



**Laboratoire d'Economie de la Production et
de l'Intégration Internationale**

Département Energie et Politiques de
l'Environnement (EPE)
FRE 2664 CNRS-UPMF



Prospective énergétique à 2050, contrainte carbone et changements structurels

Présentation à l'atelier « Vers une représentation des économies sous contrainte carbone », Fondri, Paris, 4 avril 2006.

**Patrick Criqui
Silvana Mima
Christophe Rynikiewicz**

Avril 2006

FONDDRI

Fondation de recherche pour le développement durable et les relations internationales

PROSPECTIVE ENERGETIQUE A 2050, CONTRAINTE CARBONE ET CHANGEMENTS STRUCTURELS

**Patrick Criqui,
Silvana Mima,
Christophe Rynikiewicz**

LEPII-EPE

Atelier du 4 avril 2006

**Vers une représentation des économies sous
contrainte carbone : enjeux structurels,
industriels, technologiques**

Table des matières

1	Le scénario de « Référence » Imaclim-Poles, une croissance forte dans un monde à faible contrainte carbone	2
1.1	« Forces motrices et contraintes » de la projection de Référence	3
1.2	Les résultats-clé de la projection de Référence	6
1.3	Un scénario de politique climatique modérée à valeur croissante du carbone (VCC).....	14
2	Changements structurels : les choix de modélisation matériaux, urbanisme, transports.....	19
2.1	Les industries de matériaux : développements à partir du cas de l'acier	20
2.2	La modélisation « systèmes urbains – systèmes de transport ».....	24
2.3	Transmatérialisation et dématérialisation dans une société à bas profil d'émission.....	28
3	Conclusion	28

PROSPECTIVES ENERGETIQUES EXPLORATOIRES A 2050 ET CHANGEMENTS STRUCTURELS DANS LES SOCIETES A BAS PROFIL D'EMISSION

La projection énergétique de référence développée avec le modèle POLES dans le cadre du projet IDDRI-EpE permet de construire une image cohérente du monde de l'énergie sur les cinquante prochaines années. Sur un tel horizon de temps et compte-tenu des incertitudes, il ne peut en aucun cas s'agir d'une « prévision ». La projection de Référence constitue simplement une base de travail – ou un repère pour l'évaluation – pour laquelle on s'attache à construire un jeu d'hypothèses exogènes plausibles, tant pour les éléments qui fondent la dynamique du système (le couple population-croissance, les dynamiques technologiques) que pour ceux que l'on peut analyser comme les principales contraintes à son développement – contraintes de ressources d'hydrocarbures, limitations d'émission de gaz à effet de serre (GES).

Les résultats de la projection de référence (REF) permettent précisément d'explorer dans un cadre économique cohérent la dialectique des éléments moteurs (*drivers*) et des contraintes, en identifiant les changements structurels du système énergétique mondial qui semblent imposés par le respect du principe de non-contradiction. **La première partie de ce rapport expose d'abord les jeux d'hypothèses retenus¹ et les résultats les plus significatifs de la projection énergétique de Référence**, développée conjointement avec les modèles POLES et IMACLIM.

Elle constitue en outre la base des exercices de simulation de politiques renforcées en matière de lutte contre le changement climatique et de réduction des émissions. Une telle politique est simulée dans le scénario dit de « Valeur du Carbone Croissante » (VCC), avec l'introduction dans le modèle d'une valeur du carbone croissante et significativement plus élevée que celle retenue dans la Référence. **La comparaison du scénario VCC avec la Référence conduit à conclure que les changements obtenus dans les émissions mondiales sont à la fois significatifs et insuffisants** pour amener les différents systèmes énergétiques à s'inscrire sur des profils compatibles avec, par exemple, l'objectif climatique européen de limitation de l'augmentation moyenne de température à moins de +2°C par rapport à la situation pré-industrielle.

La poursuite de cet objectif nécessiterait en effet des politiques plus affirmées de réduction, de type Facteur 4² conduisant sans doute à des changements structurels marqués, dans les technologies industrielles comme dans le contenu en matière première de la croissance économique, mais aussi dans les infrastructures de transports comme dans l'urbanisme. **La deuxième partie de ce rapport porte précisément sur la représentation de ces changements structurels qui devraient**

¹ Pour l'énergie, les hypothèses de base de la projection de Référence présentée ici reprennent pour l'essentiel celles utilisées dans l'étude WETO-2050 développée pour la DG Recherche de la Commission Européenne.

² Sur la cohérence entre objectif européen, scénarios de stabilisation à 450 ppmv pour le CO₂ et Facteur 4 dans les pays industrialisés, voir l'étude « Greenhouse gas Reduction Pathways », 2003, coordonnée par le LEPII pour la DG Environnement :

