



Étude « *Scénarios sous Contrainte Carbone* »

**FONDDRI**  
**Fondation pour le développement durable et les relations**  
**internationales**

**Rapport Complet**

**Décembre 2008**



## Introduction

Ce rapport regroupe les résultats obtenus dans le cadre de l'étude *Scénarios sous Contrainte Carbone*, financée par la FONDDRI de 2004 à 2008. Cette étude a consisté :

- (i) à enquêter sur les enjeux d'une forte contrainte carbone pour les industriels impliqués dans le projet, en examinant non seulement les potentiels de décarbonisation internes à chaque industrie mais aussi les restructurations potentielles de la demande de matériaux ;
- (ii) à développer une plateforme de modélisation hybride fondée sur le modèle sectoriel POLES et le modèle macroénergétique Imaclim-R, afin de permettre une quantification cohérente des enjeux de la décarbonisation pour les secteurs industriels en tenant compte des contraintes techniques, des barrières à la pénétration des nouvelles technologies et des effets d'équilibre général ;
- (iii) à produire une série de scénarios de prospective à l'horizon 2050 correspondant à différents jeux d'hypothèses sur les forces motrices des émissions – en particulier sur les styles de développement ;
- (iv) à instaurer un dialogue itératif entre chercheurs et industriels autour des résultats de ces scénarios, afin d'une part de les améliorer, d'autre part de faciliter la compréhension et l'exploitation de ces résultats par les partenaires industriels.

Le présent rapport présente les résultats des scénarios obtenus tout au long du projet, il ne donne donc qu'une synthèse partielle des travaux réalisés et des échanges nourris par ce projet de recherche.

Dans un premier temps il reprend intégralement le rapport d'étape d'avril 2007, qui regroupait les résultats obtenus pour la projection d'un scénario de référence et d'un premier scénario de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> visant à stabiliser sa concentration à 450 ppm à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle. Ce scénario avec politiques climatiques a été qualifié de « mimétique » parce qu'il est fondé sur l'hypothèse de la coexistence d'une politique climatique ambitieuse incarnée par une valeur du carbone croissant rapidement et d'une homogénéisation progressive des trajectoires de développement sur le modèle de ceux qui ont été suivis par les pays industrialisés : étalement urbain, recours généralisé au transport automobile, systèmes électriques centralisés, etc.

Suite aux nombreux échanges entre industriels et chercheurs, ces scénarios ont ensuite été rectifiés, puis finalisés en septembre 2007. Une présentation brève des modifications apportées est incluse dans ce rapport.

La seconde partie du rapport reprend ensuite intégralement le second rapport d'étape produit en septembre 2008. Suite aux premières projections, il a été convenu d'explorer la simulation d'un scénario « non-mimétique », prenant en compte des bifurcations ou mutations importantes sur les styles de développement et d'organisation spatiale. Ce scénario a été produit en intégrant un travail préliminaire d'ENERDATA sur les hypothèses de bifurcation dans l'architecture de modélisation couplée POLES – IMACLIM-R déjà utilisée pour les scénarios précédents. Enfin, Au cours des discussions menées dans les comités de pilotage successifs, il est apparu que deux hypothèses pouvaient jouer un rôle déterminant dans la plausibilité des scénarios de réduction des émissions :

- (i) la pénétration et la diffusion à temps et à grande échelle de certaines technologies comme la capture et séquestration du carbone ou l'énergie nucléaire ;

(ii) l'adoption de politiques climatiques ambitieuses dans tous les pays émergents et en développement sans délai, c'est-à-dire avant 2020.

Pour confirmer ce diagnostic, une variante a été réalisée pour chacune de ces deux hypothèses, la première supposant que la capture et séquestration du carbone n'était pas réalisable avant le milieu du siècle, la seconde supposant que les pays hors Annexe B repoussaient leur participation aux efforts de réduction des émissions de 5 ans, au-delà de 2020.

Contact :

Renaud Crassous

crassous@centre-cired.fr

# Sommaire

**PREMIERE PARTIE :**  
**SCENARIO DE REFERENCE ET SCENARIO DE STABILISATION AVEC DEVELOPPEMENT**  
**« MIMETIQUE »**

<b>1</b>	<b>SCENARIO DE REFERENCE .....</b>	<b>11</b>
1.1	LA CROISSANCE ECONOMIQUE : FORCES MOTRICES ET CROISSANCE REALISEE.....	11
1.1.1	<i>Hypothèses</i> .....	11
	Démographie.....	11
	Productivité du travail.....	13
	Épargne.....	13
	Régime international.....	14
1.1.2	<i>Résultats</i> .....	14
	Croissance économique.....	14
	Commerce international.....	15
1.2	STYLES DE DEVELOPPEMENT.....	16
1.2.1	<i>Hypothèses qualitatives</i> .....	16
1.2.2	<i>Résultats</i> .....	17
	Résidentiel : surfaces de logement.....	17
	Transport : Parc de Véhicules et Partage modal.....	18
	Changement structurel de la consommation finale.....	20
1.3	CONTENU ENERGETIQUE.....	21
1.3.1	<i>Hypothèses</i> .....	21
	Réserves fossiles.....	21
	Valeur du carbone.....	22
	Progrès technique et gains d'efficacité.....	22
	Nucléaire.....	23
	Energies renouvelables.....	23
1.3.2	<i>Résultats</i> .....	23
	Demande finale d'énergie.....	23
	Energie primaire.....	24
	Panier technologique de Production d'électricité.....	26
	Tensions sur les ressources fossiles : prix et volumes de production.....	27
	Capture et Séquestration du carbone.....	29
	Facture énergétique.....	29
1.4	SECTEURS INDUSTRIELS.....	31
1.4.1	<i>Hypothèses</i> .....	31
	Technologies.....	31
	Indicateurs d'activités consommatrices de matériaux et intensités matériaux.....	32
1.4.2	<i>Résultats</i> .....	32
	Demande de matériaux : acier, ciment, aluminium.....	32
1.5	EMISSIONS DE CO2.....	34
<b>2</b>	<b>SCENARIO 450 PPMV – F4 MIMETIQUE .....</b>	<b>36</b>
2.1	INSTRUMENTS.....	36
2.1.1	<i>Hypothèses</i> .....	36
	Enveloppe d'émissions.....	36
	Style de développement « mimétique ».....	37
2.1.2	<i>Résultats</i> .....	38
	Valeurs du carbone.....	38
2.2	DEVELOPPEMENT ENERGETIQUE SOUS CONTRAINTE CARBONE.....	39
	Demande finale d'énergie.....	39
	Energie Primaire.....	40
	Mix technologique de Production d'électricité.....	41
	Rôle des ressources fossiles.....	42
	Capture et Séquestration du carbone.....	43
	Facture énergétique.....	44
2.3	SECTEURS INDUSTRIELS.....	46

2.3.1	<i>Hypothèses d'intensité matériaux</i> .....	46
	La conception des bâtiments .....	46
	La structure des bâtiments.....	46
	La conception des véhicules.....	47
2.3.2	<i>Des demandes de matériaux soutenues</i> .....	49
2.4	BILAN ECONOMIQUE .....	53
<b>3</b>	<b>CONCLUSION INTERMEDIAIRE : ACQUIS ET TRAVAUX FUTURS .....</b>	<b>55</b>
<b>4</b>	<b>ADDENDUM : REVISION DU SCENARIO DE REFERENCE ET DU SCENARIO DE STABILISATION « MIMETIQUE » .....</b>	<b>57</b>
4.1	SCENARIO DE REFERENCE. ....	57
4.2	SCENARIO DE STABILISATION AVEC DEVELOPPEMENT « MIMETIQUE ».....	57

<p><b>DEUXIEME PARTIE :</b></p> <p><b>SCENARIO DE STABILISATION AVEC DEVELOPPEMENT « NON-MIMETIQUE »</b></p> <p><b>SCENARIO VARIANTE AVEC RETARD DES PED</b></p> <p><b>SCENARIO VARIANTE SANS CAPTURE DU CO2</b></p>
--

<b>5</b>	<b>SCENARIO « NON-MIMETIQUE ».....</b>	<b>61</b>
5.1	LES RAISONS JUSTIFIANT LA PRODUCTION D'UN SCENARIO NON MIMETIQUE .....	61
5.1.1	<i>La plausibilité du scénario mimétique en question</i> .....	61
5.1.2	<i>Des stratégies de réduction prenant en compte les choix de style de développement</i> ....	62
5.2	ÉLÉMENTS DE RECITS DU SCENARIO « NON MIMETIQUE » .....	64
5.2.1	<i>L'espace de vie quotidien</i> .....	64
	Pays industriels, zones diffuses .....	65
	Pays industriels, zones denses .....	65
	Pays en développement, villes nouvelles .....	65
	Pays en développement, mégapoles .....	66
	Pays en développement, autres espaces.....	66
5.2.2	<i>Mobilité des personnes et des marchandises</i> .....	66
	Mobilité des personnes dans les pays industriels .....	68
	Mobilité des personnes dans les pays en développement .....	69
	Mobilité des marchandises.....	70
5.2.3	<i>Production industrielle</i> .....	71
	La sidérurgie .....	72
	La production de ciment.....	72
5.3	QUANTIFICATION DES HYPOTHESES NARRATIVES .....	72
5.4	INSTRUMENTS ET POLITIQUES MIS EN OEUVRE .....	73
5.4.1	<i>Politiques et mesures</i> .....	73
5.4.2	<i>Trajectoire de valeur du carbone</i> .....	74
5.5	EVOLUTION DU SYSTEME ENERGETIQUE .....	75
5.5.1	<i>Demande finale d'énergie</i> .....	75
5.5.2	<i>Energie Primaire</i> .....	76
5.5.3	<i>Production d'électricité</i> .....	77
5.5.4	<i>Impact sur les marchés de ressources fossiles</i> .....	78
5.5.5	<i>Capture et séquestration du carbone</i> .....	79
5.6	EVOLUTION DES SECTEURS INDUSTRIELS .....	80
5.6.1	<i>Secteur de la sidérurgie</i> .....	80
5.6.2	<i>Secteur de la production d'aluminium</i> .....	80
5.6.3	<i>Secteur de la production de ciment</i> .....	81
5.6.4	<i>Secteur de la production de verre plat</i> .....	81
5.7	EMISSIONS DE CO <sub>2</sub> .....	81
5.8	BILAN MACRO-ECONOMIQUE .....	83
5.8.1	<i>Facture énergétique des ménages</i> .....	83
5.8.2	<i>Coûts macroéconomiques de la transition</i> .....	84

<b>6</b>	<b>VARIANTES DE SCENARIOS .....</b>	<b>86</b>
6.1	VARIANTE TECHNOLOGIQUE SANS CCS.....	86
6.1.1	<i>emissions de CO<sub>2</sub></i> .....	86
6.1.2	<i>Evolution du système énergétique</i> .....	86
6.1.3	<i>Bilan macroéconomique</i> .....	88
6.2	VARIANTE POLITIQUE AVEC PARTICIPATION RETARDEE DES PED.....	89
6.2.1	<i>Bilan macroéconomique : un ralentissement mondial</i> .....	89
6.2.2	<i>Emissions mondiales</i> .....	90
<b>7</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>92</b>



# **Première Partie :**

Rapport d'étape 2006

Scénario de référence et  
Scénario de stabilisation avec développement  
« mimétique »



# 1 Scénario de référence

Lorsqu'il est resitué au sein des projections de long terme mondiales les plus connues, le scénario de référence apparaît comme **un scénario démographique et économique médian** : la population mondiale croît à un taux moyen de 0,8% par an (pour une fourchette allant de 0.7% à 1,2 % dans les trajectoires SRES<sup>1</sup>), le PIB par tête moyen croît de 1,3 % par an (pour un intervalle allant de 1% à 3% par an, mais mesuré en taux de change et non en parités de pouvoir d'achat<sup>2</sup>). Sur le plan des émissions, le scénario de référence reste **majoritairement fondé sur les énergies fossiles**, d'où un taux de réduction de l'intensité carbone du PIB de -0,7% par an qui reste modéré (l'intervalle des SRES va de -0.8 % à -2,5% par an).

## 1.1 La croissance économique : forces motrices et croissance réalisée

La croissance économique est endogène au modèle IMACLIM-R. Elle résulte d'une part de déterminants exogènes – démographie et croissance de la productivité du travail – qui fournissent des indicateurs de croissance potentielle des régions, et d'autre part des conditions de réalisation de la croissance réelle, comme les échanges internationaux de biens et de capitaux, le prix des énergies, la disponibilité de l'investissement.

### 1.1.1 HYPOTHESES

#### *Démographie*

Les hypothèses démographiques de la population sont inspirées du scénario médian de l'ONU. Elles supposent une population mondiale de 7,5 milliards d'habitants en 2020 puis 9 milliards en 2050, dont 84% dans les pays actuellement en développement.

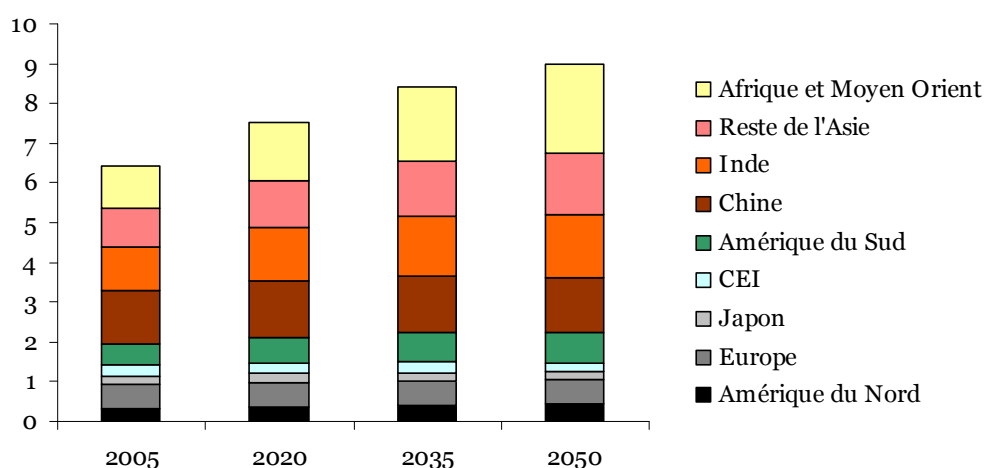


Figure 1 : Population totale (Milliards d'habitants)

<sup>1</sup> Special Report on Emission Scenarios, GIEC, 2001. La borne haute de la fourchette de population a depuis été révisée à la baisse dans toutes les projections plus récentes – Census Bureau, ONU, IIASA.

<sup>2</sup> Le passage à une mesure en parités de pouvoir d'achat réduit l'écart de PIB par tête mesuré entre les pays développés et les pays en développement, et tend à diminuer en général les taux moyens de croissance pour une même trajectoire.

Il y a une différence significative entre les pays en expansion démographique (les USA, tous les PED sauf la Chine) et les autres (Chine, CEI, OCDE sauf USA,) dont le taux de croissance moyen ne dépasse pas 1‰.

Dans les pays à faible croissance, le vieillissement de la population se traduit par une baisse continue des taux d'activité (ratio de la population active<sup>3</sup> sur la population totale). Au contraire les pays à forte croissance démographique voient leur taux d'activité, qui sont plus faibles en début de période, augmenter jusqu'en 2040 au moins. Les Etats-Unis connaissent aussi un vieillissement important, mais leur croissance démographique dynamique permet de maintenir leur taux d'activité au-dessus de 60%.

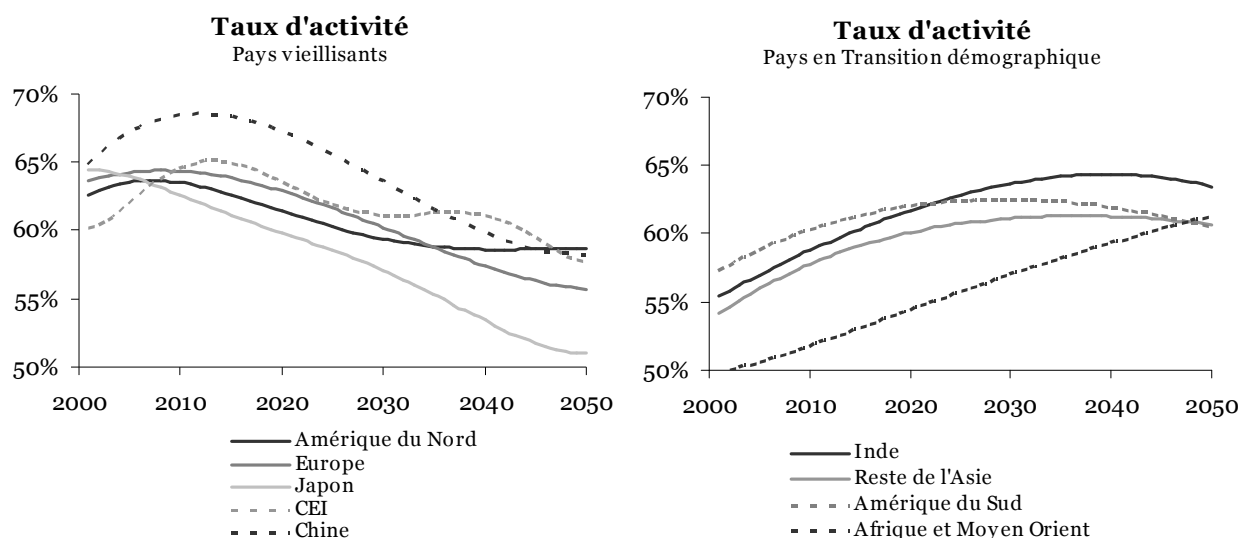


Figure 2 : Ratio de la population active sur la population totale

	Population totale	Population active
Amérique du Nord	6.2 ‰	4.4 ‰
Europe	0.3 ‰	-2.9 ‰
Japon	-0.6 ‰	-5.6 ‰
CEI	-3.3 ‰	-4.9 ‰
Amérique du Sud	7.4 ‰	8.0 ‰
Inde	8.1 ‰	10.6 ‰
Chine	1.2 ‰	-2.0 ‰
Reste de l'Asie	10.0 ‰	11.8 ‰
Afrique et Moyen Orient	16.6 ‰	20.9 ‰

Tableau 1 : Taux de croissance moyen de la population totale et active sur la période 2005-2050

<sup>3</sup> La population active est en fait la population *en âge de travailler*, décrite à travers la tranche 18-65 ans dans les pays développés et 15-65 ans dans les pays en développement (données disponibles).

### Productivité du travail

La croissance de la productivité du travail repose sur deux hypothèses :

- Le maintien de la position des USA comme leader mondial, avec une croissance continue et stabilisée à 2% par an. Les autres pays de l'OCDE et la CEI suivent ce leader et convergent en taux à l'horizon 2050.
- Un rattrapage partiel de l'écart de productivité pour les pays en développement : la Chine et l'Inde connaissent les rattrapages les plus dynamiques, suivies par le reste de l'Asie, le Brésil et le reste de l'Amérique Latine. L'Afrique et le Moyen Orient sont supposés ne pas connaître de décollage comparable à l'échelle régionale mais restent sur une croissance continue de 2% par an.

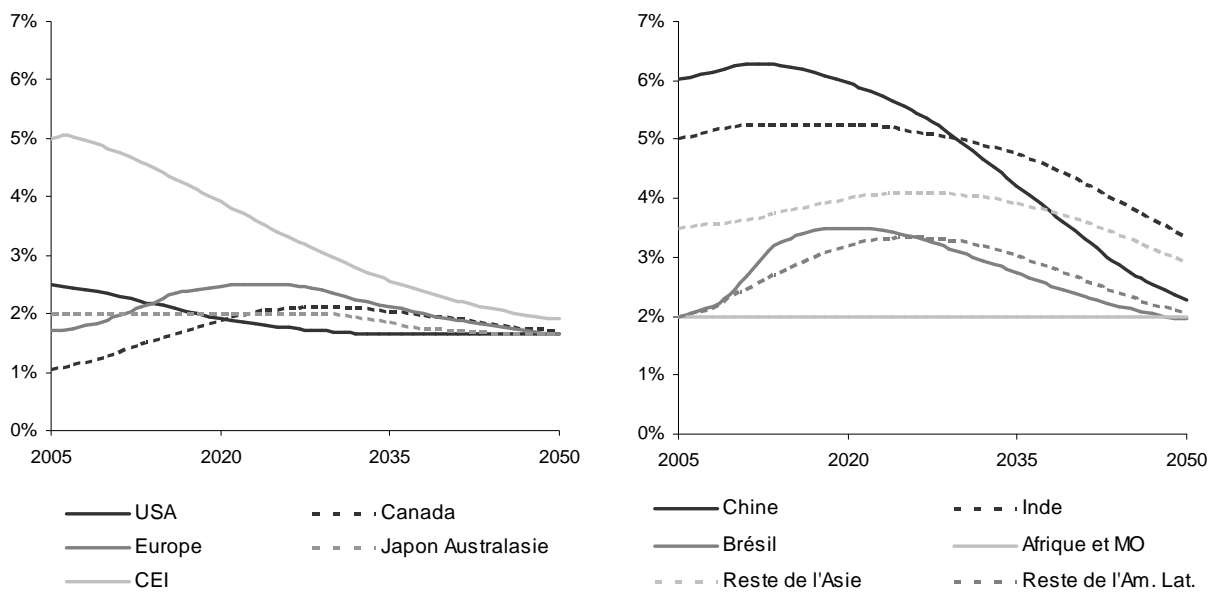


Figure 3 : croissance de la productivité moyenne du travail

### Épargne

Dans Imacim-R le taux d'épargne suit une trajectoire exogène. Dans ces simulations nous avons conservé un taux d'épargne constant et égal à celui observé en 2001 pour toutes les régions sauf pour la Chine, qui passe de 44% en 2001 à 14% en 2050.

<b>USA</b>	9 %	<b>CEI</b>	24 %	<b>Moyen Orient</b>	20 %
<b>Canada</b>	18 %	<b>Chine</b>	44 %	<b>Afrique</b>	10 %
<b>Europe</b>	13 %	<b>Inde</b>	18 %	<b>Reste de l'Asie</b>	22 %
<b>Japon OCDE Pacific</b>	19 %	<b>Brésil</b>	12 %	<b>Reste de l'Amérique Latine</b>	11 %

Tableau 2 : Taux d'épargne régionaux

### **Régime international**

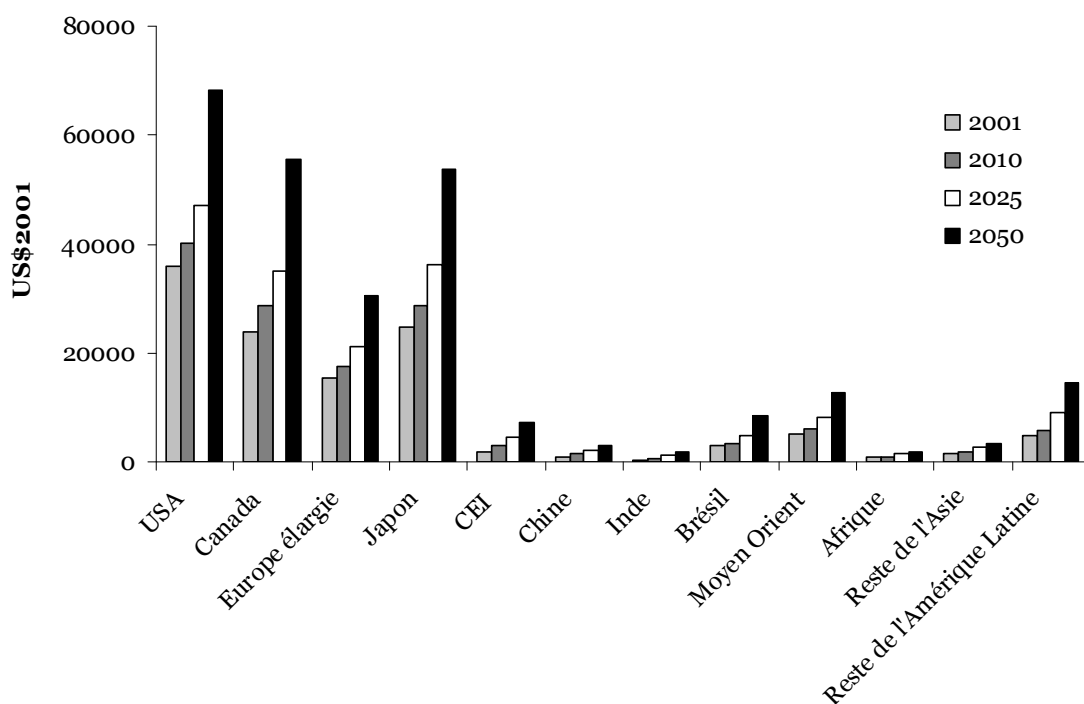
Le scénario de référence est un scénario de globalisation continue et stable. Les paramètres de commerce international correspondent à une compétition internationale continue. Sur les marchés des capitaux, les flux s'ajustent progressivement pour permettre aux balances des capitaux de converger vers l'équilibre. C'est là une hypothèse forte mais communément utilisée dans les modèles de long terme. En fait, pour modéliser de manière robuste des déséquilibres de flux de capitaux persistants, il est nécessaire de modéliser la dette extérieure des régions, point qui est à l'ordre du jour des développements du modèle IMACLIM-R mais ne sera pas considéré dans le cadre de cette étude.

#### 1.1.2 RESULTATS

##### **Croissance économique**

Compte tenu des hypothèses sur le moteur de la croissance de chaque région et du contexte international stable dans lequel cette croissance se déploie, les résultats de croissance réelle montrent sans surprise :

- un maintien des régions de l'OCDE en tête de la richesse mondiale par habitant, essentiellement liée à des gains de productivité ;
- une forte croissance pour les pays émergents et les PED, liée à la fois à une démographie dynamique et un rattrapage partiel des écarts de productivité. La Chine et l'Inde sont les plus dynamiques en début de période, avec un taux de croissance moyen du PIB total de 7% par an, grâce à l'effet conjoint d'importants rattrapages de gains de productivité et d'une démographie croissante. Cette croissance est fortement ralentie au-delà de 2025, du fait de l'essoufflement de ces deux moteurs de croissance. La CEI connaît sensiblement le même profil de croissance, avec des marges de gains de productivité élevées, et malgré l'absence de dynamisme démographique. Le reste des pays en développement connaissent des taux de croissance supérieurs à ceux de l'OCDE, avec un rattrapage de productivité un peu plus échelonné dans le temps que pour l'Asie et l'Inde, mais une croissance démographique soutenue.



Graphique 1 : PIB par habitant (Taux de change réels, dollars constants US\$2001)

	2005-2010	2010-2025	2025-2050
USA	2.6%	2.4%	2.4%
Canada	3.2%	2.2%	2.4%
Europe élargie	2.2%	1.9%	1.5%
Japon	1.8%	1.7%	1.2%
CEI	6.0%	2.3%	1.6%
Chine	7.0%	4.3%	1.5%
Inde	7.0%	6.2%	2.6%
Brésil	5.2%	4.2%	2.5%
Moyen-orient	4.8%	3.7%	3.3%
Afrique	4.8%	4.5%	3.7%
Reste de l'Asie	5.7%	4.8%	2.5%
Reste de l'Amérique Latine	4.9%	4.5%	2.8%
Monde	4.1%	3.2%	2.1%

Tableau 3 : taux de croissance annuel du PIB total

### Commerce international

Conformément aux hypothèses prises sur la fluidité des échanges et le degré de compétition sur les marchés internationaux, le commerce international ne cesse de croître, à un taux plus élevé que le PIB mondial (taux moyen de 2,1% par an). La part (en valeur) de l'énergie dans ce

commerce international ne cesse de croître, essentiellement à cause du renchérissement des ressources fossiles<sup>4</sup> : elle passe de 11% en 2005 à 18% en 2030 et 20% en 2050.

	<b>2005-2020</b>	<b>2020-2035</b>	<b>2035-2050</b>
<b>Commerce total</b>	3.6%	2.7%	2.1%
<b>Commerce d'énergie</b>	5.8%	4.4%	2.4%

**Tableau 4 : croissance annuelle moyenne des échanges internationaux (dollars constants)**

Les participations respectives des régions dans les exportations alimentant le commerce mondial évoluent progressivement, surtout sous l'effet des évolutions des flux énergétiques :

- les pays de l'OCDE et la Chine perdent quelques points, à l'exception du Canada dont les exportations de fossiles en croissance dopent la balance commerciale dans la seconde moitié de la période ;
- les plus gros exportateurs d'énergie – CEI, Moyen-Orient en tête – connaissent la plus importante augmentation.

	<b>2005</b>	<b>2030</b>	<b>2050</b>
<b>USA</b>	18.4%	17.3%	16.8%
<b>Canada</b>	5.7%	5.4%	5.7%
<b>Europe élargie</b>	21.0%	18.4%	17.7%
<b>Japon</b>	13.4%	12.1%	11.9%
<b>CEI</b>	3.1%	4.4%	5.3%
<b>Chine</b>	8.1%	7.1%	7.0%
<b>Inde</b>	1.3%	1.4%	1.4%
<b>Brésil</b>	1.5%	1.5%	1.5%
<b>Moyen-orient</b>	5.2%	7.9%	8.4%
<b>Afrique</b>	3.5%	4.8%	4.6%
<b>Reste de l'Asie</b>	12.0%	12.2%	12.1%
<b>Reste de l'Amérique Latine</b>	6.8%	7.6%	7.6%

**Tableau 5 : parts des régions dans les exportations mondiales**

## **1.2 Styles de développement**

### **1.2.1 HYPOTHESES QUALITATIVES**

Ce scénario est un scénario de poursuite du développement actuel type de l'OCDE selon un schéma « mimétique » dans les PED, c'est-à-dire une urbanisation et un exode rural importants, un développement exponentiel des transports, d'abord de la route et du rail puis de l'aérien. La

<sup>4</sup> Voir paragraphe 1.3.2 pour les prix des énergies fossiles.

politique d'infrastructure est supposée suivre la demande de service de transports. La part de la demande finale qui est adressée au secteur de l'agriculture connaît un ralentissement progressif au fur et à mesure du rattrapage des niveaux de PIB par tête et de l'industrialisation importante que connaissent les PED.

## 1.2.2 RESULTATS

### **Résidentiel : surfaces de logement**

Les surfaces de logement par habitant sont supposées croître dans toutes les régions du monde. Cette croissance est modérée mais significative dans les pays de l'OCDE dont les niveaux sont déjà élevés : parmi ces pays on différencie nettement le mode de développement d'Amérique du Nord avec de niveaux approchant 80 m<sup>2</sup> par habitant et celui de l'Europe, du Japon et de la CEI, où les surfaces par habitant sont deux fois moins élevées en 2050. Du côté des PED, une croissance plus forte s'applique à des niveaux de départ plus faibles.

	<b>2005</b>	<b>2030</b>	<b>2050</b>
<b>USA</b>	60	62	67
<b>Canada</b>	48	62	79
<b>Europe élargie</b>	33	36	39
<b>Japon</b>	29	32	34
<b>CEI</b>	27	36	41
<b>Chine</b>	20	23	28
<b>Inde</b>	8	12	19
<b>Brésil</b>	11	16	23
<b>Moyen-orient</b>	20	27	39
<b>Afrique</b>	11	15	22
<b>Reste de l'Asie</b>	18	23	31
<b>Reste de l'Amérique Latine</b>	12	16	24

**Tableau 6 : surface de logement (m<sup>2</sup> par habitant)**

Compte tenu de la forte croissance démographique des PED, les surfaces de logements à construire que supposent ces croissances de surfaces par habitant sont très importantes, aussi bien pour la Chine, pour laquelle cette question est souvent pointée du doigt, que pour d'autres régions en développement (Inde, Afrique, reste de l'Asie).

	2005-2015	2015-2025	2025-2035	2035-2045
USA	4.4	4.8	5.3	5.8
Canada	0.6	0.7	0.8	1.0
Europe élargie	4.4	4.2	4.0	3.9
Japon	1.3	1.2	1.1	1.0
CEI	2.8	1.8	1.6	1.6
Chine	6.6	7.2	7.9	8.6
Inde	4.3	5.7	7.5	10.0
Brésil	0.9	1.1	1.4	1.7
Moyen-orient	1.9	2.5	3.3	4.5
Afrique	5.4	7.5	10.2	14.0
Reste de l'Asie	7.3	9.0	11.2	14.0
Reste de l'Amérique Latine	1.8	2.3	3.0	3.8

Tableau 7 : Surface résidentielle construite (M<sup>ards</sup> de m<sup>2</sup> par an, démolition 1,5% par an incluse)

#### **Transport : Parc de Véhicules et Partage modal**

L'autre hypothèse déterminante de style de développement concerne l'équipement des ménages en véhicules personnels, puisque ce niveau va conditionner l'essor du trafic routier, compte tenu par ailleurs d'un développement suffisant des infrastructures nécessaires. L'hypothèse est, comme dans le cas des logements, que le taux d'équipement continu à croître dans toutes les régions, à l'exception des USA déjà proches de la saturation. Pour les pays émergents ou en développement, l'expansion du parc de véhicules est particulièrement importante. Cela revient à supposer que ces pays font a priori le choix d'un développement sans contrainte véritable du trafic automobile.

