



Étude « *Scénarios sous Contrainte Carbone* »

FONDDRI
Fondation pour le développement durable et les relations
internationales

Scénarios « REF » et « F4 mimétique »

Résultats des simulations harmonisées
POLES / IMACLIM-R

Avril 2007

Introduction

Suite aux travaux de développement des modèles POLES et IMACLIM-R entrepris en 2005, la deuxième année de l'étude *Scénarios sous Contrainte Carbone*, financée par la FONDDRI, a permis la production de deux premiers scénarios mondiaux, avec une représentation explicite de la croissance économique et de son contenu énergétique et matériel : un scénario de référence d'une part et un premier scénario de stabilisation de la concentration du CO₂ à 450 ppm d'autre part.

La plausibilité et la cohérence interne de ces scénarios ont été renforcées par un effort méthodologique important, comprenant (i) l'appui d'ENERDATA pour la modélisation et la formulation d'hypothèses de projections, (ii) une harmonisation approfondie des projections des deux modèles POLES et IMACLIM-R¹, (iii) un dialogue itératif avec les partenaires industriels sur les hypothèses et résultats de ces scénarios². Ce rapport clôture les travaux réalisés au titre de l'année 2006 en présentant les principaux indicateurs des deux scénarios produits.

***NB :** Ces scénarios sont exploratoires et les résultats présentés dans ce rapport seront soumis à une validation critique définitive au cours de l'année 2007. Les auteurs du rapport seront heureux de recevoir tout commentaire ou suggestion qui puisse contribuer à l'amélioration de ce travail. Les chiffres et analyses présentés ici n'engagent que leurs auteurs, aucune des institutions partenaires du projet de recherche ne peut être tenue responsable d'un quelconque message présent dans ce rapport.*

Contact :

Renaud Crassous

crassous@centre-cired.fr

¹ Cf. « Note méthodologique : Le dialogue des modèles POLES et IMACLIM-R », Mars 2007.

² Au cours des comités de pilotages successifs en 2005 et 2006, et à l'occasion des échanges autour du questionnaire de validation produit en octobre 2006.

Précision sur le rôle du scénario de référence

Dans l'étude des trajectoires de réduction des émissions de gaz à effet de serre, le recours à un ou plusieurs scénarios de référence est un point de départ systématique. Un scénario de référence joue toujours le rôle du point d'ancrage pour l'application de politiques climatiques données et la mesure de leur coût et de leur efficacité. Cette attitude est tout à fait légitime lorsque l'on étudie des politiques modérées, qui ne changent qu'à la marge la trajectoire de référence. Par contre, dans le cas de politiques pouvant induire des bifurcations très importantes sur plusieurs décennies, la comparaison des trajectoires à un tel horizon devient un exercice complexe, qui s'étend au-delà de la comptabilité des « pertes » de croissance, puisqu'il s'agit en fait de comparer des modes de vies différents, des préférences qui ont pu évoluer de manière très différente, des itinéraires techniques divergents.

Malgré cela, si l'on reste prudent sur l'interprétation des comparaisons quantitatives entre les trajectoires, cette étape reste importante dans le processus de modélisation. En particulier elle est nécessaire pour analyser **le comportement des modèles et le paramétrage** retenu : ce paramétrage – qui sera conservé en dehors du prix du carbone ou des autres leviers de politique climatique bien identifiés – est déterminant pour le contenu des scénarios de réduction comme pour celui d'un scénario de référence. On peut citer par exemple les hypothèses sur le moteur de la croissance, l'acceptabilité d'un recours au nucléaire civil, les élasticités prix de la demande, les réserves d'hydrocarbures, le degré d'ouverture internationale et d'intégration financière, etc.

Sommaire

1	SCENARIO DE REFERENCE	7
1.1	LA CROISSANCE ECONOMIQUE : FORCES MOTRICES ET CROISSANCE REALISEE.....	7
1.1.1	<i>Hypothèses</i>	7
	Démographie.....	7
	Productivité du travail.....	9
	Épargne	9
	Régime international	10
1.1.2	<i>Résultats</i>	10
	Croissance économique.....	10
	Commerce international	11
1.2	STYLES DE DEVELOPPEMENT	12
1.2.1	<i>Hypothèses qualitatives</i>	12
1.2.2	<i>Résultats</i>	13
	Résidentiel : surfaces de logement	13
	Transport : Parc de Véhicules et Partage modal.....	14
	Changement structurel de la consommation finale.....	16
1.3	CONTENU ENERGETIQUE	17
1.3.1	<i>Hypothèses</i>	17
	Réserves fossiles	17
	Valeur du carbone	18
	Progrès technique et gains d'efficacité.....	18
	Nucléaire	19
	Energies renouvelables.....	19
1.3.2	<i>Résultats</i>	19
	Demande finale d'énergie	19
	Energie primaire.....	20
	Panier technologique de Production d'électricité.....	22
	Tensions sur les ressources fossiles : prix et volumes de production	23
	Capture et Séquestration du carbone	25
	Facture énergétique	25
1.4	SECTEURS INDUSTRIELS	27
1.4.1	<i>Hypothèses</i>	27
	Technologies	27
	Indicateurs d'activités consommatrices de matériaux et intensités matériaux.....	28
1.4.2	<i>Résultats</i>	28
	Demande de matériaux : acier, ciment, aluminium	28
1.5	EMISSIONS DE CO2	30
2	SCENARIO 450 PPMV – F4 MIMETIQUE	32
2.1	INSTRUMENTS	32
2.1.1	<i>Hypothèses</i>	32
	Enveloppe d'émissions.....	32
	Style de développement « mimétique ».....	33
2.1.2	<i>Résultats</i>	34
	Valeurs du carbone.....	34
2.2	DEVELOPPEMENT ENERGETIQUE SOUS CONTRAINTE CARBONE	35
	Demande finale d'énergie	35
	Energie Primaire	36
	Mix technologique de Production d'électricité	37
	Rôle des ressources fossiles	38
	Capture et Séquestration du carbone	39
	Facture énergétique	41
2.3	SECTEURS INDUSTRIELS	43
2.3.1	<i>Hypothèses d'intensité matériaux</i>	43
	La conception des bâtiments	43
	La structure des bâtiments.....	43
	La conception des véhicules.....	44
2.3.2	<i>Des demandes de matériaux soutenues</i>	46
2.4	BILAN ECONOMIQUE	50
3	CONCLUSION : ACQUIS ET TRAVAUX FUTURS.....	52

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 SRES³), 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'achat⁴). 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.

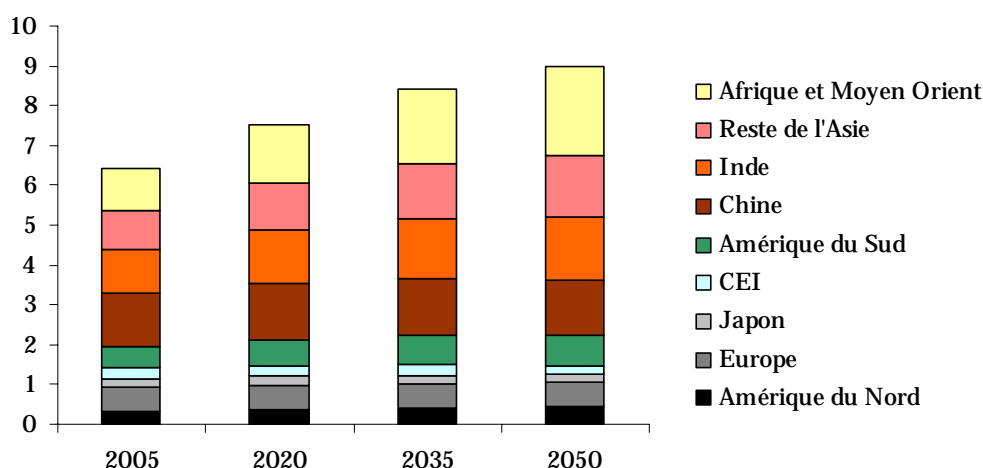


Figure 1 : Population totale (Milliards d'habitants)

³ 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.

⁴ 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 active⁵ 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%.

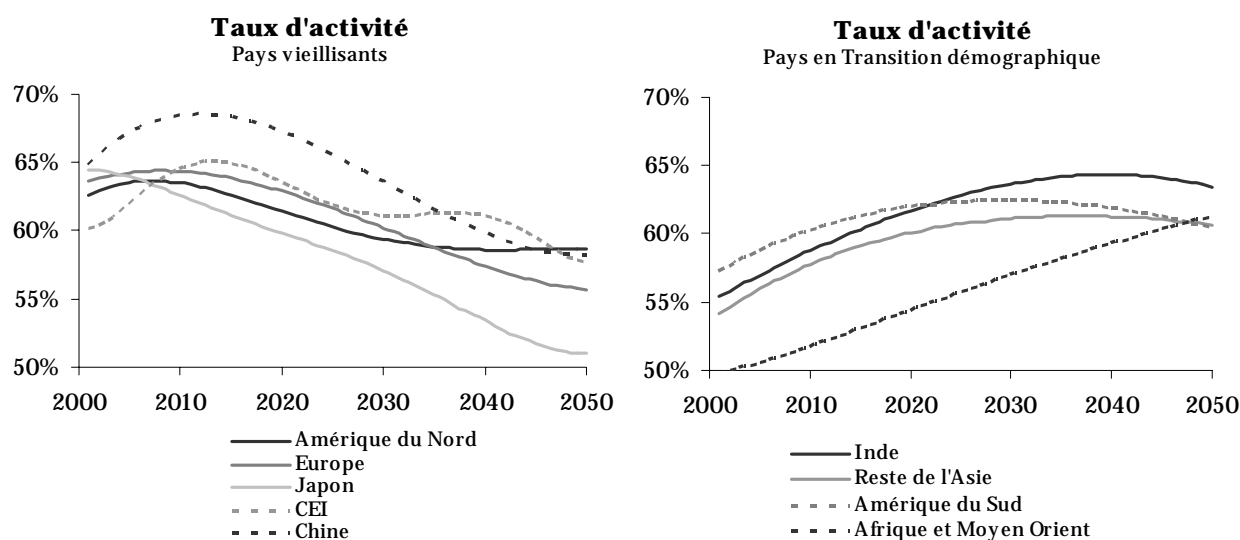


Figure 2 : Ratio de la population active sur la population totale

	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

⁵ 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.

