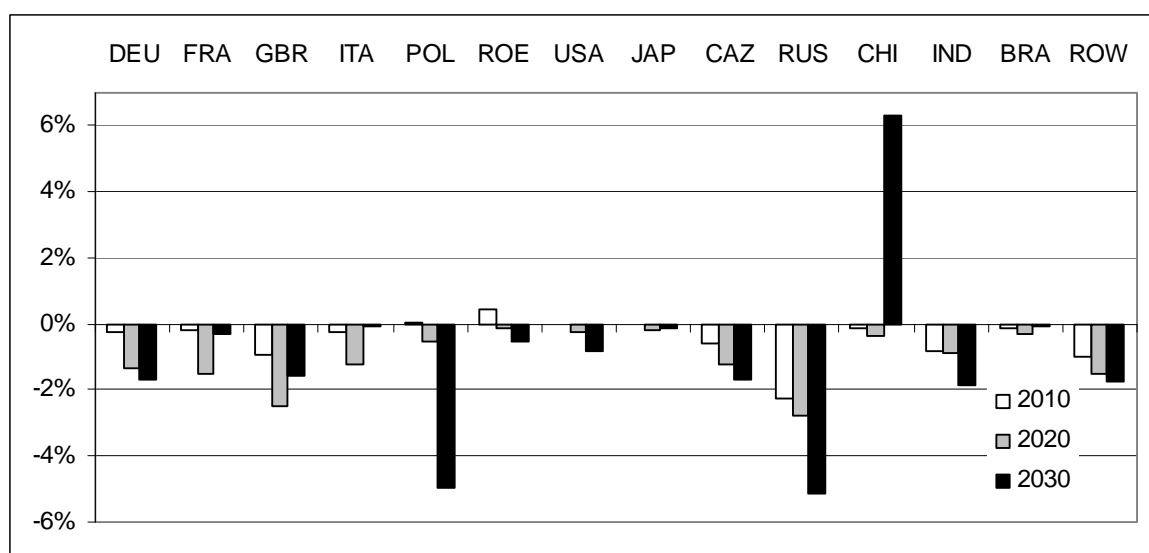
	2010	2015	2020	2025	2030
DEU	5	31	71	19	39
FRA	5	31	71	19	39
GBR	5	31	71	19	39
ITA	5	31	71	19	39
POL	5	31	71	19	39
ROE	5	31	71	19	39
ETS	12	35	90	19	39
USA	6	16	37	19	39
JAP	8	19	33	19	39
CAZ	6	18	44	19	39
RUS				19	39
CHI				19	39
IND				19	39
BRA				19	39
ROW					

Tableau 13 : Échange de permis d'émission en MT de carbone-équival. – 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 5 : Surplus en % de la consommation finale des ménages – Scénario 4



SCÉNARIO 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 14 : Prix du CO₂ en € 2005 par tonne– Scénario 5

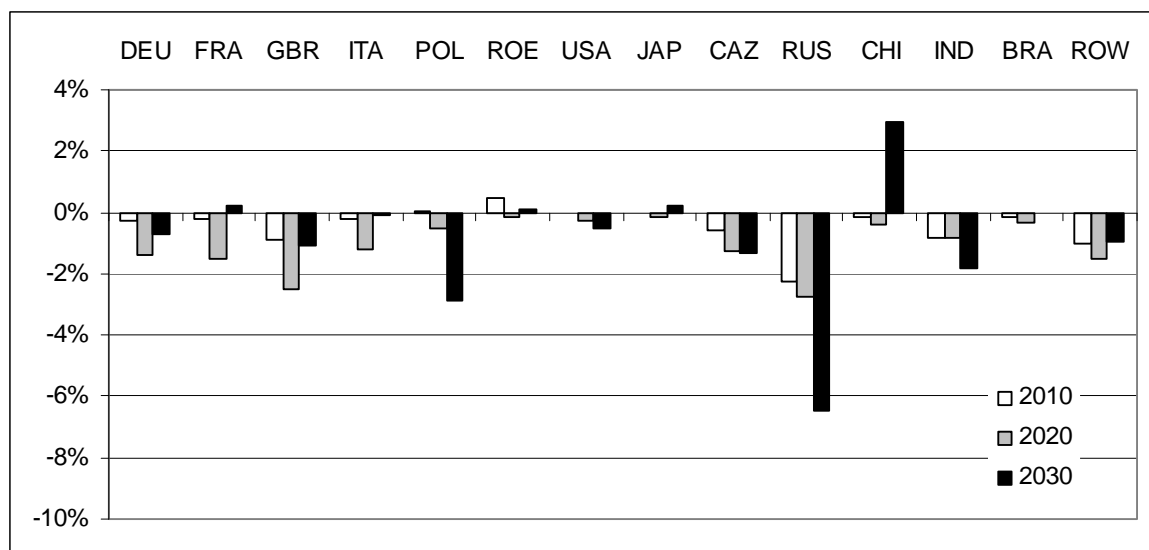
	2010	2015	2020	2025	2030
DEU	5	31	71	13	23
FRA	5	31	71	13	23
GBR	5	31	71	13	23
ITA	5	31	71	13	23
POL	5	31	71	13	23
ROE	5	31	71	13	23
ETS	12	35	90	13	23
USA	6	16	37	13	23
JAP	8	19	33	13	23
CAZ	6	18	44	13	23
RUS				13	23
CHI				13	23
IND				13	23
BRA				13	23
ROW				13	23

Tableau 15 : Échange de permis d'émission en MT de carbone-équival. – 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 6 : 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.

6.3 ANALYSE DES SIMULATIONS RÉALISÉES AVEC TIAM

Nous proposons ici de reprendre les principaux résultats des scénarios politiques. Pour plus de détails, il convient de consulter directement le site Internet, où les figures par scénario ainsi que des comparaisons inter-scénarios sont disponibles. Les résultats sont brièvement commentés dans le cas de la cible de 2°C, sauf indication contraire.

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 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 social¹, 2.8% dans le cas de la politique 1 à moyen terme suivie de la coopération totale, 2.5% 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 680 €/tCO₂ dans le cas de l'optimum social à 1270€/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 (132 €/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 910 €/tCO₂).

¹ Coopération de tous les pays dès 2010 en vue d'atteindre collectivement la cible de 2°C.

ÉMISSIONS 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 carburant 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.

6.5 RÉSUMÉ DES RÉSULTATS DES SIMULATIONS FOURNIES PAR GENIE

Le scénario de référence promet un réchauffement climatique de 4,2° degrés C (relatif à l'ère pré-industrielle), 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

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.

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.

7. 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. Les résultats de ces cinq scénarios sont fort instructifs, et sont d'ores et déjà utilisables par accès direct du site Web.

La seconde phase du projet consistera à définir de nombreux autres scénarios, à les analyser à l'aide des modèles coordonnés, à afficher les résultats dans le site Internet, et à permettre à l'utilisateur de créer ses propres scénarios et d'en observer les résultats en ligne. Une large diffusion de cet outil est prévue.

8. 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 Wauub (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.