Ceci peut paraître en contradiction avec un prix du pétrole en forte augmentation sur toute la période, avec une augmentation régulière de 2,5% par an en dollars constants pour atteindre 120 dollars par baril en 2050 (voir infra, Figure 13). Cependant l'impact du prix du pétrole sur les prix de l'essence est considérablement amorti par la fiscalité ; dans des conditions européennes par exemple le doublement du prix du pétrole de 60 \$/bl aujourd'hui à 120 \$/bl en 2050 n'entraîne qu'une augmentation de 34 % du prix de l'essence, de 1,28 à 1,71 €/l.

Dans ces conditions, le taux d'équipement des ménages en automobile augmente dans toutes les régions du monde. L'augmentation est évidemment plus significative dans les régions en développement. En 2050 les taux d'équipement sont compris entre 100 et 300 véhicules pour mille habitants dans toutes les régions en développement sauf l'Afrique (90 pour mille), alors que ce taux est de l'ordre de 500 véhicules pour mille habitants dans les pays industrialisés, sauf les Etats-Unis (700 pour mille) (Tableau 8).

	<b>2005</b>	<b>2030</b>	<b>2050</b>
<b>USA</b>	0.73	0.77	0.79
<b>Canada</b>	0.48	0.52	0.56
<b>Europe élargie</b>	0.38	0.43	0.48
<b>Japon</b>	0.43	0.46	0.48
<b>CEI</b>	0.12	0.21	0.27
<b>Chine</b>	0.01	0.07	0.12
<b>Inde</b>	0.01	0.09	0.20
<b>Brésil</b>	0.10	0.22	0.31
<b>Moyen-orient</b>	0.07	0.13	0.23
<b>Afrique</b>	0.02	0.04	0.09
<b>Reste de l'Asie</b>	0.04	0.09	0.14
<b>Reste de l'Amérique Latine</b>	0.08	0.20	0.30

**Tableau 8 : Equipements des ménages en véhicules particuliers (véhicule par habitant)**

Le parc mondial d'automobiles passe de 675 millions à 1,89 milliard en 2050. Mais en 2050, la structure du parc mondial est profondément bouleversée : les pays industrialisés (y compris la CEI) ne compteraient plus que pour 50 % du parc mondial de véhicules en 2030 et 37 % en 2050, contre 80 % aujourd'hui (Tableau 14). En 2050, les parcs de véhicules de l'Inde et de la Chine réunies représenteraient à eux-seuls 485 millions de véhicules. En 2050 il y aurait dans le monde près de trois fois plus (2,8) de véhicules automobiles qu'aujourd'hui.

	<b>2005</b>	<b>2030</b>	<b>2050</b>
<b>USA</b>	212185	260561	278452
<b>Canada</b>	15285	20171	23593
<b>Europe élargie</b>	224864	256103	269593
<b>Japon</b>	54510	54841	51110
<b>CEI</b>	32990	58969	75199
<b>Chine</b>	10525	99947	181360
<b>Inde</b>	9865	131535	304131
<b>Brésil</b>	17358	49845	74971
<b>Moyen-orient</b>	12121	36590	80235
<b>Afrique</b>	15117	62934	164628
<b>Reste de l'Asie</b>	38690	125562	226964
<b>Reste de l'Amérique Latine</b>	30634	96694	164669

**Tableau 9 : Nombre des véhicules par région (en 000)**

Dans ce scénario de référence, sans politique climat de grande ampleur, les véhicules conventionnels restent dominants et représentent 1,2 sur 1,9 milliards. Cependant la raréfaction progressive du pétrole induit déjà un développement de véhicules alternatifs, hybrides, 100 % électriques ou conventionnel à hydrogène (Tableau 10). Dans le cadre d'hypothèses technologiques retenu, les piles à combustible ne passent pas le seuil de la compétitivité économique avant 2050 et leur développement reste totalement marginal.

	2005	2030	2050
<b>Conventionnel</b>	673323	1153758	1196463
<b>Pile à combustible à gas</b>	0	0	16
<b>Pile à combustible à H2</b>	0	1	25
<b>Hybride</b>	130	34510	269261
<b>Electrique</b>	616	54779	222923
<b>Conventionnel à H2</b>	73	10703	206216

**Tableau 10 : Motorisation mondiale des véhicules (en 000)**

Au total, l'intensité de la mobilité automobile est profondément modifiée au cours des cinquante prochaines années dans les régions en développement, mais non dans les régions aujourd'hui industrialisées où le trafic total n'augmente que faiblement. Les plus fortes augmentations se trouvent en Inde, puis en Chine et en Afrique avec des multiplications du trafic supérieures à un facteur 10 entre 2005 et 2050 (Tableau 11). Au total le trafic automobile mondial est multiplié par 2,4 entre aujourd'hui et la fin de la projection

	2005	2030	2050	2050/2005
<b>USA</b>	3872	4675	4952	1,3
<b>Canada</b>	290	314	316	1,1
<b>Europe élargie</b>	3710	3821	3836	1,0
<b>Japon</b>	868	860	793	0,9
<b>CEI</b>	456	803	1017	2,2
<b>Chine</b>	138	1292	2334	16,9
<b>Inde</b>	111	1465	3368	30,3
<b>Brésil</b>	223	689	1075	4,8
<b>Moyen-orient</b>	202	597	1290	6,4
<b>Afrique</b>	223	904	2328	10,4
<b>Reste de l'Asie</b>	611	1952	3508	5,7
<b>Reste de l'Amérique Latine</b>	449	1396	2361	5,3

**Tableau 11: V véhicules.kilomètres parcourus (en millions de km)**

### **Changement structurel de la consommation finale**

Conformément à l'idée d'un scénario de continuité par rapport au monde actuel, le changement structurel observé est un changement modéré sans rupture importante :

- **Energie** : On observe un découplage progressif limité en OCDE, où le poste énergétique passe de 5.5% à 4.4% de la consommation finale, et fort en CEI, où il passe de 16% à 9%. Au contraire dans les PED, la hausse des équipements et de l'accès à l'énergie implique une intensification : le budget énergie passe de 3,7% à 6,5 % en Chine, ou encore de 7,8% à 12,3% au Moyen Orient.

- **Transport** : on observe une intensification en OCDE - de 5.2% à 6.5% de la consommation finale, une part stable dans les PED, mais qui signifie une forte croissance en volume, puisque le revenu par habitant augmente fortement.
- **Industrie intensives en énergie et BTP** : la part de ces secteurs reste stable en OCDE (16%) et décroît globalement dans tous les PED, surtout après 2030 (de 23% à 21% en Chine, de 21% à 19 % en Amérique Latine).

### **1.3 Contenu énergétique**

#### 1.3.1 HYPOTHESES

Les scénarios énergétiques sont fondés sur la prise en compte de quatre grands ensembles d'hypothèses exogènes pour le modèle d'équilibre sectoriel du système énergétique POLES :

1. l'évolution démographique et la croissance économique, en cohérence avec les hypothèses et résultats du modèle IMACLIM-R;
2. La disponibilité des ressources énergétiques fossiles, pour celles qui sont susceptibles d'être contraignantes à l'horizon 2050, c'est à dire pétrole et gaz naturel ;
3. Les contraintes d'émission introduites par la « valeur carbone », sous forme d'une taxe CO<sub>2</sub>, prise comme variable proxy de l'ensemble des politiques menées (Politiques et Mesures, quotas et/ou taxes) ;
4. Les technologies caractérisées par leurs coûts et leurs performances pour la production et la conversion d'énergie, mais aussi pour la production des matériaux structurels et les équipements à basse et très basse consommation d'énergie.

#### **Réserves fossiles**

En ce qui concerne les ressources fossiles, les scénarios sont dominés par la question de la disponibilité en pétrole et en gaz naturel. Le modèle POLES simule de manière endogène l'évolution des estimations des réserves disponibles, en combinant la représentation des principales étapes de la découverte et de la mise en œuvre des ressources pétrolières avec la modélisation du progrès technique de récupération permettant d'étendre considérablement le volume de ressources au fil de la trajectoire. La Figure 4 reprend les ressources supposées en 2001. Au total les hypothèses dynamiques du modèle aboutissent à une croissance de la production pouvant atteindre 25% par rapport à aujourd'hui, avec une stabilisation de la production conventionnelle vers 2030.

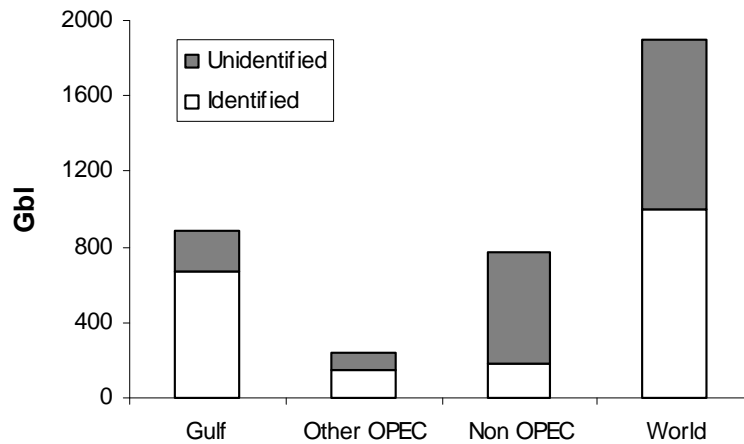


Figure 4: réserves de pétroles estimées en 2001

### Valeur du carbone

La valeur du carbone constitue évidemment une variable exogène pour le modèle, puisqu'elle reflète, via un signal unique, l'intensité des politiques climatiques menées dans les différentes régions du monde. Dans ce scénario de référence, on suppose que ces politiques restent très modestes dans les différentes régions du monde. L'Europe est supposée mettre en œuvre une politique modérée, correspondant à une valeur du carbone de 10 €/CO<sub>2</sub> en 2010, croissant jusqu'à 30 € en 2050.

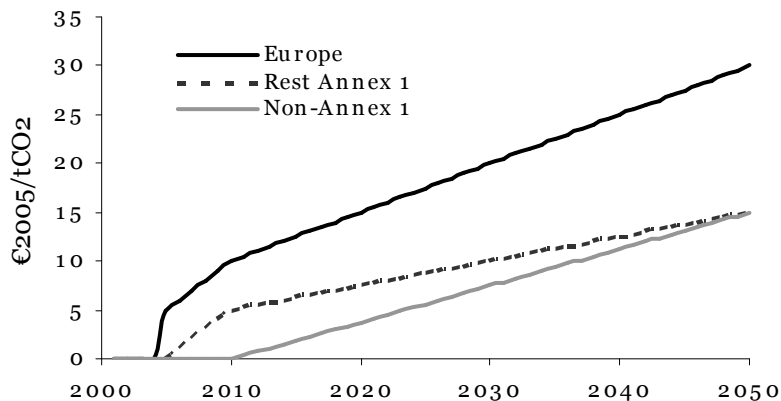


Figure 5 : Valeur du carbone – scénario de référence

### Progrès technique et gains d'efficacité

Dans le modèle POLES les gains d'efficacité énergétiques autonomes (Autonomous Energy Efficiency Improvement, indépendants des prix) sont pris en compte au niveau de chaque secteur. Combinés aux effets induits par la hausse des prix de l'énergie, ces processus conduisent à des gains d'efficacité déjà très importants dans la référence, puisque la consommation primaire d'énergie augmente à un rythme qui est deux fois inférieur à celui de la croissance du PIB : l'intensité énergétique du PIB mondial passe de 200 à 120 tep par millions de dollars de PIB.

## Nucléaire

La compétitivité de l'énergie nucléaire augmente du fait des hypothèses retenues dans la base TECHPOL pour l'amélioration des coûts des technologies de 3<sup>ème</sup> génération, combinées avec une hausse des prix de toutes les énergies fossiles au cours du scénario. Dans ces conditions, on assiste en Europe au redémarrage des nouvelles capacités après 2030, sur la base des technologies dites de troisième génération.

## Energies renouvelables

Les énergies renouvelables connaissent également un développement significatif, du fait des politiques d'incitation mises en œuvre – en particulier des tarifs de rachat avantageux en Europe – mais dans certaines limites liées aux potentiels techniques (part des énergies intermittentes dans le total de la production d'électricité) et à la disponibilité des ressources. La base TECHPOL fournit un cadre unifié sur les coûts et les performances des technologies énergies renouvelables, à différents horizons de temps.

### 1.3.2 RESULTATS

#### Demande finale d'énergie

L'augmentation de la consommation mondiale d'énergie, affichée sur la Figure 6, est à la fois modeste et significative : *modeste* si l'on considère qu'elle n'aboutit qu'à un doublement de la consommation finale sur 50 ans, ce qui est peu compte-tenu de l'importance des besoins aujourd'hui non satisfaits ; *significative* si l'on prend en compte la nécessaire extension des capacités de production, transport, distribution qu'elle implique.

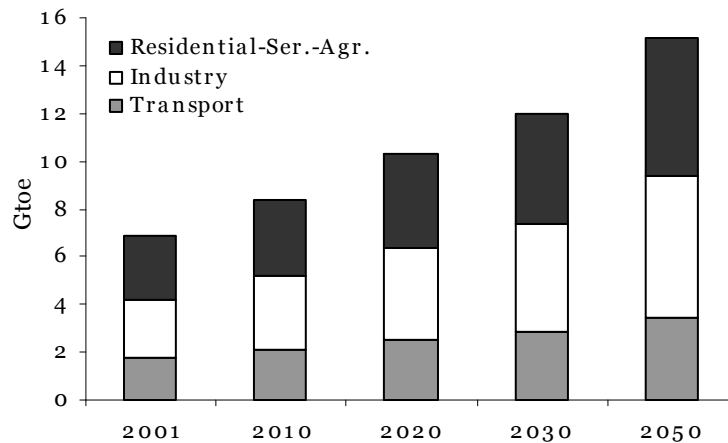


Figure 6 : Consommation d'énergie finale - Monde

La demande finale d'énergie est multipliée par 2,2 en 50 ans, passant de 6,9 Gtep à 15,1 Gtep. L'industrie est le secteur dont la demande est la plus fortement croissante avec une multiplication par 2,45 tandis que la demande des transports n'est multipliée que par 1,93 grâce à des progrès d'efficacité importants. Comme on l'a vu plus haut, le parc de véhicules automobiles est multiplié par 2,8, le trafic automobile par 2,4. Compte-tenu également du rôle des transports de marchandise, on a bien au plan mondial des parcs en forte croissance, mais un taux d'utilisation des véhicules un peu moins important et des rendements supérieurs qui limitent partiellement les consommations de carburants.

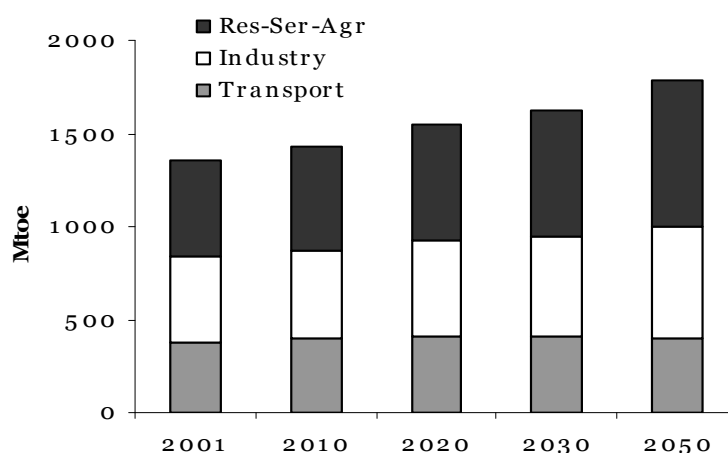


Figure 7 : Consommation d'énergie finale – Europe

Pour l'Europe en particulier, la demande finale n'augmente que de 30% en 50 ans, passant de 1,35 Gtep à 1,8 Gtep, mais la majeure partie de cette augmentation est liée aux secteurs Résidentiel-Services-Agriculture dont la demande croît de 50% tandis que la demande des transports n'augmente que de 5%. La projection du modèle confirme donc l'hypothèse du découplage des consommations de transport, dont les prémices apparaissent déjà avec la stabilisation des consommations de carburants dans certains pays comme la France.

### Energie primaire

La consommation mondiale d'énergie primaire atteint 24 Gtep en 2050. La perspective énergétique d'ensemble est dominée par la stabilisation progressive de la production de pétrole conventionnel et de gaz naturel à partir de 2030. La production d'hydrocarbures non-conventionnels d'une part et de charbon d'autre part augmente rapidement tout au long de la période, ces deux ressources fossiles étant en effet les seules qui restent relativement abondantes vers le milieu du siècle. De même les énergies non fossiles, renouvelables et nucléaires connaissent un développement significatif, les rapprochant de leur potentiel maximum de développement, déjà dans ce scénario de référence

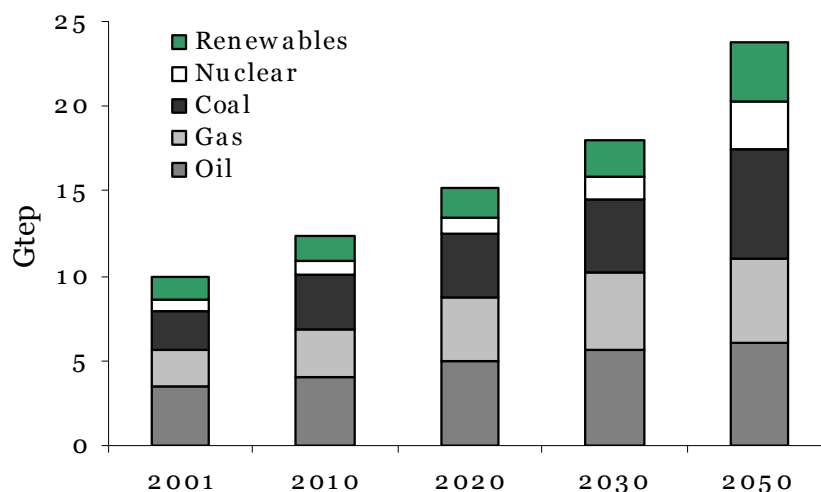
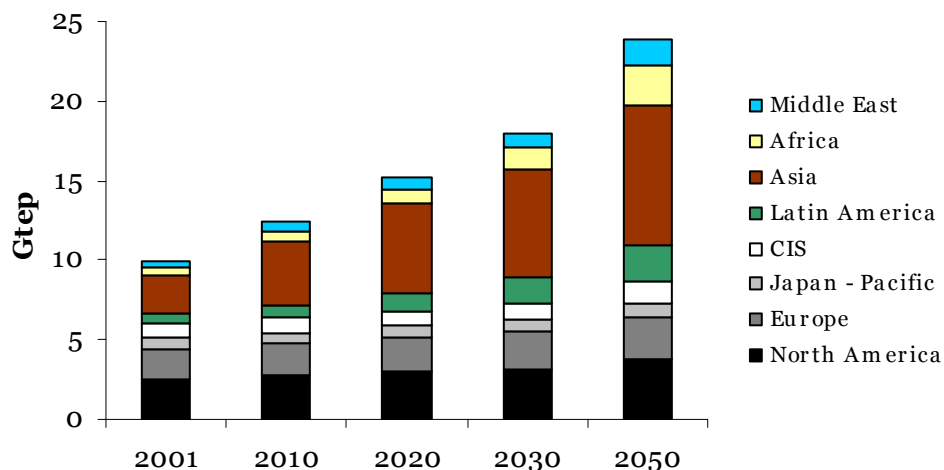


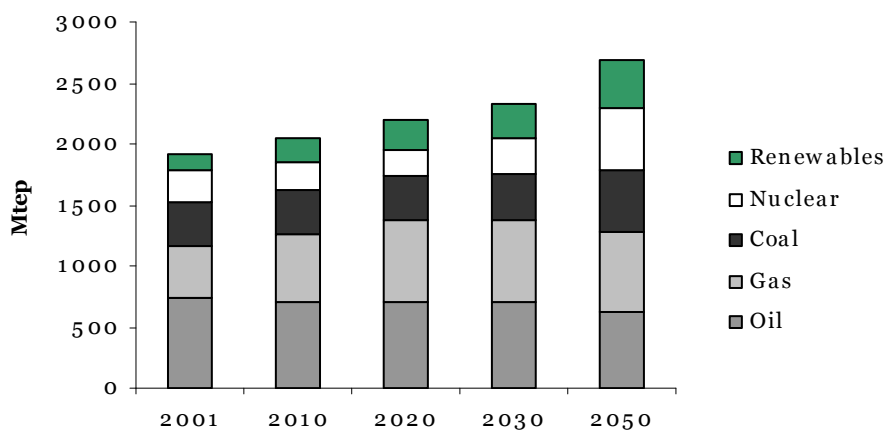
Figure 8 : Production d'énergie primaire - Monde

La désagrégation des consommations par grandes régions du monde fait clairement apparaître un basculement important : l'essentiel de la croissance se produit dans les régions du monde en développement, et bien sûr particulièrement en Asie. Globalement la consommation des pays du Nord augmente très peu, de 6 à 8 Gtep entre 2000 et 2050, alors que celle des pays du Sud est multipliée par quatre sur la même période, de 4 à 16 Gtep.



**Figure 9 : Répartition de la demande d'énergie primaire par région**

En Europe (élargie), la consommation d'énergie primaire passe de 2 à 2.7 Gtep, notamment avec la croissance de la demande chez les anciens « pays de l'est ». Le pétrole décroît sur toute la période, en part et en niveau, alors que le gaz, après une augmentation des consommations correspondant notamment au parc électrique installé dans les années quatre-vingt dix, se stabilise à partir de 2020 puis décroît. Le charbon effectue alors un retour prononcé. Après 2030 la contribution de l'électricité nucléaire augmente de manière significative du fait de la relance des programmes, alors que les renouvelables sont en croissance constante sur toute la période.



**Figure 10 : Consommation d'énergie primaire - Europe**

### Panier technologique de Production d'électricité

La consommation mondiale d'électricité est multipliée par quatre au cours de la période étudiée. Cela signifie que l'on conserve une élasticité proche de l'unité entre demande d'électricité et PIB pendant le prochain demi-siècle. Cela s'explique à la fois par l'ampleur des besoins à satisfaire dans les pays en développement et par le fait que dans bien des domaines l'électricité peut demeurer un vecteur énergétique en progression, qu'il s'agisse de satisfaire les besoins associés à la révolution de l'information ou de la pénétration sur de nouveaux marchés, tels ceux des transports. Le mix de production évolue de manière significative, avec en particulier la forte progression du charbon et, après 2030 des renouvelables et du nucléaire.

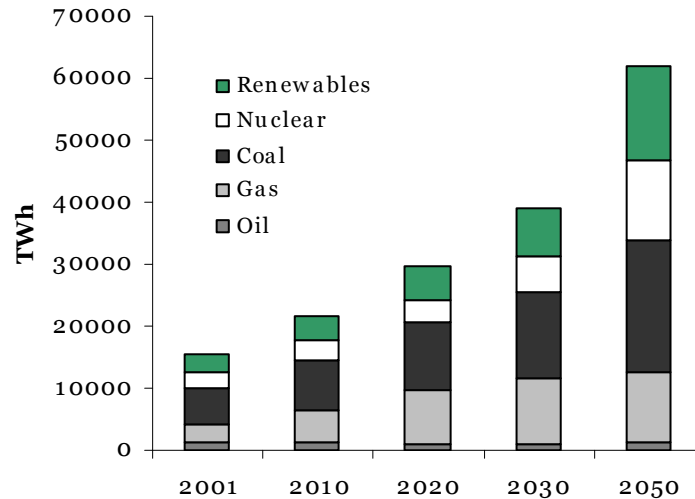


Figure 11 : Mix de production d'électricité - Monde

Alors que la croissance de la demande est plus modérée en Europe, on retrouve des évolutions comparables, mais accentuées pour le mix de production, qui voit nucléaire et renouvelables se développer dans des proportions comparables. En 2050 ces deux sources représentent près de 60 % de la production électrique.

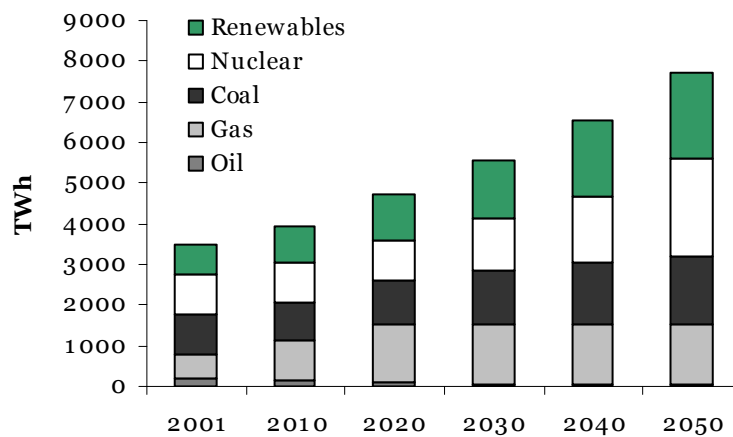


Figure 12 : Mix de production d'électricité – Europe

### Tensions sur les ressources fossiles : prix et volumes de production

La tension croissante sur le marché du pétrole se traduit assez directement par une hausse structurelle des prix, après une brève accalmie à l'horizon 2010. Le prix du pétrole s'établit à près de 120 \$/bl en 2050. Il s'agit ici de niveaux de prix structurels, indépendamment des crises, accidents, oscillations qui ne manqueront pas de marquer l'évolution des marchés au cours de cette période : il s'agit en quelque sorte du « climat » du marché pétrolier, non de sa « météo ».

Les évolutions anticipées pour le gaz naturel sont tout à fait comparables. Ceci ne découle pas d'un dispositif d'indexation systématique des prix du gaz sur ceux du pétrole, mais simplement du fait que les fondamentaux en termes de mécanismes d'évolution des prix et en termes de longueur des ressources disponibles sont tout à fait similaires pour le gaz naturel et pour le pétrole.

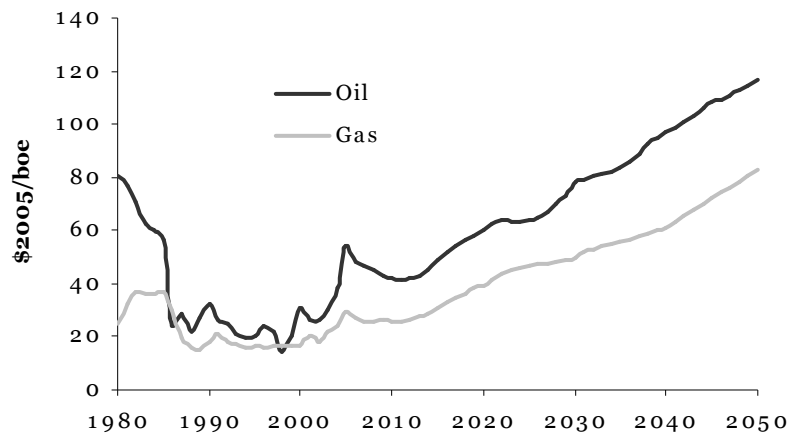


Figure 13 : prix internationaux du pétrole brut et du gaz naturel

Le profil de production pétrolier mondial associé à ces projections de prix ne fait pas apparaître un pic pétrolier brutal du type de celui prédit par exemple par les experts de l'ASPO, mais plutôt un plateau du pétrole conventionnel avec une stabilisation progressive légèrement au-dessus de 100 Mbj avant 2040, suivi d'un déclin très progressif. Dans ces conditions une part importante de l'offre supplémentaire provient des pétroles non conventionnels, ultralourds du Venezuela et sables asphaltiques du Canada.

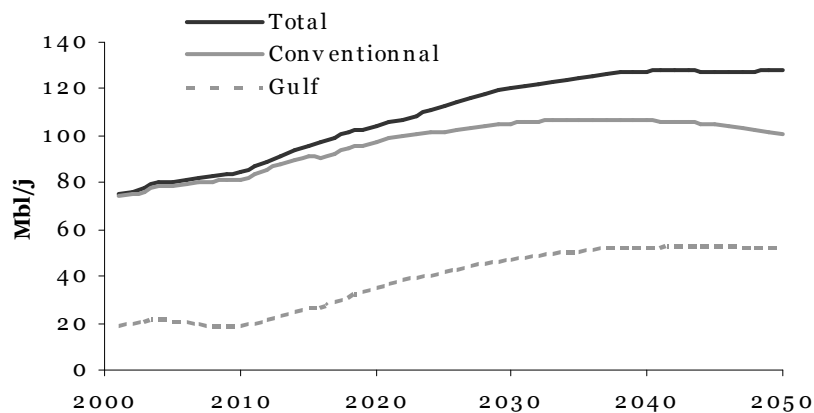
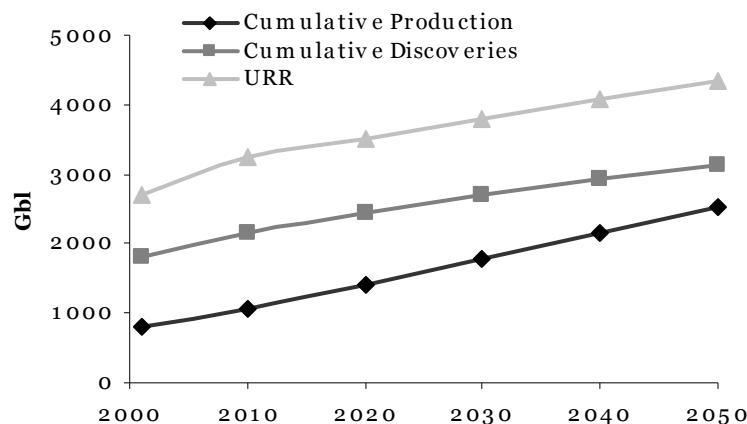


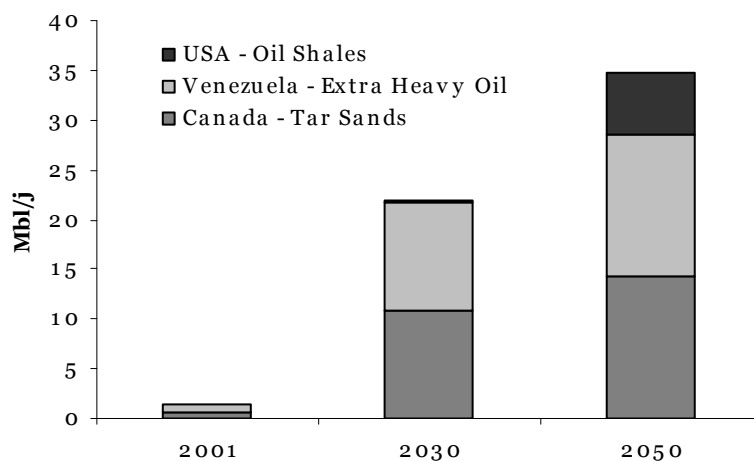
Figure 14 : Production totale de pétrole

Ces évolutions conduisent néanmoins à la disparition des marges de manœuvre du côté de l'offre : malgré l'augmentation des taux de récupération du pétrole, les découvertes de pétrole suivent une courbe de rendements décroissants et les réserves décroissent de manière significative.



**Figure 15 : Ressources de pétrole conventionnel – Monde**  
URR : Ultimate Recoverable Resources

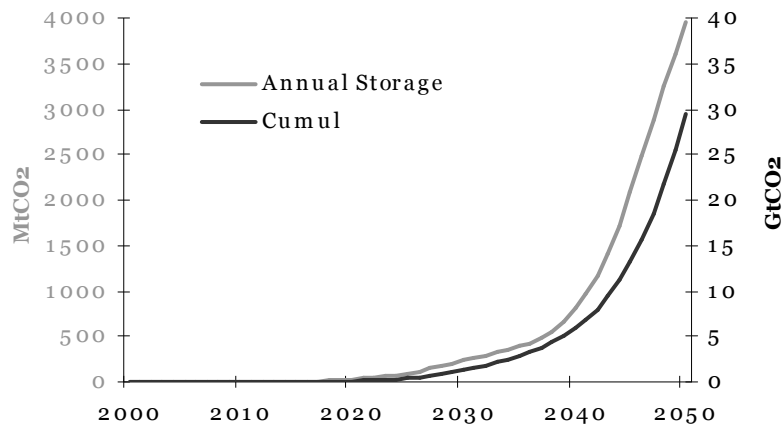
Dans ces conditions la production des pétroles non-conventionnels doit augmenter de manière très significative. Dans un premier temps, jusqu'en 2030 seuls les ultra-lourds et les sables asphaltiques sont développés, à parts égales. Avec le passage des prix du pétrole au-delà de 100 \$/bl après 2040, les schistes bitumineux, présents en grandes quantités en particulier aux Etats-Unis, entrent en production à l'horizon 2050. A cette date les non-conventionnels représentent une production de 35 Mbj, soit plus que l'OPEP actuellement.