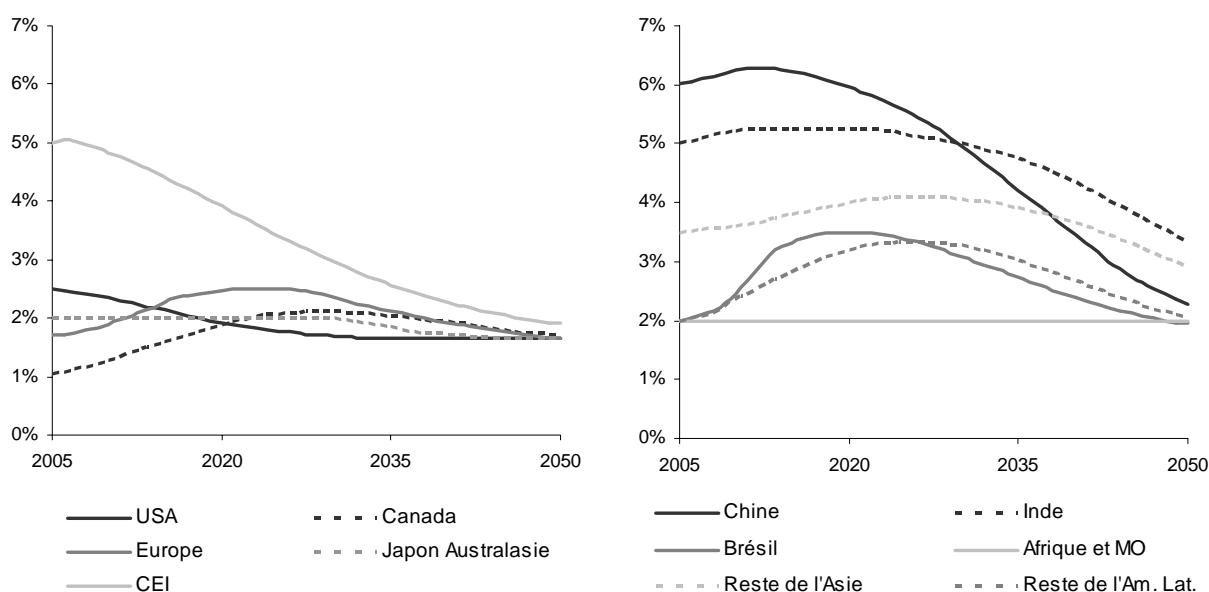


Figure 3 : croissance de la productivité moyenne du travail

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.

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

Tableau 2 : Taux d'épargne régionaux

Régime international

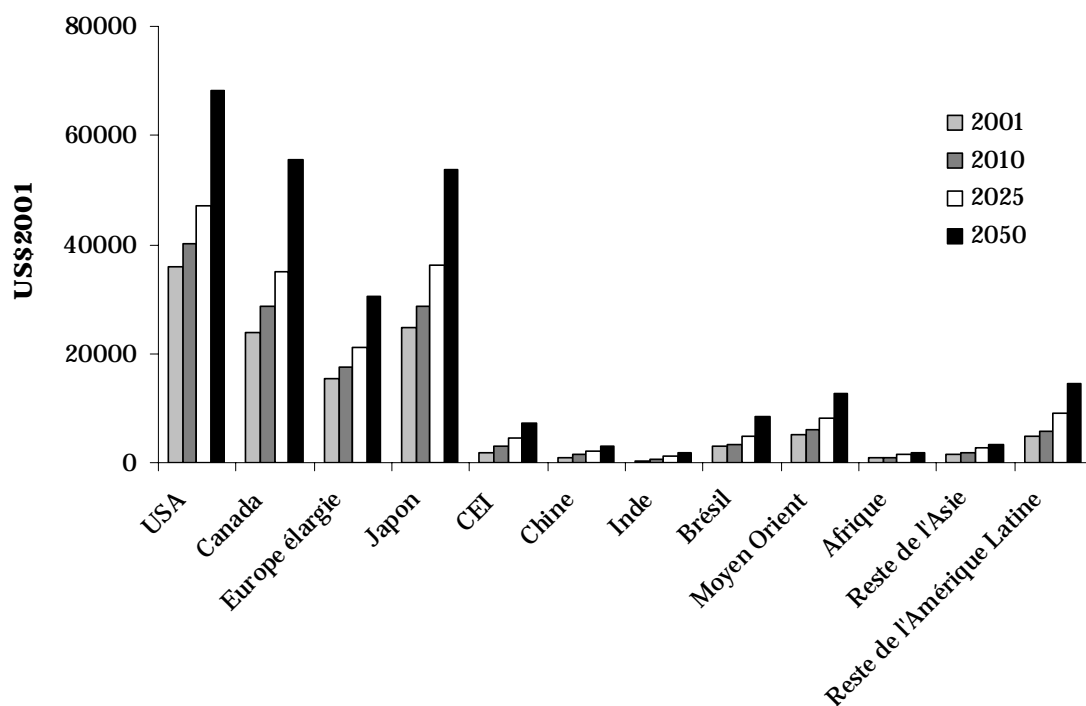
Le scénario de référence est un scénario de globalisation continue et stable. Les paramètres de commerce international correspondent à une compétition internationale continue. Sur les marchés des capitaux, les flux s'ajustent progressivement pour permettre aux balances des capitaux de converger vers 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 fossiles⁶ : elle passe de 11% en 2005 à 18% en 2030 et 20% en 2050.

	2005-2020	2020-2035	2035-2050
Commerce total	3.6%	2.7%	2.1%
Commerce d'énergie	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.

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

⁶ 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 m² 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.

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

Tableau 6 : surface de logement (m² 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^{ards} de m² 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).

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

	2005	2030	2050
USA	212185	260561	278452
Canada	15285	20171	23593
Europe élargie	224864	256103	269593
Japon	54510	54841	51110
CEI	32990	58969	75199
Chine	10525	99947	181360
Inde	9865	131535	304131
Brésil	17358	49845	74971
Moyen-orient	12121	36590	80235
Afrique	15117	62934	164628
Reste de l'Asie	38690	125562	226964
Reste de l'Amérique Latine	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
Conventionnel	673323	1153758	1196463
Pile à combustible à gas	0	0	16
Pile à combustible à H2	0	1	25
Hybride	130	34510	269261
Electrique	616	54779	222923
Conventionnel à H2	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
USA	3872	4675	4952	1,3
Canada	290	314	316	1,1
Europe élargie	3710	3821	3836	1,0
Japon	868	860	793	0,9
CEI	456	803	1017	2,2
Chine	138	1292	2334	16,9
Inde	111	1465	3368	30,3
Brésil	223	689	1075	4,8
Moyen-orient	202	597	1290	6,4
Afrique	223	904	2328	10,4
Reste de l'Asie	611	1952	3508	5,7
Reste de l'Amérique Latine	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 CO₂, 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.

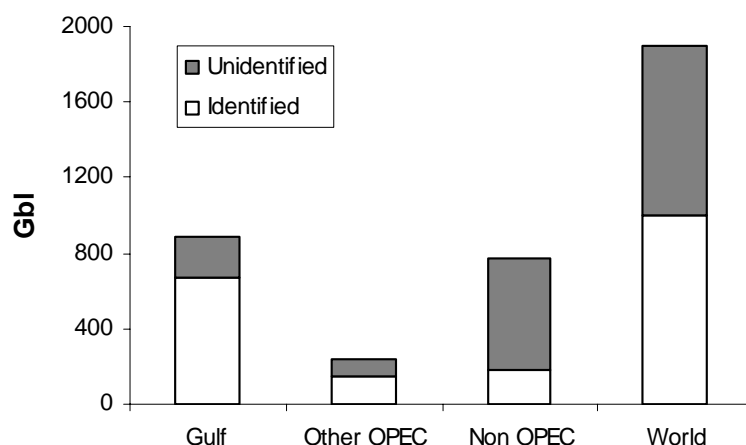


Figure 4: réserves de pétroles estimées en 2001

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 €/CO₂ en 2010, croissant jusqu'à 30 € en 2050.

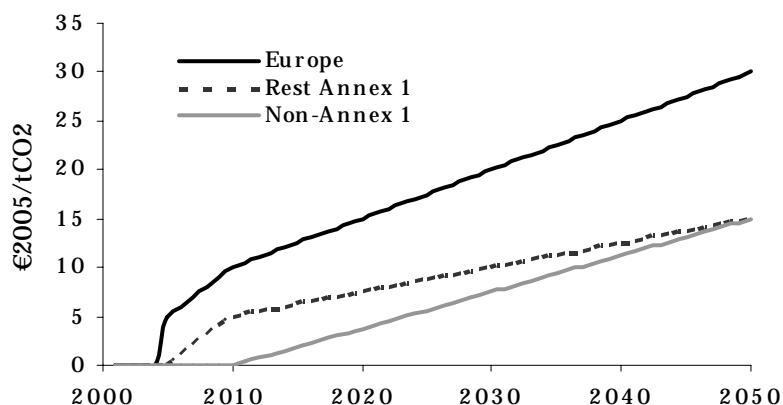


Figure 5 : Valeur du carbone – scénario de référence

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^{ème} 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.

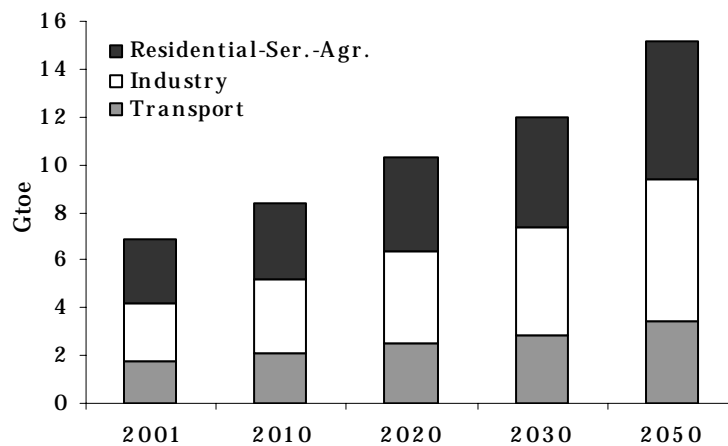


Figure 6 : Consommation d'énergie finale - Monde

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.

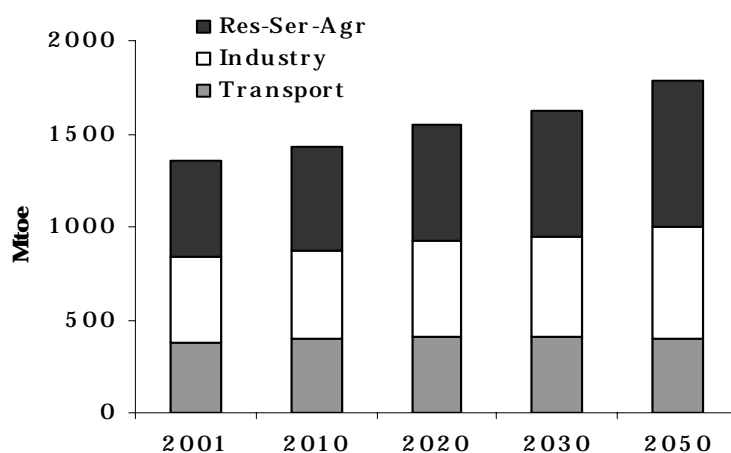


Figure 7 : Consommation d'énergie finale – Europe

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

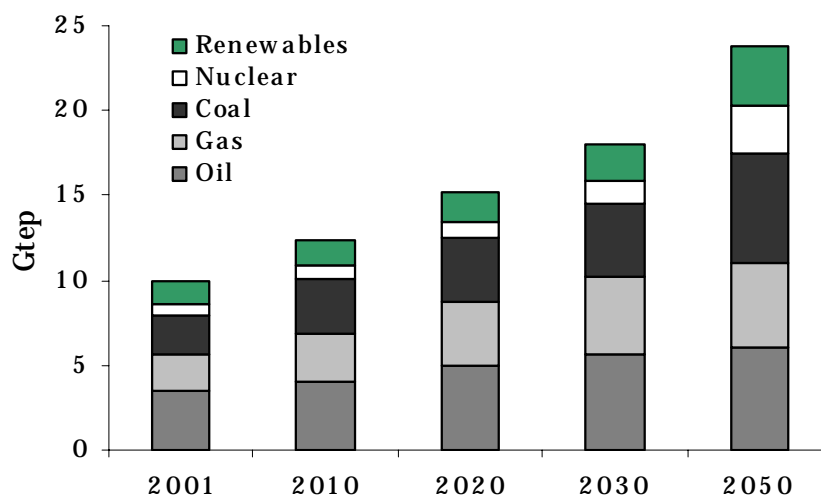


Figure 8 : Production d'énergie primaire - Monde

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.