http://europa.eu.int/comm/environment/climat/pdf/pm_summary2025.pdf

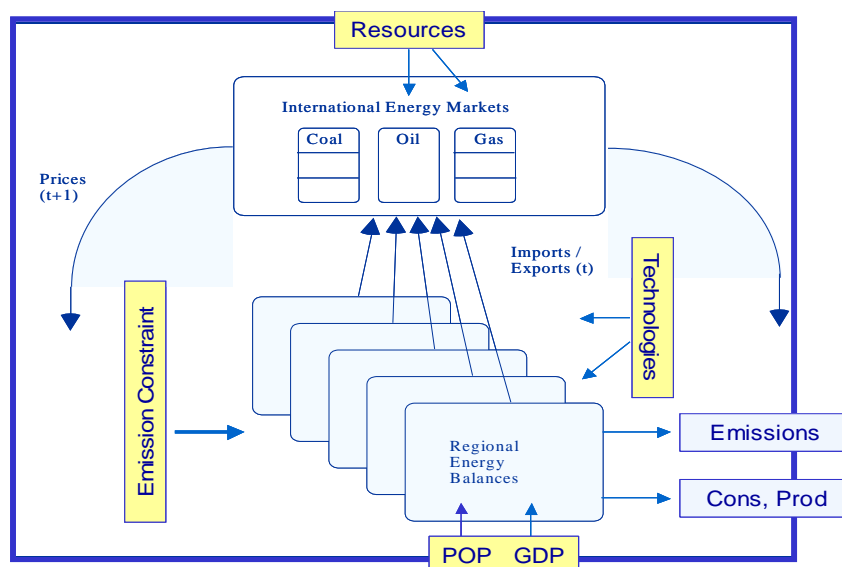
accompagner le développement de sociétés à bas profil d'émission. Les travaux actuellement en cours dans le projet visent de fait à améliorer la compréhension, la description et l'introduction dans les modèles des plus importants de ces changements structurels.

La première sous-partie est consacrée aux innovations technologiques radicales pour les technologies « Très Basses Emissions » dans plusieurs domaines comme le bâtiment les véhicules et les industries de matériaux et s'attache à décrire les modélisation actuellement développées pour en rendre compte. **La deuxième sous-partie aborde enfin les propositions de représentation des changements dans les « macro-systèmes »** d'infrastructures, qui viendront sans doute caractériser les sociétés à très bas profil d'émission de GES, via en particulier d'éventuels changement dans les tissus urbains.

1 LE SCENARIO DE « REFERENCE » IMACLIM-POLES, UNE CROISSANCE FORTE DANS UN MONDE A FAIBLE CONTRAINTE CARBONE

La projection de Référence s'attache à décrire le développement énergétique mondial dans un contexte dans lequel la contrainte carbone serait peu opérante, par absence de volonté politique ou de capacité d'action dans ce domaine. **Il est clair que dans ce contexte le terme « Référence » n'implique aucune dimension de désirabilité du scénario et qu'il est à prendre exclusivement au sens de « repère »** pour l'évaluation économique. Les éléments structurants la dynamique énergétique mondiale sont alors la croissance de la population, des besoins et de l'économie, confrontée aux contraintes de raréfaction croissante des ressources d'hydrocarbures fossiles, pétrole et gaz naturel (Figure 1). Le modèle POLES permet en effet non seulement de décrire les processus contradictoires d'épuisement et de reconstitution économique des réserves, mais il permet aussi de traduire la difficulté croissante de cette reconstitution à travers une augmentation structurelle des prix des hydrocarbures qui apparaît inéluctable dans les scénarios à faible contrainte carbone.

Figure 1: Le modèle POLES, forces motrices, contraintes et processus récursif



1.1 « Forces motrices et contraintes » de la projection de Référence

- *Tendances démographiques : une population mondiale multipliée par 1,5 en 2050*

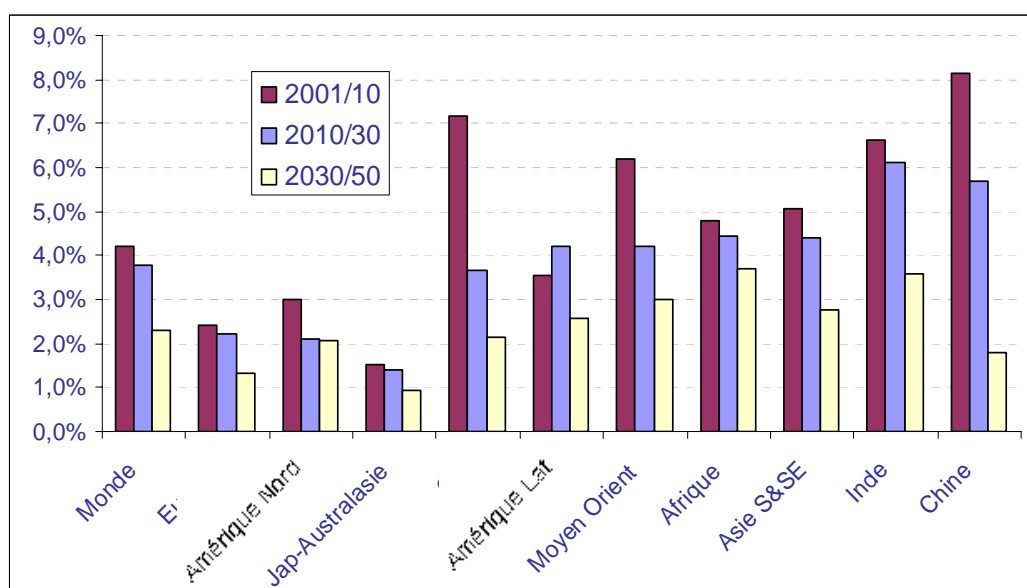
Conformément à toutes les projections centrales de l'ONU depuis plusieurs années maintenant, le ralentissement de la croissance de la population mondiale est assez marqué, dans toutes les régions du monde. **En 2050, la population mondiale aura augmenté d'environ 50 % pour atteindre près de 9 milliards d'habitants** et à cet horizon la croissance de la population totale sera devenu très faible, préluant à une stabilisation dans la seconde moitié du siècle.

Dans les deux dernières décennies de la projection, **l'Europe (définition large), le Pacifique OCDE, la CEI et Chine voient même leur population décroître**. De 2030 à 2050 ces régions perdent respectivement 34, 9, 11 et 19 M d'habitant ce qui ne peut manquer d'impacter la croissance de ces zones. La question est alors posée, pour la construction de scénarios économiques alternatifs d'ensemble de la mise en œuvre de politiques de natalité ou d'immigration actives (travaux en cours du CIRED).