**Figure 16 : Production de pétroles non conventionnels**

### **Capture et Séquestration du carbone**

Le scénario de référence décrit le monde « tel qu'il va » sans hypothèse de politique globale vigoureuse d'atténuation de changement climatique. Il ne suppose cependant pas l'absence complète de politique, avec une valeur du carbone non nulle. Celle-ci est suffisante pour déclencher à partir de 2030 des investissements pour la capture et séquestration du CO<sub>2</sub>, si bien que cette technologie représente déjà 8 % des émissions totales brutes en 2050.

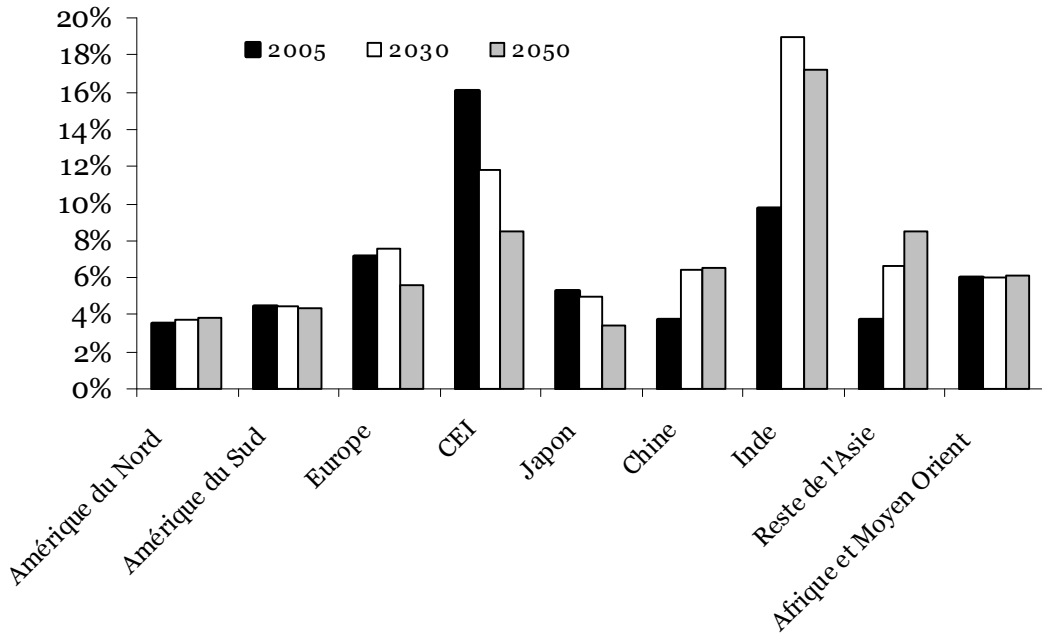


**Figure 17 : Développement de la séquestration du carbone**

### **Facture énergétique**

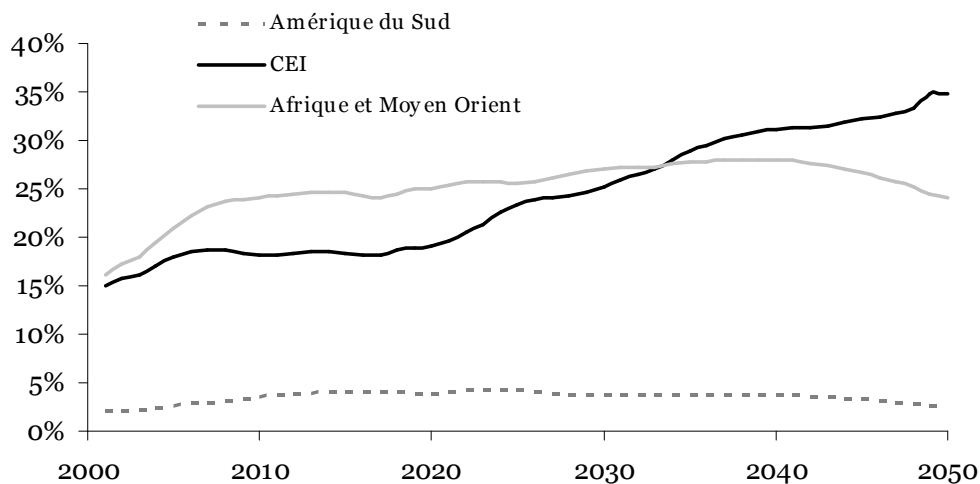
L'évolution de la facture énergétique des ménages dépend de la variation de leur demande d'énergie finale, elle-même fonction du changement structurel et des progrès d'efficacité énergétique, de l'augmentation des prix des énergies fossiles, et de la hausse des revenus par habitant :

- pour les pays de l'OCDE, la part allouée à l'énergie reste à peu près constante ou décroît (surtout grâce aux pays entrants pour l'Europe élargie, avec des progrès d'efficacité importants et un mouvement de tertiarisation, comme pour la CEI);
- pour la Chine et l'Inde, la première moitié de la période correspond à une augmentation de la facture, liée à une phase d'équipements et de croissance des consommations énergétique, tandis que dans la seconde moitié de la période les progrès d'efficacité deviennent dominants ;
- pour les autres régions en développement, la facture énergétique est presque stable (Amérique du Sud, Afrique et Moyen Orient) ou en croissance (reste de l'Asie).



**Figure 18 : Fardeau énergétique des ménages**  
(ratio des dépenses d'énergie sur dépenses totales)

Un autre indicateur important du poids de l'énergie dans l'économie des régions est le ratio entre importations ou exportations d'énergie et le PIB. Pour les pays exportateurs d'énergie fossile, ce ratio est positif : en 2050, il atteint 35% pour la CEI, 25% pour l'OPEP et reste inférieur à 5% pour l'Amérique du Sud (avec cependant des ratios par pays susceptibles d'être plus élevés pour le Brésil et le Venezuela par exemple).



**Figure 19 : Ratio du solde commercial énergétique sur PIB – pays exportateurs**

Pour les pays importateurs, ce ratio est négatif et en général augmente en valeur absolue au cours du demi-siècle. Les pays de l'OCDE restent en deçà des 5% mais la Chine, l'Inde et le Reste de l'Asie atteignent respectivement -7%, -14% et -6%.

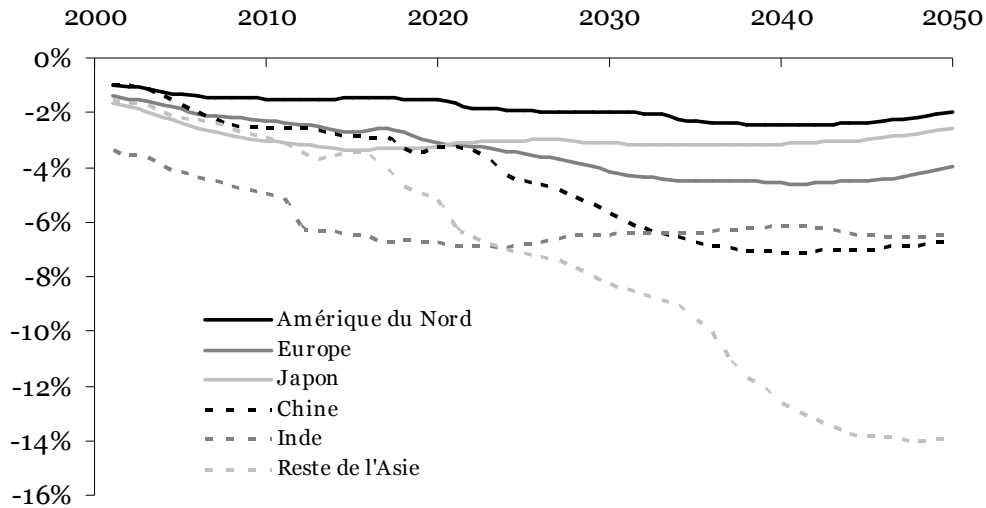


Figure 20 : Ratio du solde commercial énergétique sur PIB – pays importateurs

## 1.4 Secteurs industriels

### 1.4.1 HYPOTHESES

Cette étude se concentre plus particulièrement sur la dynamique de quatre industries de matériaux : l'acier, le ciment, l'aluminium et le verre. La modélisation de ces industries recouvre à la fois le côté offre – en particulier la description des principales technologies de production – et le côté demande – avec la représentation des activités consommatrices de matériaux et leur intensité en matériaux

#### *Technologies*

Les données sur coûts et les performances des principales technologies de production de matériaux ont été agrégées dans la base de données TECHPOL, dont l'objet est de fournir des données fiables sur les coûts et les performances des technologies d'offre et de demande d'énergie, en particulier pour alimenter le modèle du système énergétique POLES<sup>5</sup>. Les données collectées permettent de calculer un coût de production actualisé en suivant une procédure standard appliquée à toutes les technologies de façon identique.

Pour la production **d'acier**, onze technologies ont été considérées dont deux avec des performances améliorées (technologies avancées) correspondant à des évolutions de procédés actuels :

- Acier Martin (Open Hearth Furnace)
- Haut Fourneau à Oxygène (Blast Oxygen Furnace)
- Haut Fourneau "technology avancée" (BOF advanced)
- Haut Fourneau avec CCS (Blast Oxygen Furnace with CO2 capture)

<sup>5</sup> Cette base de données comprend aujourd'hui une extension vers les technologies à très basses émissions : nouveaux vecteurs d'énergie (hydrogène), nouvelles technologies de production (capture du CO2, nucléaire de 4ème génération, etc.) ou de demande d'énergie (piles à combustible pour les applications stationnaires, nouvelles motorisations, etc.).

- Fusion – Réduction (Smelting Reduction Process)
- Fusion – Réduction à l'hydrogène (Smelting Reduction Process, H2 based)
- Fusion – Réduction avec CCS (Smelting Reduction Process with CO2 capture)
- Four Electrique (Electric Arc Furnace)
- Four Electrique "technologie avancée" (EAF advanced)
- Réduction directe (Direct Reduction Process)
- Réduction directe à l'hydrogène (Direct Reduction Process, H2 based)

Pour la production de **ciment**, outre le four vertical, la voie sèche et la voie humide sont les principales familles technologiques existantes avec différentes options de préchauffage ou précalcinateur permettant de diminuer les consommations unitaires d'énergie :

- Voie humide / Four rotatif
- Voie semi humide / Four rotatif
- Voie semi sèche / Four rotatif
- Voie sèche / Four rotatif long
- Voie sèche / Four rotatif avec Préchauffeur
- Voie sèche / Four rotatif avec Préchauffeur et Précalcinateur
- Four vertical (shaft kiln)

Enfin, pour la production **d'aluminium**, le principal procédé disponible est le procédé électrolytique Hall-Heroult mais les technologies diffèrent selon le type d'anode et le système d'alimentation en alumine :

- Cuves à anode précuite – alimentation ponctuelle (Point Feeder Prebake)
- Cuves à anode précuite – alimentation centrale (Center Work Prebake)
- Cuves à anode précuite - alimentation latérale (Side Work Prebake)
- Four horizontal Stud Söderberg
- Four Vertical Stud Söderberg
- Deuxième fusion (Secondary aluminium)

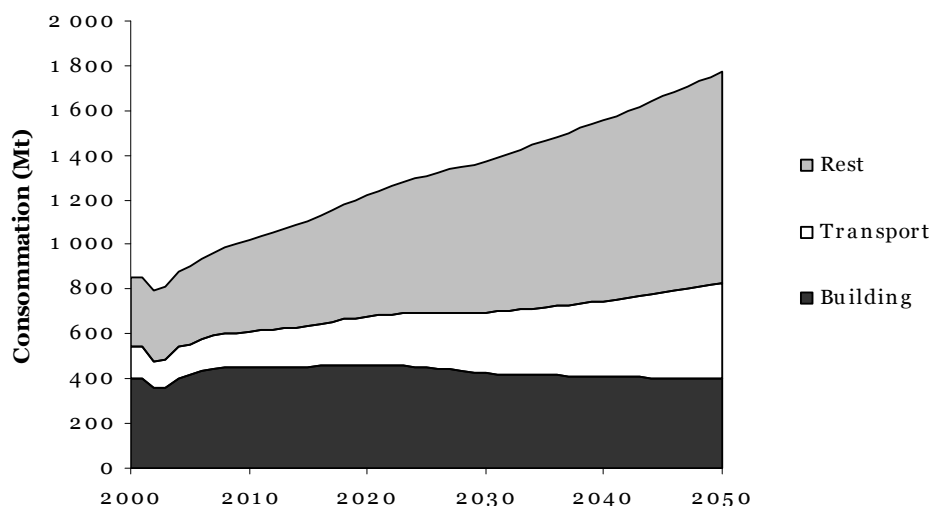
#### ***Indicateurs d'activités consommatrices de matériaux et intensités matériaux***

Les données aujourd'hui disponibles ne permettent pas de recenser et d'analyser en détail la demande des grands matériaux « structurels ». Habituellement, celle-ci est « calée » en fonction de courbes d'intensité d'usage totale, en fonction du PIB. Dans les modèles POLES et IMACLIM-R la représentation de la demande est maintenant désagrégée, pour faire apparaître les consommations de matériaux structurels pour le bâtiment, les transports et l'ensemble des autres usages (machines, équipements, emballages). Pour les deux premiers usages, les consommations sont reliées à des variables endogènes des modèles, comme les surfaces habitables ou les volumes des parcs de véhicules.

### 1.4.2 RESULTATS

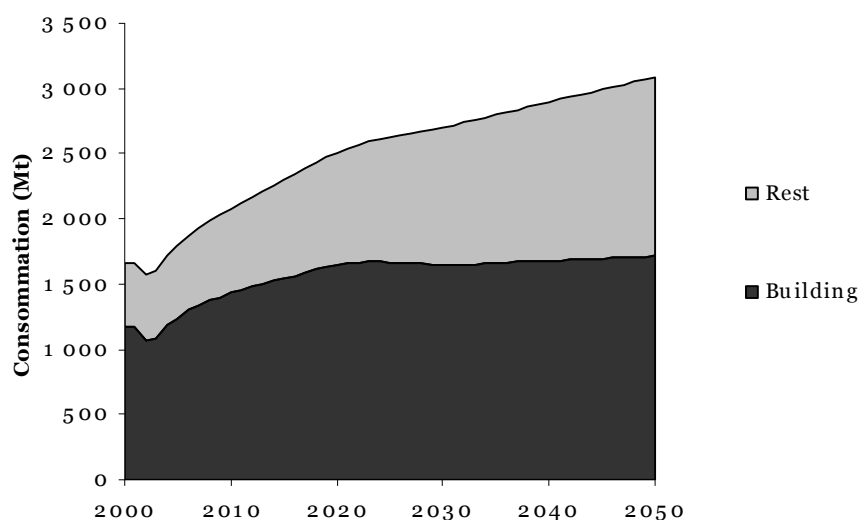
#### ***Demande de matériaux : acier, ciment, aluminium***

Dans notre scénario de référence, la demande mondiale d'acier est multipliée par deux au court du prochain demi-siècle. Cela correspond à une tendance continue à la dématérialisation de l'économie, dans des proportions comparables à ce qui se produit pour l'énergie. Cette demande mondiale se décompose en une demande pour les bâtiments qui reste assez stable sur la période, alors que la demande pour les transports et les autres usages croît régulièrement.



**Figure 21 : Consommation d'Acier par poste**

La consommation de ciment est majoritairement située dans le secteur du bâtiment, les autres usages correspondant dans ce cas à la construction d'infrastructures de toutes sortes. La stabilisation progressive de la population mondiale explique le ralentissement de la croissance de la consommation après 2020.



**Figure 22 : Consommation de Ciment par poste**

La consommation d'aluminium est désagrégée avec une composante supplémentaire correspondant aux usages de l'aluminium dans les infrastructures de réseaux électriques. La consommation mondiale connaît une croissance régulière sur la période avec un léger ralentissement après 2020. L'augmentation la plus importante provient du secteur des transports, du fait de la progression du parc automobile mondial et de l'augmentation de l'usage de l'aluminium dans cette industrie. Malgré cette progression, la consommation d'aluminium reste inférieure à celle d'acier ou de ciment d'un facteur supérieur à 10 en poids total.

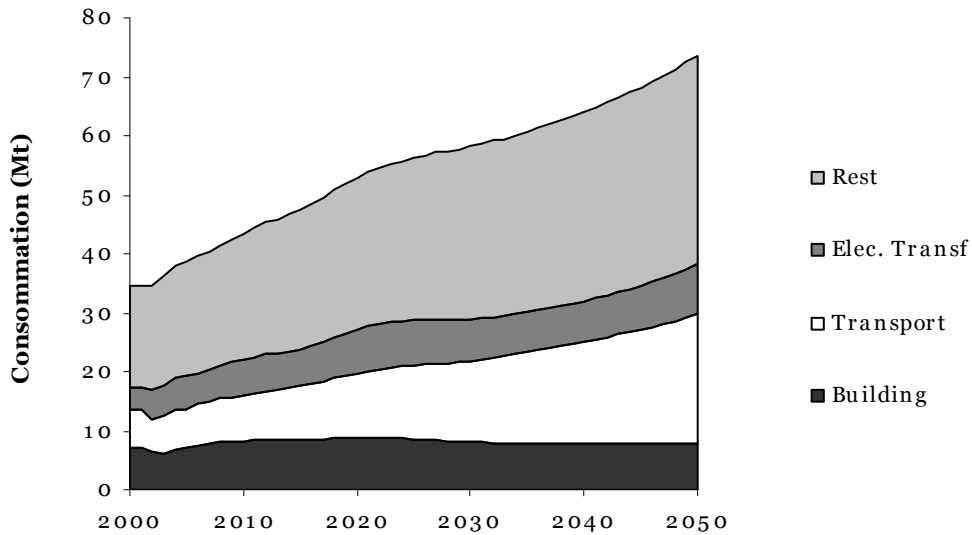


Figure 23 : Consommation d'Aluminium par poste

### 1.5 Emissions de CO2

Dans la projection de référence, celle d'un monde sans forte contrainte carbone, les émissions passent de 23 GtCO<sub>2</sub> aujourd'hui à 54 GtCO<sub>2</sub> en 2050. Ce doublement correspond à l'augmentation des consommations mondiales d'énergie, et résulte du fait que l'intensité en carbone du mix énergétique mondial reste assez stable sur la période. En effet les progrès des énergies sans carbone, nucléaire et renouvelables sont compensés par le recul du pétrole et du gaz dans la partie fossile de l'approvisionnement, en faveur évidemment du charbon, dont la consommation augmente considérablement au cours de la période.

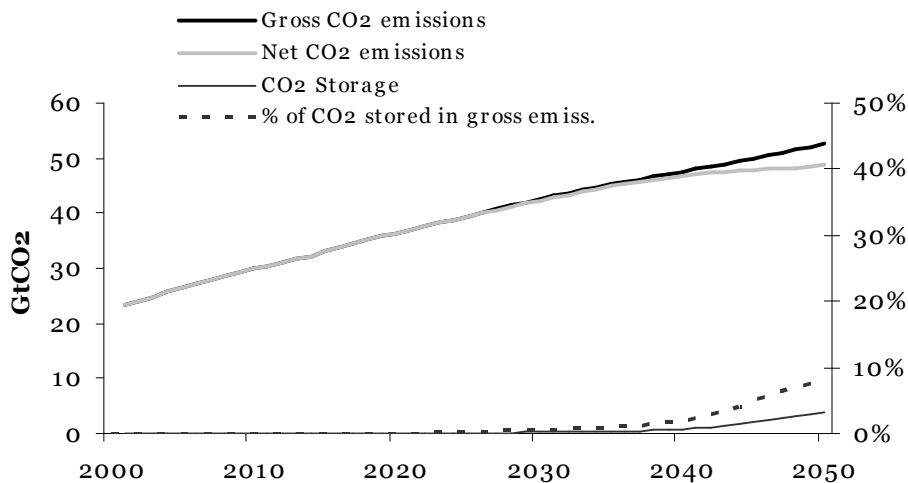


Figure 24 : Emissions de CO<sub>2</sub>

La raréfaction relative des hydrocarbures entraîne de ce fait une rupture dans le trend séculaire de décarbonisation de l'approvisionnement énergétique mondial. Les résultats de ce scénario font apparaître alors le risque majeur que constitue pour le climat une politique de laisser-faire : dans ce type de configuration les trajectoires de stabilisation des émissions qui restent possibles

après 2050 se situent à un niveau d'au moins 900 ppmv pour le CO<sub>2</sub>. Il faut dans ce cas s'attendre, selon l'IPCC, à un changement climatique majeur, avec des augmentations moyennes de température dépassant 4 °C à l'échelle du siècle.

## 2 Scénario 450 ppmv – F4 mimétique

### 2.1 Instruments

Le scénario « Stabilisation des concentrations à 450 ppmv CO<sub>2</sub> et Facteur 4 dans les pays de l'Annexe 1 » (S450-F4) constitue une réponse compatible avec la préoccupation européenne de limiter le changement climatique à une augmentation de température moyenne inférieure à 2°C par rapport à la situation pré-industrielle. Cela suppose une forte contrainte de limitation des émissions, dont nous décrivons ci-dessous l'impact potentiel sur le système énergétique, sur les secteurs industriels de production de matériaux et l'économie dans son ensemble.

#### 2.1.1 HYPOTHESES

##### *Enveloppe d'émissions*

L'objectif d'une stabilisation à 450 ppmv implique de maintenir les émissions mondiales à l'intérieur d'une enveloppe très contraignante. Cela se décline en objectifs très ambitieux pour le contrôle des émissions :

- d'obtenir une inflexion des émissions mondiales avant 2020 ;
- de ramener les émissions de 2050 à un niveau représentant deux-tiers à trois-quarts de celui de 1990.

Si on rajoute à cela une « clé » d'arbitrage du partage des efforts des différents pays prenant en compte l'équité entre pays développés et pays en développement et émergents – *dans le sens d'une convergence* des émissions par habitant à long terme, il est nécessaire de réduire de manière proportionnellement beaucoup plus importante les émissions des pays aujourd'hui développés.

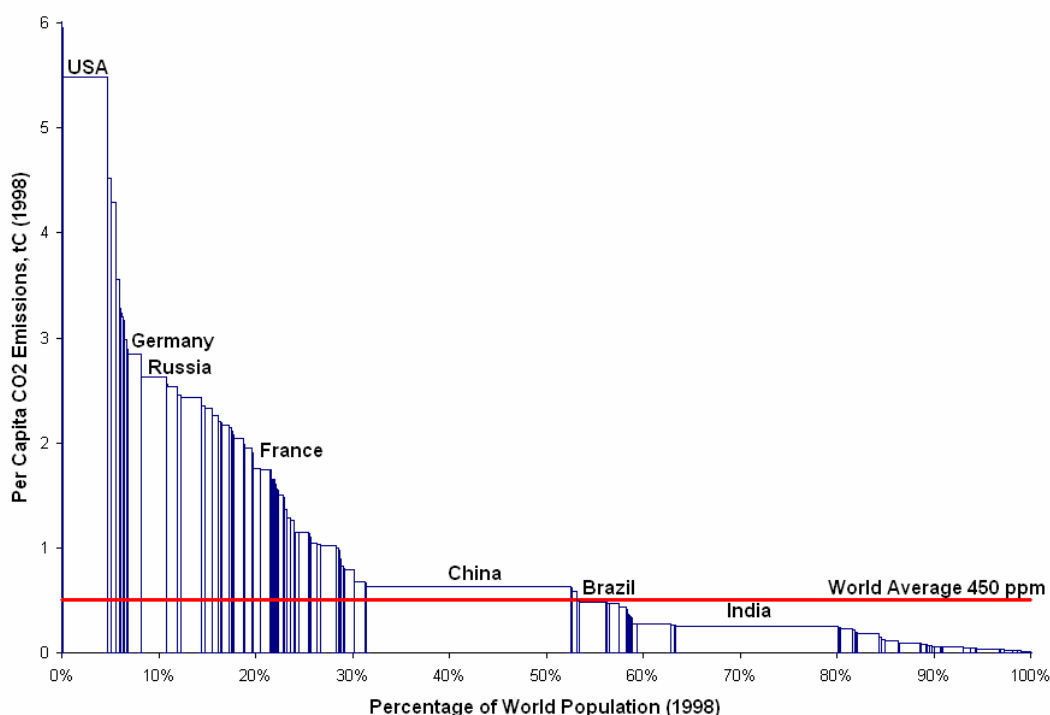
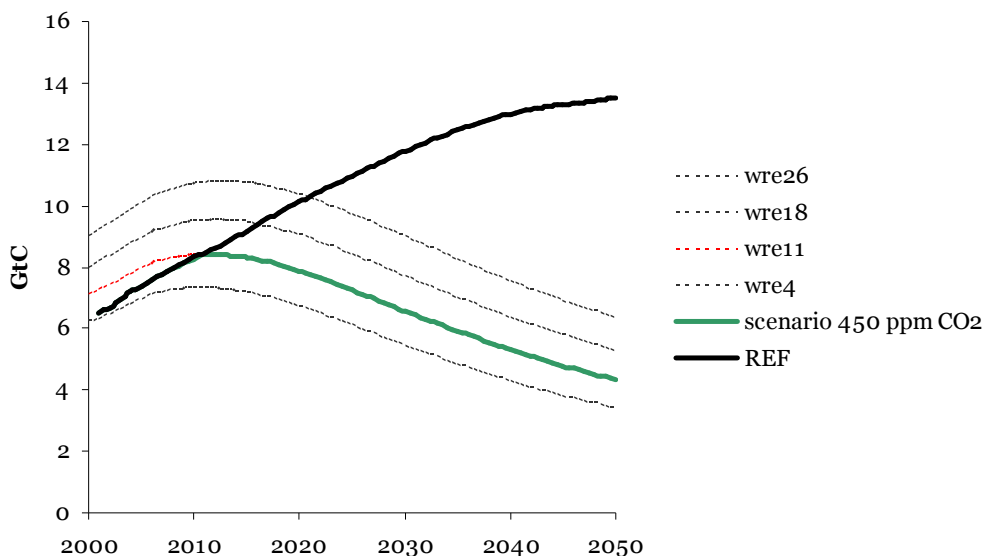


Figure 25 : Emissions par habitant et objectif de convergence pour une stabilisation à 450 ppm

Au total la réduction requise par rapport à la projection de référence est donc considérable, et la bifurcation par rapport à la trajectoire doit de plus être effectuée sans délai. Le profil retenu peut apparaître comme trop ambitieux, mais c'est le seul type de trajectoire susceptible de répondre aux objectifs politiques affichés au plan européen et français : un profil d'émissions plus élevés impliquerait inéluctablement un niveau de stabilisation plus élevé<sup>6</sup>.



**Figure 26 : Trajectoire de stabilisation 450 ppm CO<sub>2</sub>**

Deux jeux de trajectoires de stabilisation font figure de référence dans la littérature : les trajectoires WGI (IPCC, 1994) et les scénarios WRE (Wigley, Richels and Edmonds, ). Ces derniers permettent des émissions plus importantes dans les décennies les plus proches mais une réduction plus sévère ensuite.

### **Style de développement « mimétique »**

Le scénario S450-F4 développé à cette étape du projet suppose, pour y parvenir, des changements très importants dans :

- les comportements de consommation d'énergie et d'investissement des industriels
- la diffusion rapide d'équipements Très Basses Emissions de gaz à effet de serre dans le bâtiment, les transports et l'industrie ;
- le développement et la diffusion de nouvelles technologies énergétiques associées aux énergies renouvelables, au nucléaire de troisième génération, à la Capture et Séquestration du Carbone ;
- le développement et la diffusion de technologies industrielles de production de matériaux de type « innovation radicale ».

Néanmoins le scénario développé à ce stade ne comporte pas d'hypothèses de changement dans les styles de vie, de localisation et d'urbanisation, qui permettront plus tard de distinguer des scénarios plus contrastés.

<sup>6</sup> Ce profil de stabilisation des émissions correspond aux émissions d'origine énergétique et industrielle, hors biomasse et usage des sols. Les quatre scénarios WRE affichés sur le graphe correspondent à quatre scénarios d'émissions liées à l'usage des sols et la forêt différents, sachant si les tendances actuelles des émissions LULUCF (Land Use, Land Use Change and Forestry) perduraient, elles imposeraient de respecter le profil d'émissions hors LULUCF le plus bas sur cette figure.

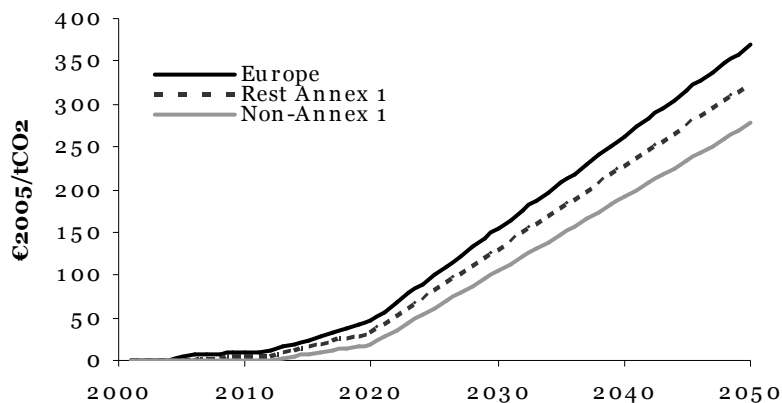
## 2.1.2 RESULTATS

Dans le système de modélisation POLES-IMACLIM, la manière la plus directe d'introduire une contrainte carbone est de supposer l'imposition d'une taxe aux émissions, venant augmenter directement le prix à la consommation des énergies fossiles. Cela se traduit ensuite par des substitutions vers des énergies non carbonées, des progrès d'efficacité, des ruptures technologiques, des baisses d'activités polluantes, etc. Les modèles permettent ensuite d'évaluer les effets systémiques de ces changements, dans un cadre d'équilibre partiel (POLES) ou général (IMACLIM-R). Le dispositif d'articulation d'un modèle énergétique et d'un modèle macro-économique permet d'évaluer l'ampleur des effets indirects d'une contrainte carbone très forte sur le système énergétique et le reste de l'économie.

### **Valeurs du carbone**

Les valeurs du carbone sont calculées par tâtonnement pour obtenir le profil d'émissions contraignant présenté ci-dessus, leur profil correspond donc à une hypothèse d'action rapide. Par ailleurs elles sont différenciées par région pour tenir compte du rôle potentiel de leader de l'Europe dans les politiques de réduction des émissions et des délais d'ajustement laissés aux pays en développement. En 2050 la valeur du carbone est comprise entre 250 et 350 €/tCO<sub>2</sub>. Très élevée par rapport aux estimations rencontrées dans la littérature, cette valeur du carbone doit être interprétée avec précaution :

- il ne s'agit que d'une mesure du signal à imposer aux différents secteurs pour obtenir la réponse recherchée ; ce signal ne doit pas forcément passer intégralement par une taxe ou un prix du permis, mais est révélateur de l'ampleur de la contrainte implicite pesant sur les activités sources d'émissions;
- même si ce signal était converti en taxe effective, on peut noter que cela n'impliquerait qu'un doublement du prix de l'essence en Europe en 2050, ce qui semble relativement proportionné à l'objectif de réduction par quatre des émissions ;
- enfin, ce signal correspond bien au signal marginal à imposer dans les secteurs où les réductions sont les plus difficiles à obtenir, et non au coût moyen des réductions.



**Figure 27 : Valeur du carbone – scénario 450 ppm / F4 mimétique**

Les différences entre les trois profils de valeur du carbone sont à interpréter comme des délais de mises en œuvre dans les pays de l'Annexe I hors Europe et dans les pays en développement, lesquels délais ne sont pas, ici, supposés être rattrapés par la suite. Cette hypothèse sera amendée lors des prochaines simulations.

## 2.2 Développement énergétique sous contrainte carbone

### *Demande finale d'énergie*

La demande finale d'énergie est fortement réduite dans ce scénario. En croissance jusqu'en 2020, la consommation décline ensuite dans tous les secteurs, si bien qu'elle n'est en 2050 que de 20 % supérieure à celle de 2000 et elle est inférieure de 50 % à celle obtenue dans la référence. On peut retenir, comme ordre de grandeur, que dans le scénario Facteur 4 la moitié des émissions est obtenue par la maîtrise de la demande d'énergie.