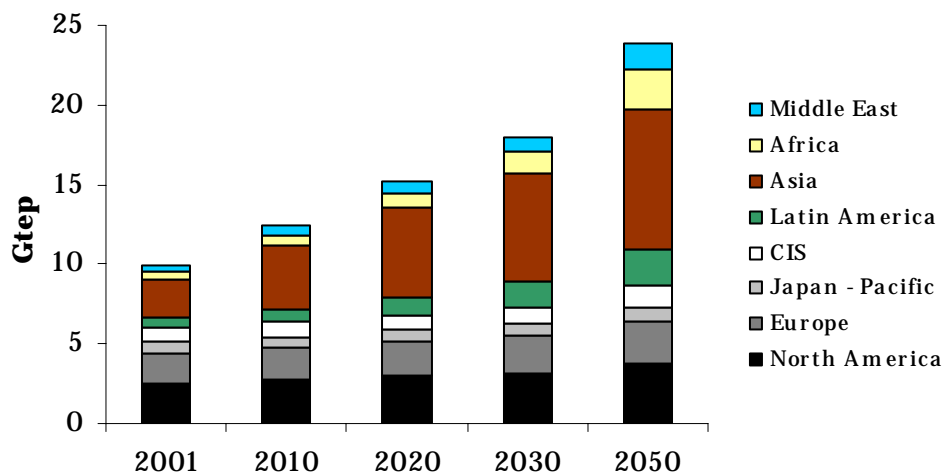


Figure 9 : Répartition de la demande d'énergie primaire par région

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.

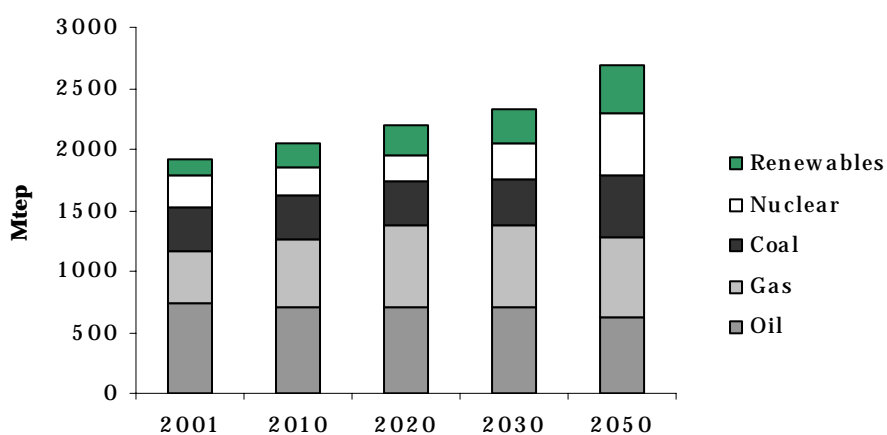


Figure 10 : Consommation d'énergie primaire - Europe

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.

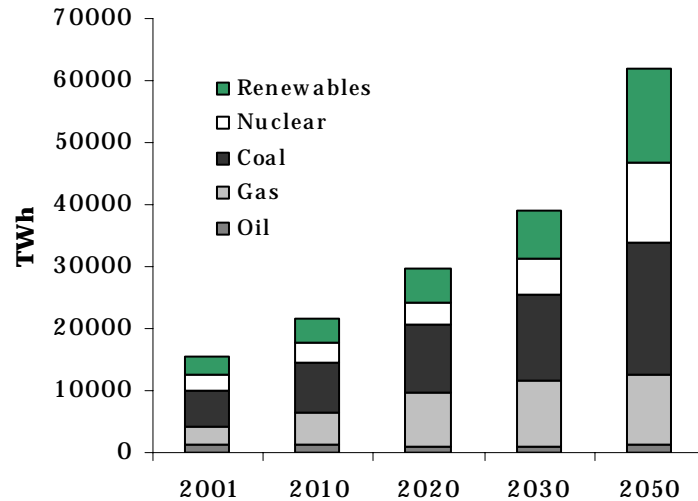


Figure 11 : Mix de production d'électricité - Monde

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.

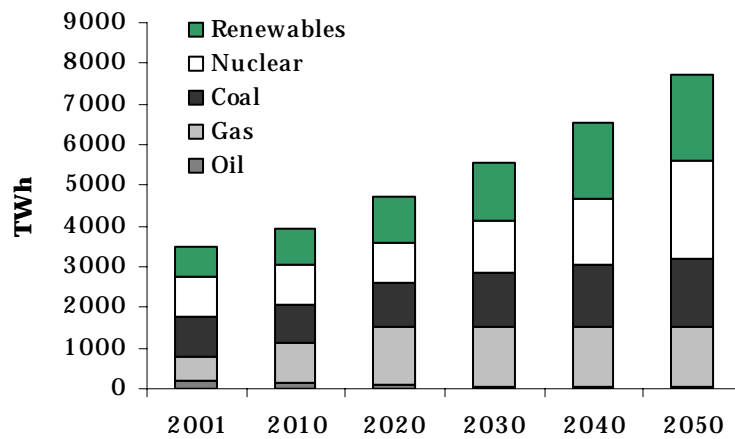


Figure 12 : Mix de production d'électricité – Europe

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.

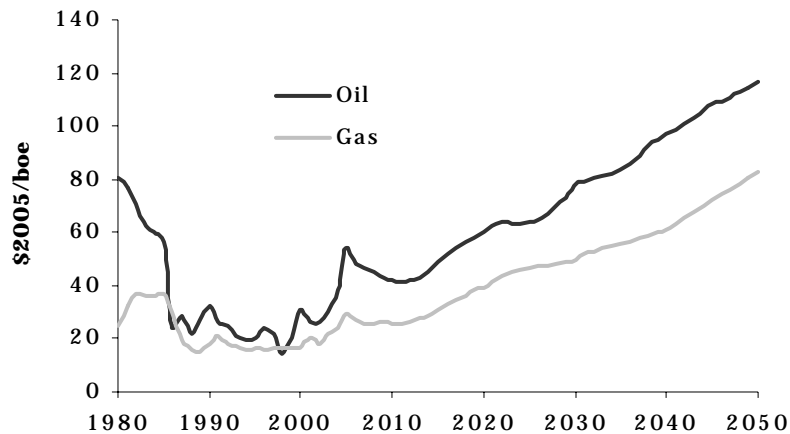


Figure 13 : prix internationaux du pétrole brut et du gaz naturel

Le profil de production pétrolière mondiale 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.

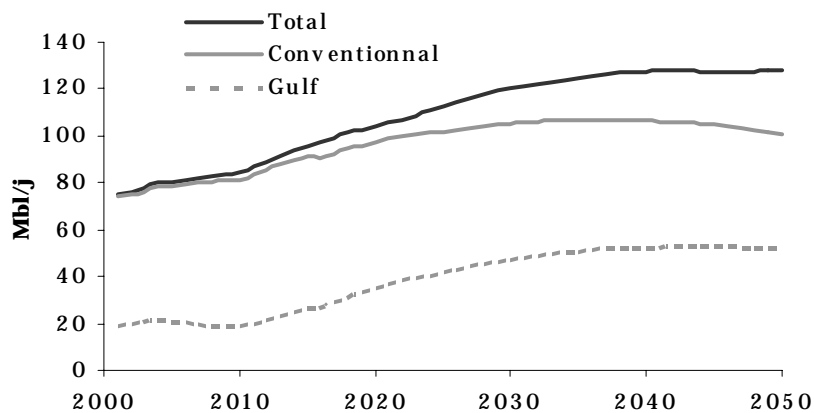


Figure 14 : Production totale de pétrole

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.

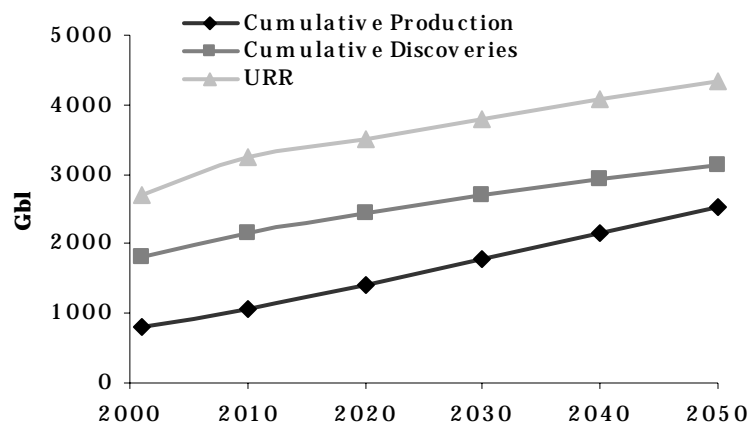


Figure 15 : Ressources de pétrole conventionnel – Monde
URR : Ultimate Recoverable Resources

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.

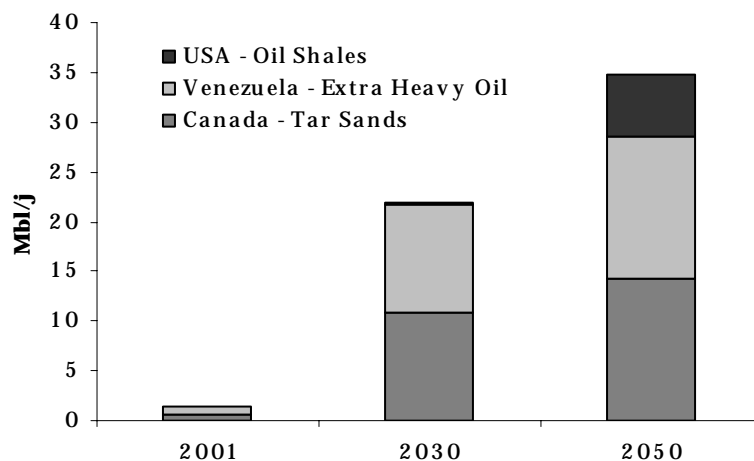


Figure 16 : Production de pétroles non conventionnels

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 CO₂, si bien que cette technologie représente déjà 8 % des émissions totales brutes en 2050.