- *Croissance économique : un PIB mondial en forte croissance jusqu'en 2050*

Le scénario harmonisé IMACLIM-POLES conduit à une croissance économique mondiale qui demeure très soutenue jusqu'en 2030 autour de 4 %/an, mais avec un fort ralentissement entre 2030 et 2050, à 2 %/an . Dans la première partie de la projection l'économie mondiale est tirée par l'Asie, avec en particulier l'émergence de l'Inde comme pôle de croissance : à partir de 2010 la croissance indienne devient supérieure à la croissance chinoise, dont le ralentissement est déjà amorcé et s'accroît entre 2030 et 2050.

Figure 2: Croissance économique par région (REF-Imaclim-Poles)



Source : POLES-2006, projection Imaclim-Poles

Dans la typologie du Special Report on Emission Scenario (SRES) de l'IPCC, le scénario harmonisé Imaclim-Poles est très clairement un scénario de type A1, c'est à dire de **forte croissance par la globalisation et l'émergence de la Chine et de l'Inde, avec une convergence marquée des PIB par habitant**. Il suppose que la hausse des prix de l'énergie – bien que très prononcée, voir infra – ne vient pas ralentir l'économie mondiale, qu'aucune crise ou tension interne ne vient remettre en question la croissance chinoise ou indienne, que les déficits américains constituent plus un moteur qu'un point de faiblesse de l'économie mondiale ...

Malgré le ralentissement progressif de la croissance après 2030, le PIB mondial est multiplié par cinq entre aujourd'hui et 2050, en monnaie constante. A l'horizon 2050, la croissance économique est comprise entre 1 et 2 %/an dans les pays « Annexe 1 », 2 et 3 %/an pour les pays non-Annexe 1 » à l'exception de l'Afrique et de l'Inde qui connaissent une croissance supérieure à 3 %/an. A cet horizon apparaissent quatre géants économiques, représentant plus de 60 % du PIB mondial, dont deux en forte croissance (Chine et Inde) et deux en déclin relatif (Europe et Amérique du Nord).

- « *Contraintes amont* » : les ressources d'hydrocarbures

Les ressources à produire de pétrole conventionnel – identifiées et non identifiées – sont estimées à 1 700 Gbl aujourd'hui auxquels il faut ajouter les 900 Gbl déjà produits pour obtenir les 2 600 Gbl de ressources totales, telles qu'estimées par l'US Geological Survey³. Cependant **le progrès technique sur les taux de récupération – aujourd'hui de l'ordre de 35 % en moyenne mondiale, passant à plus de 50 % en fin de période – devrait permettre d'augmenter les ressources récupérables à 3 400 Gbl d'ici 2050, soit une augmentation de plus de 30 %.**

Malgré cette extension des réserves par le progrès technique le cap d'une production cumulée égale à la moitié des ressources récupérables serait franchi entre 2020 et 2030. La théorie du « Peak Oil »⁴ indique qu'à partir de cette date la production conventionnelle devrait plafonner, avant de décliner progressivement. Pour le gaz naturel et en raison d'un niveau de production initial plus faible, le pic de production pourrait survenir environ plus tard, peu avant 2040. Cependant une différence majeure avec le pétrole est que le taux de récupération du gaz naturel est d'ores et déjà élevé, ce qui laisse augurer d'un pic plus brutal, puisqu'il n'y a pas alors de marge de progrès technique.

³ USGS - En 2005, dans le cadre de l'étude WETO-H2 (DG-Recherche) l'ensemble des hypothèses sur les ressources pétrole et gaz dans le modèle POLES ont été validées ou révisées par l'IFP.

⁴ Initialement formulée en 1956 par M. King Hubbert pour les Etats-Unis, avec une prévision vérifiée depuis de pic de production pour la fin des années soixante, cette théorie est aujourd'hui transposée au niveau mondial et conduit de plus en plus d'experts à prédire une courbe en cloche pour la production pétrolière mondiale. Cependant la date du pic demeure discutée, comme devant survenir entre aujourd'hui et 2050.

- « *Contraintes aval* » : les politiques de réduction des émissions de GES

La projection de Référence doit permettre de construire une image plausible du monde énergétique à 2050. Dans cette perspective, il apparaît aujourd'hui peu probable que les politiques énergétiques puissent se développer sans aucune prise en compte d'un souci de limitation des émissions de CO₂.

La projection de référence prend donc en compte des politiques climatiques a minima qui ne supposent pas l'existence un accord international multilatéral sur le climat mais traduisent des politiques différenciées selon les régions du monde :

- l'Europe est supposée être la région avec la volonté d'action la plus affirmée, se traduisant par une valeur du carbone de 10 €/tCO₂ en 2010 augmentant à 30 €/tCO₂ en 2050⁵.
- Le reste de l'Annexe 1 mène une politique plus modérée correspondant à la moitié de la valeur du carbone européenne (5 €/tCO₂ en 2010, 15 en 2050).
- Enfin les pays Non-Annexe 1 engagent une action plus tardivement, après 2010 et rejoignent en 2050 la valeur du carbone de 15 €/tCO₂.

Ces « pénalités carbone » sont données pour l'ensemble de l'économie, comme traduisant l'effort global de réduction des émissions et sans référence directe à des systèmes de régulation environnementale précis comme le système européen des quotas échangeables pour l'industrie. Il s'agit bien d'une approximation, rendant compte du fait que les scénarios sans aucune réduction d'émission sont aujourd'hui devenus improbables.