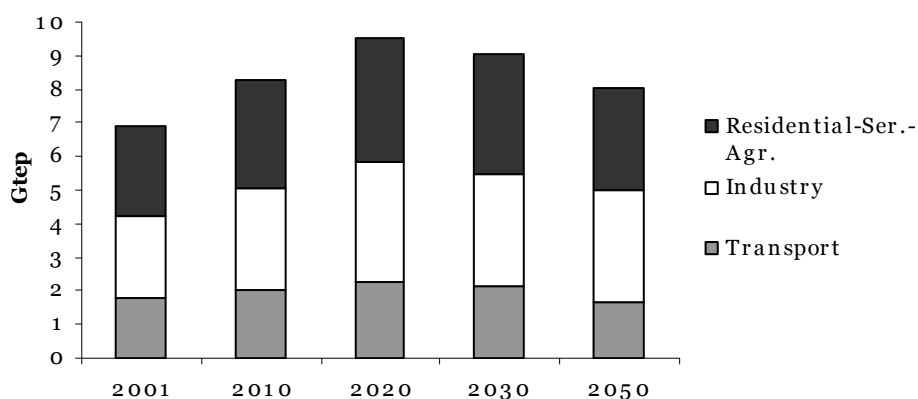


Figure 28 : Consommation d'énergie finale - Monde

L'évolution est encore plus marquée en Europe où la consommation finale se stabilise à partir de 2010 et décline à partir de 2020, pour atteindre en 2050 un niveau inférieur d'un tiers au niveau actuel.

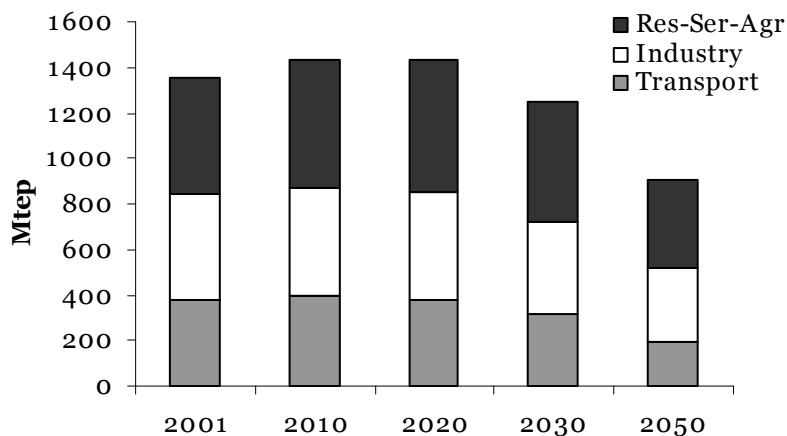


Figure 29 : Consommation d'énergie finale - Europe

## Energie Primaire

La consommation mondiale d'énergie primaire plafonne en 2020 à 14 Mtep, avant de redescendre en 2050 à 13 Gtep – contre 24 Gtep dans la référence. La part des énergies non fossiles, renouvelables et nucléaire augmente significativement pour atteindre 40 % de l'approvisionnement énergétique mondial alors même qu'en volume ces deux sources augmentent peu par rapport à leur niveau de la référence ; on voit ici à nouveau l'impact de la réduction totale des consommations sur la structure du système énergétique mondial.

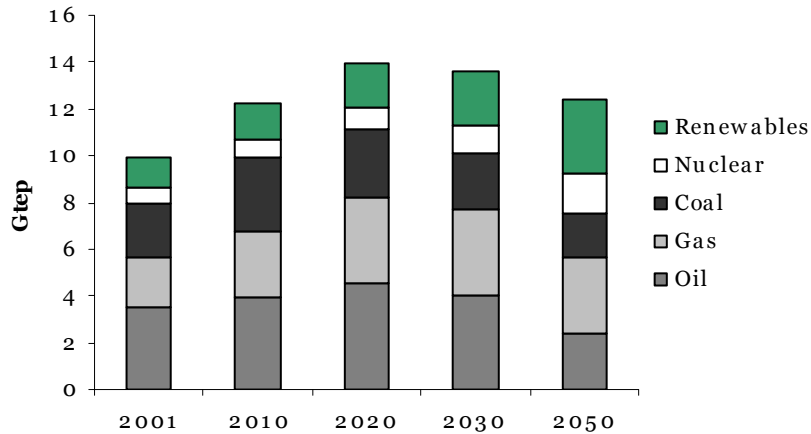


Figure 30 : Production d'énergie primaire – Monde

La croissance de la demande est contenue dans toutes les régions. Dans les pays du Nord, les réductions en volume des consommations se différencient en fonction des dynamiques de demande, des sensibilités au prix des différents secteurs et des différences de valeur du carbone. Dans les régions du monde émergentes et en développement la consommation primaire double.

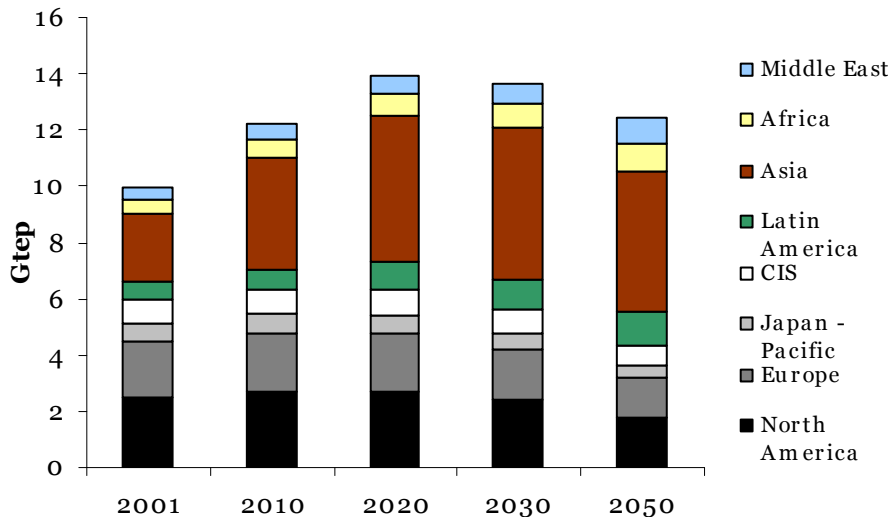


Figure 31 ; Répartition de la demande d'énergie primaire par région

### Mix technologique de Production d'électricité

La consommation mondiale d'électricité est limitée à 40 000 TWh en 2050, contre 60 000 dans la référence, mais elle demeure en croissance significative par rapport au niveau initial. Cela s'explique par la moindre sensibilité de la demande à l'introduction d'une valeur du carbone, mais aussi du fait que l'électricité est dans de nombreux cas un substitut utile pour la décarbonisation du système énergétique. En effet en 2050 plus de la moitié de l'électricité est produite avec des sources primaires non carbonées, nucléaire et renouvelables, bien que les technologies de Capture et Séquestration jouent un rôle important dans le thermique fossile résiduel (voir infra).

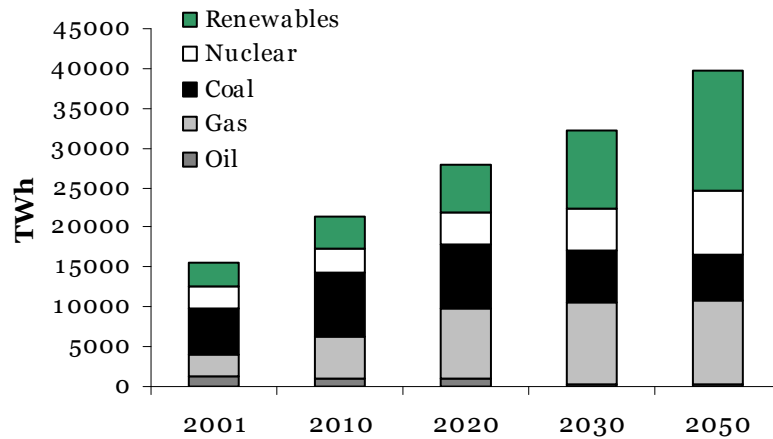


Figure 32 : Mix de production d'électricité – Monde

En Europe le rôle des moyens de production non fossiles est encore plus important et représente plus des deux-tiers du total en 2050. Le système électrique européen devient clairement un système « renouvelables + nucléaire ».

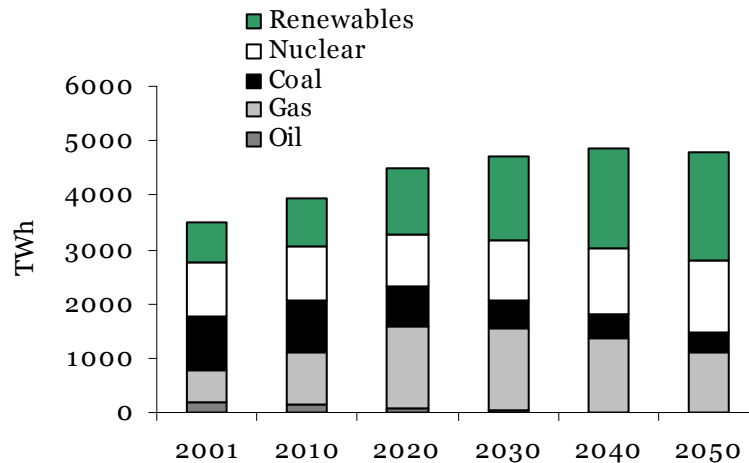


Figure 33 : Mix de production d'électricité – Europe

### Rôle des ressources fossiles

L'un des résultats les plus significatifs de ce scénario du point de vue des évolutions du système énergétique est que la contrainte de demande est suffisamment forte pour changer structurellement les équilibres des marchés énergétiques. C'est le cas en particulier pour le système pétrolier, avec tout d'abord une limitation forte de la demande et de l'offre qui plafonnent à 100 Mbl/j après 2020. Ce nouvel équilibre permet d'une part de limiter considérablement le recours aux pétroles non conventionnels qui sont par ailleurs des solutions à forts impacts environnementaux, d'autre part de restreindre la part du Golfe dans l'approvisionnement mondial : celle-ci reste inférieure à 50% sur toute la simulation.

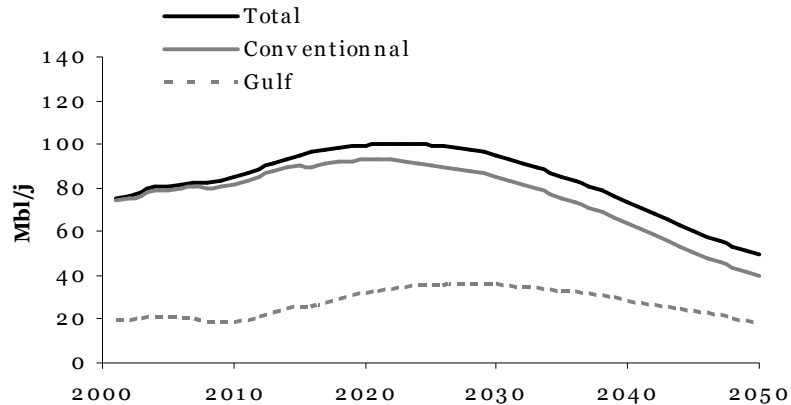


Figure 34 : Production de pétrole – scénario 450 / F4

Cette nouvelle configuration du système pétrolier mondial transparaît directement dans les trajectoires de prix du pétrole. Aucune hypothèse supplémentaire n'étant faite dans le modèle sur la possibilité d'une cartellisation des producteurs en réponse à la réduction de la demande par les consommateurs, la trajectoire de prix du pétrole est significativement plus basse. Elle conduit à une stabilisation des prix du pétrole à un niveau de l'ordre de 40 \$/bl jusqu'à 2050. La valeur élevée du carbone permet de créer un double dividende pour la durabilité du système énergétique mondial, par la résolution conjointe d'une contrainte-amont sur les ressources d'hydrocarbures et d'une contrainte-aval sur la réduction des émissions. D'autres hypothèses pour l'équilibre du marché peuvent être envisagées, mais les fondamentaux du problème pétrolier seront inéluctablement changés en profondeur, et celui-ci sera beaucoup moins aigu dans le cas d'un scénario 450 ppmv-F4.

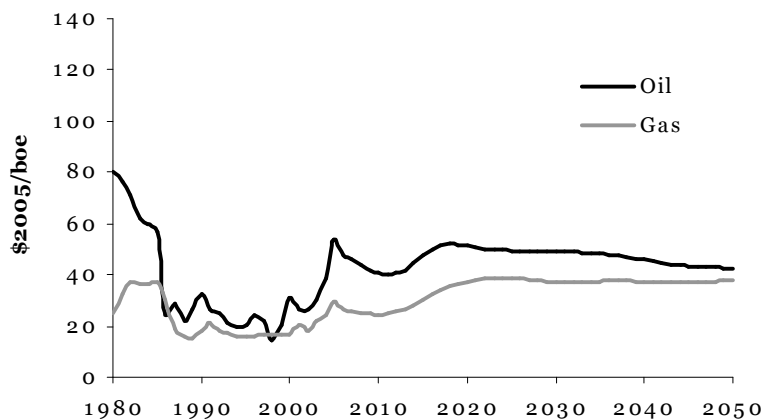


Figure 35 : prix mondiaux du pétrole brut et du gaz naturel

### Capture et Séquestration du carbone

La Capture et Séquestration du CO<sub>2</sub> joue un rôle très important dans ce scénario, puisqu'au plan mondial elle représente 11 GtCO<sub>2</sub> en 2050, et un stockage total cumulé de 220 GtCO<sub>2</sub>.

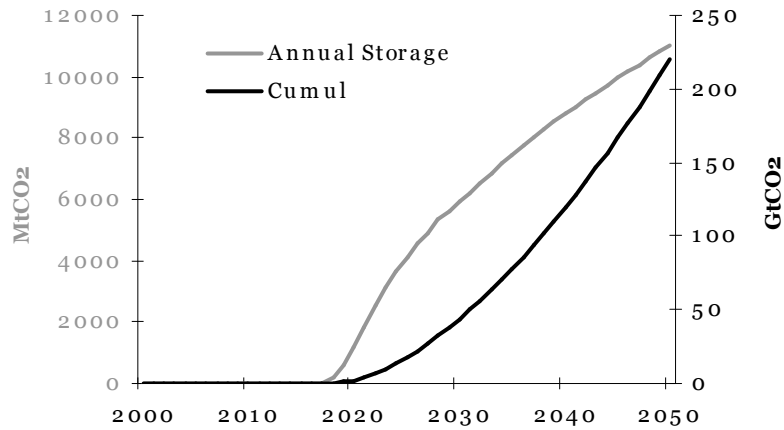


Figure 36 : Développement de la séquestration du carbone

En 2050 cela correspond à 40 % des émissions brutes mondiales séquestrées, ou encore à un quart des réductions totales obtenues par rapport à la référence.

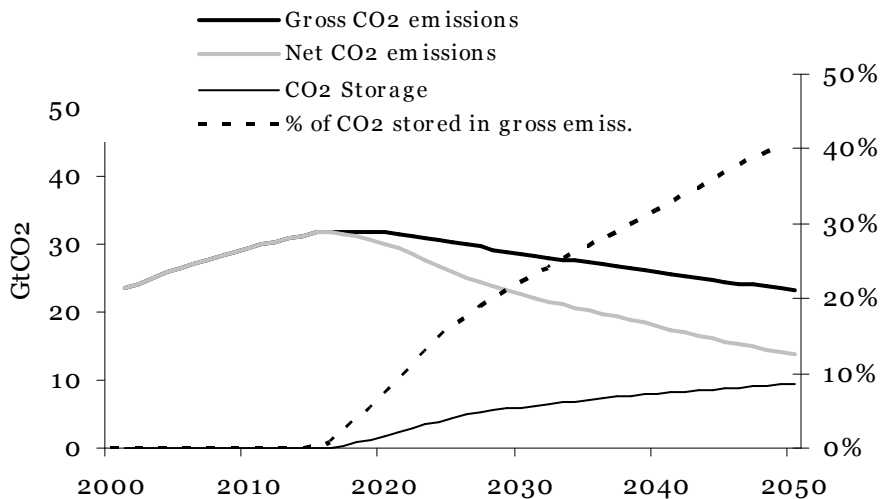


Figure 37 : émissions de CO<sub>2</sub> et niveau de séquestration

## Facture énergétique

L'impact de la contrainte carbone sur la part de l'énergie dans le panier de consommation des ménages est la résultante du fardeau de la valeur élevée du carbone sur les émissions résiduelles d'une part, et des économies réalisées grâce aux gains d'efficacité et à la décarbonisation du panier énergétique induits d'autre part. Cette résultante diffère selon les régions :

- pour l'Amérique du Nord, l'Amérique du Sud, l'Afrique et le Moyen Orient, le fardeau énergétique est très peu modifiée, le surcoût du à des consommations fossiles résiduelles très taxées compensant les gains d'efficacité ou de décarbonisation.
- Pour les autres régions, la facture est réduite par rapport à la référence ; la région la plus bénéficiaire est l'Inde, dont la décarbonisation importante permet d'éviter à terme un blocage dans une trajectoire carbonée très coûteuse (notamment à cause de très larges importations de pétrole cher) dans le scénario de référence.

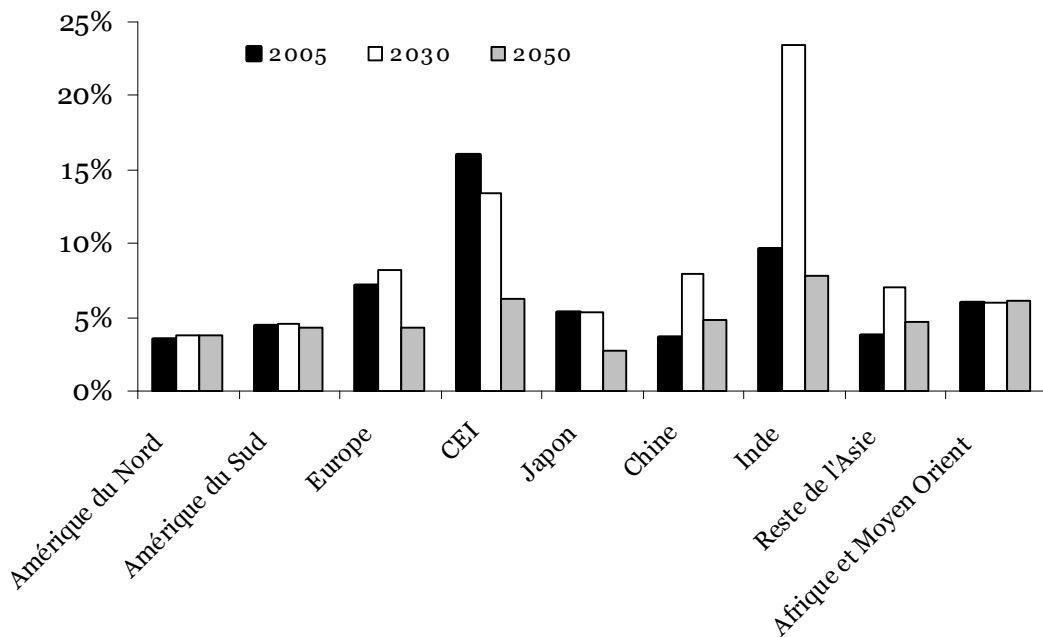
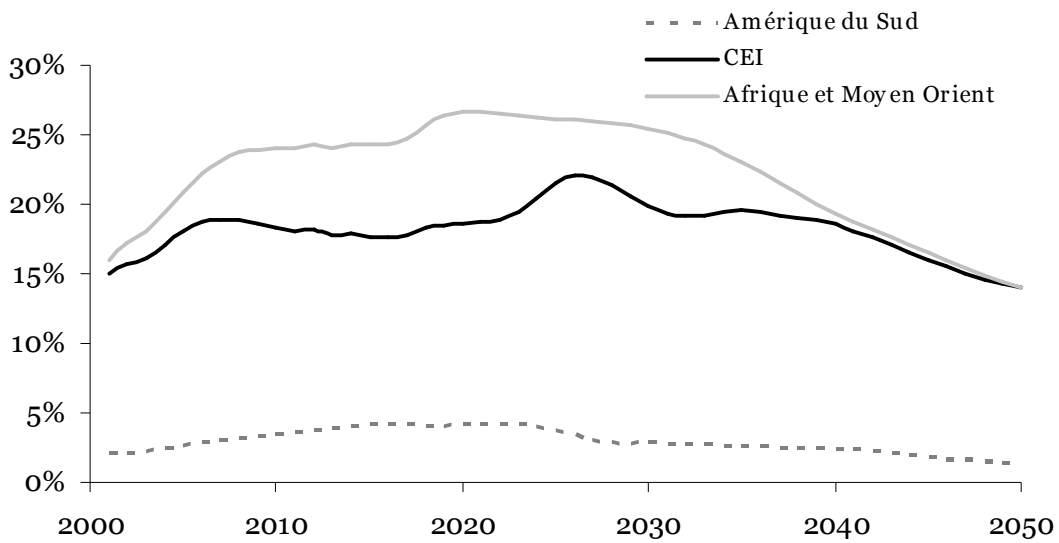


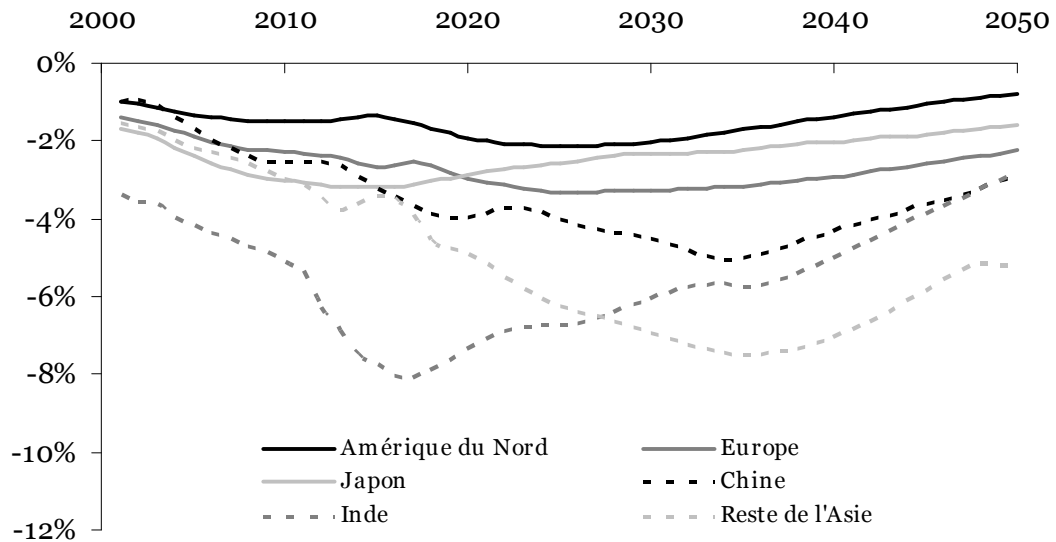
Figure 38 : Fardeau énergétique des ménages – scénario 450 / F4

La transformation du monde énergétique évoquée plus haut, et en particulier de l'approvisionnement en pétrole et en gaz, se répercute au niveau macroéconomique sur le poids des importations et des exportations d'hydrocarbures. Les pays exportateurs voient logiquement leurs revenus d'exportations fortement réduits. Cette réduction est à double tranchant : d'un côté cela constitue un manque à gagner brut dans les revenus de ces régions, mais d'un autre côté, ces régions, en particulier le Moyen-Orient, souffrent beaucoup moins dans ce scénario de prix intérieurs très élevés défavorisant la demande intérieure et le développement des secteurs non-énergétiques : en résumé, la croissance économique de ces régions est réorientée vers les secteurs non-énergétiques, même si le bilan net sur la croissance est fortement négatif (§2.4).



**Figure 39 : Ratio du solde commercial énergétique sur PIB – pays exportateurs**

Au contraire, grâce aux politiques de réduction des émissions, les pays importateurs d'hydrocarbures bénéficient d'un allègement de leur dépendance énergétique très significatif, combinant prix mondiaux plus bas et volumes d'importations plus faibles.



**Figure 40 : Ratio du solde commercial énergétique sur PIB – pays importateurs**

## **2.3 Secteurs industriels**

### **2.3.1 HYPOTHESES D'INTENSITE MATERIAUX**

Plusieurs hypothèses ont été considérées dans la réalisation du facteur 4 ayant une incidence spécifique sur la demande de matériaux. L'écriture de ces hypothèses nécessite de répondre à des questions sectorielles très ciblées.

En ce qui concerne les *bâtiments*, il est nécessaire de déterminer :

- quels sont les contenus moyens en matériaux de différents types de bâtiments (tertiaire, maison individuel, logements collectifs) ?
- à quelle augmentation de la surface vitrée correspond un logement très basse consommation en individuel ou en collectif ?
- quelles sont les conditions de faisabilité technique, de longévité et de résistance des matériaux naturels pouvant se substituer aux matériaux traditionnels dans la construction ?

La traduction d'une contrainte carbone sur les bâtiments a été réalisée à travers deux leviers : la conception des bâtiments et la structure des bâtiments.

#### ***La conception des bâtiments***

Le bâtiment est à la fois un capteur d'énergie solaire (thermique et lumineuse) et un échangeur thermique entre le climat extérieur et les exigences de confort à l'intérieur. Concevoir des bâtiments pour minimiser les émissions directes ou indirectes de CO<sub>2</sub>, c'est à la fois maximiser le captage d'énergie solaire « utile » et minimiser les pertes des échanges thermiques. Le captage d'énergie solaire « utile » est surtout une préoccupation des pays froids, et le plus souvent une affaire de surfaces vitrées, et donc de verre plat. La minimisation des pertes lors des échanges thermiques est une question universelle, généralement une affaire d'isolants, parfois de circulation d'air, rarement de matériaux de gros œuvre. Les hypothèses introduites dans le scénario facteur 4 sont essentiellement relatives au développement de l'eau chaude solaire, dont le caractère est universel, et aux logements très basse énergie dans les pays froids, où les apports solaires passifs constituent une composante forte de la performance thermique globale. Elles se traduisent dans notre étude par :

- Une augmentation des surfaces vitrées de 50% dans les régions « froides » (Europe et Amérique du Nord)
- La diffusion du triple vitrage pour les logements très basse consommation
- La diffusion de capteurs solaires pour l'eau chaude sanitaire de 10 m<sup>2</sup>/logement pour les régions « froides » et de 2 m<sup>2</sup> /logement pour les autres régions pour les logements très basse consommation.

#### ***La structure des bâtiments***

S'il est concevable de produire des bâtiments neufs à très basse énergie à partir de n'importe quel matériau de construction, le choix du matériau n'est bien sûr pas neutre sur les productions de clinker, de verre, sur la transformation du minerai de fer, etc. et sur les émissions associées à ces productions et transformations. Les seules alternatives réellement économes en émissions induites de CO<sub>2</sub> sont les matériaux naturels : bois, terre crue, paille, etc... A ce stade de l'étude, seule la pénétration de bâtiments avec une structure bois a été considéré par manque d'information sur la faisabilité technique, la longévité et la résistance des

autres matériaux naturels ainsi que sur l'incidence de leur introduction sur la consommation des matériaux « traditionnels » considérés dans notre étude. Le scénario facteur 4 considère ainsi l'hypothèse d'une diffusion massive de la construction bois dans l'accélération de la construction induite par la contrainte carbone (80% en Afrique et en Amérique du Nord en 2050, 70% en Europe et 32% en Asie et Amérique Latine). En s'appuyant sur des études menées par le Consortium for Research on Renewable Industrial Materials (CORRIM)<sup>7</sup>, on estime que la construction d'un bâtiment avec une structure en bois consomme 12% de moins de ciment par m<sup>2</sup> que la construction d'un bâtiment traditionnel et 50% de moins d'acier.

Pour les *transports* il est nécessaire de trouver d'autres informations tout aussi précises :

- le contenu en matériaux des véhicules particuliers selon leur taille (pouvant accueillir 2 ou 4 personnes) et leur utilisation (trajets urbains ou régional),
- le poids des véhicules selon leur motorisation,
- le contenu en matériaux des véhicules de transport collectifs<sup>8</sup>.

### **La conception des véhicules**

La taille, le poids, la puissance sont autant de facteurs qui entrent dans la conception des engins de transport et qui déterminent leur « équation CO<sub>2</sub> ». La taille est à la fois affaire d'adéquation de l'engin aux usages, mais aussi, en particulier pour la voiture, affaire d'image et de perception de l'utilité. Le poids est lui plus une question de sécurité, de performance et de coût : la voiture a tendance à s'alourdir, l'avion à s'alléger. Enfin, la puissance semble être une résultante complexe de performances objectives, d'usage et d'image.

Si l'on s'en tient à la seule question de l'image et de l'utilité pour les voitures individuelles, les orientations « facteur 4 » vont dans le sens d'une meilleure adéquation entre la taille, la puissance et le poids des voitures d'une part, et leur utilisation dominante de l'autre : strictement urbaine versus peri-urbaine et régionale versus trajets longs.

L'hypothèse retenue dans ce scénario de réduction est que la multi-motorisation se porte progressivement exclusivement sur des véhicules spécifiquement urbains (autonomie <100km), et que dans le premier équipement des ménages, plurifonctionnel, la part adaptée également aux trajets longs (autonomie > 200 km) diminue progressivement, au fur et à mesure du développement des transports terrestres rapides (TGV).

Le nombre total de véhicules.kilomètres est cependant peu affecté et la réduction n'est significative (> 5-10 %) que dans les régions en développement, où la croissance des trafics était très importante dans la projection de référence (Tableau 12).

---

<sup>7</sup> Etude disponible sur le site <http://www.corrim.org/reports/>

<sup>8</sup> Le temps consacré à cette problématique à cette phase de l'étude et les connaissances actuelles des divers correspondants (industriels et experts) ne nous ont pas permis de répondre à l'ensemble de ses questions. Une simplification des leviers d'actions du facteur 4 et une estimation des hypothèses ont donc été réalisées à ce stade. Un approfondissement ultérieur sera nécessaire.

	<b>2005</b>	<b>2030</b>	<b>2050</b>
<b>USA</b>	1.00	0.95	0.95
<b>Canada</b>	1.00	0.98	0.98
<b>Europe élargie</b>	1.00	0.97	0.95
<b>Japon</b>	1.00	0.99	0.98
<b>CEI</b>	0.99	0.99	0.96
<b>Chine</b>	0.99	0.98	0.93
<b>Inde</b>	0.99	0.84	0.81
<b>Brésil</b>	0.99	0.98	0.98
<b>Moyen-Orient</b>	1.00	0.95	0.85
<b>Afrique</b>	1.00	0.96	0.90
<b>Reste de l'Asie</b>	1.00	0.93	0.85
<b>Reste de l'Amérique Latine</b>	1.00	0.76	0.70

**Tableau 12: Changement dans les véhicules.kilomètres parcourus (en F4/REF)**

Si l'équipement total en véhicules diminue peu dans ce scénario facteur 4 « mimétique », en revanche la différenciation des véhicules permet une percée accélérée des véhicules « basses émissions ». Le nombre des véhicules conventionnels diminue en effet de 80 % en 2050, alors que celui des véhicules hybrides, électriques et thermiques-hydrogène est multiplié par deux ou plus (Tableau 13).