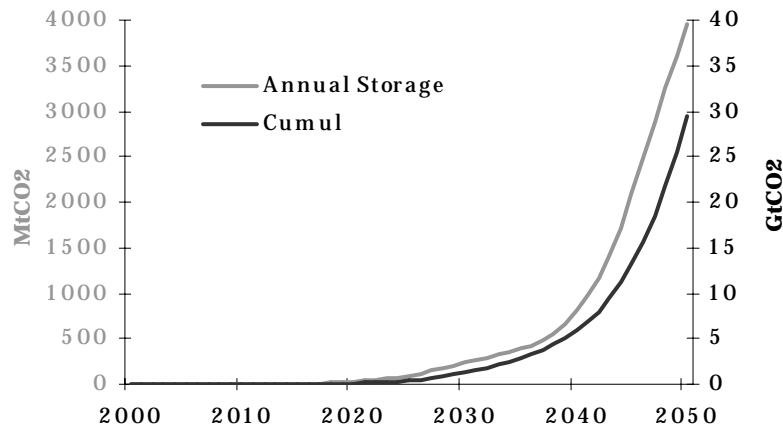


Figure 17 : Développement de la séquestration du carbone

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).

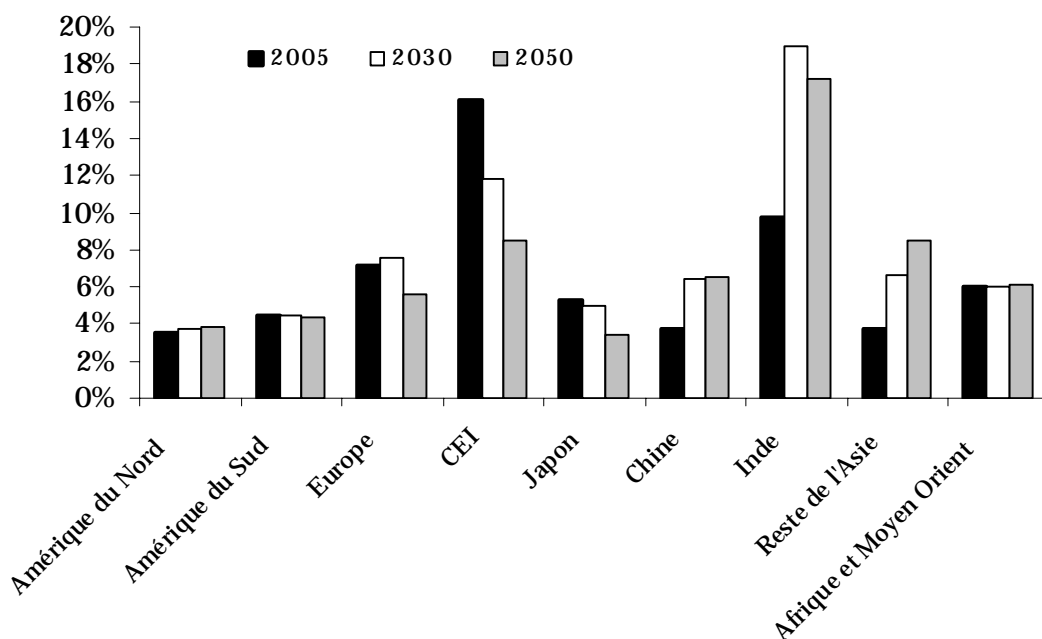


Figure 18 : Fardeau énergétique des ménages
(ratio des dépenses d'énergie sur dépenses totales)

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).

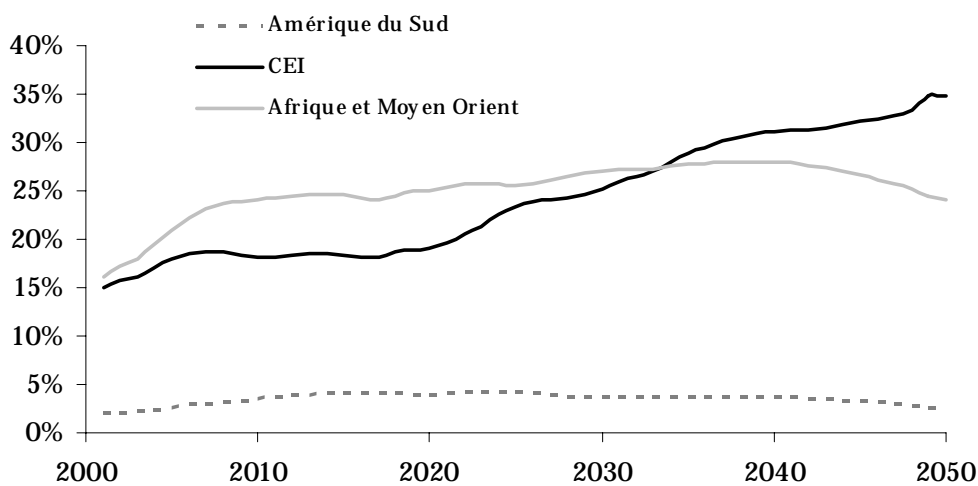


Figure 19 : Ratio du solde commercial énergétique sur PIB – pays exportateurs

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%.

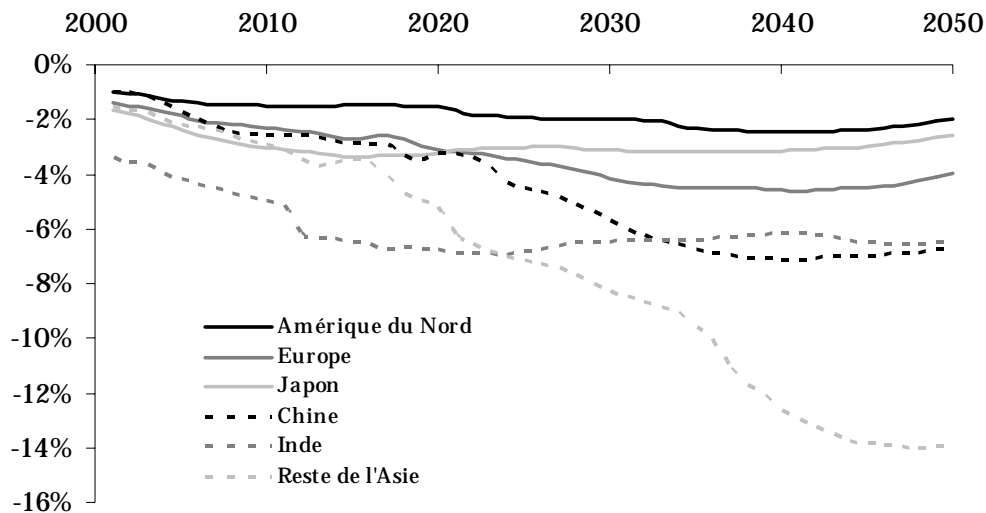


Figure 20 : Ratio du solde commercial énergétique sur PIB – pays importateurs

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 POLES⁷. 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)

⁷ 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.

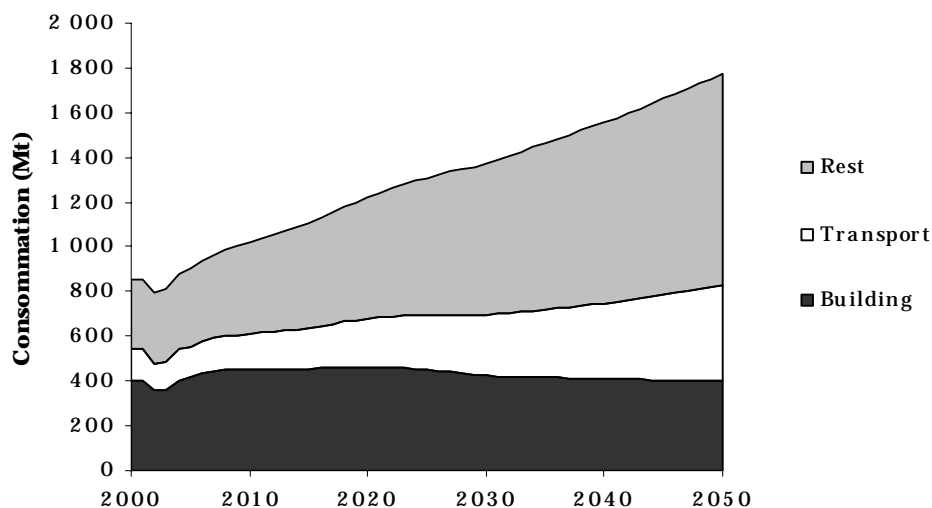


Figure 21 : Consommation d'Acier par poste

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.

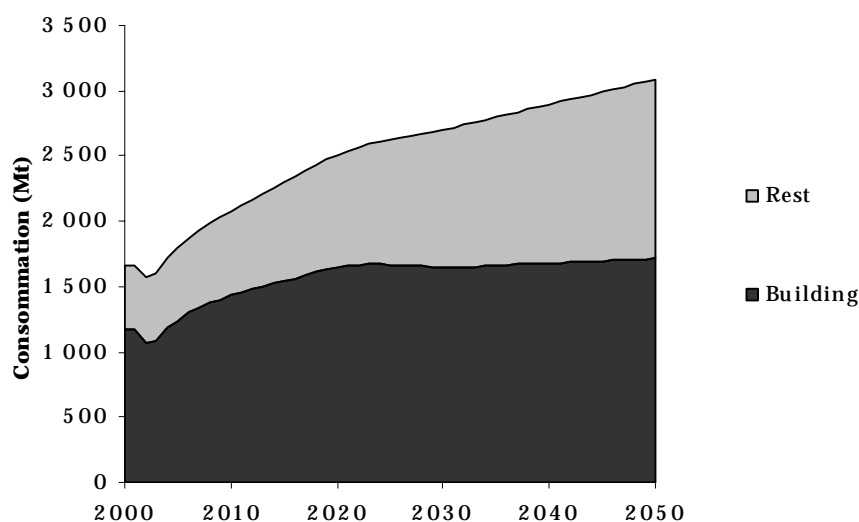


Figure 22 : Consommation de Ciment par poste

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.

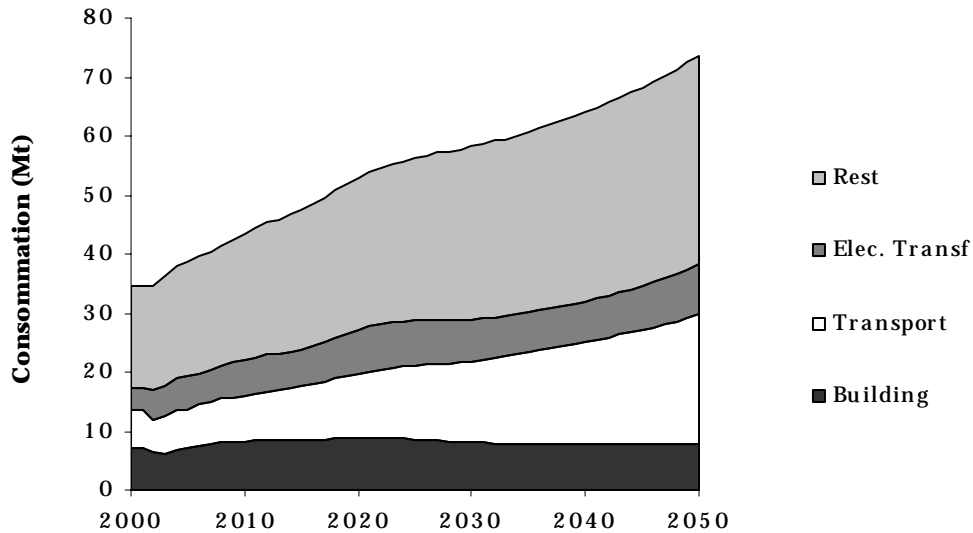


Figure 23 : Consommation d'Aluminium par poste

1.5 Emissions de CO₂

Dans la projection de référence, celle d'un monde sans forte contrainte carbone, les émissions passent de 23 GtCO₂ aujourd'hui à 54 GtCO₂ 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.