- *Portefeuilles technologiques dans le modèle POLES, la base de données TECHPOL*

La base de données TECHPOL rassemble des informations utilisées dans la projection pour environ cinquante technologies-clé de production-conversion d'énergies. Ces technologies sont regroupées en cinq grands portefeuilles : production d'électricité de grande puissance, énergies renouvelables, production distribuée d'électricité, production d'hydrogène, véhicules et bâtiments TBE (Très Basses Emissions). TECHPOL permet de fournir des données standardisées sur les coûts d'investissement et les coûts variables ainsi que sur les performances en termes de rendements.

Le Tableau 1 permet de décrire la composition des portefeuilles technologiques. Il constitue en lui-même **un inventaire des technologies énergétiques du futur, en compétition dans les prochaines décennies dans un contexte qui sera structuré par des changements importants dans les prix des énergies primaires et dans la valeur du carbone.**

⁵ Cette valeur est déjà élevée en comparaison des évaluations les plus conservatrices du coût social du changement climatique ... pour aussi discutables que soient ces estimations.

Tableau 1: Technologies énergétiques dans le modèle POLES et la base TECHPOL

<p>Large Scale Power Generation</p> <ul style="list-style-type: none"> Hydroelectricity Light-water nuclear reactor (including EPR) New nuclear design (Generation 4) Pulverised coal, supercritical, with/without CO2 capture Integrated coal gasification in combined cycle, with/without CO2 capture Coal conventional thermal Lignite conventional thermal Gas conventional thermal Gas turbine Gas turbine in combined cycle, with/without CO2 capture Oil conventional thermal Oil gas turbine in combined cycle
<p>Renewable Energy Sources</p> <ul style="list-style-type: none"> Small hydro power (<10 MWe) Onshore wind power Offshore wind power Solar thermal power Biomass (woodfuels, electricity from wastes, biofuels) Biomass gasification for power generation
<p>Distributed Power Generation</p> <ul style="list-style-type: none"> Combined heat and power Stationary fuel-cells, natural gas Stationary fuel-cells, hydrogen Building integrated photovoltaic systems Photovoltaic systems for rural electrification
<p>Hydrogen Production</p> <ul style="list-style-type: none"> Gas steam reforming, with/without CO2 capture Coal partial oxidation, with/without CO2 capture Biomass pyrolysis Solar high-temperature thermolysis Nuclear high-temperature thermolysis Water electrolysis, dedicated nuclear power plant Water electrolysis, dedicated wind power plant Water electrolysis, baseload electricity
<p>Very Low Emission Vehicles / Buildings</p> <ul style="list-style-type: none"> Internal combustion engine (including hybrid) Pluggable hybrid Electric, battery Gas fuel-cell vehicle Hydrogen fuel-cell vehicle Hydrogen internal combustion engine Low energy building Very low energy building

1.2 Les résultats-clé de la projection de Référence

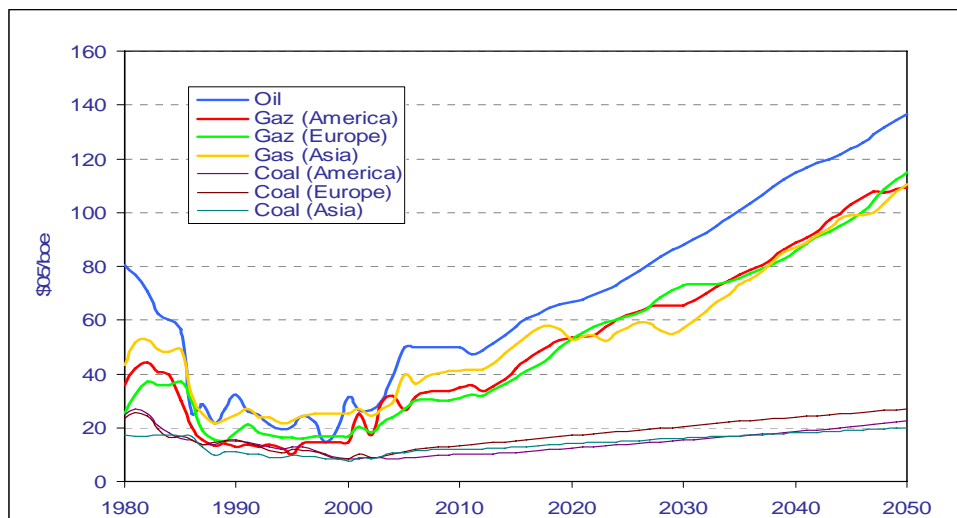
- *Les prix des énergies*

Outre les contraintes de renouvellement des réserves pétrolières de nature directement géologique et économique, **la projection de référence prend également en compte les contraintes**

géopolitiques limitant le développement rapide de la production pétrolière dans la région du Golfe. Celles-ci découlent évidemment du contexte stratégique extrêmement instable de certains pays, mais aussi de l'absence de volonté ou de l'impossibilité politique à ouvrir très rapidement et largement ces pays à un investissement extérieur massif. Cela se traduit par un niveau de prix plus élevé que dans une projection qui ne reposerait que sur les seuls fondamentaux économiques et verrait alors se développer un investissement massif des compagnies internationales dans le Golfe pour des investissements d'une rentabilité exceptionnelle.

Après une baisse modérée des prix d'ici 2010 du fait des impacts différés des fortes hausses de 2004-2005, **le prix du pétrole repart à la hausse, atteignant des niveaux structurels de 75 \$/bbl en 2025, 135 \$ en 2050.** Les prix du gaz sur les grands marchés suivent la hausse de celui du pétrole, non pas en raison d'effets directs d'indexation mais parce que comme pour le pétrole le maintien de l'équilibre offre-demande, qui passe par le renouvellement des réserves dans un contexte de raréfaction impose une hausse continue du prix. **Mais à 60 \$/bep en 2025 et 110 \$/bep en 2050, le prix du gaz reste cependant inférieur à celui du pétrole,** ce qui traduit à la fois une contrainte relativement moins forte et une décote du gaz liée au coût des nécessaires infrastructures de transport et distribution.