	<b>2005</b>	<b>2030</b>	<b>2050</b>
<b>Conventionnel</b>	1.0	0.8	0.2
<b>Pile à combustible à gas</b>	1.0	1.7	0.4
<b>Pile à combustible à H2</b>	1.0	2.1	0.7
<b>Hybride</b>	1.7	3.7	2.5
<b>Electrique</b>	1.4	2.6	1.8
<b>Conventionnel à H2</b>	1.0	2.4	1.9

**Tableau 13: Changement dans le type de motorisation des véhicules (en F4/REF)**

Dans ce scénario sous contrainte carbone, une hypothèse de diminution du poids des véhicules est donc considérée. Cette tendance est appliquée de manière différente en fonction des technologies de véhicules. Les hypothèses adoptées sont inspirées des hypothèses utilisées par le Programme de REcherche et D'Innovation dans les Transports Terrestres (PREDIT) dans ses propres études<sup>9</sup>. Sur cette base, les poids des véhicules considérés dans notre étude sont les suivants pour les voitures particulières:

<sup>9</sup> Etudes disponibles sur le site <http://www.predit.prd.fr/predit3/homePage.fo>

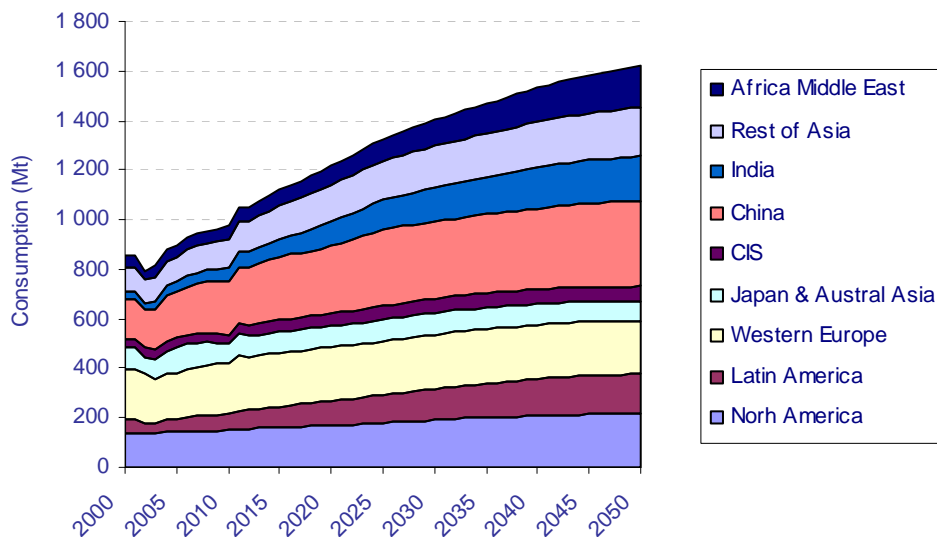
Technologie du véhicule	Poids en 2000 (kg/véhicule)	Poids en 2050 (kg/véhicule)
Conventionnel	1200	980
Conventionnel + hydrogène	1300	1070
Electrique		680
PAC Gaz		720
PAC Hydrogène		720
Hybrides	1300	690

**Tableau 14 : Evolution du poids des véhicules individuels**

L'incidence de cette diminution du poids des véhicules a porté, en première approche, essentiellement sur la demande d'acier, celui-ci étant les matériaux contribuant le plus au poids des véhicules. Dans la suite de l'étude il sera pertinent de voir dans quelle mesure cette diminution de poids n'aurait pas aussi un impact sur la demande d'aluminium.

### 2.3.2 DES DEMANDES DE MATERIAUX SOUTENUES

L'impact du Facteur 4 sur les industries de matériaux est significatif et change la structure et le volume de la demande. La demande d'acier est moindre (-8.6 % en 2050) dans ce scénario par rapport à la référence. Cette baisse résulte d'une pression à la baisse liée à l'hypothèse de diminution de la consommation unitaire d'acier dans les véhicules (réduction des poids des véhicules) et les bâtiments et d'une pression à la hausse due à l'hypothèse de l'accélération de la reconstruction et de l'augmentation du taux de renouvellement des parcs des véhicules.



**Figure 41 : Consommation d'Acier par région**

En fait, en comparaison avec le scénario de référence en 2050, la consommation d'acier dans les bâtiments est plus élevée de 22 %, tandis que la consommation des transports et des autres secteurs est moins élevée, respectivement de 32 % et de 11%.

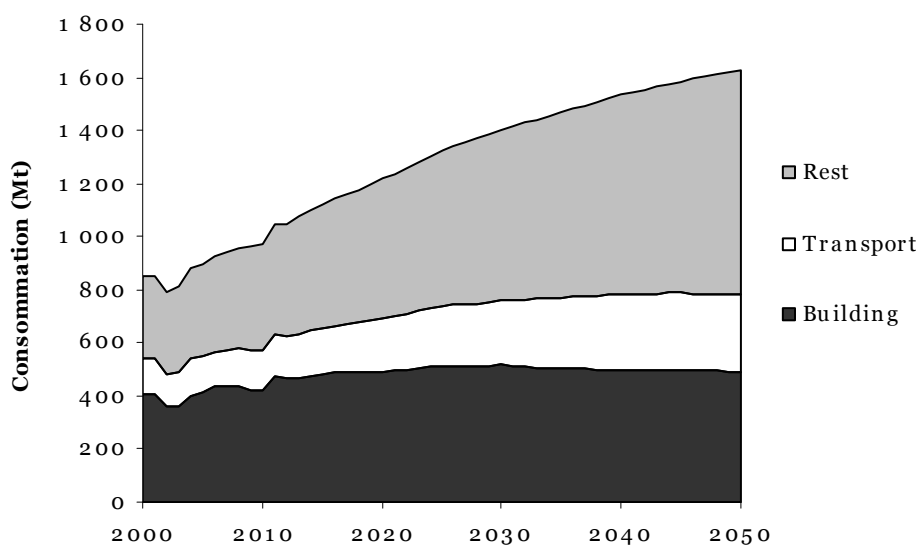


Figure 42 : Consommation d'Acier par poste

La demande de ciment est plus haute de 10 % en 2050 par rapport au scénario de référence, en raison des hypothèses de l'accélération de la reconstruction qui domine l'effet de la réduction de la consommation *unitaire* de ciment.

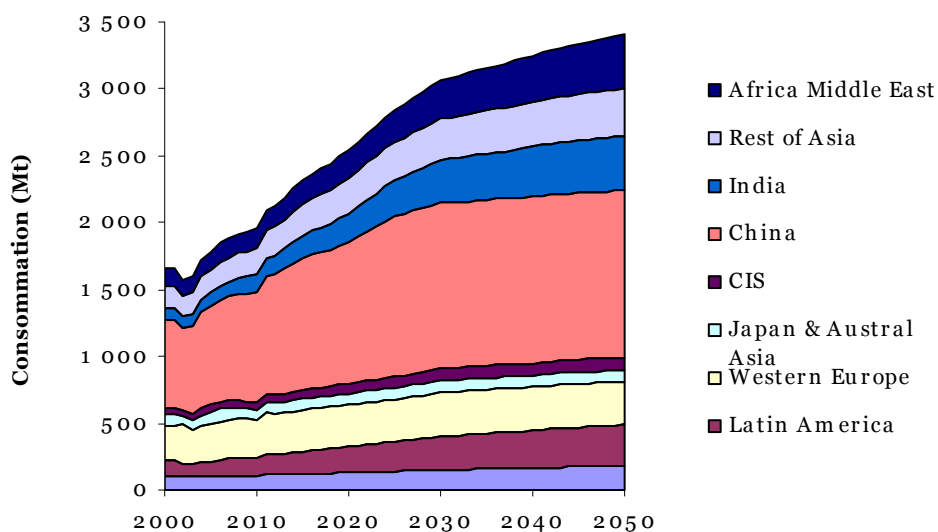
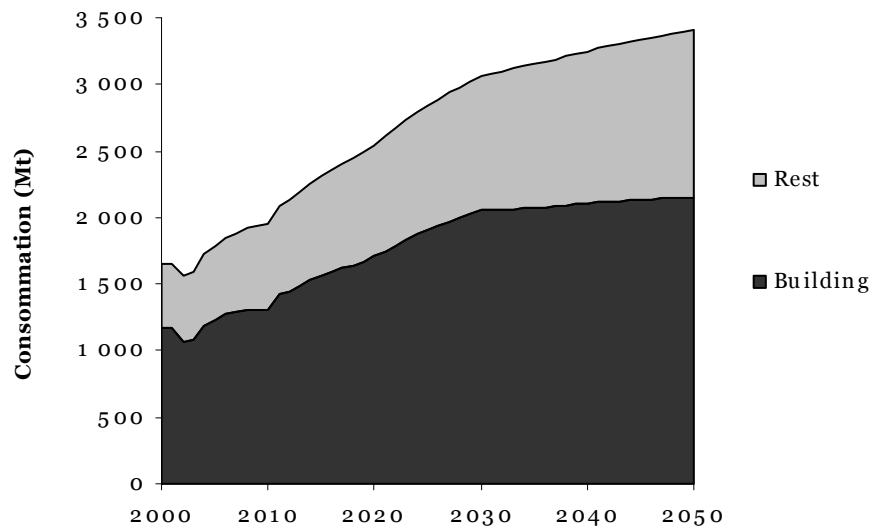
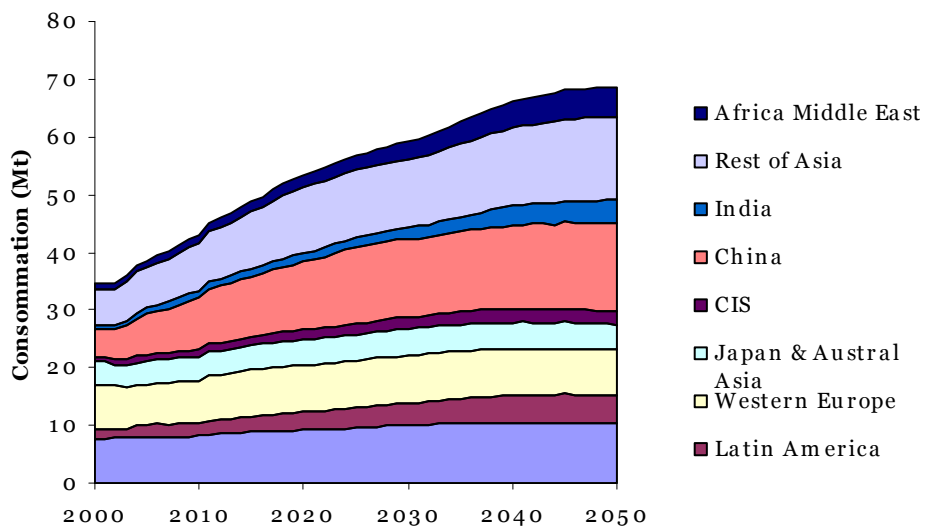


Figure 43 : Consommation de Ciment par région

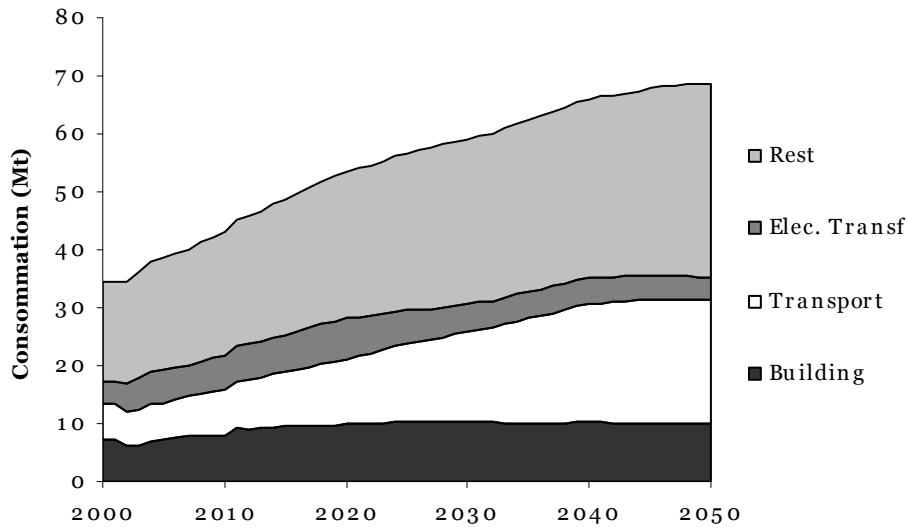


**Figure 44 : Consommation de Ciment par poste**

En ce qui concerne la demande totale d'aluminium, celle-ci est légèrement moindre (-7% en 2050) dans le scénario F4. Au niveau des postes de demande, la consommation est plus forte de 29% dans les bâtiments tandis qu'elle est réduite de plus de 50% dans les investissements de réseau électrique, et faiblement réduite dans le secteur des transports et les autres secteurs (3% et 5% respectivement).

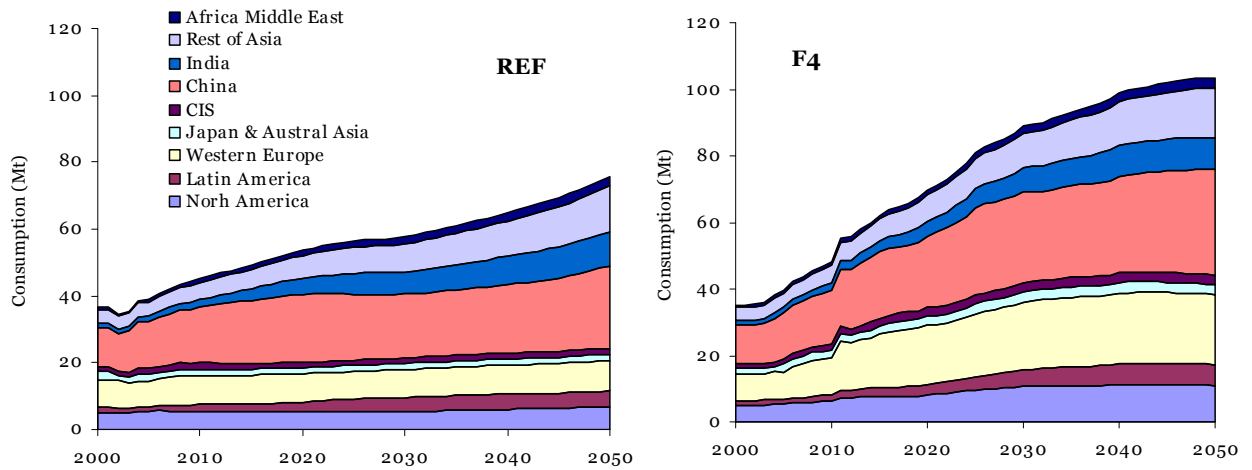


**Figure 45 : Consommation d'Aluminium par région**



**Figure 46 : Consommation d'Aluminium par poste**

Enfin, la demande de verre plat est plus élevée de 63 % en 2050 dans le scénario F4 par rapport au scénario de référence en raison des hypothèses de développement massif du double vitrage et chauffe-eau solaires et de l'augmentation de la consommation unitaire de verre. Cette demande plus forte se justifie principalement par le poste des bâtiments, dont la consommation est le double de celle calculée dans le scénario de référence. La demande des transports n'est quasiment pas affectée et celle des autres secteurs est moindre de 16% dans ce scénario.



**Figure 47 : Consommation verre plat par région**

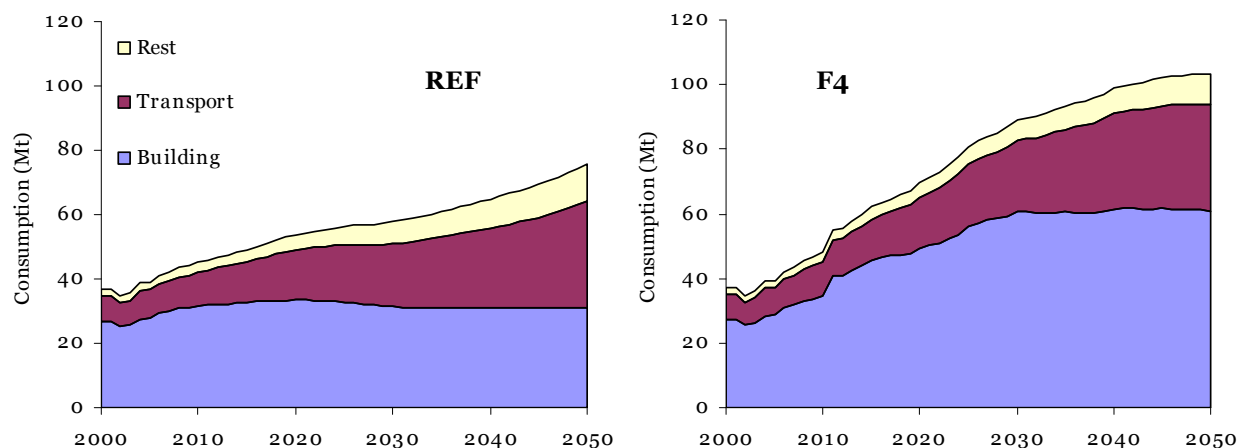


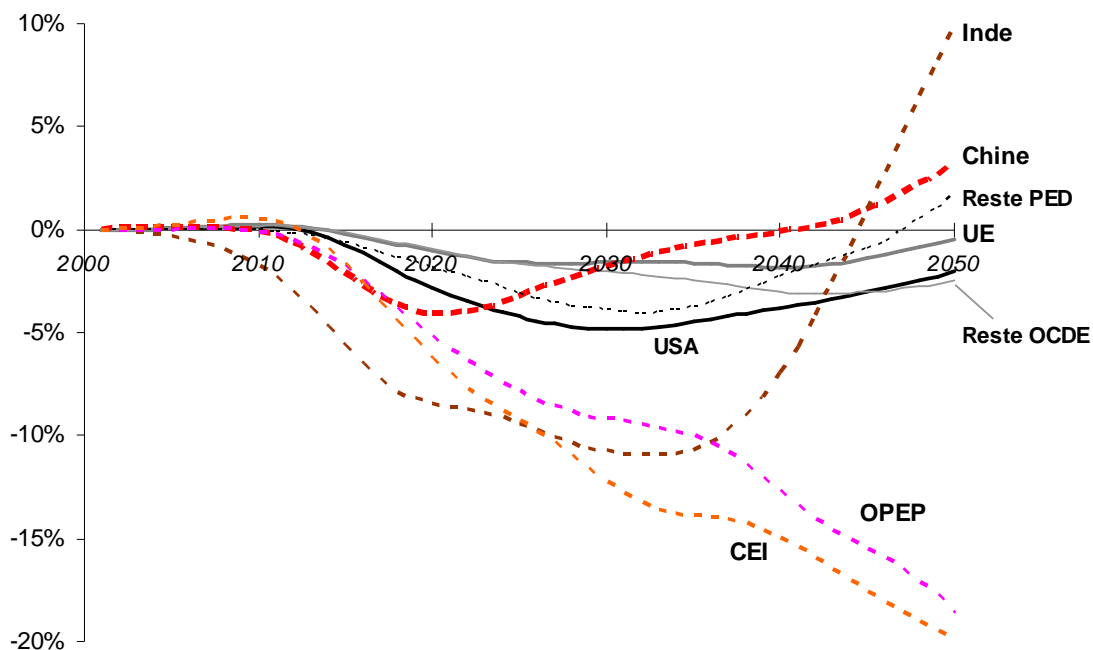
Figure 48 : Demande de verre plat par poste

## 2.4 Bilan économique

Comme nous l'avons précisé en introduction de ce document, il est nécessaire d'être prudent dans toute comparaison des trajectoires de PIB agrégé sur les grandes régions correspondant à deux scénarios qui présentent des bifurcations très larges dans le domaine énergétique et en termes de changement structurel. Néanmoins cette comparaison mérite une certaine attention, d'une part parce qu'elle peut faire apparaître des faits économiques importants, d'autre part parce que telles comparaisons sont susceptibles d'être avancées pour fournir des arguments pour ou contre la mise en place des politiques.

La figure ci-dessous montre les pertes et gains de PIB réel entre le scénario de réduction et le scénario de référence. Cette figure appelle plusieurs commentaires :

- La contrainte carbone représente pour toutes les régions un coût économique pendant plusieurs décennies, celui-ci restant cependant assez faible et, pour la plupart des régions, inférieur à 5% ;
- Les pays exportateurs de ressources fossiles voient leur revenu extérieur baisser de manière drastique, ce qui explique, pour eux (CEI et OPEP), un manque à gagner continu pouvant atteindre 20% en 2050 ;
- En fin de période, le retard de quelques pourcents pris dans l'activité économique à cause de la contrainte carbone est rattrapé voire inversé, grâce à l'allègement induit de la facture énergétique et la plus grande indépendance des économies vis-à-vis de combustible fossiles qui se raréfient, et dont les prix augmentent beaucoup plus dans le scénario de référence.



**Figure 49 : Variation de PIB PPA entre scénarios REF et 450 ppm / F4**

Il apparaît ici clairement que la contrainte carbone pose plus un problème de transition que de coût économique à long terme, *mis à part pour les régions très exportatrices d'hydrocarbures (OPEP et CEI).*

Le fait que nous ayons implémenté une contrainte carbone grossière, avec un signal prix unique et croissant linéairement, sans compensations pour les régions les plus vulnérables à court terme à ce prix du carbone, implique qu'en aménageant de manière plus subtile cette mise en place, il est possible de réduire significativement le retard pris pendant la transition de décarbonisation. Ce sera l'objet des prochains scénarios de réduction avec différenciation des instruments.

### 3 Conclusion intermédiaire : acquis et travaux futurs

Sur la base d'un important travail de développement, de programmation, de calibrage et d'harmonisation des modèles, les travaux effectués au titre de l'année 2006 ont permis de développer deux scénarios harmonisés, un scénario de référence utile et un premier scénario de réduction des émissions 450 ppmv-F4. Ce premier scénario 450ppmv-F4 fournit quelques leçons préliminaires :

1. L'inflexion des émissions pour une stabilisation des concentrations à 450 ppmv, dans les conditions technologiques et macroéconomiques de ce scénario, est réalisable à travers un signal prix du carbone très élevé en 2050, allant de 250 à 350 euros par tonne de CO<sub>2</sub>.

2. Le bilan macroéconomique de cette contrainte *en 2050* semble rassurant, en particulier parce que les gains d'efficacité et la décarbonisation de l'économie permettent d'éviter un futur très dépendant d'hydrocarbures se raréfiant et devenant beaucoup plus chères. Par contre les pays gros exportateurs d'hydrocarbures subissent un manque à gagner très significatif et des pertes de PIB en conséquence.

3. Les coûts de transition peuvent être élevés dans certains pays, notamment lorsque le prix du carbone croissant rapidement vient alourdir un fardeau énergétique dont la décarbonisation vient seulement d'être amorcée (en Inde par exemple).

4. Ces coûts de transition peuvent être réduits en affinant le profil temporel du signal prix sur le carbone, en facilitant l'anticipation par les agents économiques d'un signal clair et crédible lancé rapidement, ou en mettant en place des mécanismes de compensation ciblés.

5. A l'inverse, le bilan économique peut être alourdi par des frictions diverses peu ou mal représentées dans les scénarios actuels : frictions sur le déploiement de l'innovation technologique, effets pervers sur la distribution des revenus et « grippage » de la croissance, incitations mal orientées et défaillance des institutions.

6. Le scénario 450 ppmv - F4 actuel suppose un progrès technique soutenu, dans toutes les directions, sans contrainte d'acceptabilité : la séquestration du CO<sub>2</sub> atteint 40% des émissions en 2050 (9,4 Gt CO<sub>2</sub>), le parc automobile se diversifie avec la pénétration simultanées de toutes les technologies innovantes - véhicules hybrides (38%), électriques (24%) et hydrogène (19%), et rien n'est supposé s'opposer à un développement important du Nucléaire et des Énergies Renouvelables (respectivement 14% et 25% de l'énergie primaire en 2050).

6. En ce qui concerne la demande de matériaux, celle-ci est soutenue par un renouvellement et une rénovation accélérés des bâtiments et infrastructures. Une grande incertitude subsiste sur la demande de matériaux hors transport et bâtiment. L'évolution de cette demande diffuse dépendra de l'ampleur des potentiels de substitutions vers d'autres matériaux, et de l'augmentation du prix des matériaux liée à la contrainte carbone.

7. L'évolution technologique vers la décarbonisation des secteurs industriels étudiés passe par une montée en puissance du recyclage des matériaux, laquelle ne dépend pas seulement de stratégies industrielles mais suppose la mise en place d'un système global de collecte et de revalorisation.

Les travaux de l'année 2007 consisteront à poursuivre le développement de scénarios 450 ppmv-F4 selon deux axes de travail, et d'analyser l'avenir des secteurs industriels de matériaux au sein de ces scénarios :

Premièrement, il est prévu d'élaborer et d'analyser une alternative contrastée sur les styles de développement futurs, en supposant une réorientation de l'organisation urbaine et territoriale, des besoins de mobilité et de logement.

Deuxièmement, il s'agira de raffiner le « policy-mix » actuel fondé sur un signal prix unique, en étudiant l'adaptation des instruments (niveau et tempo) à chaque secteur, et en cherchant à évaluer le coût des Politiques & Mesures et leur articulation avec le prix du carbone.

Enfin on testera un scénario de démarrage retardé de la coordination climatique internationale, avec des actions plus tardives dans les pays en développement et les pays émergents.

## **4 Addendum : révision du scénario de référence et du scénario de stabilisation « mimétique »**

### **4.1 Scénario de référence.**

Le scénario de référence a été peu modifié par le processus de révision. Les principales corrections ont concerné (i) le recalibrage des fonctions liant les taux d'équipement des ménages en véhicules particuliers et surfaces de logement en fonction du revenu par habitant en indice de parité de pouvoir d'achat, (ii) le renforcement du couplage entre POLES et IMACLIM sur la composition matérielle du PIB, conduisant à une modification du changement structurel dans les simulations de POLES. Ces modifications ont conduit à une rehausse de l'énergie primaire produite au niveau mondial en 2050, de 24 Gtep dans le scénario présenté plus haut à 28 Mtep dans le scénario rectifié. Cette correction à la hausse est essentiellement due au recalibrage des fonctions d'équipements des ménages, dont les premiers résultats semblaient très pessimistes sur le rattrapage économique des pays émergents. La composition du mix d'énergie primaire n'est guère modifiée, les énergies fossiles assurant les trois quart de l'approvisionnement, le reste étant également réparti entre nucléaire et énergies renouvelables.

### **4.2 Scénario de stabilisation avec développement « mimétique »**

Du fait des modifications apportées au scénario de référence, les résultats du scénario de stabilisation sont aussi rectifiés. L'énergie primaire produite au niveau mondial atteint 15 Gtep au lieu d'être limitée à 12 Gtep dans le premier scénario. Ce surplus d'énergie primaire est assuré par des énergies fossiles – dont les émissions sont plus largement capturées par les dispositifs de CCS – et par un développement plus important du nucléaire. Le bilan pour les secteurs industriels et le coût macroéconomique de la stabilisation ne sont pas modifiés de manière significative par ces modifications, mis à part pour les pays exportateurs de ressources fossiles (OPEP et CEI) dont le manque à gagner est augmenté à cause d'une consommation supérieure de ressources fossiles dans le scénario de référence.



## **Deuxième Partie :**

Rapport d'étape 2008

Scénario de stabilisation avec développement

« non-mimétique »

Variante avec retard des PED

Variante sans séquestration du CO<sub>2</sub>



## 5 Scénario « non-mimétique »

Le scénario *non mimétique* est né d'un diagnostic à la fois méthodologique et politique sur le premier scénario de réduction réalisé dans le cadre de l'étude. Suite à ce diagnostic il a été proposé d'envisager un scénario « non-mimétique » dans lequel certaines hypothèses du premier scénario étaient révisées en considération du haut niveau de taxe atteint au cours des décennies à venir. Le scénario a été réalisé en trois étapes : la formulation du récit sous-jacent aux modifications d'hypothèses, la quantification de ces modifications puis enfin le recours à la plateforme de modélisation POLES / IMACLIM-R pour examiner les implications de ce nouveau jeu d'hypothèses dans un scénario macro-énergétique cohérent.

### 5.1 Les raisons justifiant la production d'un scénario non mimétique

#### 5.1.1 LA PLAUSIBILITE DU SCENARIO MIMETIQUE EN QUESTION

La projection du scénario F4 « mimétique » a été réalisé en imposant une valeur du carbone croissante dans l'économie mondiale pour faire bifurquer les choix techniques vers des technologies moins consommatrices d'énergie et/ou peu émettrices de carbone. Dans ce scénario, un certain nombre d'hypothèses fondamentales du scénario de référence n'ont pas été modifiées : l'hypothèse de poursuite de la mondialisation et du rattrapage économique progressif des pays en développement, le calibrage des fonctions qui conditionne l'évolution des équipements et des préférences des ménages (constitué à partir des tendances observées dans le passé) et les choix d'infrastructures et d'organisation du territoire. Ce choix méthodologique, classique dans l'étude des trajectoires de réduction des émissions, a suscité deux commentaires.

Premièrement, la construction de ce scénario répond à une volonté d'explorer un scénario de réduction dans lequel un certain nombre de dynamiques dans l'économie restent peu sensibles à une valeur du carbone croissante. Le maintien des hypothèses ci-dessus conduit en effet à représenter un monde dans lequel la valeur du carbone n'a pas d'influence notable sur la convergence des styles de développement. Cette représentation n'est pas purement fictive dans la mesure où il existe des forces de rattrapage et de convergence très robustes dans l'économie :

- *Une convergence technologique* : Toute bifurcation significative exigerait des innovations technologiques significatives, alors que le chemin « de moindre effort » est celui des transferts des technologies *existantes* entre pays. La mondialisation conduit à une certaine uniformisation du niveau technologique accessible dans les différentes régions du monde.
- *Un rattrapage des modes de vie* : Les individus de tous pays ont en commun une aspiration universelle aux mêmes services en milieu urbain : mobilité, espace, énergie, information, loisirs, etc. Les dynamiques d'acquisition de véhicules particuliers ou de logements spacieux sont particulièrement robustes du moment que le revenu moyen continue d'augmenter.
- *Des politiques publiques* faiblement engagées dans la modification des préférences des individus ou dans la gestion durable du territoire à long terme (mandats politiques de

court-terme, priorité des dossiers plus urgents, caractère peu populaire de ces politiques, etc.)

Deuxièmement, il est tout de même légitime de penser que le niveau élevé de valeur du carbone que nous atteignons dans le premier scénario risque d'être difficilement tolérable et que, même en deçà de ce niveau là, nous risquerions d'assister à des réactions politiques et économiques qui sortent du domaine de calibrage des modèles. Le scénario est extrêmement exigeant en terme de déploiement de technologies peu carbonées, ce qui fragilise la perspective de mobiliser à temps ces technologies à temps pour atteindre une division par 4 des émissions de l'Annexe 1 et une division par 2 de l'ensemble du monde. L'ampleur des coûts de transition générés par un tel scénario vient encore fragiliser la plausibilité du scénario. Globalement, il est difficile de croire d'une part que les préférences des individus ne seront pas modifiées progressivement par la révolution technologique en train de se déployer sous l'effet d'une valeur uniforme du carbone, et d'autre part que les décideurs ne réagiront pas par des politiques et mesures complémentaires pour trouver une stratégie moins de réduction moins coûteuse. Il faut ajouter à cela que d'autres facteurs que la réduction des émissions peuvent pousser les pays à adopter des politiques et mesures de bifurcation des modes de vie et d'organisation : une dégradation rapide de la qualité de vie et de l'efficacité économique des zones urbaines, un contexte énergétique mondial difficile, la croissance des dommages climatiques d'ici à quelques décennies.

En conséquence de cela, la construction de ce nouveau scénario, qualifié de « non-mimétique » a été entreprise avec deux préoccupations simultanées : d'une part le désir d'explorer une évolution différente des styles de développement et la contribution de cette évolution à la réduction des émissions, d'autre part la nécessité de corriger un certain nombre d'évolutions non plausibles dans le scénario précédent. Finalement, la précaution s'imposera dans l'interprétation des différences entre les deux scénarios de réduction, certaines de ces différences relevant d'une bifurcation des styles de développement, tandis que les autres correspondent à des corrections de sorties non plausibles.

#### 5.1.2 DES STRATEGIES DE REDUCTION PRENANT EN COMPTE LES CHOIX DE STYLE DE DEVELOPPEMENT

Il existe un paradoxe frappant dans l'étude des politiques climatiques. D'un côté l'analyse discursive des moyens d'infléchir les émissions fait état d'une large diversité d'outils de politiques et mesures, dépassant largement les seuls instruments classiquement cités : taxes, quotas, normes. Il suffit de se référer au résumé pour les décideurs du dernier rapport du GIEC pour faire ce constat :

« A wide variety of national policies and instruments are available to governments to create the incentives for mitigation action. Their applicability depends on national circumstances and an understanding of their interactions, but experience from implementation in various countries and sectors shows there are advantages and disadvantages for any given instrument. [...] Policies that provide a real or implicit price of carbon could create incentives for producers and consumers to significantly invest in low-GHG products, technologies and processes. Such policies could include economic instruments, government funding and regulation » (SPM, Working Group III, p. 22)

De l'autre côté, la représentation des politiques climatiques dans les modèles est étonnamment pauvre, puisqu'elle repose en général uniquement sur une valeur du carbone uniforme, généralement comme une taxe ou un système de permis négociables. S'il est vrai que cette valeur du carbone peut être considérée comme un indicateur de la pression exercée sur les émissions par un ensemble de politiques et mesures plus diversifié, cette simplification conduit progressivement à un biais dans l'analyse des politiques climatiques : on finit par observer un glissement vers le diagnostic qu'un prix uniforme du carbone dans l'économie mondiale permet de stabiliser les concentrations de GES pour quelques points de PIB en 2050, et que l'enjeu de cette stabilisation est purement technologique. L'architecture de modélisation utilisée a permis d'éclairer très précisément les conséquences de cette vision dans le scénario « mimétique ». Dans la plateforme POLES / IMACLIM-R, les déterminants des émissions sont représentés explicitement : nombre de véhicules particuliers, surface habitable et équipements par habitant sont fonction du revenu par tête ; les décisions d'infrastructures résultent des besoins progressifs de l'économie dans les différents modes. La majorité des autres modèles ont recours à des fonctions de production ou d'utilité à facteurs substituables, qui sous-estiment la robustesse de ces dynamiques même en cas de taxe carbone élevée. A cause de nos choix de représentation, nous avons exposé qu'une politique climatique mondiale qui ne touchait pas à ces déterminants amont des émissions risquait de générer des coûts élevés ou de manquer la cible si les technologies ne sont pas disponibles à temps. Autrement dit, un signal prix croissant dans l'économie mondiale risque de se heurter à un obstacle lourd lié aux choix de développement.