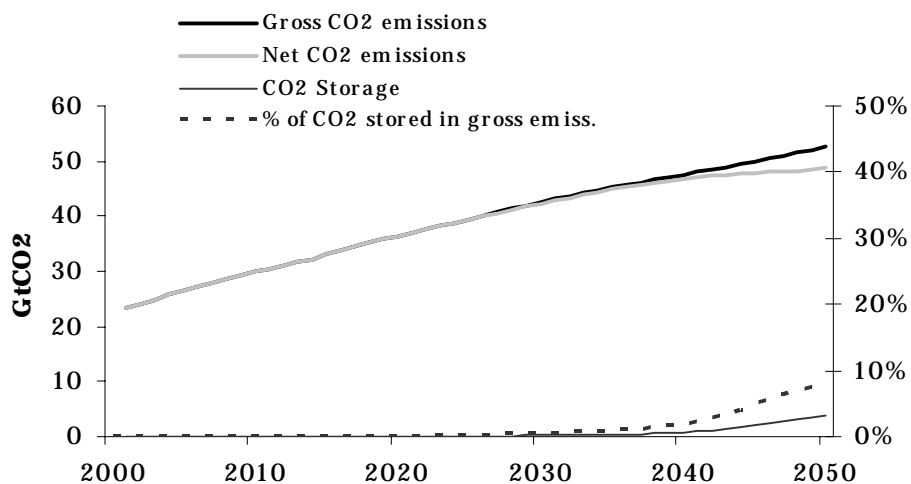


Figure 24 : Emissions de CO₂

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 CO₂. 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 CO₂ 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.

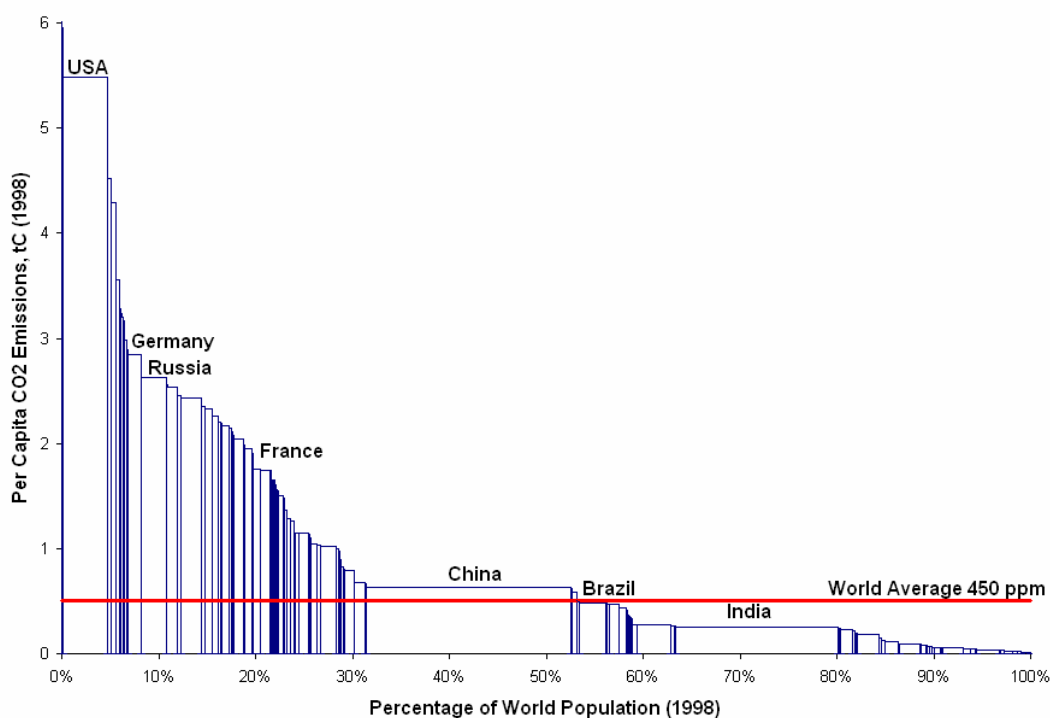


Figure 25 : Emissions par habitant et objectif de convergence pour une stabilisation à 450 ppm

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 élevé⁸.

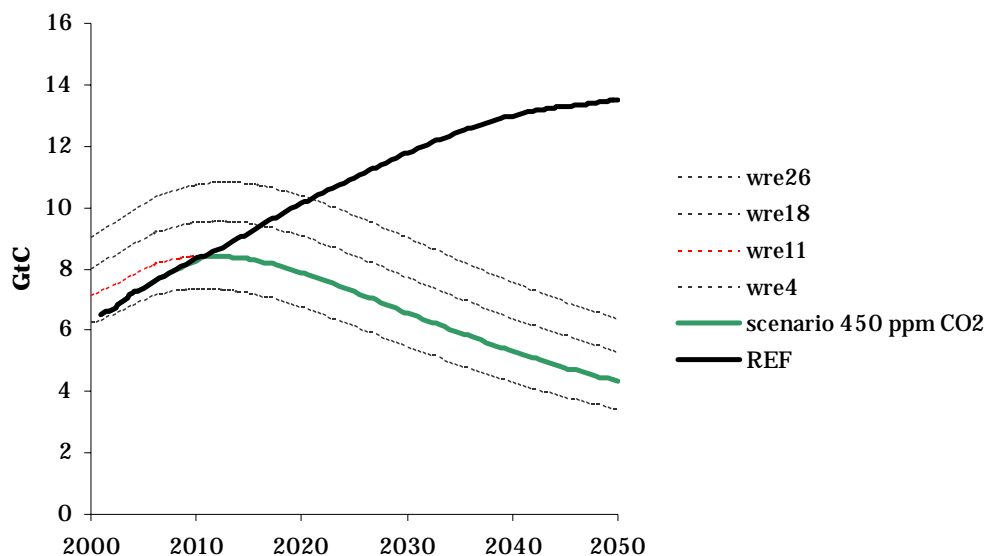


Figure 26 : Trajectoire de stabilisation 450 ppm CO₂

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.

⁸ 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 €/tCO₂. 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.

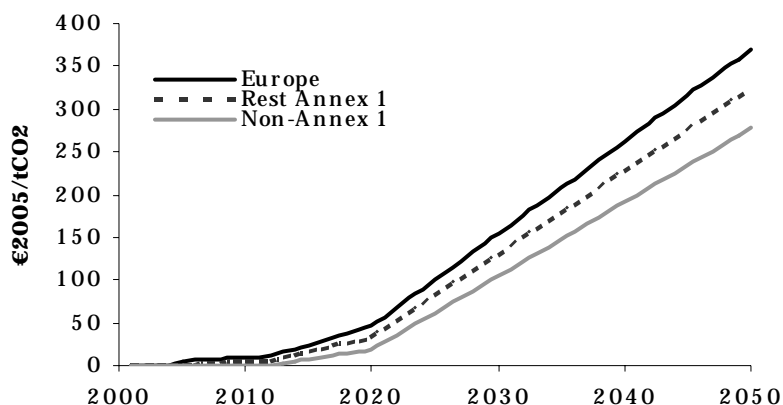


Figure 27 : Valeur du carbone – scénario 450 ppm / F4 mimétique

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.

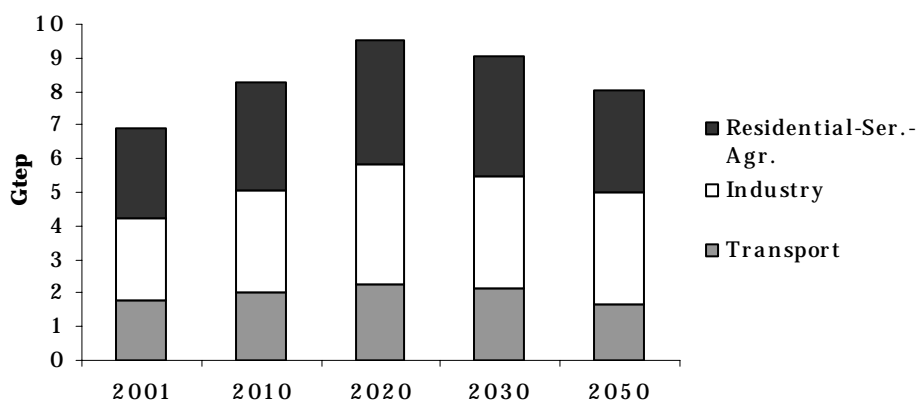


Figure 28 : Consommation d'énergie finale - Monde

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.

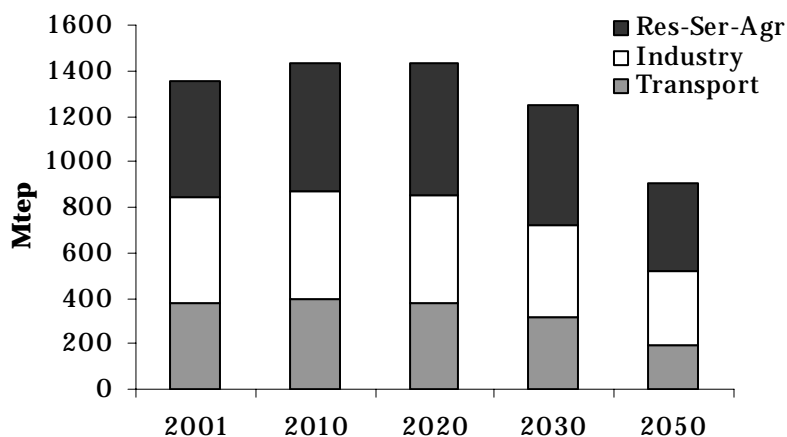


Figure 29 : Consommation d'énergie finale - Europe

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.