Figure 3: Prix internationaux des énergies dans la projection REF-Imaclim-Poles



Source : POLES-2006, projection Imaclim-Poles

Le prix du charbon augmentent proportionnellement moins sur toute la période avec une multiplication limitée à 2,5-3 par rapport à 2001 ; ceci reflète des réserves qui restent abondantes et des conditions de développement stables. **La compétitivité-prix du charbon à la tep par rapport au pétrole ou au gaz s'améliore considérablement dans ce scénario qui ne retient pas l'hypothèse d'une cartellisation de l'offre charbonnière.**

- *Consommation primaire mondiale et mix énergétique*

Dans le scénario de référence, **la consommation mondiale est multipliée par deux et demi en 2050, ce qui signifie une réduction globale de l'intensité énergétique de près de 50 %**, puisque dans le même temps le PIB est multiplié par près de cinq (et, rappelons-le, la population par 1,5). Le taux de croissance de la consommation primaire mondiale décroît progressivement, à 2,2 %/an entre 2010 et 2030, jusqu'à 1,4 %/an dans les dernières vingt années de la projection.

Figure 4: Bilan mondial en énergie primaire (REF-Imaclim-Poles)

	2001	2010	2030	2050	t.c.a.m.		
					2001/10	2010/30	2030/50
Primary Production (Mtoe)	9779	12807	19624	25901	3,0%	2,2%	1,4%
Coal, lignite	2351	3184	4875	6546	3,4%	2,2%	1,5%
Oil	3487	3973	6111	6635	1,5%	2,2%	0,4%
Natural gas	1929	3330	4703	4685	6,3%	1,7%	0,0%
Nuclear	671	753	1858	4343	1,3%	4,6%	4,3%
Hydro, geothermal	232	276	365	425	1,9%	1,4%	0,8%
Wind, solar	7	21	200	751	12,5%	11,9%	6,8%
Biomass and wastes	1101	1270	1513	2516	1,6%	0,9%	2,6%

Source : POLES-2006, projection Imaclim-Poles

Par énergie primaire, les plus fortes hausses après 2030 sont rencontrées pour les énergies renouvelables (surtout éolien et solaire) et le nucléaire. Après 2040 le pétrole (conventionnel et non conventionnel) et le gaz naturel ont passé leur pic de production. **Le charbon progresse de manière marquée avec un taux de croissance très supérieur à celui du pétrole et du gaz naturel à partir de 2010.** En 2050, sa contribution au bilan énergétique mondial égale celle des hydrocarbures liquides, conventionnels et non-conventionnels.

- *Production d'électricité mondiale et mix de production*

Suivant de manière assez étroite la croissance économique, la production mondiale d'électricité est multipliée par plus de quatre entre aujourd'hui et 2050, date à laquelle elle atteint 70 000TWh, contre 15 000 aujourd'hui.

Tableau 2: Production mondiale d'électricité (REF-Imaclim-Poles)

	2001	2010	2030	2050
Electricity Generation (TWh)	15468	21841	42742	70828
Thermal	65%	70%	65%	51%
of which:				
Coal	38%	37%	36%	31%
Gas	19%	27%	23%	14%
Biomass and wastes	1%	2%	4%	3%
Nuclear	17%	14%	19%	29%
Hydro+Geoth	17%	15%	10%	7%
Solar	0%	0%	0%	2%
Wind	0%	1%	5%	10%
Hydrogen	0%	0%	0%	1%

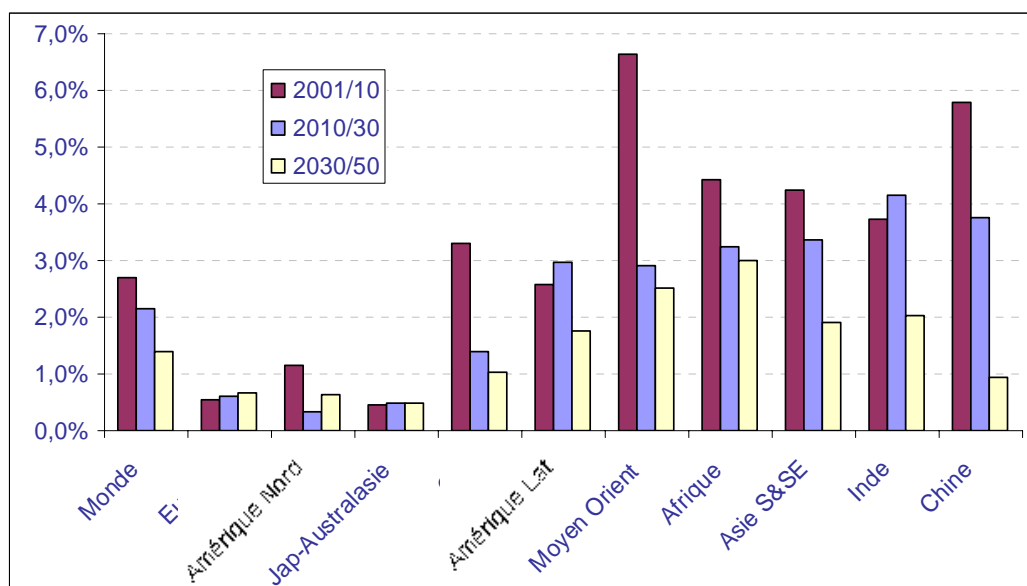
Source : POLES-2006, projection Imaclim-Poles

En 2030 le mix de production électrique est encore très proche de celui d'aujourd'hui avec environ deux tiers d'électricité ex-fossiles. Entre 2030 et 2050 la situation change rapidement puisque **la production d'électricité de source renouvelable ou nucléaire représente la moitié du total à la fin de la projection**. En 2050, le charbon représente néanmoins un tiers de la production totale et le gaz naturel 14 %. La part de l'énergie nucléaire dans la production mondiale décroît jusqu'en 2010 mais a retrouvé en 2030 un niveau légèrement supérieur au niveau actuel. De 2030 à 2050 l'énergie nucléaire connaît une très forte croissance puisque sa part de la production mondiale s'élève à 29 % en 2050. Globalement, les sources renouvelables d'électricité ont une part de marché stable jusqu'en 2030 et croissante au-delà, la progression de l'énergie éolienne notamment compensant la baisse de part de marché de l'hydroélectricité.