Si la modification des hypothèses du premier scénario a permis au passage de corriger des évolutions peu plausibles, elle traduit surtout le choix d'explorer un scénario de politiques climatiques reposant en partie sur une bifurcation des choix de développement, d'organisation spatiale et de structure du système énergétique.

Ces leviers d'action supplémentaires sont importants pour les pays industrialisés mais ils sont cruciaux pour les pays émergents et en développement. Premièrement il s'agit de chercher les leviers d'action qui replacent toute politique climatique ambitieuse dans le sens du soutien d'un développement économique durable en favorisant un usage efficace des ressources énergétiques rares et en limitant les pollutions locales par exemple. Deuxièmement, il est impératif d'éviter les risques d'effet de cliquet (*lock-in*) des choix d'organisation et d'infrastructures dans des trajectoires très intensives en énergie et en carbone. Le diagnostic usuel que le coût d'une politique climatique fondée uniquement sur une valeur croissante du carbone sera faible a toutes les chances de manquer ces deux cibles, avec le risque d'un coût de transition élevé et le constat d'impotence du signal prix du carbone sur les choix d'organisation du territoire, de localisation d'activité et les choix d'infrastructures. Pire, la non prise en compte des autres leviers de décision que le prix unique peut conduire à des aberrations économiques, quand le développement des infrastructures est totalement déconnecté de la pression mise sur les émissions via un mécanisme de taxes ou de quotas échangeables :

« In Britain, early 2007 found the Environment Secretary announcing his enthusiasm for personal carbon allowances (...) this policy debate is being conducted alongside other governmental priorities that have a quite different focus. The government is raising the marginal costs of train travel, making plans to expand airports, widen motorways, build

roads, and build large numbers of new houses in food-plains. » (G. Prins et S. Rayner, 2007, pp. 5-6)

## 5.2 Éléments de récits du scénario « non mimétique »

La révision des hypothèses du premier scénario de réduction porte sur trois domaines : l'espace de vie quotidien, la mobilité des personnes et des marchandises, l'organisation de la production industrielle. L'idée maîtresse est de supposer un changement de paradigme dans le domaine énergétique, du paradigme des énergies-stock (fossiles) – abondantes et mobilisées dans une organisation très concentrée et un mode de production centralisé – vers celui des énergies de flux (principalement renouvelables) – instantanément limitées mais mobilisées dans une organisation beaucoup plus déconcentrée et un mode de production largement distribué.

### 5.2.1 L'ESPACE DE VIE QUOTIDIEN

Dans l'espace de vie quotidien, il est possible d'envisager deux bifurcations « polaires » :

- **Un habitat dispersé à énergie autonome** : une maximisation des surfaces de captation de l'énergie solaire pour répondre simultanément aux besoins stationnaires à l'intérieur des bâtiments (usages électriques et thermiques) et aux besoins nomades à l'extérieur (recharge de véhicules électriques ou hybrides), de pair avec une dispersion croissante des bâtiments et une augmentation des besoins de mobilité ;
- **Un habitat dense avec un système énergétique concentré et optimisé** : une densification de l'espace urbain, permettant de limiter le besoin de mobilité et une concentration de la production d'énergie pour satisfaire les besoins stationnaires, en valorisant d'autres sources d'énergie plus concentrées mais globalement limitées, comme la biomasse, les déchets, la géothermie profonde ou l'éolien off-shore.

Chaque option peut être adaptée à tel ou tel contexte local ou national, si bien que la reformulation des hypothèses requiert d'abord de projeter une typologie des contextes régionaux.

**Dans les pays industrialisés**, où le taux d'urbanisation est déjà très élevé et les perspectives démographiques faibles, les évolutions futures seront fortement contraintes par les organisations actuelles de l'espace urbain. Dans les espaces urbains dispersés, villes nord-américaines ou espaces « rurbanisés » en Europe, l'évolution naturelle serait celle du captage diffus de l'énergie solaire et éolienne et de son utilisation in-situ pour répondre aux besoins stationnaires et nomades. Dans les espaces urbains de forte concentration, le schéma de production concentrée de l'énergie resterait dominant, mais sous une forme adaptée à la valorisation locale d'énergies renouvelables, comme la biomasse, les déchets, les fermes éoliennes.

**Dans les pays en développement**, l'organisation de l'espace – constitué conjointement des plus grandes mégapoles mondiales et d'une importante population rurale – est susceptible d'être largement réorganisé, sous l'impulsion conjointe d'une forte croissance démographique

et du développement économique. Nous distinguons alors le cas des mégapoles existantes, des futures villes nouvelles et du reste du territoire.

### ***Pays industriels, zones diffuses***

Deux mouvements devraient dominer l'évolution structurelle de l'habitat :

- dans la construction neuve et la reconstruction de l'habitat individuel, la généralisation progressive de l'habitat à « énergie positive », combinant une architecture climatique, des capteurs solaires thermiques pour l'eau chaude et des capteurs photovoltaïques dimensionnés pour satisfaire les besoins internes du logement en électricité (hors usages thermiques) et les besoins de mobilité quotidiens avec des véhicules hybrides rechargeables ;
- dans la rénovation de l'habitat, amélioration de l'isolation thermique et installations de capteurs solaires thermiques et photovoltaïques dimensionnés pour satisfaire les besoins internes du logement en électricité (hors usages thermiques) et les besoins de mobilité quotidiens avec des véhicules hybrides rechargeables.

Dans ces espaces diffus, la mobilité quotidienne serait assurée par deux moyens complémentaires :

- des véhicules individuels hybrides rechargeables, dont on chercherait à maximiser l'utilisation avec la propulsion électrique dans les limites autorisées d'un côté par les progrès sur les batteries, de l'autre par les surplus d'électricité solaire ;
- des modes collectifs sur site propre avec parkings relais dont le maillage serait dimensionné en fonction de l'autonomie électrique solaire des véhicules individuels et de la localisation des lieux de travail et de consommation.

### ***Pays industriels, zones denses***

Deux mouvements devraient affecter le parc d'immeubles collectifs dans les zones denses :

- la progressive réhabilitation thermique, conduisant à limiter les besoins de chauffage et/ou de climatisation des logements ;
- la généralisation des réseaux de fluides caloporteurs permettant de répondre aux besoins de chauffage et d'eau chaude à partir d'énergies renouvelables concentrées (biomasse, déchets, géothermie principalement) et/ou de co-génération.

Dans ces espaces denses, la voiture individuelle (au sens où on l'entend aujourd'hui) serait progressivement écartée et laisserait la place à une intermodalité combinant des modes doux, des transports collectifs et des voitures en usage collectif (taxis, location courte, etc.), la taille de la ville déterminant la part respective de ces modes. Cela supposerait une forte réduction du taux de motorisation individuelle pour les personnes vivant à l'intérieur de ces espaces.

### ***Pays en développement, villes nouvelles***

Le principe de base de ces villes nouvelles pourrait être la stricte autonomie énergétique à partir des énergies renouvelables, tant pour les besoins à l'intérieur des bâtiments (résidentiel et tertiaire) que pour les besoins de mobilité à l'intérieur de l'espace urbain. Selon les densités de population et les zones climatiques, ce principe de base se déclinerait différemment en type de

bâtiments, en densité de construction, en réseaux d'énergie, en réseaux et modes de transport, et en niveau de motorisation individuelle.

### ***Pays en développement, mégalo***

Dans les zones périphériques de ces mégalo, où prédomine l'habitat individuel ou de petite taille et de médiocre qualité, on peut envisager une reconstruction massive dont les standards de construction et d'équipement énergétique pourraient être soit ceux de l'habitat diffus des pays industriels (bâtiments à énergie positive) si la pression démographique le permet, soit ceux de villes nouvelles denses dans le cas contraire.

Dans les zones centrales, généralement très denses, où prédominent les grands immeubles, le seul fait dominant devrait être celui de la réhabilitation thermique, fondée le plus souvent sur la minimisation des besoins de climatisation.

Le développement de la voiture individuelle (au sens où on l'entend aujourd'hui) serait fortement combattu dans ces mégalo, puis celle-ci serait progressivement évincée des zones centrales, laissant place à une intermodalité combinant des modes doux, des transports collectifs et des voitures en usage collectif (taxis, location courte, etc...), la zone de la ville déterminant la part respective de ces modes. Une des conséquences en serait une forte réduction du taux de motorisation individuelle par rapport aux standards des pays industriels d'aujourd'hui, pour des niveaux de revenus comparables.

### ***Pays en développement, autres espaces***

Dans ces autres espaces, le fait dominant serait la forte expansion des villes de petite et moyenne taille résultant de la migration des populations rurales, encore nombreuses, et des tentatives de lutter contre l'exode vers les mégalo, souvent déjà au bord de l'asphyxie.

Dans les zones de bon ensoleillement et de grande disponibilité d'espace, la construction pourrait suivre le même chemin que dans les zones diffuses des pays industriels, du moins là où les climats sont comparables, avec des surfaces de captage dimensionnées en fonction des besoins et des solutions techniques à l'utilisation prédominante dans ces pays.

Dans les autres zones, on pourrait retrouver une logique de construction en zone dense dont les déterminants majeurs seraient la performance thermique (vis à vis de la climatisation le plus souvent) et la localisation au regard des réseaux de transport collectif.

Dans tous les cas, le zonage de l'habitat serait effectué de façon à maximiser l'attractivité des transports collectifs et de limiter le recours indispensable à la voiture individuelle, tout en appliquant le principe d'autonomie sur la consommation d'électricité du véhicule individuel (qui serait donc également hybride rechargeable connecté au photovoltaïque).

## **5.2.2 MOBILITE DES PERSONNES ET DES MARCHANDISES**

Le déploiement de la mobilité des personnes et des marchandises s'est inscrit jusqu'à présent, dans les pays industriels, dans un schéma caractérisé par :

- La stabilité du temps consacré à la mobilité par les personnes, autour d'une heure par jour en moyenne par personne, seul l'accroissement de la vitesse moyenne de déplacement ayant autorisé une croissance de la mobilité individuelle exprimée en kilomètres par an ;

- La croissance de la vitesse moyenne de déplacement des *personnes* avec une élasticité au PIB relativement stable et similaire d'un pays à l'autre : on peut aujourd'hui relier les écarts de vitesse moyenne (et donc de km/an/personne puisque le budget-temps reste constant) aux écarts de PIB par habitant avec cette même élasticité ;
- La croissance de la vitesse moyenne de déplacement des *marchandises* avec le PIB, la valeur par tonne des marchandises transportées augmentant plus vite que le coût de la vitesse, ce qui a conduit à un allongement continu de la distance de transport d'une tonne de marchandises.

L'accroissement de la vitesse moyenne de déplacement des personnes et des marchandises a été permis principalement par les substitutions de modes lents (animaux de trait, voie d'eau, puis train) par des modes plus rapides (trains, camions et avion). Ce développement de la mobilité, induit et permis d'abord par le chemin de fer, puis par la route, aujourd'hui par l'avion, trouve sa rationalité économique dans le fait que la progression du coût de transport en fonction de la vitesse a toujours été inférieure à la progression de la valeur du temps (basée par exemple sur le coût du travail) et à celle de la valeur des marchandises par tonne.

Le scénario mimétique était fondé sur la prolongation de ces tendances dans les pays industriels et leur transposition aux pays en développement. Le scénario non mimétique suppose à l'inverse un renversement des tendances dans les pays industriels et un cheminement différent dans les pays en développement. Cela suppose des politiques de lutte contre la dérive des vitesses liée à l'augmentation de revenu des personnes et à l'augmentation de la valeur (à la tonne) des marchandises transportées. En limitant les vitesses, il faut aussi éviter toute altération de l'utilité globale de la mobilité ou du bon fonctionnement de l'outil de production, ainsi que l'allongement possible des budgets-temps de transport. Enfin, conjointement à ce contingentement de la vitesse, deux « routes » technologiques sont possibles : soit des innovations de rupture vers des systèmes de motorisation alternatifs, avec des moteurs hybrides, tout électriques ou à hydrogène ; soit le recours à des carburants verts ou non carbonés (hydrogène produits avec de l'électricité d'origine renouvelable) dans des moteurs à combustion plus usuels.

Le scénario non mimétique repose finalement sur trois perspectives conjointes :

- articuler l'évolution de l'équipement automobile des ménages avec d'un côté la transformation des espaces de vie, de l'autre l'arbitrage entre nouveaux carburants ou innovation radicale, compte tenu des contraintes de limitation des vitesses et des budgets-temps ;
- combiner le recours à des véhicules routiers à autonomie réduite, résultant du renoncement aux carburants de forte densité énergétique, avec une modification des pratiques de mobilité individuelle à longue distance qui n'aille pas dans le sens d'une explosion du transport aérien ;
- troquer de la vitesse contre de la proximité, tant pour les loisirs des personnes que pour l'organisation des flux de marchandises, afin de favoriser le recours à des modes plus lents et/ou à plus faible autonomie.

**Dans les pays industriels**, le renversement de tendances pourrait passer d'une part par la croissance plus rapide du coût de transport en fonction de la vitesse que la valeur du temps et la

valeur à la tonne des marchandises, d'autre part par une rupture des budgets-temps de transport et/ou de l'utilité attachée à l'éloignement.

**Dans les pays en développement**, un cheminement différent pourrait être celui qu'induirait une trajectoire technologique dans laquelle le recours aux véhicules routiers réduirait la vitesse moyenne de déplacement, par mise à disposition de modes collectifs terrestres plus rapides pour les déplacements longue distance (TGV par exemple) et par ralentissement du flux des voitures dans les déplacements quotidiens (limitation des infrastructures ouvertes aux voitures).

### ***Mobilité des personnes dans les pays industriels***

L'équipement automobile des ménages est supposé rester un trait dominant des modes de vie, mais avec un changement de rapport social à l'automobile: les contraintes croissantes mises sur l'usage de la voiture lui font perdre en partie son rôle d'indicateur de statut social et son assimilation à la liberté de mouvement. L'équipement des ménages en serait profondément modifié, avec (i) un recul du multi-équipement des ménages de deux personnes et plus dans toutes les zones urbaines bien desservies par les transports publics, (ii) un recul du premier équipement de tous les ménages d'une et deux personnes dans les zones urbaines denses, (iii) l'émergence de voitures mono-fonctionnelles, en propriété individuelle ou collective, ou encore en usage public.

Les besoins de mobilité seront satisfaits de façon croissante par des modes alternatifs à la voiture, ceux-ci devenant de mieux en mieux interconnectés entre eux, et avec la voiture, que celle-ci soit ou non en propriété individuelle, dans l'optique de minimiser globalement les temps de parcours. L'interconnexion se place à trois niveaux :

- interconnexion au sein de l'espace urbain (hub, tarification unique, « park&ride ») pour la mobilité quotidienne
- interconnexion entre l'espace urbain et l'espace inter-urbain
- interconnexion au sein de l'espace inter-urbain (plateformes multi-modales route/rail/air, comme l'aéroport Lyon St Exupéry)

Dans l'espace urbain, la voiture garde fondamentalement son rôle de garant de la continuité spatiale de la vie quotidienne, dès lors que les distances au réseau de transport public excèdent les horizons pertinents des modes doux. Le dimensionnement et la géographie de ces réseaux sont progressivement déterminés par l'autonomie électro-solaire des voitures, devenues entre-temps toutes hybrides rechargeables. Le recours à la voiture pour les déplacements de longue distance se réduit progressivement, au fur et à mesure que se développent les infrastructures terrestres pour le transport collectif à grande vitesse, notamment le TGV. La voiture garde un rôle prépondérant dans les déplacements de courte distance hors de l'espace urbain, mais corrélativement le moindre niveau de motorisation et la densification et l'interconnexion des modes alternatifs à la voiture renforcent l'attractivité de ces modes.

Globalement, ce scénario non mimétique conduirait donc à moins de voitures, avec un kilométrage annuel en réduction du fait de la baisse de la vitesse moyenne (effet majeur des changements dans la structure d'usage et des restrictions de circulation en zone urbaine), et une fraction plus importante de ces kilomètres effectuée en mode électrique. La baisse de trafic passagers en voiture serait compensée de trois façons : par une réallocation spatiale des gens et des activités socio-économiques diminuant les besoins bruts de mobilité quotidienne

(km/pers/an), par un recours accru aux modes doux et par un accroissement de trafic des transports publics.

La diminution des besoins bruts de mobilité découlerait de la contrainte imposée sur l'usage du temps : dans un espace urbain déjà largement organisé et construit, seuls des mouvements de population et d'activité rapprochant les gens de leurs activités quotidiennes est à même d'éviter une dérive à la hausse des budgets-temps de transport quotidiens lorsque la vitesse moyenne de déplacement diminue. Dans ce sens, les restrictions mises à l'usage de la voiture et le moindre équipement automobile imposeront bien un ralentissement général des déplacements au sein des zones urbaines.

Le recours accru aux modes doux est une conséquence directe et inéluctable du moindre équipement automobile et du plus grand recours aux transports publics. L'accroissement du trafic en transport public concerne (i) les déplacements urbains, déplacements obligatoires en tête (domicile-travail, domicile-école), (ii) l'ensemble des déplacements de longue distance, privés et professionnels, (iii) les déplacements de courte et moyenne distances de ville à ville.

L'électricité devient l'énergie dominante des transports publics terrestres : c'est déjà fortement le cas pour tous les modes ferroviaires, ça le devient pour les transports routiers urbains et locaux via l'hybridation. Celle-ci est produite majoritairement à partir d'énergies renouvelables, éolien, solaire ou biomasse selon les endroits. Seuls devraient rester durablement alimentés par des moteurs à combustion interne les transports publics routiers de moyenne et longue distance, les biocarburants de 2<sup>nde</sup> génération s'imposant progressivement comme forme dominante d'énergie.

### ***Mobilité des personnes dans les pays en développement***

L'équipement automobile des ménages continue à se développer, mais dans un contexte socio-économique très différent de celui qui a marqué l'explosion de la voiture dans les pays industriels : c'est toujours le mode garant de la liberté de mouvement, mais ce n'est plus le mode garant de la vitesse, et c'est un mode dont l'utilisation devient très onéreuse. Trois conséquences en découlent :

- une saturation de l'équipement automobile des ménages à un niveau beaucoup plus bas que dans les pays industriels dans les zones urbaines denses
- un fort développement des services de mise à disposition de voitures banalisées dans les zones urbaines
- un faible développement du multi-équipement dans les ménages de deux personnes et plus.

L'inéluctable croissance des besoins de mobilité est satisfaite en priorité par des modes alternatifs à la voiture, ceux-ci étant conçus dès le départ dans l'optique d'une interconnexion permettant de se passer quasiment complètement de la voiture :

- interconnexion au sein de l'espace urbain pour la mobilité quotidienne
- interconnexion entre l'espace urbain et l'espace inter-urbain
- interconnexion au sein de l'espace inter-urbain

Le développement et l'organisation des espaces urbains est ainsi conçu de façon à limiter autant que faire se peut la nécessité de recourir à la voiture et de limiter ce recours à l'autonomie électro-solaire des voitures, devenues entre-temps toutes hybrides rechargeables.

Le développement des infrastructures terrestres pour le transport met d'abord l'accent sur le transport collectif à grande vitesse, notamment le TGV, de façon à décourager le recours à la voiture pour les trajets à longue distance.

La voiture reste recherchée pour les déplacements de courte et moyenne distance hors de l'espace urbain, mais corrélativement le faible niveau de motorisation dans les zones urbaines denses renforce l'attractivité des modes alternatifs et la nécessité de les développer.

Globalement, ce scénario non mimétique conduit à un parc automobile nettement en retrait par rapport à celui envisagé dans un scénario mimétique, avec un kilométrage annuel plus faible du fait d'une vitesse moyenne plus faible (effet majeur des choix infrastructurels, des changements dans la structure d'usage et des restrictions de circulation en zone urbaine), et une fraction plus importante de ces kilomètres effectuée en mode électrique.

La baisse relative (par rapport au « mimétique ») de trafic passagers en voiture correspondant aux mouvements décrits ci-dessus s'explique de trois façons : une autre répartition spatiale des gens et des activités socio-économiques dans les espaces urbains, réduisant les besoins bruts de mobilité quotidienne (km/pers/an), un recours accru aux modes doux et un recours accru aux transports publics.

Les besoins bruts de mobilité sont moindres car l'espace urbain est construit et organisé non pour accélérer les flux de déplacement, mais de façon à minimiser les distances entre les gens de leurs activités quotidiennes.

Le recours accru aux modes doux est une conséquence directe et inéluctable du moindre équipement automobile et du plus grand recours aux transports publics.

Le plus grand recours aux transports publics, induit par un développement plus soutenu des infrastructures, concerne

- d'une part les déplacements urbains, d'abord les déplacements obligatoires (domicile-travail, domicile-école), accessoirement les déplacements secondaires (consommation, relations sociales) ;
- d'autre part l'ensemble des déplacements de longue distance, privés et professionnels
- enfin, pour partie, les déplacements de courte et moyenne distances de ville à ville.

L'électricité devient l'énergie dominante des transports publics terrestres ferroviaires et routiers via l'hybridation (transports urbains et locaux). Celle-ci est produite majoritairement à partir d'énergies renouvelables, éolien, solaire ou biomasse selon les endroits.

Seuls devraient rester durablement alimentés par des MCI les transports publics routiers de moyenne et longue distance, les biocarburants de 2<sup>nde</sup> génération s'imposant progressivement comme forme dominante d'énergie.

### **Mobilité des marchandises**

Le transport routier conserve partout son rôle d'appoint dans la continuité spatiale du transport des marchandises.

En revanche, son rôle dans l'accélération des flux de marchandises et l'élargissement des zones de chalandise est remis en cause. Le déploiement d'infrastructures terrestres à grande vitesse pour le transport de marchandises sur des distances longues (au-delà de 500 km pour fixer les idées), bien connectées au réseau routier traditionnel, conduit à deux effets :

- un basculement d'une partie du trafic routier existant sur ces infrastructures
- une polarisation des installations de production et de logistique sur le réseau à grande vitesse.

Dans les pays industriels, où les infrastructures autoroutières sont déjà en place et la localisation des productions et des centres logistiques relativement inerte, seul le premier effet sera véritablement important.

Dans les pays en développement, où les grandes infrastructures de transport sont encore à construire, le second effet devrait être dominant.

Par ailleurs, le renchérissement du coût de la vitesse, plus rapide que la croissance de la valeur moyenne par tonne transportée, devrait logiquement conduire à des réorganisations spatiales des chaînes de production : rapprochement de l'élaboration des produits à haute valeur de leurs lieux de consommation, allongement des distances de parcours des matières premières et des grands intermédiaires à faible valeur à la tonne, pour lesquelles les délais de transport sont sans enjeu économique réel.

Les conséquences de ces différents mouvements sont les suivantes :

- baisse (relative par rapport au mimétique) de la part du transport routier conventionnel dans les tkm, et concentration sur les trajets courts et moyens, favorables pour l'hybridation des véhicules
- hausse de la part des modes lents (voie d'eau, maritime, fer traditionnel)
- part significative des modes terrestres à grande vitesse (TGV marchandises ?)

### 5.2.3 PRODUCTION INDUSTRIELLE

Historiquement, la croissance de la valeur des marchandises à la tonne a cru systématiquement plus vite que le coût de transport, ce qui a favorisé la recherche continue d'économies d'échelle par concentration de la production, avec pour conséquence la croissance des distances de transport et des vitesses. Plus récemment la croissance des transports a été entretenue par les productions *just-on-time* et les arbitrages en temps réel dans l'utilisation des capacités de production industrielles disponibles.

Le scénario non mimétique repose sur un paradigme déconcentré et décentralisé, s'articulant autour de deux idées maîtresses, que l'on applique aux secteurs du ciment et de la sidérurgie :

- contrebalancer les économies d'échelle par des économies sur l'énergie permises par un recours aux énergies disponibles in-situ (exemple des éoliennes pour l'électrometallurgie ou les cimenteries) ;
- contrebalancer les économies d'échelle par des économies sur le transport en réduisant la distance parcourue par les marchandises à haute valeur ajoutée, quitte à accroître la distance parcourue par les intrants à plus faible valeur (la distance globale de parcours d'une tonne de grands intermédiaires à différents stades d'élaboration est aujourd'hui quasiment fixe à l'intérieur de l'espace européen).

### ***La sidérurgie***

Deux technologies majeures co-existent aujourd'hui dans la sidérurgie : la conversion primaire du minerai de fer en fonte puis en acier dans les hauts-fourneaux et les aciéries à oxygène, la fusion électrique des ferrailles issues du processus de recyclage.

La recherche d'économies d'échelle a favorisé d'abord la conversion primaire du minerai de fer dans des installations de plus en plus grande taille. La fusion des ferrailles s'est ensuite imposée à la fois pour des répondre à des exigences de recyclage, et pour pallier l'absence de conversion primaire (taille du marché trop petite, barrière à l'investissement, etc...). Là où co-existent les deux technologies, il y a une compétition dans l'utilisation des ferrailles, l'injection de ferrailles améliorant la performance des hauts-fourneaux.

Dans le scénario non mimétique, le rapprochement de la production des produits à fort contenu en acier de haute technologie (et donc de haute valeur) de leur lieux de consommation est supposé induire la multiplication de petites unités de production d'acier spéciaux, dès lors que les économies sur le transport et l'énergie contrebalancent les déséconomies d'échelle. Dans les technologies actuellement disponibles, ces unités seraient certainement basées sur des fours électriques, mais rien n'interdit de penser que de nouvelles technologies de conversion primaire, comme la réduction directe à partir d'hydrogène, pour lesquelles les économies d'échelle seraient beaucoup moins importantes que pour les hauts-fourneaux actuels, pourraient voir le jour.

### ***La production de ciment***

La production de ciment résulte du mélange de clinker et d'ajouts, dans des proportions variables selon les pays et les exigences de qualité. La production de clinker est massivement faite aujourd'hui selon un procédé dit « voie sèche », dans des unités dont la capacité s'échelonne entre 0,5 et 2 Mt/an. Les fortes économies d'échelle ont jusqu'à présent conduit systématiquement vers des tailles de plus en plus grandes.

Dans le scénario non mimétique, ce mouvement s'inverse sous deux impulsions contrebalançant les économies d'échelle : le différentiel de coût croissant entre d'un côté la mobilisation des énergies renouvelables et des déchets disponibles dans un périmètre limité, et de l'autre, les achats de combustibles fossiles et d'électricité au réseau ; l'augmentation forte du coût du transport routier.

## **5.3 Quantification des hypothèses narratives**

La traduction de ces projections narratives en un nouveau paramétrage des modèles a nécessité l'identification préalable des variables supports au sein de la plateforme de modélisation, en particulier dans le modèle POLES, auquel était confiée la représentation détaillée des évolutions techniques. Le Tableau 15 regroupe l'ensemble des variables dont l'évolution a été quantifiée par ENERDATA. Cette quantification a été réalisée non pas dans

des termes absolus mais en termes de déviation par rapports aux résultats du scénario mimétique. Elle traduit la vision « normative » des projections narratives exposées ci-dessus.

**Tableau 15 : Variables supports des variations non-mimétiques**

<b>Résidentiel</b>	Surface par habitant Puissance photovoltaïque installée Part de bâtiments Très basse Energie dans le parc construit
<b>Mobilité des personnes</b>	Equiperment des ménages Passagers kilomètres en avion Passagers kilomètres en transport collectif rail Passagers kilomètres en transport collectif route Passagers kilomètres en voiture individuelle
<b>Mobilité des marchandises</b>	Tonnes kilomètres route Tonnes kilomètres rail
<b>Demande de matériaux</b>	Contenu en Ciment des bâtiments Contenu en Acier des bâtiments Contenu en Acier des véhicules Contenu Acier des infrastructures transport Contenu Ciment des infrastructures transport

Pour traduire ensuite les différentes trajectoires possibles identifiées dans les récits ci-dessus, une typologie des régions a été effectuée, en prenant en compte les conditions climatiques de chaque zone – températures, ensoleillement, aérologie – ainsi que la disponibilité de la biomasse et l’existence de façades maritimes. En fonction de ces caractéristiques, différents types d’espace et de schémas d’urbanisation (3 pour les PI et 4 pour les PED) ont été affectées aux différentes régions de POLES. Des hypothèses de composition de chaque schéma d’urbanisation ont ensuite permis d’en déduire la superficie moyenne par habitant et les caractéristiques énergétiques du parc. Les résultats quantitatifs de cette démarche quantification sont détaillés en annexe du présent document.

## **5.4 Instruments et politiques mis en oeuvre**

### **5.4.1 POLITIQUES ET MESURES**

Les bifurcations identifiées dans le récit en amont du scénario non mimétique ne peuvent être considérées que comme des évolutions spontanées du système économique sous l’effet d’une valeur du carbone croissante. Certes, une partie d’entre elles est envisageable, en particulier dans les pays en développement, dans le cadre des politiques de développement durable, hors du cadre strict des objectifs de réduction d’émissions de GES. Mais la plupart de ces bifurcations ne peuvent apparaître avec cette ampleur que sous l’effet de politiques et mesures orientées dans le bon sens et assez tôt pour induire une bifurcation notable d’ici 2050. Parmi les politiques et mesures nécessaires, nous pouvons citer :

- **Une réorientation du changement technique**, par des programmes de recherche ambitieux, des instruments d’incitation à l’innovation, et des aides à la pénétration des innovations dans le système économique pour accélérer l’apprentissage. Notre scénario non-mimétique suppose ici de telles politiques sur le photovoltaïque, sur les motorisations

alternatives et éventuellement en appui de la restructuration nécessaire de la logistique industrielle.

- **Une réorganisation encadrée du secteur électrique**, pour inciter au développement d'un réseau décentralisé dans les zones d'habitat diffus et pour la maximisation des sources renouvelables dans les zones d'habitat dense. Une telle réorganisation peut nécessiter des changements profonds institutionnels dans le domaine de l'électricité ou de larges réajustements dans les signaux-prix envoyés aux producteurs sur les marchés libéralisés.
- **Une planification contraignante des infrastructures de transports**, incluant une limitation ou une modification importante des infrastructures de transport routier pour diminuer les vitesses moyennes et inciter au transfert modal, simultanément à un développement massif des infrastructures de transport collectif pour accueillir les transferts de modes, aussi bien en zone urbaine dense et diffuse que dans l'inter-urbain.
- **Une planification vigoureuse du développement et de la rénovation urbaine**, de manière à favoriser la rénovation des bâtiments existants et la pénétration des bâtiments à énergie positive dans l'habitat diffus en quelques décennies, ou encore à encadrer le développement rapide des villes des pays émergents ou en développement selon des schémas d'aménagement durable.

Si la mise en œuvre de ces politiques est « sous-jacente » à notre projection quantitative d'un monde non-mimétique, la prise en compte du coût de ces politiques reste un problème mal traité. Les courbes d'apprentissage des technologies nouvelles sont mal connues, les coûts d'une vague importante de rénovation du résidentiel sont inconnus et les coûts d'infrastructures sont pris en compte dans IMACLIM-R mais de manière très sommaire.

#### 5.4.2 TRAJECTOIRE DE VALEUR DU CARBONE

Compte tenu des modifications introduites par les choix de bifurcation dans le scénario non-mimétique par rapport au scénario de stabilisation précédent, il a été nécessaire de réévaluer le sentier de valeur carbone nécessaire pour respecter le même budget d'émissions entre 2010 et 2050. Par tâtonnement, nous avons trouvé que la valeur carbone nécessaire pouvait être abaissée de 12% tout au long de la période par rapport au profil nécessaire dans le scénario mimétique, pour atteindre en 2050 320 \$/tCO<sub>2</sub> au lieu de 370\$/tCO<sub>2</sub>.