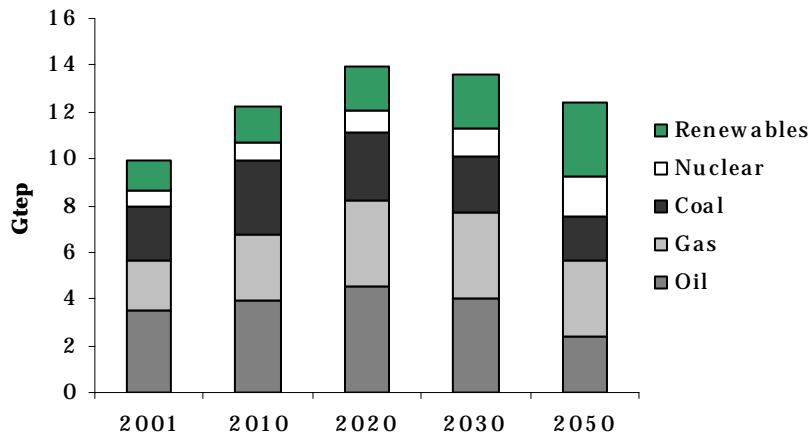


Figure 30 : Production d'énergie primaire – Monde

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.

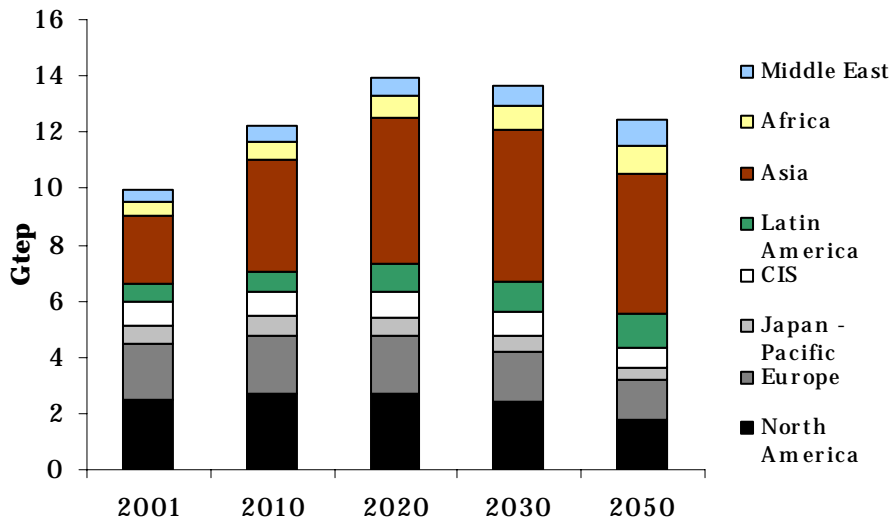


Figure 31 ; Répartition de la demande d'énergie primaire par région

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).

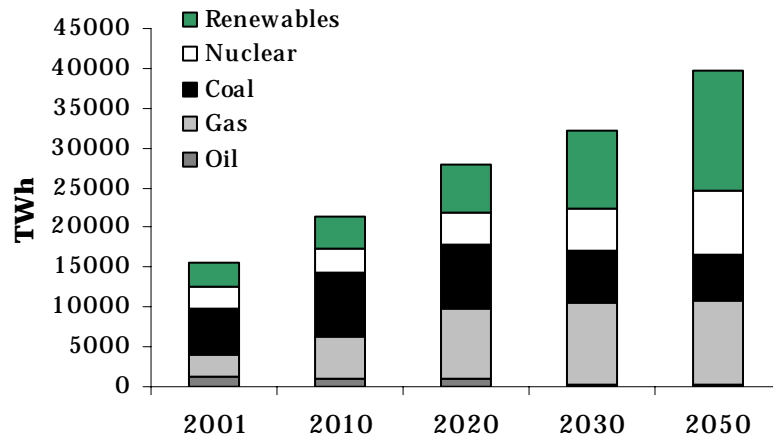


Figure 32 : Mix de production d'électricité – Monde

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 ».

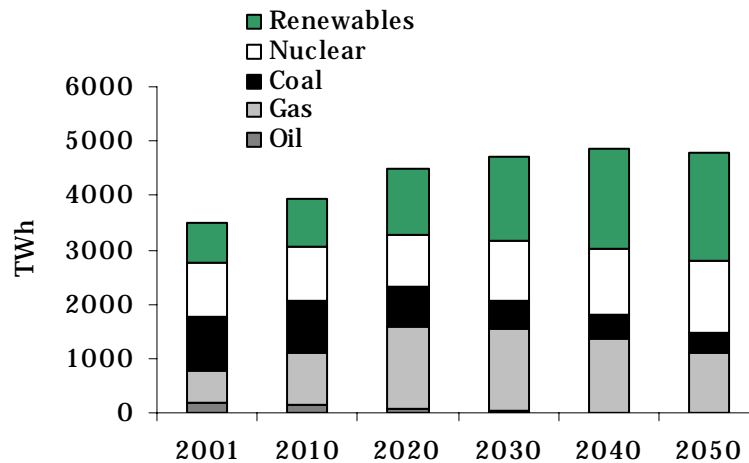


Figure 33 : Mix de production d'électricité – Europe

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.

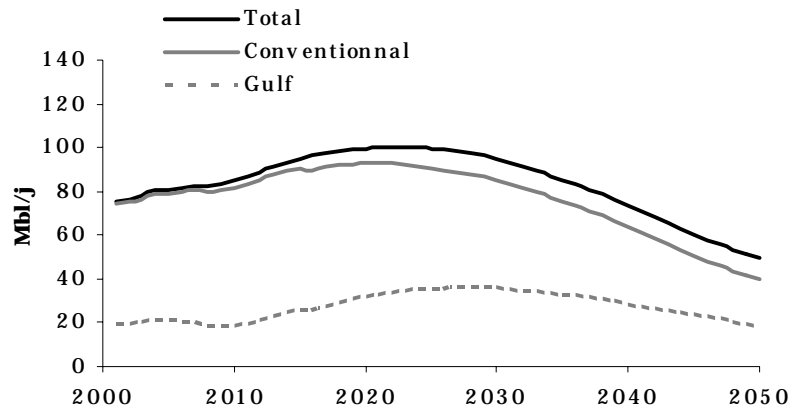


Figure 34 : Production de pétrole – scénario 450 / F4

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.

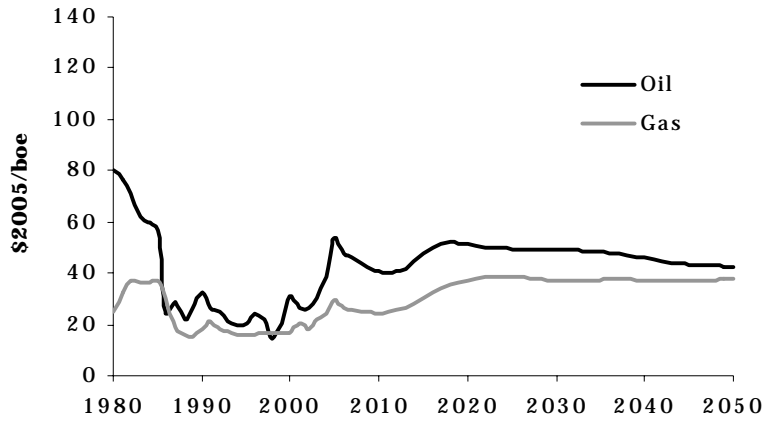


Figure 35 : prix mondiaux du pétrole brut et du gaz naturel

Capture et Séquestration du carbone

La Capture et Séquestration du CO₂ joue un rôle très important dans ce scénario, puisqu'au plan mondial elle représente 11 GtCO₂ en 2050, et un stockage total cumulé de 220 GtCO₂.

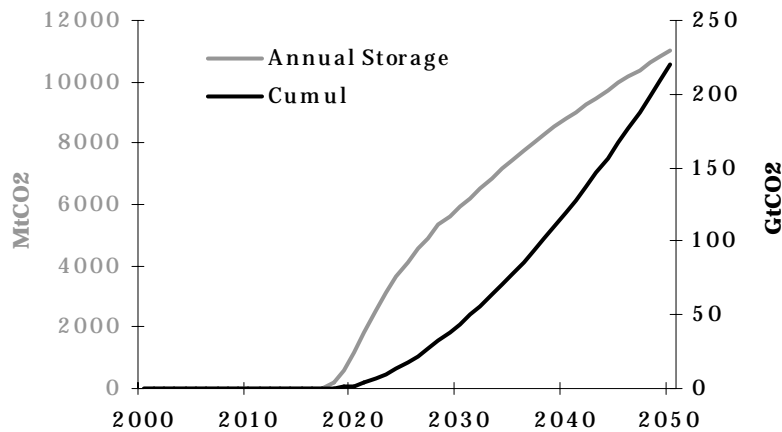


Figure 36 : Développement de la séquestration du carbone

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.

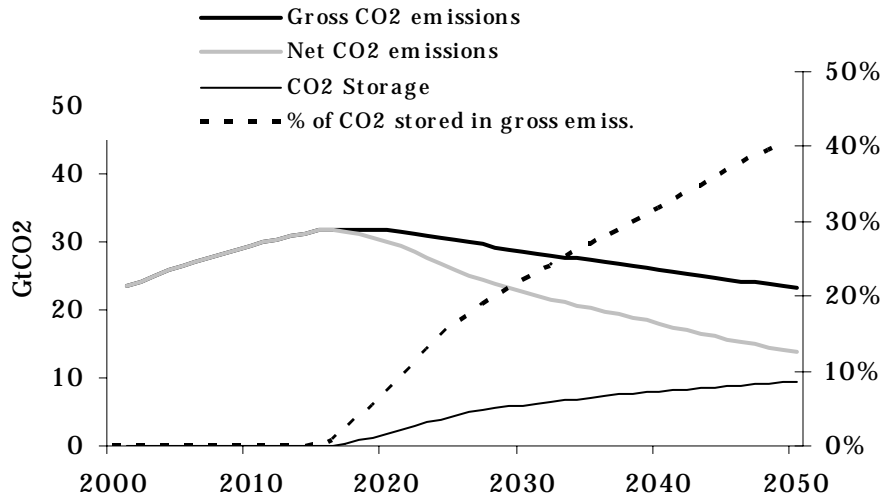


Figure 37 : émissions de CO₂ et niveau de séquestration

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.

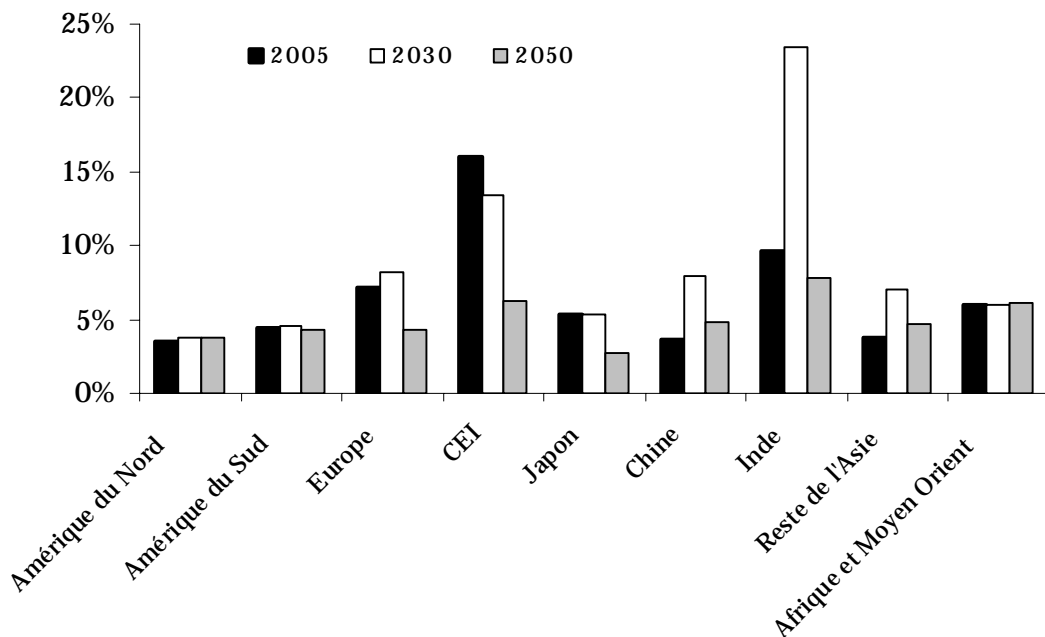


Figure 38 : Fardeau énergétique des ménages – scénario 450 / F4

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).