- *Consommation primaire par région*

La croissance de la consommation primaire est différenciée selon les régions, après 2030 elle est très inférieure à 1 %/an dans toutes les régions « Annexe 1 » et comprise entre 1 et 2 %/ an dans toutes les régions en développement à l'exception de l'Afrique et du Moyen-Orient (Figure 5. **En 2050 la géographie de la consommation mondiale d'énergie est profondément bouleversée avec une part totale des pays Annexe 1 ramenée de 61 % aujourd'hui à 34 %.**

Figure 5: Croissance annuelle de la consommation primaire, par région (REF-Imaclim-Poles)



Source : POLES-2006, projection Imaclim-Poles

Ces évolutions correspondent à une amélioration de l'accès à l'énergie dans les régions en développement et entraînent une augmentation de la consommation par tête moyenne de 1,6 à 2,9 tep/hab. Alors que la consommation par tête augmente de 40 % en Europe d'ici 2050, l'Amérique Latine, le Moyen-Orient et l'Asie du Sud et du Sud-Est atteignent alors entre 40 et 60 % du niveau de consommation par tête européen. Seule l'Afrique et l'Inde présentent à cette date des niveaux de consommation moyens beaucoup plus faibles, égaux ou inférieur au tiers du niveau européen (Tableau 3).

Tableau 3: Consommation d'énergie par tête, par région (base 100 = Europe élargie) (REF-Imaclim-Poles)

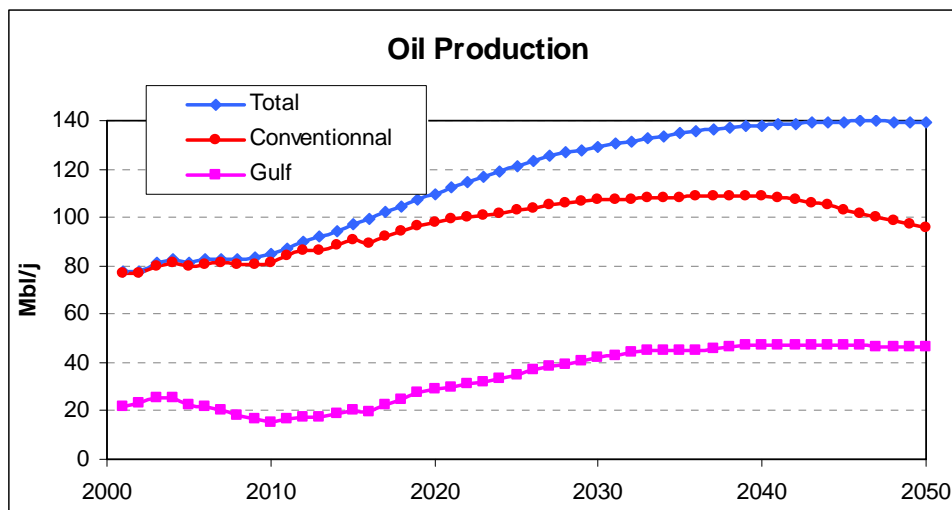
Europe = 100	2001	2010	2020	2030	2050
Monde	50	55	60	62	62
Europe	100	100	100	100	100
Amérique Nord	245	246	227	207	184
Jap-Australasie	126	124	122	123	118
CEI	100	129	141	150	158
Amérique Lat	36	39	45	50	53
Moyen Orient	68	97	102	108	119
Afrique	18	21	23	24	29
Asie S&SE	25	31	37	42	45
Inde	16	19	25	31	34
Chine	27	41	58	69	70

Source : POLES-2006, projection Imaclim-Poles

- Profil de la production pétrolière et gazière mondiale

Le « peak oil » conventionnel survient à près de 110 Mbj entre 2030 et 2040, puis la production décline rapidement pour retrouver en 2050 un niveau inférieur à 100 Mbj. Cependant la contribution rapidement croissante des pétroles non-conventionnels (ultra-lourds, sables asphaltiques et, à partir de 2030 schistes bitumineux) permet de différer le pic global de 10 ans avec un niveau de près de 140 Mbj. La production mondiale en 2050 est répartie en trois ensembles d'importance très comparable à 40-50 Mbj : la production du Golfe, la production hors-Golfe et les non-conventionnels.