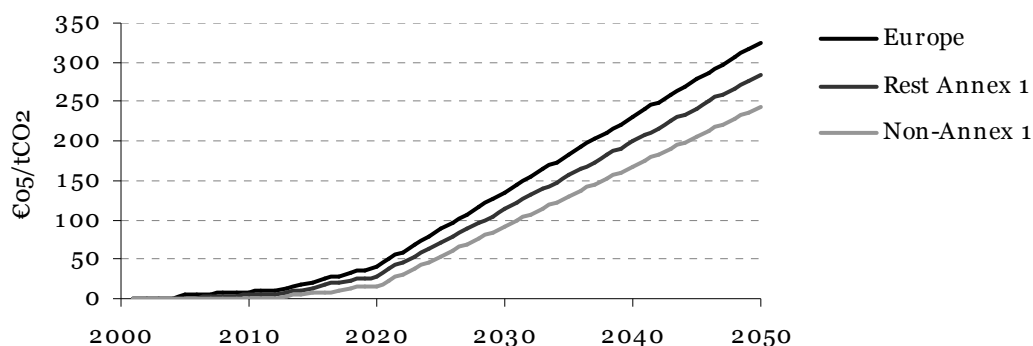


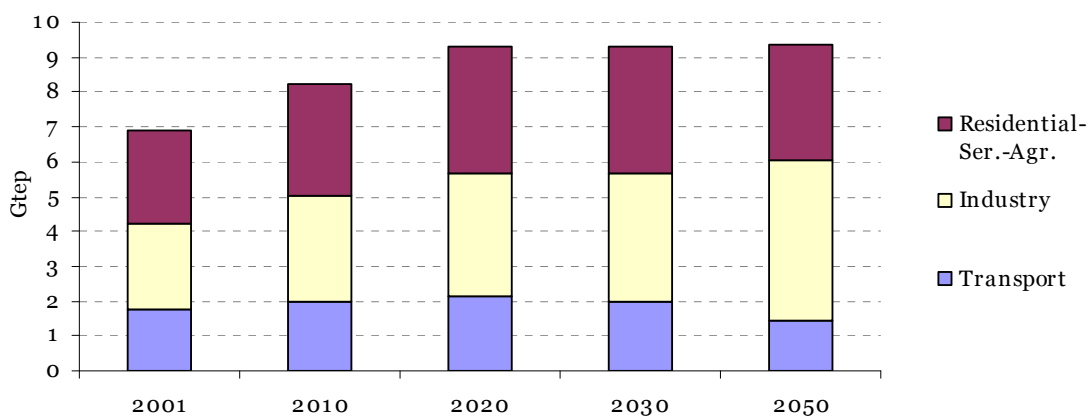
Figure 50 : Trajectoire de valeur du carbone par ensemble de régions

## 5.5 Evolution du système énergétique

### 5.5.1 DEMANDE FINALE D'ENERGIE

Les hypothèses du scénario non-mimétique conduisent à une stabilisation de la demande finale d'énergie entre 2030 et 2050, autour de 9700 Mtep.

Contrairement à la majorité des scénarios publiés dans la littérature, la part des transports dans la demande totale diminue tout au long de la période, passant de 25% en 2010 à 15% en 2050, avec une baisse en termes absolus à partir de 2030 au rythme de -1.5% par an. Cette baisse est liée non seulement à un report modal sur les transports en commun dans de nombreux pays mais aussi à une économie de mobilité totale pour les individus, conformément aux hypothèses concernant la réorganisation du territoire et des zones urbaines. En Chine, par exemple, la croissance de la mobilité par habitant passe de 4% par an entre 2020 et 2030 à 3% jusqu'en 2040 puis 1% jusqu'en 2050, pour atteindre 6800 km par an, ce qui reste très inférieur aux 10600 km parcourus par en moyenne un européen actuel.



La demande de l'industrie croît régulièrement à un rythme de 1% par an pendant toute la période, pour atteindre quasiment 50% de la demande totale. La part restante, couvrant les besoins du résidentiel, des services et de l'agriculture, est en légère diminution à partir de 2020, passant de 39.2% à 35.8%, ce qui se traduit par une baisse de demande de 275 Mtep entre 2020 et 2050.

Au niveau régional, ces tendances sont déclinées en fonction des dynamiques économiques locales. Dans les pays industrialisés, la baisse de demande des transports commence dès 2010 à un rythme avoisinant -1.5% par an, puis s'accélère après 2030 à un rythme annuel moyen de 2.5% par an. Dans les pays émergents, la mobilité croît d'abord fortement simultanément au processus de rattrapage économique, si bien que la demande finale d'énergie pour les transports croît jusqu'en 2030, avant de se stabiliser et de diminuer légèrement en fin de période.

Le même schéma s'applique à la demande d'énergie du secteur services, agriculture et résidentiel. La croissance forte des pays émergents et en développement s'accompagne d'un accès de masse aux services énergétiques résidentiels modernes et d'un fort déploiement des services, si bien que la demande énergétique de ce secteur là ne diminue pas au cours de la période, elle ralentit seulement sa croissance à l'horizon 2050. Au contraire dans les pays

industrialisés, la demande finale baisse dès 2010 car les gains d'efficacité dominent la croissance faible des besoins de services finaux.

La ventilation de la demande d'énergie finale par vecteur énergétique montre essentiellement une forte électrification des usages finaux, puisque la part de l'électricité passe de 15% à 35% entre 2001 et 2050. Simultanément, le charbon baisse légèrement de 11% à 8%, le pétrole raffiné baisse de 42% à 27%, le gaz naturel se maintient autour de 15%, le reste étant assurée par la biomasse et les déchets (de 14% à 12%), la chaleur en cogénération (3% à 2%) et une faible pénétration de l'hydrogène (2% en fin de période).

### 5.5.2 ENERGIE PRIMAIRE

La fourniture de cette énergie finale requiert une production mondiale d'énergie primaire croissant vigoureusement de 10130 Mtep en 2010 à 14140 Mtep en 2030 puis beaucoup plus lentement jusqu'à 15440 Mtep en 2050. Le rendement global du système énergétique mondial – rapport de l'énergie finale sur l'énergie primaire – se dégrade légèrement en passant de 0.70 à 0.65, sous l'effet conjoint de l'électrification du système énergétique et d'un recours croissant à la capture et séquestration à partir de 2030.

La part des énergies fossiles dans la production totale d'énergie primaire décroît de 81% en 2010 à 61% en 2050. Les parts respectives du charbon et du pétrole brut sont en constante diminution, bien que la pénétration de la capture et séquestration du carbone maintienne la part du charbon autour de 18% (soit 2600 Mtep en environ) au-delà de 2030. La production mondiale de pétrole brut augmente d'abord jusqu'en 2020, où elle atteint 4370 Mtep (soit l'équivalent d'environ 90 barils-jour) puis baisse continuellement ensuite, pour redescendre à un niveau 20% inférieur à celui de 2000. En ce qui concerne le gaz naturel, la production mondiale est en forte hausse jusqu'en 2030, passant de 2100 Mtep à 3800 Mtep en 2030, pour rester stable ensuite dans les deux décennies suivantes. Cette dynamique en deux temps est soutenue d'abord par une substitution vers le gaz pour la production d'électricité et en moindre proportion dans l'industrie, puis par une pénétration progressive de capture et séquestration sur les centrales à gaz (8.4% équipées en 2050).

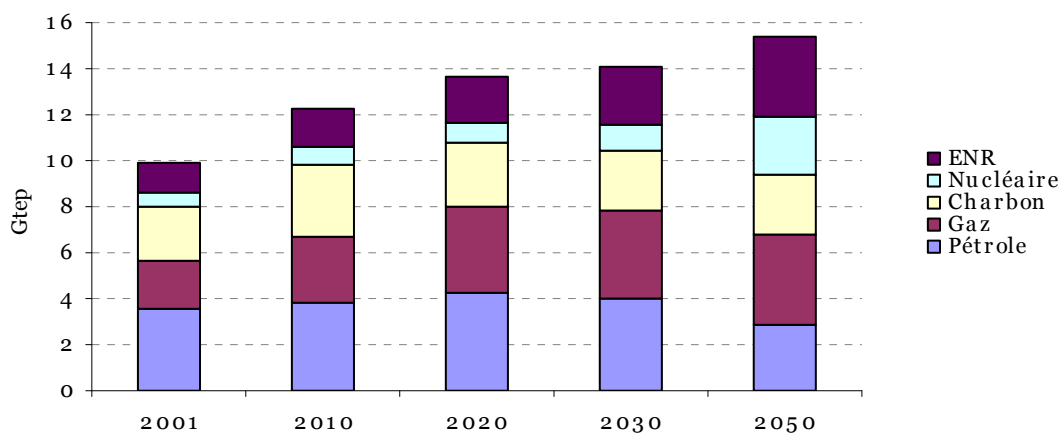


Figure 51 : Consommation d'énergie primaire, Monde, scénario Non-mimétique

Au total, la montre clairement le déclin des énergies fossiles dans le panier d'énergie primaire mondial à partir de 2020. Pour approvisionner la demande finale d'énergie, le recours au nucléaire et aux énergies renouvelables doit croître de manière très importante. En 2050, le nucléaire assure 16% de l'énergie primaire mondiale, avec 2550 Mtep, soit environ 4 fois plus d'énergie qu'actuellement. Cette croissance, qui intervient surtout après 2030, requiert de mettre en opération 56 GW nouveaux chaque année entre 2030 et 2050, sans compter le remplacement des centrales en fin de vie.

Le développement des énergies renouvelables est aussi fortement mis à contribution, avec la fourniture de presque 3000 Mtep d'énergie primaire en 2050, contre 1000 en 2000. Energies solaire et éolienne sont largement développées pour assurer 160 Mtep en 2020 puis 860 Mtep en 2050, tandis que l'énergie fournie par la biomasse et les déchets double entre 2000 et 2050 pour atteindre 2120 Mtep en fin de période.

### 5.5.3 PRODUCTION D'ELECTRICITE

La production d'électricité mondiale connaît une croissance très dynamique du fait de l'électrification importante de la fourniture des services énergétiques finaux : elle est multipliée par 3.2 en passant de 15460 TWh (1330 Mtep) à 51340 TWh (4415 Mtep). Cette augmentation est fondée en partie sur le thermique au gaz naturel, qui passe de 2933 TWh (252 Mtep) à 11830 TWh (1017 Mtep), et dont la part dans la production totale passe de 19% à 23%. En 2050 toutes les centrales à gaz sont à cycle combiné (85%) ou en cogénération (15%). Le thermique au fioul a quasiment disparu après 2030. La part du charbon décroît mais reste très significative avec 16% de la production en 2050 (contre 38% en début de période). Dès 2030 le parc ne contient plus que des unités de production supercritiques et l'adjonction d'un système de capture et séquestration débute, pour atteindre 10% des unités en 2050.

Le reste de la production est assurée par l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables. En ce qui concerne le nucléaire, dont nous avons mentionné plus haut le développement très important dans la seconde moitié du siècle, on notera en plus que 70% des nouvelles centrales construites entre 2030 et 2050 seront situées en Asie (+270 GW en Chine, +160 GW en Inde, +340GW dans le reste de l'Asie) et 12% en Europe (+135GW).

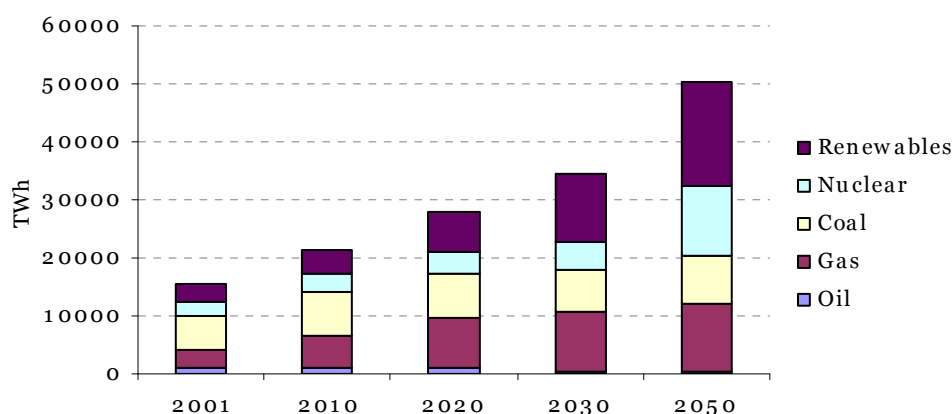
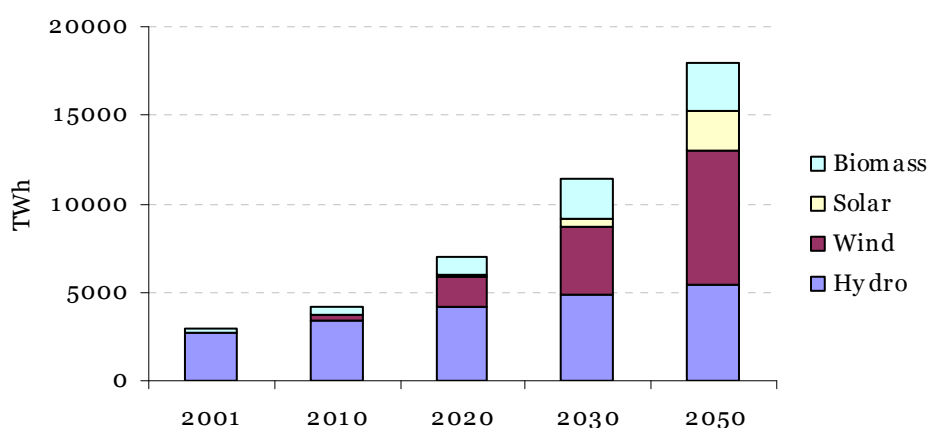


Figure 52 : Production mondiale d'électricité, par source d'énergie.

Les énergies renouvelables fournissent une part croissante de la production grâce à un fort développement de toutes les sources d'énergie renouvelable. La capacité hydroélectrique est multipliée par 2 entre 2000 et 2050, avec 740 GW supplémentaires, dont 295 GW en Chine, 117 GW en Inde et 90 GW au Brésil<sup>10</sup>. En 2050 l'hydroélectricité garantit 12% de la production. L'énergie éolienne connaît un essor impressionnant, en passant de 24 GW en 2001 à 2522 GW en 2050<sup>11</sup>, avec un développement bien réparti sur l'ensemble du monde. En 2050, cela correspond à 19% des capacités mondiales, fournissant 10% de la production, presque autant que l'hydroélectricité. L'énergie solaire connaît un développement tout aussi vigoureux, passant de 1GW en 2001 à 1585 GW en 2050, soit 12% de la capacité totale installée en 2050. Cependant la production permise par ce déploiement n'atteint que 2290 TWh (197 Mtep) soit 4% de la production totale. Enfin la biomasse fournit 5% de la production totale en 2050, avec une croissance aussi très dynamique des capacités, passant de 26 GW en 2001 à 447 GW en 2050.



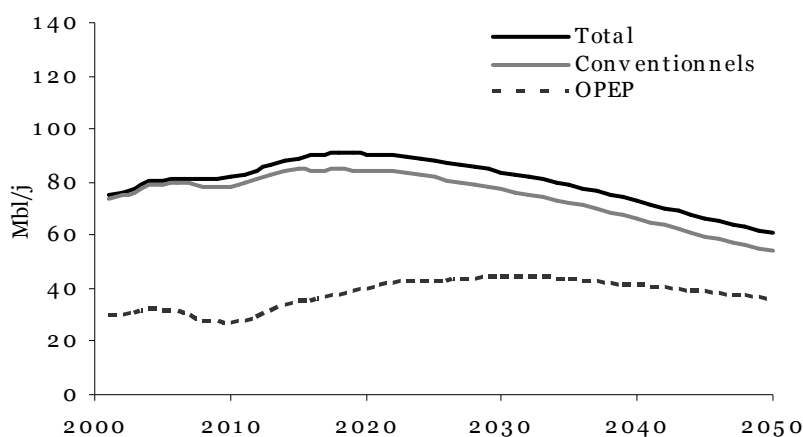
**Figure 53 : Production mondiale d'électricité d'origine renouvelable.**

#### 5.5.4 IMPACT SUR LES MARCHES DE RESSOURCES FOSSILES

La décarbonisation du système énergétique se traduit par un plafonnement de la production de pétrole autour de 2020 puis une décroissance lente de la production de pétrole à un rythme de 1.3% par an, si bien qu'en 2040 la production mondiale est repassée en dessous du niveau de production de 2000 (75 milliards de barils par jour).

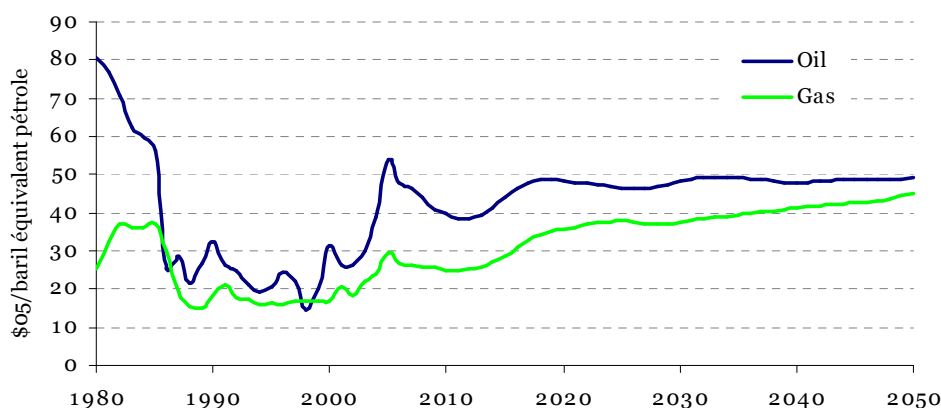
<sup>10</sup> A titre de comparaison, le barrage des trois gorges sur le fleuve Yangtsé en Chine est construit pour produire 18,2 GW.

<sup>11</sup> En 2007 le parc mondial a atteint 94 GW installés (source : GWEC).



**Figure 54 : Production mondiale de pétrole**

Conjointement à cette décroissance de la production mondiale, la part de marché de l'OPEP croît de 40% à 60%. Cet accroissement de pouvoir de marché est lié au plafonnement du prix du pétrole à 50 dollars par baril, un prix auquel le différentiel de coût de production des réserves de l'OPEP désavantage largement les concurrents, qui n'ont pas intérêt à mettre en production les ressources plus chères, notamment les ressources non-conventionnelles, qui restent très minoritaires à l'horizon 2050 (10 M<sup>ards</sup> de baril-jour en provenance du Canada et du Venezuela).



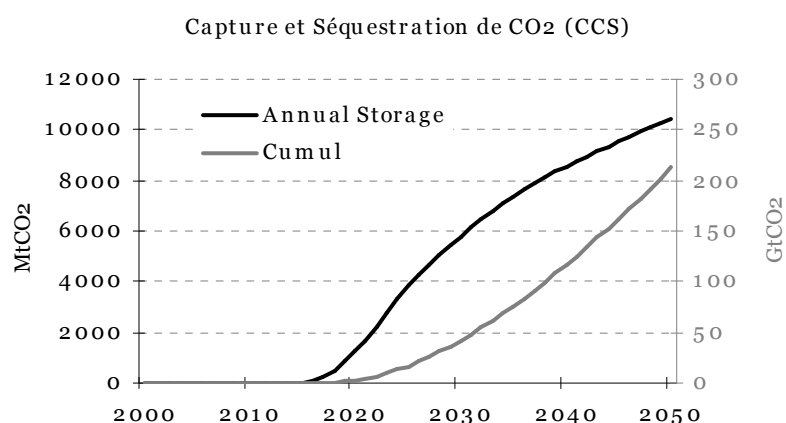
**Figure 55 : Prix mondiaux du pétrole brut et du gaz naturel**

Le prix du gaz naturel se rapproche progressivement de celui du pétrole lorsqu'il est ramené à une unité énergétique commune, sous l'effet de l'augmentation de la demande mondiale de gaz naturel.

#### 5.5.5 CAPTURE ET SEQUESTRATION DU CARBONE

Les dispositifs de capture et séquestration du carbone se déploient à partir de 2020, équipant 9% des centrales au charbon et 4% des centrales à gaz, pour un total de 233 GW (3.5% des capacités totales de production d'électricité). Ce déploiement permet au gaz et au charbon de rester des options d'investissements intéressantes dans le parc de production, puisqu'en 2050 le parc mondial contient encore 15% de centrales au charbon et 20% de centrales à gaz. Les premières sont équipées à 70% de CCS tandis que les secondes le sont à

43%. Même partiel, ce déploiement permet d'atteindre 20 GtCO<sub>2</sub> d'émissions séquestrées en 2050, soit 80% des émissions brutes du secteur électrique<sup>12</sup> et presque 40% des émissions brutes totales.



## 5.6 Evolution des secteurs industriels

### 5.6.1 SECTEUR DE LA SIDERURGIE

La demande d'acier connaît une croissance soutenue au cours de tout le demi-siècle, à un rythme moyen de 1.8% par an. Cette croissance est principalement alimentée par l'Asie : la Chine est responsable de 30% de la demande supplémentaire l'Inde 24%, le reste de l'Asie 15%. En 2050, l'Amérique du Nord, l'Europe, le Japon et l'Océanie ne concentrent plus que 29% de la demande, contre 54% en 2001. Les infrastructures de transport constituent le segment de demande le plus dynamique, avec un taux de croissance moyen de la demande de 2.2% par an, tandis que la demande pour les bâtiments croît moins rapidement à un taux moyen de 1.2% par an.

Le secteur entreprend une mutation technologique continue permettant de diviser par trois les émissions de CO<sub>2</sub> par tonne d'acier, avec 600 kg de CO<sub>2</sub> par tonne d'acier en 2050. La production d'acier par arc électrique est supposée atteindre 50% de la production totale contre 37% en 2001. Les nouveaux procédés de fusion - réduction et réduction directe se développent pour assurer un tiers de la production en 2050. En 2050, les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> du secteur reviennent à leur niveau de 2000, avec 1.3 GtCO<sub>2</sub>.

### 5.6.2 SECTEUR DE LA PRODUCTION D'ALUMINIUM

La demande mondiale d'aluminium croît rapidement avec un rythme annuel moyen de 2.3% par an, là encore fortement soutenue par les besoins de l'Asie, qui génère 62% de l'accroissement de la demande entre 2010 et 2050. La hausse de la demande dans l'OCDE reste dynamique avec un rythme moyen de 1.4% par an.

Du côté de l'offre, le scénario ne contient pas de rupture significative dans le panier des technologies utilisés et dans leurs parts respectives dans la production mondiale. Le seul

<sup>12</sup> Les centrales thermiques non équipées de CCS étant très mal positionnées dans l'ordre de mérite (ordre des coûts croissants), elles sont beaucoup moins utilisées que les centrales équipées.

changement marquant est la progression du recyclage, qui assure 40% de la production totale en 2050, contre 26% en 2001. L'intensité carbone directe de la production est quasi échangée, autour de 160 kilogrammes de CO<sub>2</sub> par tonne d'aluminium.

### 5.6.3 SECTEUR DE LA PRODUCTION DE CIMENT

La demande mondiale de ciment croît à un rythme annuel moyen de 2.5% par an. La demande de ciment pour les infrastructures est supposée croître plus rapidement (3.3% par an) que celle qui émane du secteur des bâtiments proprement dits (2% par an). La croissance de la demande entre 2010 et 2050 peut être attribuée à l'Asie à 73% (43% à la Chine, 20% à l'Inde). En 2050, 68% de la production est située en Asie, contre 50% en 2010. L'Europe n'héberge plus que 5% de la production en 2050 contre 15% en 2001, une évolution qui est comparable à celle que l'on observait dans le scénario de référence, ce qui signifie qu'elle est moins liée à la politique climatique qu'à l'évolution de la localisation de la demande.

Côté offre, le secteur cimentier fait baisser son intensité carbone de 15% entre 2010 et 2050, avec la disparition progressive des procédés humides et semi-humides et la généralisation des préchauffeurs (80%) et précalcinateurs (63%).

### 5.6.4 SECTEUR DE LA PRODUCTION DE VERRE PLAT

Le demande mondiale de verre plat est en croissance de 2.1% par an en moyenne entre 2020 et 2050. La demande de verre pour le bâtiment est 40% plus élevée que dans le scénario de référence du fait du développement très important du photovoltaïque décentralisé dans ce scénario.

## 5.7 Emissions de CO<sub>2</sub>

Par définition, le scénario respecte l'enveloppe d'émissions imposée pour suivre une trajectoire de stabilisation du CO<sub>2</sub> à 450 ppm en 2100. La capture et séquestration du carbone sur les centrales thermiques à charbon et à gaz permet en fait 60% d'émissions brutes en plus (10 GtCO<sub>2</sub>) que le maximum autorisé par l'enveloppe d'émissions (18 GtCO<sub>2</sub>).

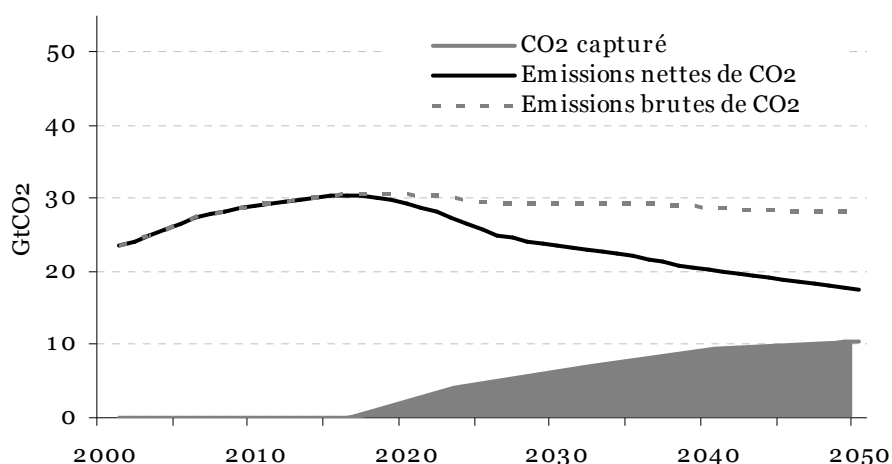
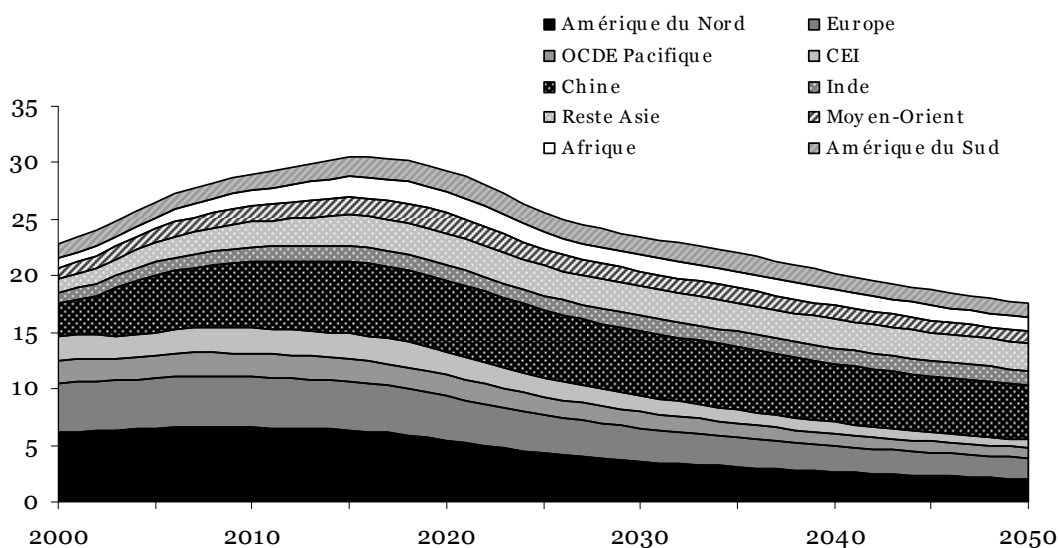


Figure 56 : Emissions mondiales de CO<sub>2</sub> – scénario Non Mimétique

En 2050, le secteur électrique est responsable de 46% des émissions brutes mais seulement de 14% des émissions nettes grâce à la capture et séquestration. Les transports n'émettent plus que 2.3 Gt CO<sub>2</sub> contre 5.3 Gt CO<sub>2</sub> en 2001. Les émissions de l'industrie progressent mais la hausse est limitée à 10% entre 2010 et 2050.

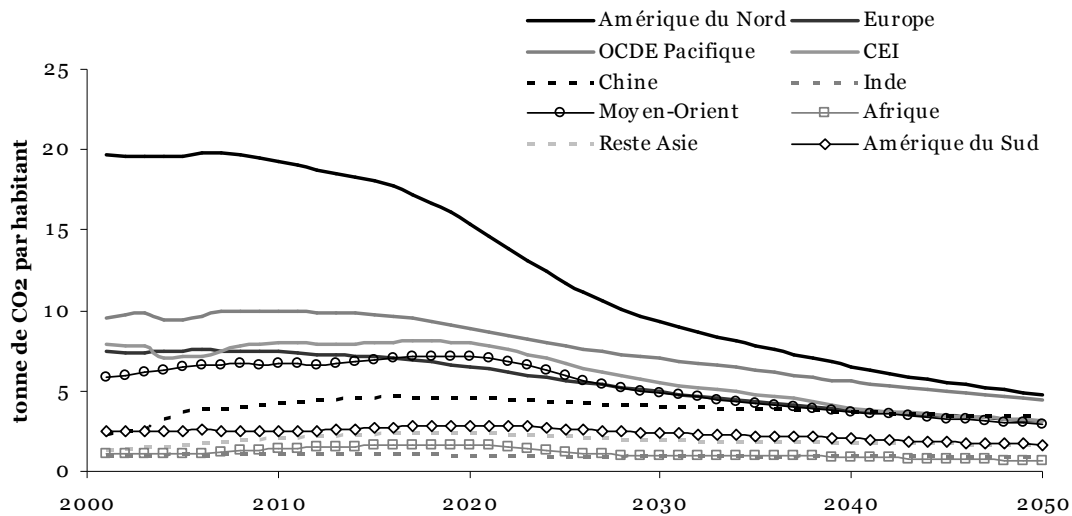
La ventilation régionale des émissions montre la forte réduction des émissions des pays industrialisés (pays de la CEI inclus) dès 2010, leurs émissions passant de 15 GtCO<sub>2</sub> en 2005 à 5.5 GtCO<sub>2</sub> en 2050. Les émissions des pays émergents et en développement croissent jusqu'en 2020 (16 Gt CO<sub>2</sub>) avant de décroître de 20% en 30 ans malgré une croissance économique soutenue.



**Figure 57 : Emissions régionales de CO<sub>2</sub>**

Si l'on prête attention aux émissions par habitant, on observe aussi le plafonnement des émissions par habitant dans les pays en développement dès 2020, bien qu'elles restent à des niveaux très bas par rapport aux niveaux actuels dans l'OCDE. Les émissions par tête des américains sont divisées par 4, celles des européens sont divisées par 2.4, celles des russes par 2.5. Si le futur système de coordination internationale devait être fondé sur une allocation de type contraction et convergence, les transferts de capitaux liés à la différence entre émissions effectives et allocations seraient très importants. Par un calcul de premier ordre, négligeant les effets macroéconomiques de ces transferts, on en déduit qu'ils équivaldraient à une entrée de capitaux égale à 17% du PIB en Inde et 19% du PIB en Afrique. La Chine serait devenue acheteuse de quotas, pour un montant équivalent à 9% de son PIB nominal<sup>13</sup>. Les pays de l'OCDE devraient consacrer 1% ou 2% de leur PIB à l'achat de quotas.

<sup>13</sup> 1.4 milliards d'habitant émettant chacun 1.5 tonne de CO<sub>2</sub> en trop, au prix mondial de 320 \$/tCO<sub>2</sub>.