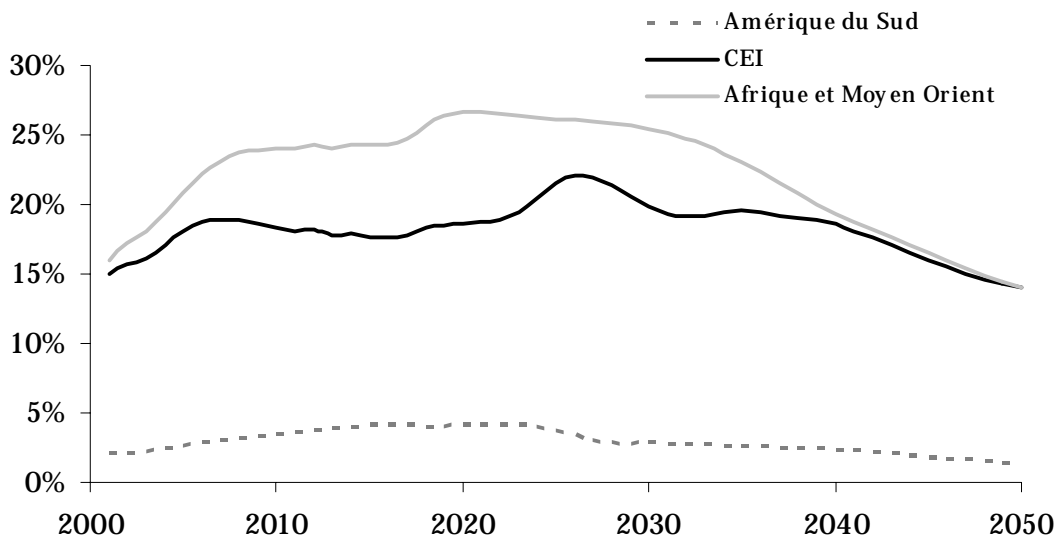


Figure 39 : Ratio du solde commercial énergétique sur PIB – pays exportateurs

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.

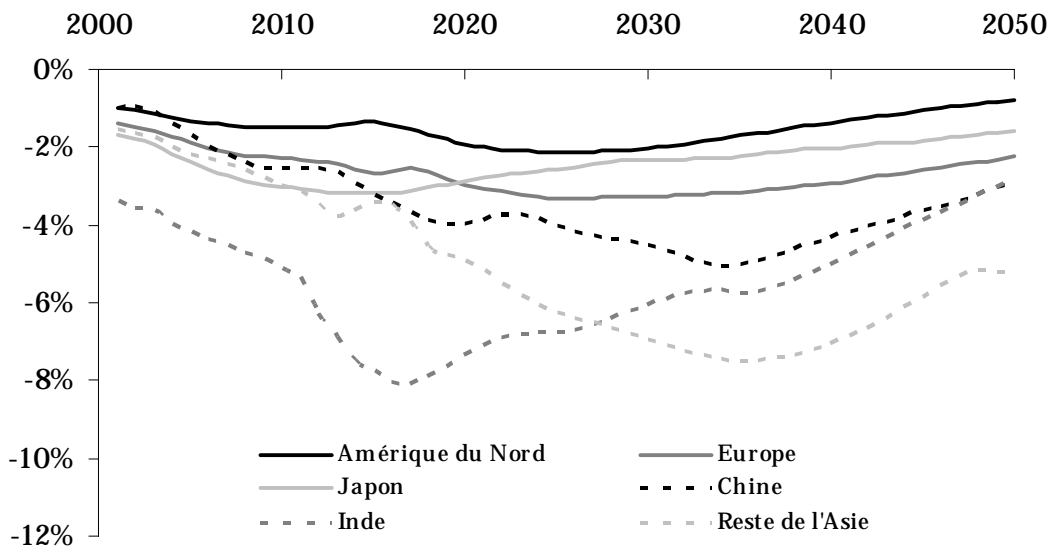


Figure 40 : Ratio du solde commercial énergétique sur PIB – pays importateurs

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 CO₂, 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 m²/logement pour les régions « froides » et de 2 m² /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 CO₂ 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)⁹, on estime que la construction d'un bâtiment avec une structure en bois consomme 12% de moins de ciment par m² 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 collectifs¹⁰.

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 CO₂ ». 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).

⁹ Etude disponible sur le site <http://www.corrim.org/reports/>

¹⁰ 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.

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

	2005	2030	2050
Conventionnel	1.0	0.8	0.2
Pile à combustible à gas	1.0	1.7	0.4
Pile à combustible à H2	1.0	2.1	0.7
Hybride	1.7	3.7	2.5
Electrique	1.4	2.6	1.8
Conventionnel à H2	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 études¹¹. Sur cette base, les poids des véhicules considérés dans notre étude sont les suivants pour les voitures particulières:

¹¹ 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.

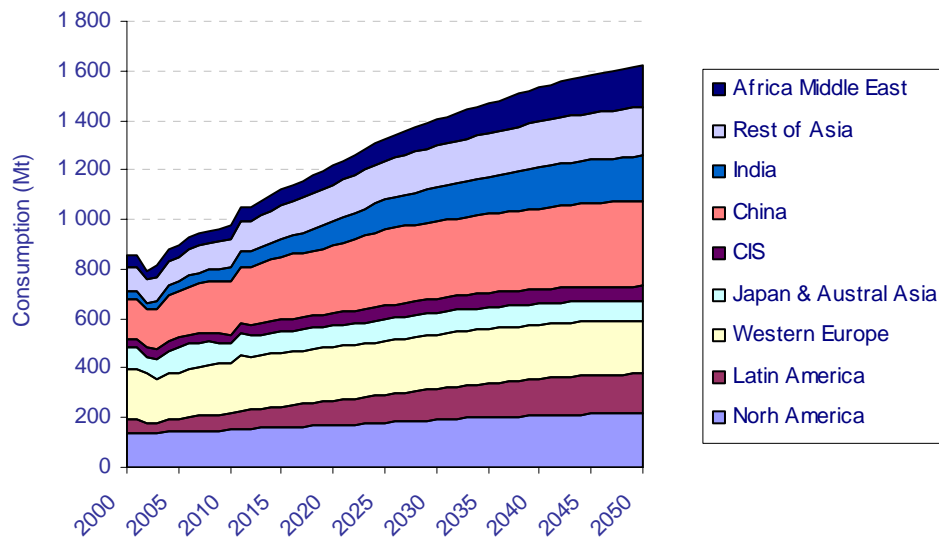


Figure 41 : Consommation d'Acier par région

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%.

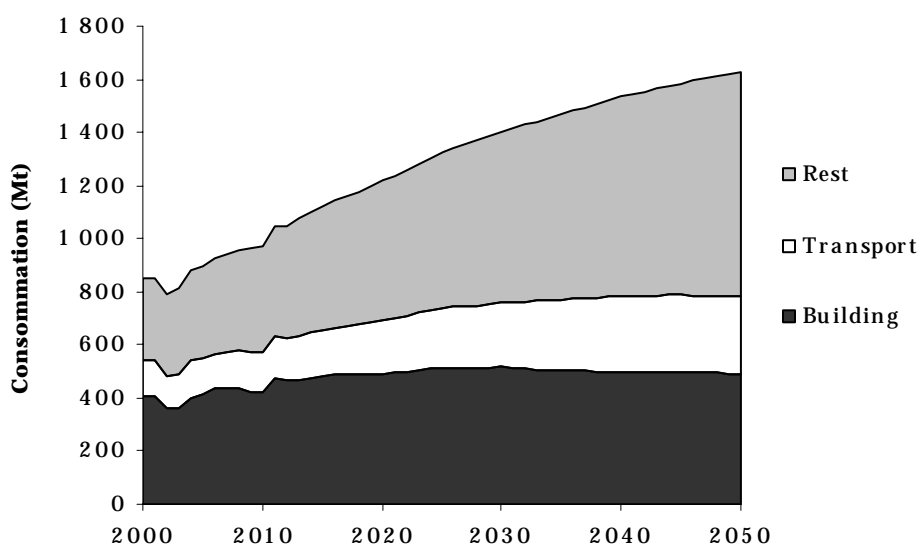


Figure 42 : Consommation d'Acier par poste

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.

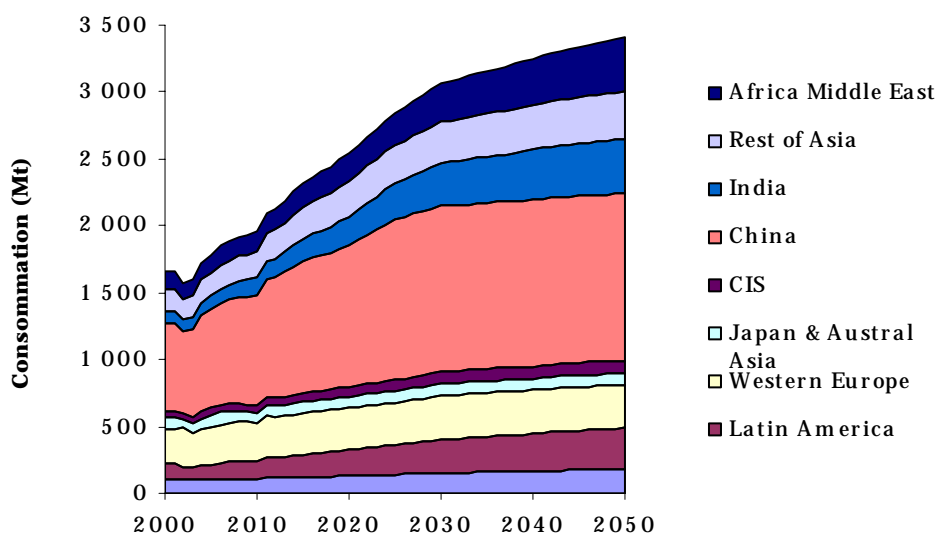


Figure 43 : Consommation de Ciment par région

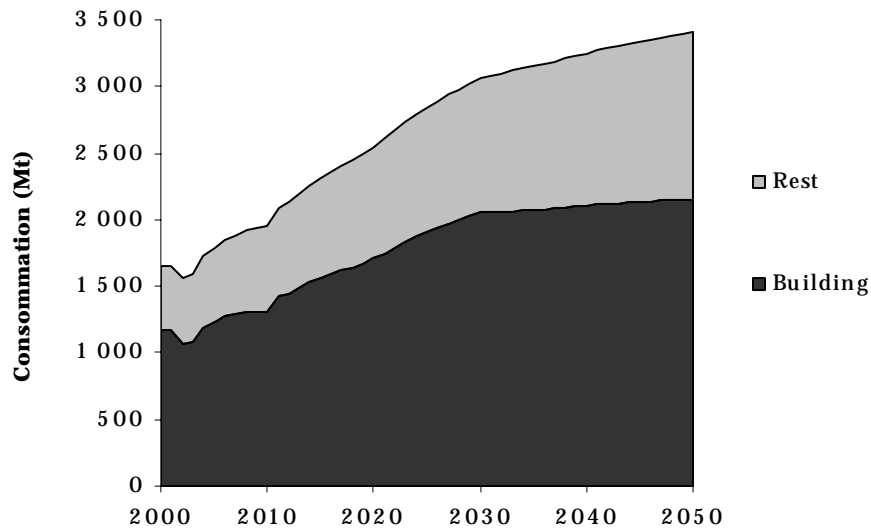


Figure 44 : Consommation de Ciment par poste

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).