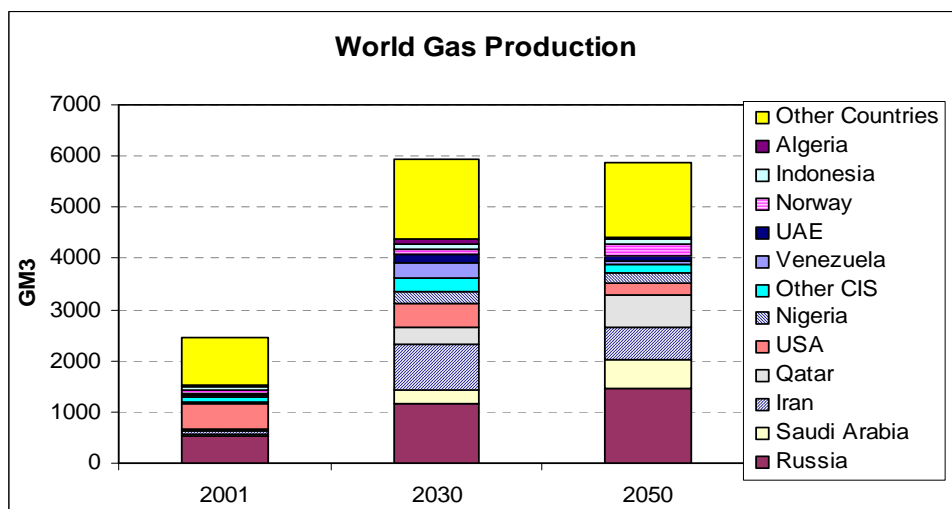
Figure 6: Profil de production pétrole conventionnel et non conventionnel (REF-Imaclim-Poles)



Source : POLES-2006, projection Imaclim-Poles

La production mondiale de gaz naturelle connaît un maximum en 2040, elle revient en 2050 à son niveau de 2030. A cette date près de 55 % de la production mondiale est assurée par quatre pays : la CEI, l'Arabie Saoudite, l'Iran et le Qatar.

Figure 7: Profil de production gaz par grand pays producteur (REF-Imaclim-Poles)

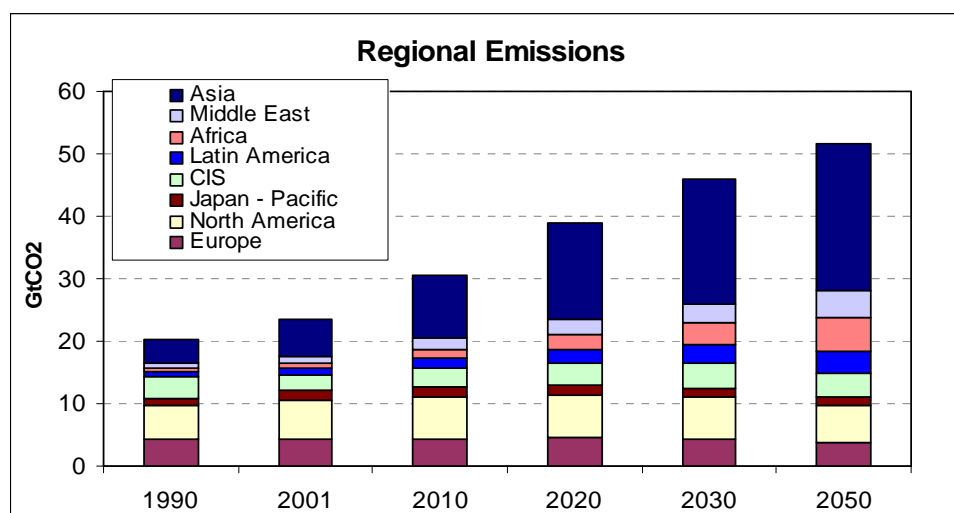


Source : POLES-2006, projection Imaclim-Poles

- *Emissions de CO2 dans la projection de référence*

Dans la projection de référence, et malgré l'introduction d'une valeur du carbone déjà non négligeable qui limite la croissance en fin de projection, **les émissions mondiales de CO2 sont presque multipliées par un facteur supérieur à 2 en 2050, soit néanmoins une augmentation plus faible que celle de la consommation d'énergie primaire.** Ceci s'explique par le ralentissement de la croissance des énergies fossiles après 2030 et la montée des renouvelables et du nucléaire. Le niveau d'émission atteint en 2050 est donc cependant significatif, il provient en particulier d'une très forte croissance des émissions dans les pays non-Annexe 1 : plus de 5 %/an d'ici 2010 sauf en Amérique Latine, de 3 à 4 %/an de 2010 à 2030, mais moins de 2 %/an ultérieurement. En fin de projection les émissions sont décroissantes dans toutes les régions Annexe 1, et la part de ces pays dans les émissions totales décroît de 60 % en 2001 à 30 % en 2050.

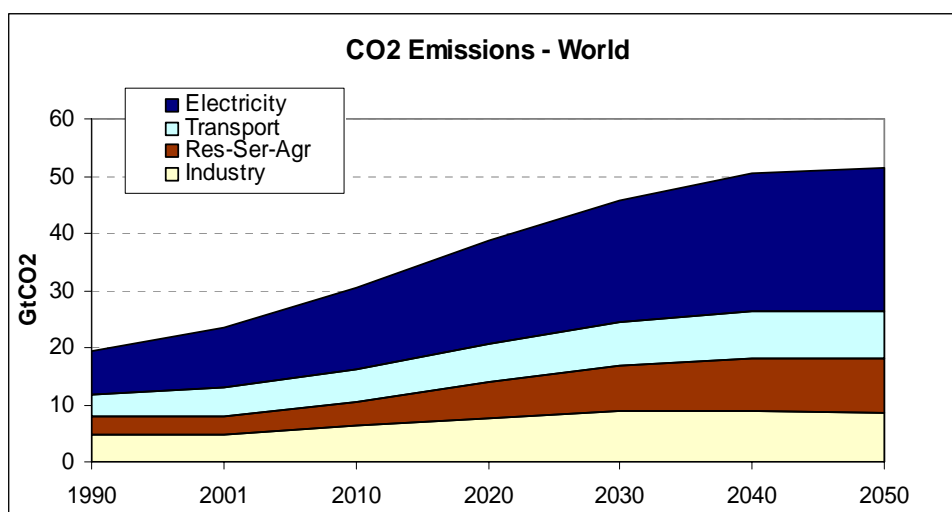
Figure 8: Emissions de CO2, par région (REF-Imaclim-Poles)



Source : POLES-2006, projection Imaclim-Poles

L'analyse des émissions par secteur fait apparaître le poids rapidement croissant au plan mondial du secteur électrique qui représente presque la moitié des émissions en 2050. La croissance des émissions est plus modérée dans les autres secteurs, en particulier dans le secteur transport, où se manifestent les conséquences de la très forte hausse des prix du pétrole sur l'ensemble de la période, d'une part avec la limitation des consommations, d'autre part avec le développement de véhicules alternatifs.