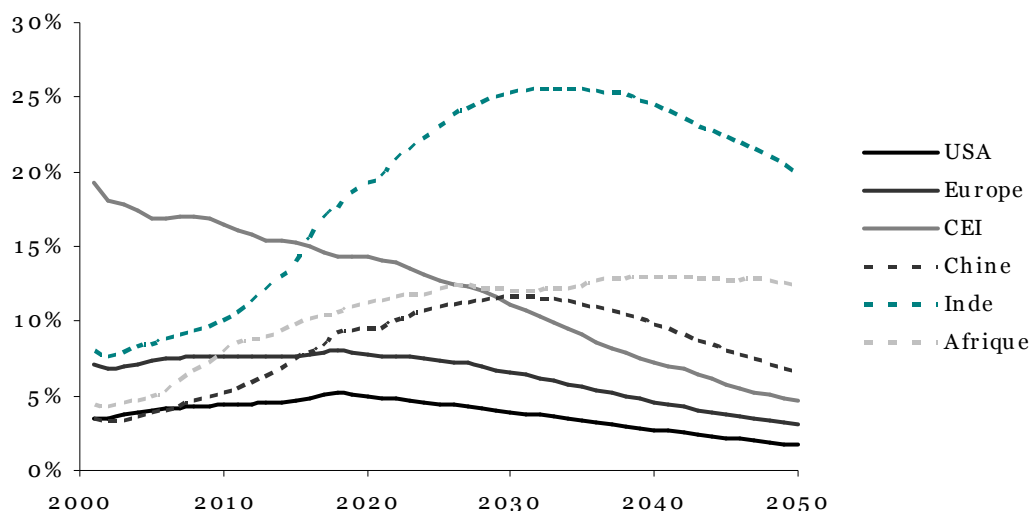
## 5.8 Bilan macro-économique

### 5.8.1 FACTURE ENERGETIQUE DES MENAGES

Dans toutes les régions, le budget des ménages subit directement l'interaction (i) de la taxation croissante des émissions de CO<sub>2</sub>, (ii) des dynamiques d'équipements et d'augmentation des besoins énergétiques au fur et à mesure du développement, (iii) de la décarbonisation progressive du système énergétique, (iv) des gains d'efficacité additionnels induits par la taxe carbone. Dans la majorité des régions, l'effet net de ces mécanismes conjoints sur le fardeau énergétique des ménages est un profil « en bosse » : dans un premier temps le poids de la taxe domine, démultiplié par la croissance dynamique des besoins d'énergie individuels dans les pays émergents, ce qui induit un effet d'éviction sur le reste du budget des ménages. Cet effet peut être très significatif, comme en Inde, où le fardeau énergétique explose jusqu'à atteindre 25% du budget total des ménages après 2030. En fait, cette évolution n'est possible que si les besoins énergétiques qui la sous-tendent sont prioritaires par rapport aux autres biens et services consommés<sup>14</sup>. Dans les pays industrialisés, le fardeau de transition paraît beaucoup plus supportable en part de budget, du fait (i) des revenus moyens beaucoup plus élevés, (ii) des fiscalités préexistantes sur l'énergie.

La transition dure de deux à trois décennies, avant que la décarbonisation du système ne prenne le pas sur l'effet de la valeur croissante du carbone. Ceci est un fait marquant de l'impact de la politique climatique que nous avons simulé : ce n'est pas à long terme, quand la valeur du carbone sera très élevée, que l'économie souffrira d'un fardeau insupportable, mais bien pendant la transition, alors que la valeur du carbone est comprise entre 50 et 150 \$/tCO<sub>2</sub>.

<sup>14</sup> Dans les modèles utilisés, nous supposons que c'est le cas, en imposant que la demande de services énergétiques est liée aux équipements possédés et à la croissance du revenu par tête, quel que soit le prix de l'énergie.



**Figure 58 : Part de l'énergie dans le budget des ménages**

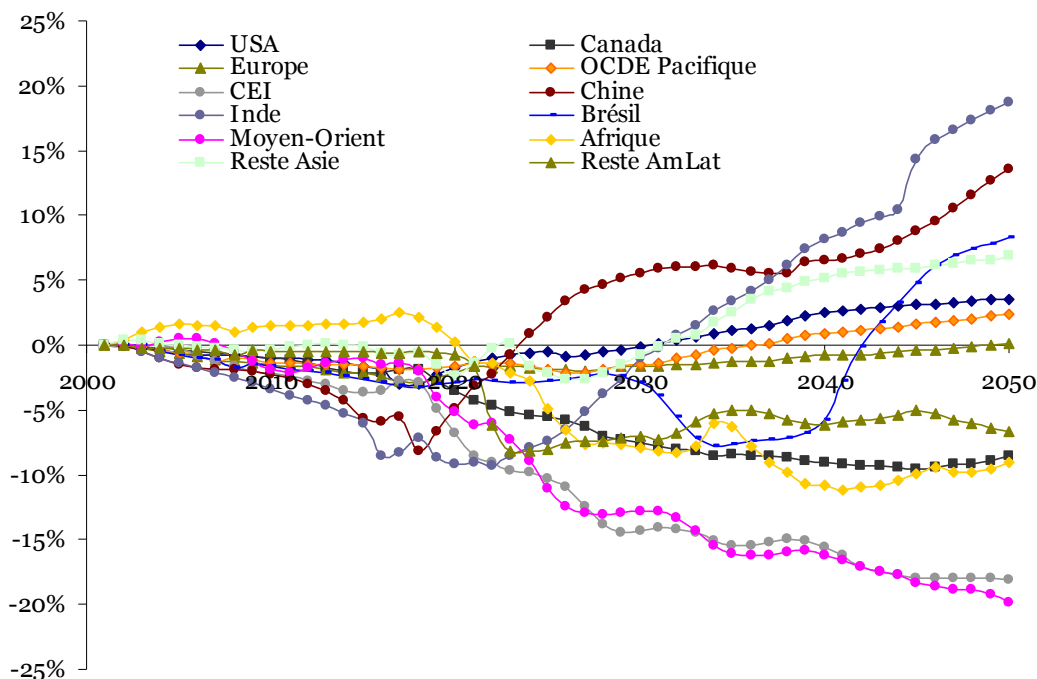
La CEI se distingue par le niveau élevé du fardeau énergétique supporté par les ménages actuels. Du fait des potentiels de gains d'efficacité très larges et d'une dynamique d'équipement moins vigoureuse que dans les pays émergents, l'effet net est une décroissance progressive du fardeau, jusqu'à la convergence avec les autres pays industrialisés en fin de période.

### 5.8.2 COÛTS MACROECONOMIQUES DE LA TRANSITION

Les variations de PIB par rapport au scénario de référence fournissent un diagnostic en quatre points :

- les pays exportateurs de ressources fossiles subissent des pertes régulières qui ralentissent leur croissance tout au long de la période ; c'est le cas du Moyen-Orient et de la CEI en premier lieu, où le ralentissement cumulé atteint 20% du PIB de référence en 2050 ; c'est le cas aussi du Canada, de l'Afrique et du Reste de l'Amérique Latine<sup>15</sup>.
- les pays industrialisés (hors Canada) subissent un ralentissement faible, qui reste inférieur à 3% du PIB de référence, entre 2010 et 2030, tandis qu'en fin de période leur niveau de PIB est plus élevé que dans le scénario de référence de quelques pourcents (jusqu'à 3.5% pour les USA, qui étaient pénalisés dans la référence par leur faible efficacité relativement aux autres pays de l'OCDE) ;
- Les pays émergents comme la Chine et l'Inde subissent un fort ralentissement entre 2015 et 2030, avant de rattraper puis de dépasser largement le niveau de PIB du scénario de référence, dès 2024 en Chine et 2032 en Inde. C'est aussi le cas du Brésil et du reste de l'Asie.
- Certains pays en développement sont plus pénalisés par la politique climatique et ne connaissent pas de phase de rattrapage après 2020, comme l'Afrique et l'Amérique Latine hors Brésil.

<sup>15</sup> En Afrique le manque à gagner du à la baisse de consommation mondiale de gaz et de charbon peut atteindre 8% du PIB de référence en 2050 ; pour la région Reste de l'Amérique Latine, cette perte de revenus atteint 3.5% du PIB de référence en 2050.



**Figure 59 : Variations de PIB réel par rapport au scénario de référence**

D'autres expériences de modélisation nous ont appris que l'ampleur des coûts de transition était fortement dépendante des modalités de mise en œuvre des politiques et mesures internes à chaque pays et région, par exemple avec les différentes options de recyclage des recettes de la taxe carbone. Par ailleurs la quantification du coût des politiques menant à la bifurcation vers des styles de développement et des schémas d'organisation non mimétiques est très partielle dans l'état des connaissances et avec les modèles utilisés, en particulier en ce qui concerne le coût de rénovation du bâti et les coûts des infrastructures.

Compte tenu de ces deux remarques il est nécessaire d'interpréter avec précaution les résultats ci-dessus. Il est possible d'en retenir les traits marquants qui sont robustes aux variantes de simulation :

- des coûts de transition qui peuvent être élevés si les politiques climatiques ne sont pas accompagnés des compensations nécessaires pour les secteurs ou les catégories de ménages les plus sensibles ;
- un potentiel bénéfique important au bout de quelques décennies pour tous les pays consommateurs d'énergie fossile, grâce au large découplage entre croissance économique et ressources fossiles ;
- un manque à gagner permanent pour tous les pays exportateurs de ressources fossiles.

Enfin, en comparaison avec le scénario intermédiaire « mimétique », il apparaît qu'une bifurcation bien anticipée vers des styles de développement plus soutenables est susceptible de réduire les coûts de transition, de rapprocher la date à laquelle les politiques climatiques génèrent un gain net par rapport au scénario de référence, et d'augmenter ce gain net sur les décennies ultérieures.

## 6 Variantes de scénarios

La variante technologique sans CCS reprend le scénario présenté précédemment avec le même montant de taxe carbone. La seule différence réside dans les hypothèses de disponibilité des dispositifs de capture et séquestration. Ici nous supposons que les coûts de mise en œuvre restent prohibitifs et qu'hormis l'expérimentation aucune centrale n'est équipée avant 2050.

### 6.1 Variante technologique sans CCS

#### 6.1.1 EMISSIONS DE CO<sub>2</sub>

L'absence de CCS contraint les producteurs d'électricité à éviter le plus possible de recourir aux centrales thermiques consommant des ressources fossiles. Dans ces conditions, réussir à limiter les émissions de CO<sub>2</sub> dans la même enveloppe que précédemment exigerait d'augmenter les niveaux de taxe, pour mobiliser des potentiels de réduction inexploités car plus chers. Le profil de taxe ayant été maintenu comme dans le scénario précédent, ces potentiels ne peuvent être mobilisés et le niveau d'émissions est plus élevé que dans le scénario précédent.

Sur l'ensemble de la période, les pays émergents et en développement rejettent 10 Gt CO<sub>2</sub> supplémentaires et les pays de l'OCDE 13 Gt. Toutefois, à partir de 2040, la trajectoire d'émissions rejoint celle du scénario non mimétique. C'est grâce à des investissements additionnels dans l'énergie nucléaire que le surplus d'émissions est atténué.

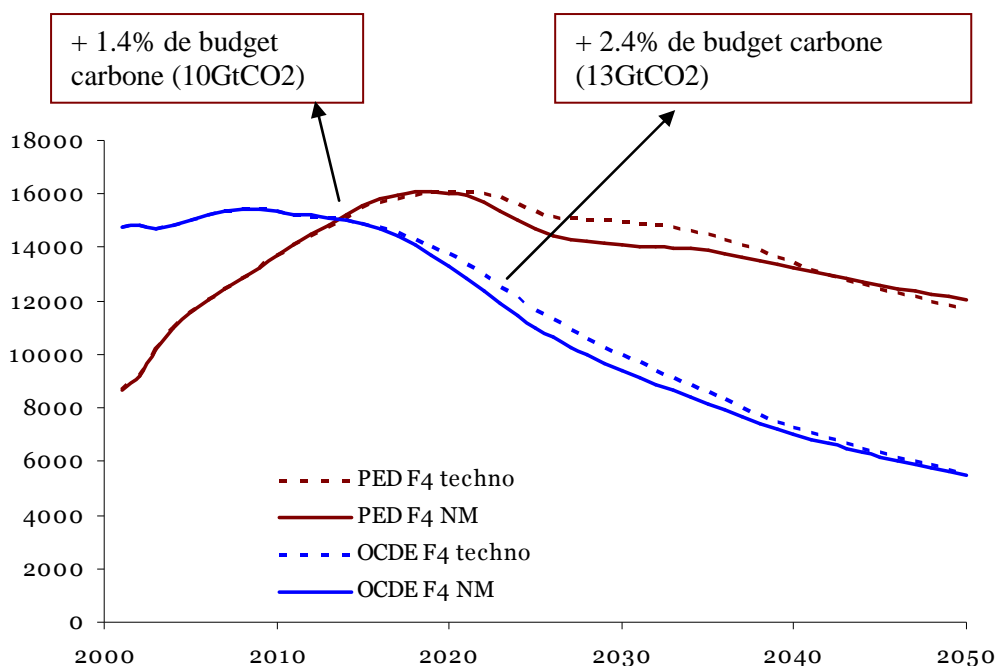


Figure 60 : Surplus d'émissions de CO<sub>2</sub> lié à l'absence de CCS

#### 6.1.2 EVOLUTION DU SYSTEME ENERGETIQUE

La non disponibilité de la CCS ne modifie le profil d'évolution du système énergétique qu'après 2020 car c'est surtout au-delà de cette date que les dispositifs de CCS devenaient effectifs. De 2020 à 2050, la demande mondiale d'énergie finale est faiblement modifiée : on

observe une demande inférieure à celle du scénario non-mimétique de 3% en 2030 et de 2% en 2050. Cette différence est exactement du même ordre que le ralentissement économique lié au surinvestissement nécessaire dans des énergies alternatives au charbon et au gaz qui ne peuvent plus être équipées de CCS (cf. bilan macroéconomique ci-dessous). Le bilan d'énergie primaire fait ressortir une différence du même ordre, mais c'est surtout son contenu qui est modifié. Le charbon décroît fortement au lieu de rester une source d'énergie importante dans la production d'électricité : le bilan mondial en 2050 contient 1150 Mtep de moins de charbon (-45%) que dans le scénario non mimétique (2610 Mtep). De même pour le gaz naturel, qui reste très employé mais est défavorisé lui aussi par l'absence de CCS : le volume de gaz produit baisse de 550 Mtep, avec 3350 Mtep au lieu de 3900 Mtep dans le scénario non-mimétique. L'énergie primaire « manquante » est assurée à 78% par le nucléaire, 19% par la combustion de biomasse et déchets, et 3% par le solaire (ce qui représente quand même 20% de capacité solaire en plus, soit 320 GW). Le parc nucléaire mondial atteint 2530 GW en 2050, soit 54% de plus que dans le scénario non mimétique, ce qui représente un développement extrêmement ambitieux des capacités entre 2020 et 2050, avec 65 GW par an en moyenne de nouvelles centrales.

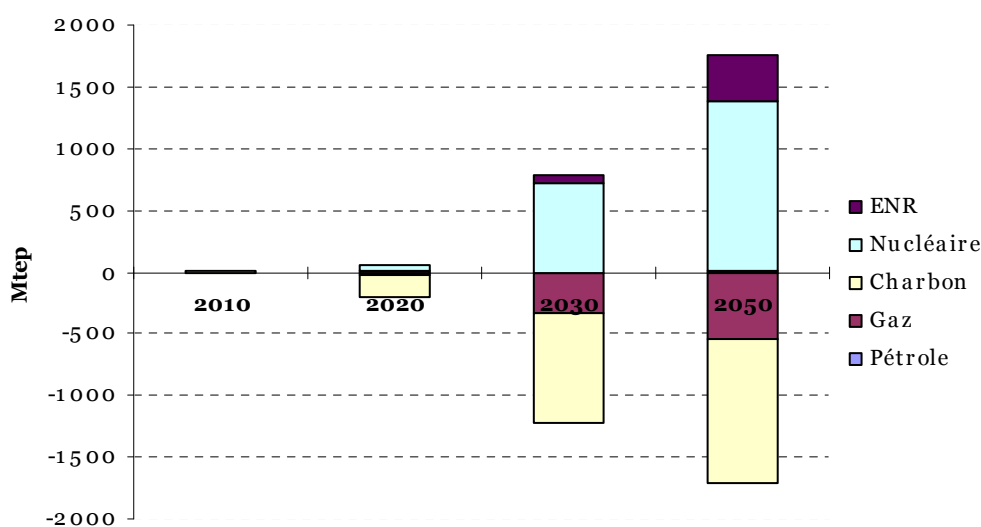


Figure 61 : Comparaison du panier d'énergie primaire mondial, variante sans CCS par rapport au scénario non-mimétique

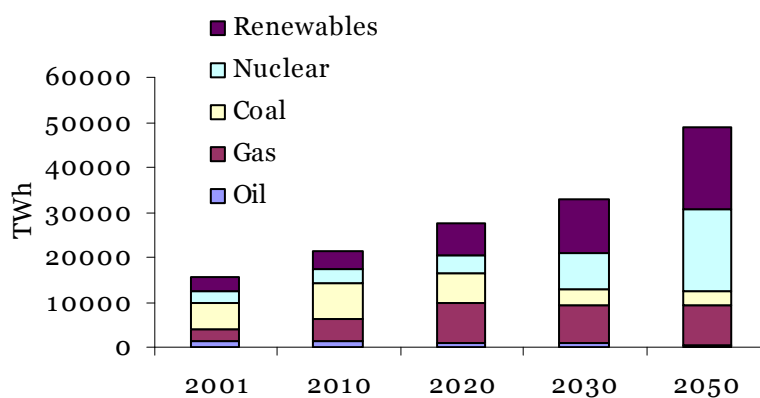


Figure 62 : Production mondiale d'électricité, par source d'énergie

Au niveau de la production, l'énergie nucléaire devient la première énergie avec 18200 TWh au niveau mondial (35% de la production), devant l'ensemble des centrales thermiques, qui assurent 15025 TWh (30% de la production).

Un tel développement de l'énergie nucléaire civil accentue les interrogations déjà présentes dans les scénarios précédents en ce qui concerne les problèmes de prolifération et de sécurité, puisque l'augmentation des capacités concerne toutes les régions du monde. Du point de vue économique, ce déploiement induit des variations dans les volumes d'investissement. Entre 2020 et 2035, le volume d'investissement est inférieur, du fait d'une part d'une moindre demande d'électricité pendant la transition (-5% en 2030) et d'autre part du fait que les dispositifs avec CCS sont plus chers tant que le processus d'apprentissage n'a pas fait baisser les coûts après une première décennie de déploiement. A long terme, par contre, le déploiement des centrales nucléaires additionnelles requiert plus d'investissement que les centrales thermiques équipées de CCS. L'investissement cumulé entre 2020 et 2050 est supérieur de 30% dans le scénario sans CCS par rapport au scénario non mimétique.

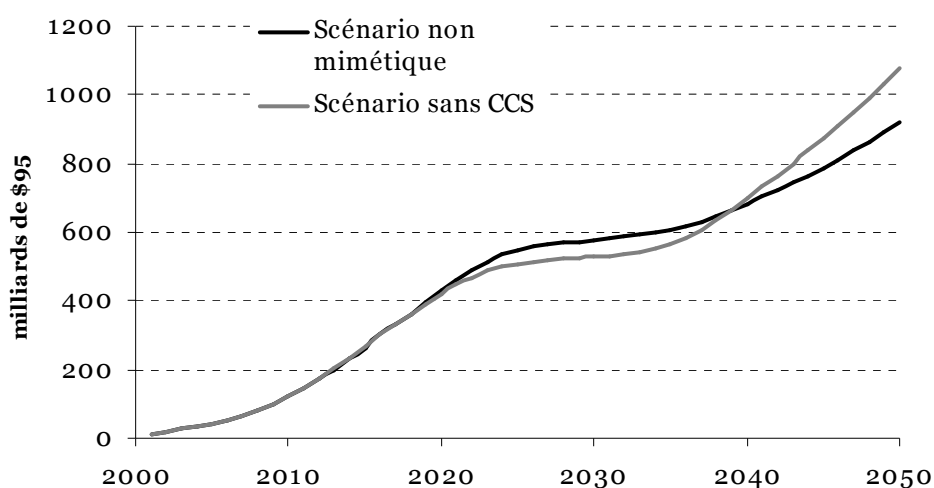


Figure 63 : Investissement cumulé dans le secteur électrique dans le monde

### 6.1.3 BILAN MACROECONOMIQUE

En l'absence de CCS, la valeur croissante du carbone induit un ralentissement de croissance supplémentaire, car il est plus difficile de décarboniser le système. En Chine et en Inde, où le charbon est une source énergie prépondérante dans le mix électrique, ce surcoût atteint respectivement 6% et 9% du PIB. Ce fardeau supplémentaire provient surtout d'un renchérissement du prix de l'électricité qui aggrave le fardeau énergétique des ménages et des industriels entre 2020 et 2030 (Figure 64). Pour les pays exportateurs de ressources fossiles, les exportations additionnelles de pétrole et de gaz, combustibles plus intéressants que le charbon sans CCS, gagnent de 1% à 3% de PIB, tandis que les autres pays industriels subissent un ralentissement modéré allant de 1 à 3%.

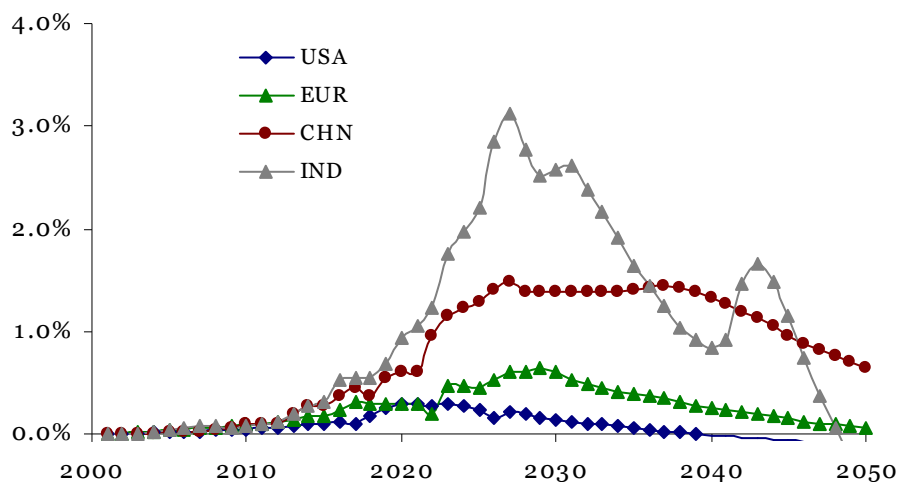


Figure 64 : Hausse du fardeau énergétique par rapport au scénario non mimétique

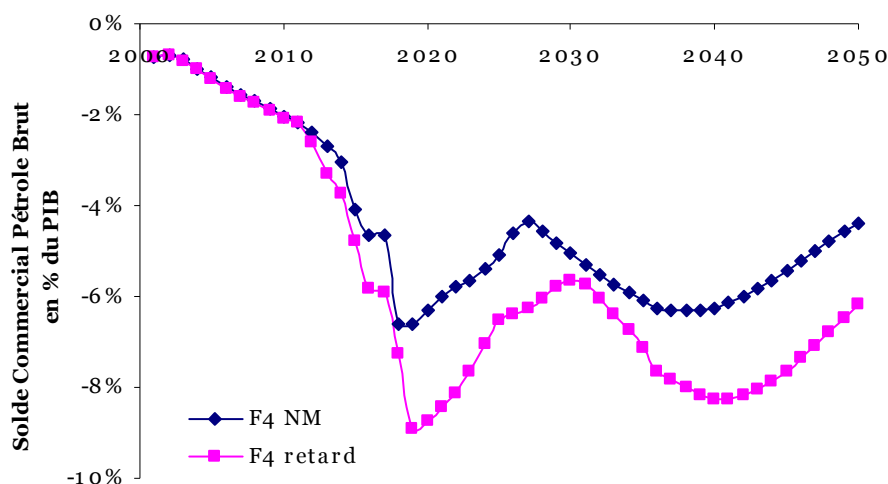
## 6.2 Variante politique avec participation retardée des PED

Ce scénario a été généré avec les mêmes hypothèses que le scénario non mimétique mais en décalant le profil de valeur du carbone de 5 ans pour les pays émergents en développement. Pour ces régions, la valeur du carbone atteint 222 \$/tCO<sub>2</sub> en 2050, au lieu de 264 \$/tCO<sub>2</sub>.

### 6.2.1 BILAN MACROECONOMIQUE : UN RALENTISSEMENT MONDIAL

Le retard des politiques de réduction dans les pays émergents et en développement n'est pas bénéfique pour la croissance. En fait les cinq années de report correspondent à une phase d'accroissement des équipements, de construction des infrastructures et des bâtiments. En l'absence de politiques climatiques, cette croissance repose sur un usage important des ressources fossiles, ce qui accroît la dépendance énergétique des pays en développement et rend les économies plus sensibles à la valeur du carbone lorsque celle-ci est finalement imposée cinq ans plus tard. Par exemple, la Figure 65 montre que le poids du solde commercial de pétrole brut en Chine est aggravé par le retard de la politique climatique : en 2020, il dépasse 9% au lieu de 7%, un fardeau additionnel qui persistera au moins jusqu'en 2050.

L'impact négatif du retard des politiques de réduction dans les pays émergents et en développement est du même ordre que le gain observé dans le scénario non mimétique par rapport au scénario de référence. En 2050, le PIB de la Chine et de l'Inde reste inférieur à celui de la référence. Cela suggère qu'il existe une « fenêtre d'opportunité » particulière dans les pays en développement, avant que la construction de masse des infrastructures, des bâtiments et le rattrapage des niveaux d'équipements n'instaure un système principalement axé sur les ressources fossiles.



**Figure 65 : Poids de la dette extérieure en pétrole brut - Chine**

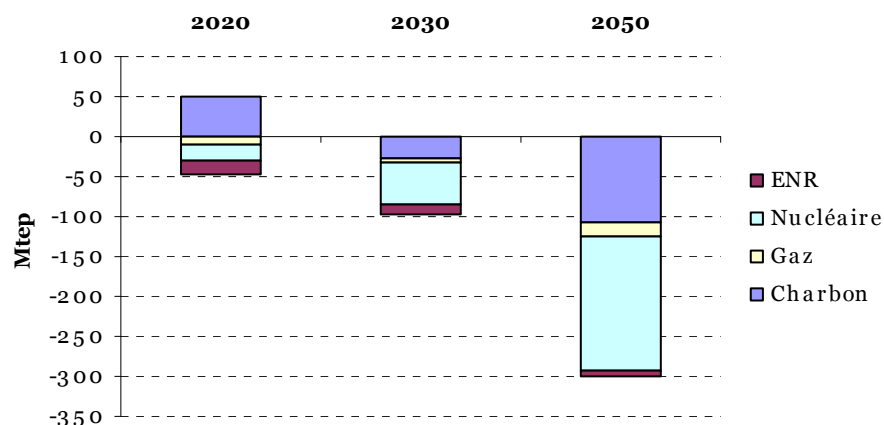
Par ricochet, la croissance de tous les pays du monde est affectée par le retard des politiques climatiques dans les PED. Les Etats-Unis et l'Europe subissent un ralentissement cumulé respectif de 10% et 6% en 2050, tant à cause de la perte d'entraînement en provenance des PED qu'à cause de l'écart plus grand des valeurs du carbone. Seule la région Moyen-Orient profite du retard des politiques climatiques, mais sa croissance économique reste très inférieure à celle du scénario de référence.

### 6.2.2 EMISSIONS MONDIALES

Le bilan énergétique des PED est modifié selon deux mécanismes : l'effet du ralentissement économique sur la demande finale et le report du sentier de valeur du carbone de 5 ans. L'exemple de la Chine en fournit une illustration très claire (Figure 66) :

- en 2020, le report de la contrainte carbone induit un panier énergétique plus riche en charbon, au détriment des énergies renouvelables, du gaz naturel et du nucléaire ;
- dès 2030, le ralentissement économique lié au fardeau de la valeur croissante du carbone induit une baisse nette de la demande finale et donc de la production d'énergie primaire. Cette baisse se traduit majoritairement par une économie de nucléaire (56% de la baisse), mais aussi de charbon (30% de la baisse), de gaz et d'ENR. Ce schéma s'amplifie jusqu'en 2050, où la production d'énergie primaire chinoise est inférieure de 13% par rapport au scénario non mimétique.

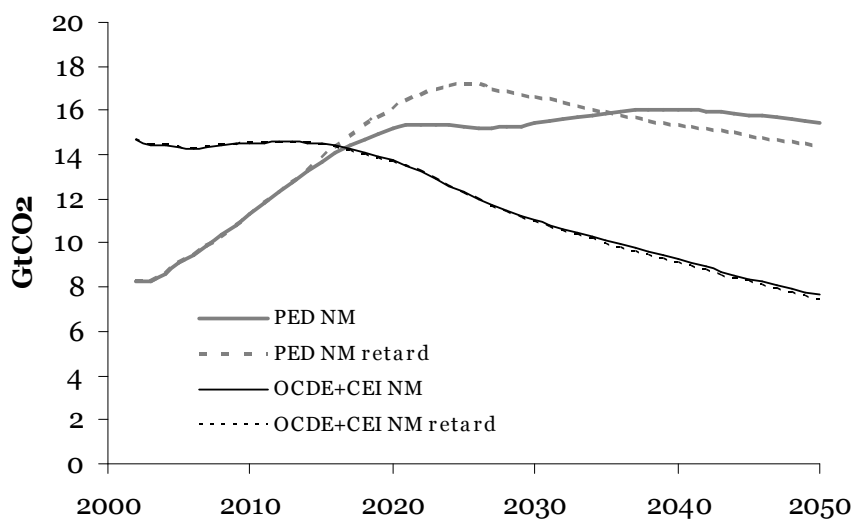
En Inde, c'est le développement du nucléaire qui absorbe presque la totalité de la baisse de demande finale liée au ralentissement économique.



**Figure 66 : Variation de volume dans la production d'énergie primaire, Chine, scénario avec retard par rapport au scénario non mimétique**

Au total, la production d'énergie primaire est diminuée de 1200 Mtep (8%) en 2050, soit une économie de 540 Mtep d'énergie nucléaire, 240 Mtep de gaz, 190 Mtep de charbon, 80 Mtep d'énergies renouvelables. Par conséquent, les émissions mondiales en 2050 sont inférieures de 3% par rapport au scénario non mimétique

Cependant, dans la transition, les émissions mondiales connaissent une croissance supérieure liée au report des politiques climatiques dans les pays en développement. Comme le montre la Figure 67, les émissions de ces pays là continuent de croître jusqu'en 2025 avant de redescendre, générant au total 20 Gt de CO<sub>2</sub> cumulés entre 2020 et 2035. Au-delà, l'effet de la baisse de croissance permet de ramener le surplus des émissions cumulées dans les PED à 10 GtCO<sub>2</sub>.



**Figure 67 : Emissions de CO<sub>2</sub>, effet du retard des politiques climatiques dans le PED**

## 7 Conclusion

Le scénario non mimétique présenté ici correspond à une démarche nouvelle dans les exercices de modélisation et d'évaluation des politiques climatiques, incluant l'examen des possibles bifurcations des styles de développement et d'organisation spatiale. La pratique des modélisateurs se limite habituellement à représenter une valeur croissante du carbone et à étudier les évolutions technologiques induites par cette valeur du carbone, sans éclairage de la contribution des infrastructures, des styles de vie ou des alternatives d'organisation du territoire à l'évolution des émissions de gaz à effet de serre. La construction du scénario non mimétique est fondé sur le constat de cette lacune et propose une première tentative pour y remédier, en incluant dans le comportement des modèles POLES et IMACLIM-R des évolutions contrastées des infrastructures, des bâtiments et des modes de vie, en fonction des spécificités régionales.

Les résultats de ce scénario « non mimétique » montrent, en comparaison avec le scénario précédent, que des politiques climatiques intégrées, incluant non seulement un prix du carbone croissant mais aussi des interventions cohérentes sur le bâti, le système de production électrique et les infrastructures de transport, permettent de réduire les émissions de GES en vue d'une stabilisation à 450 ppm CO<sub>2</sub> tout en permettant une croissance supplémentaire dès 2020 en induisant un découplage anticipé vis-à-vis des ressources fossiles.

Les deux variantes présentées dans la seconde partie de ce rapport ont pour but d'éclairer deux points particuliers caractéristiques des politiques climatiques étudiées dans les scénarios précédents :

- La variante sans capture et séquestration du carbone montre que cette technologie forme avec le nucléaire et les énergies renouvelables un trinôme d'options difficile à contourner dans tout scénario de stabilisation à 450 ppm CO<sub>2</sub>. En l'absence de CCS, le respect de la contrainte d'émissions nécessite un déploiement additionnel de centrales nucléaires et d'énergies renouvelables par rapport au scénario non mimétique dans lequel le déploiement de ces technologies est déjà très ambitieux. Le surcoût lié à l'absence de CCS est le plus élevé pour les régions dont le système énergétique reste le plus longtemps fondé sur le charbon.
- La variante avec retard des politiques climatiques dans les pays émergents et en développement montre qu'il existe une fenêtre d'opportunité importante dans laquelle les politiques climatiques représentent aussi une opportunité de croissance économique, tant que les pays émergents et en développement ne sont pas bloqués dans des schémas d'organisation et d'infrastructures intensifs en carbone. Cette fenêtre d'opportunité économique se double d'une fenêtre d'opportunité restreinte sur le système climatique car la stabilisation à 450 ppm CO<sub>2</sub> exige que les émissions mondiales décroissent avant 2030.