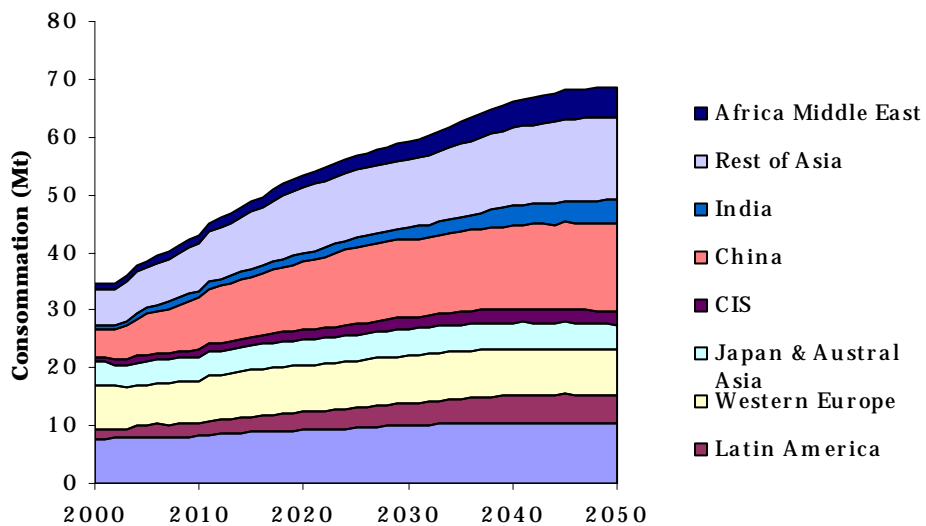


Figure 45 : Consommation d'Aluminium par région

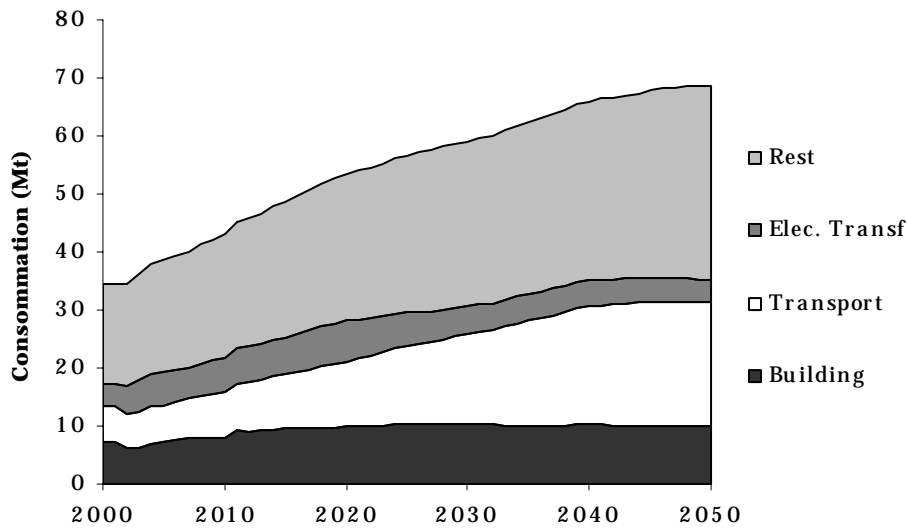


Figure 46 : Consommation d'Aluminium par poste

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.

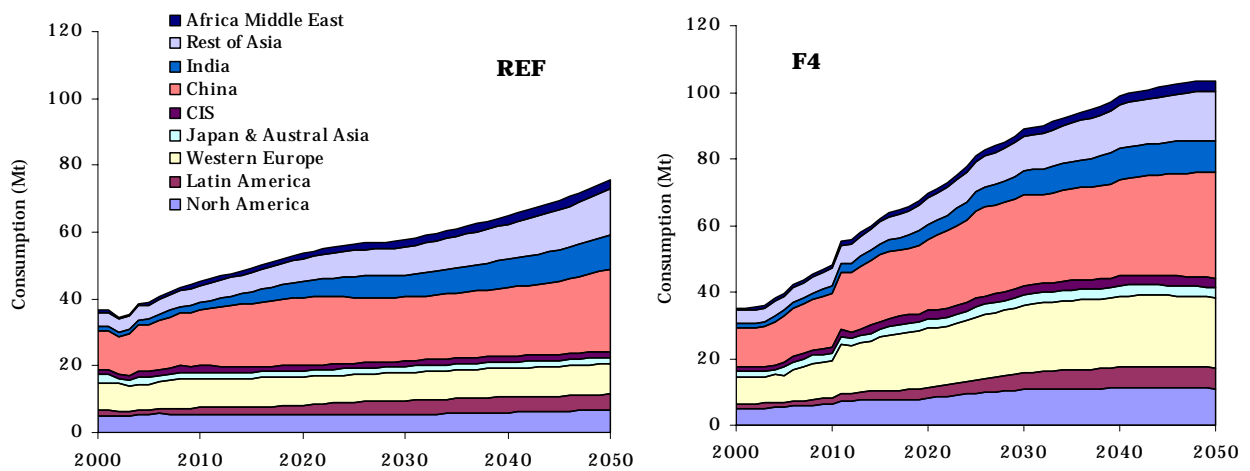


Figure 47 : Consommation verre plat par région

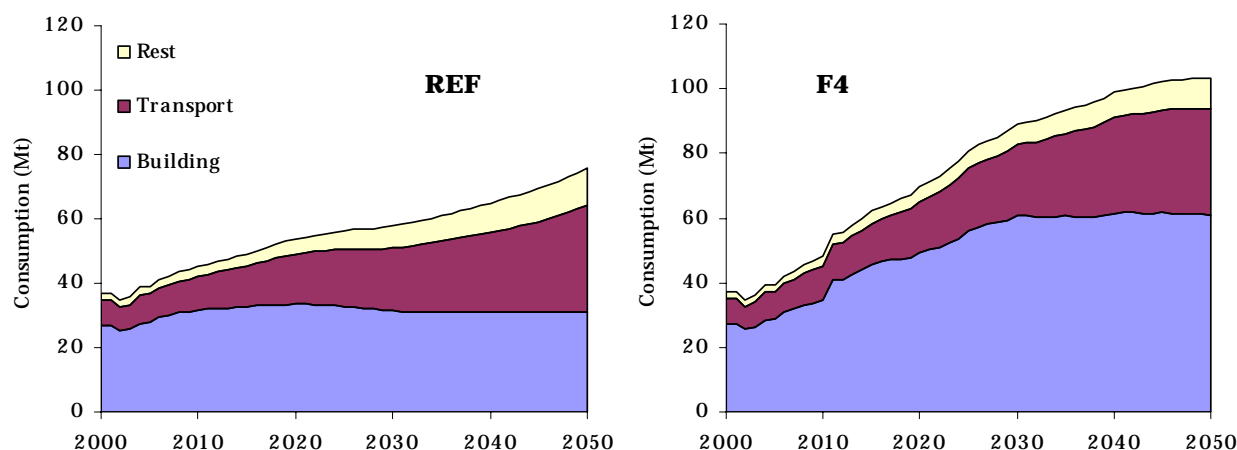


Figure 48 : Demande de verre plat par poste

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.

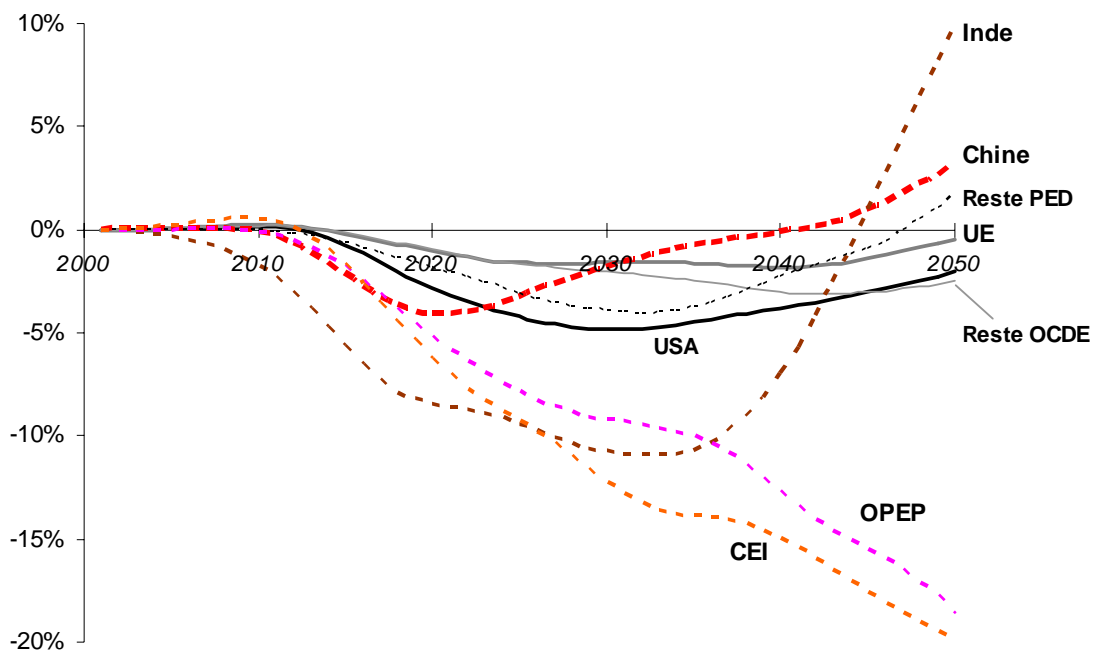


Figure 49 : Variation de PIB PPA entre scénarios REF et 450 ppm / F4

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 : 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 CO₂.

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 CO₂ atteint 40% des émissions en 2050 (9,4 Gt CO₂), 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.