Figure 9: Emissions de CO2 par secteur (REF-Imaclim-Poles)



Source : POLES-2006, projection Imaclim-Poles

- Un scénario à « haut régime » pour l'économie mondiale et les marchés énergétiques

A bien des égards le scénario de Référence Imaclim-Poles apparaît bien comme un scénario de forte croissance avec convergence marquée des niveaux de revenu par habitant dans les différentes régions du Monde. **Au plan énergétique, les conséquences en sont un recours initialement renforcé aux sources fossiles** qui sont, en particulier pour le pétrole et le gaz naturel poussées probablement à leur limite. Si la production de charbon reste tout à fait compatible avec les ressources à l'horizon 2050, elle est tout de même multipliée par près de trois entre le début et la fin de la période ce qui impliquerait des investissements massifs d'infrastructures dans de nombreuses régions du monde.

A partir de 2030 l'accroissement de l'offre fossile ne peut plus, malgré l'augmentation continue des prix suivre la demande et **le relais doit être pris par les énergies renouvelables et, quant celles-ci atteignent également leur limite vers la fin de la période, par le nucléaire.**

Le scénario Imaclim-Poles pourrait être décrit comme un scénario de type « **cinquième cycle de Kondratieff** » avec une phase ascendante jusqu'en 2025 au cours de laquelle la croissance mondiale est alimentée par les innovations technologiques, par la croissance encore forte en Chine et par l'émergence rapide de l'Inde. Cette phase ascendante est suivie d'une phase de ralentissement lorsque le dynamisme de ces deux pays s'atténue et que les contraintes énergétiques, bien que maîtrisées, se renforcent.

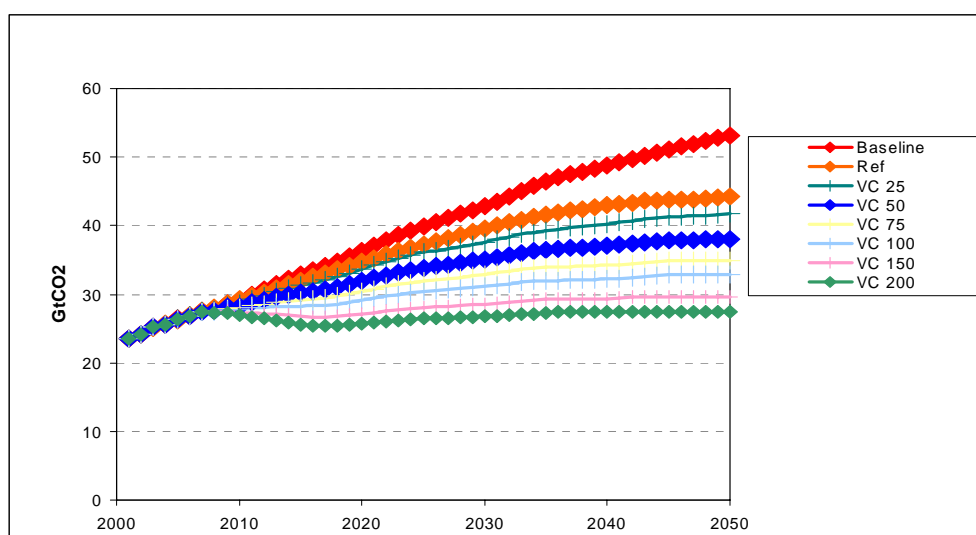
L'utilisation combinée des modèles POLES et IMACLIM montre que ce scénario est sans doute possible du point de vue des grands équilibres économiques et énergétiques. **La probabilité d'occurrence de ce scénario doit pour autant être examinée avec attention car sur la trajectoire décrite, les accidents possibles sont nombreux.** On relèvera, parmi les risques les plus importants, ceux potentiellement associés :

- à la gestion sur le long terme des doubles déficits américains ;
- aux divers conflits politiques et sociaux dans les pays en émergence rapide et en particulier en Chine ;
- à l'approvisionnement pétrolier à partir de la région du Golfe ;
- aux difficultés à surmonter pour rendre possible un développement massif de l'énergie nucléaire après 2030 (cycle du combustible et prolifération, oppositions sociales ...)

1.3 Un scénario de politique climatique modérée à valeur croissante du carbone (VCC)

A partir du scénario de Référence, la manière la plus simple d'introduire une contrainte carbone sans avoir à spécifier les arrangements institutionnels qui caractériseraient un régime ou du moins une action internationale pour le climat est de **supposer l'introduction d'une valeur du carbone que l'on considèrera, en première approximation, comme identique dans tous les pays et croissant linéairement entre 2005 et 2050**. La simulation d'une série de scénarios à « valeur du carbone croissante » menée en 2005 a permis d'obtenir une description très synthétique du comportement du modèle et de sa sensibilité à la variable-clé que constitue la valeur du-carbone, dans une perspective « dose-réponse » : une augmentation régulière de la valeur du carbone conduit à un ralentissement de la croissance des émissions. Elle ne permet pas cependant d'obtenir des profils plus marqués avec plafonnement puis décroissance des émissions.

Figure 10: Exemple de simulations POLES à valeur du carbone croissante jusqu'en 2050



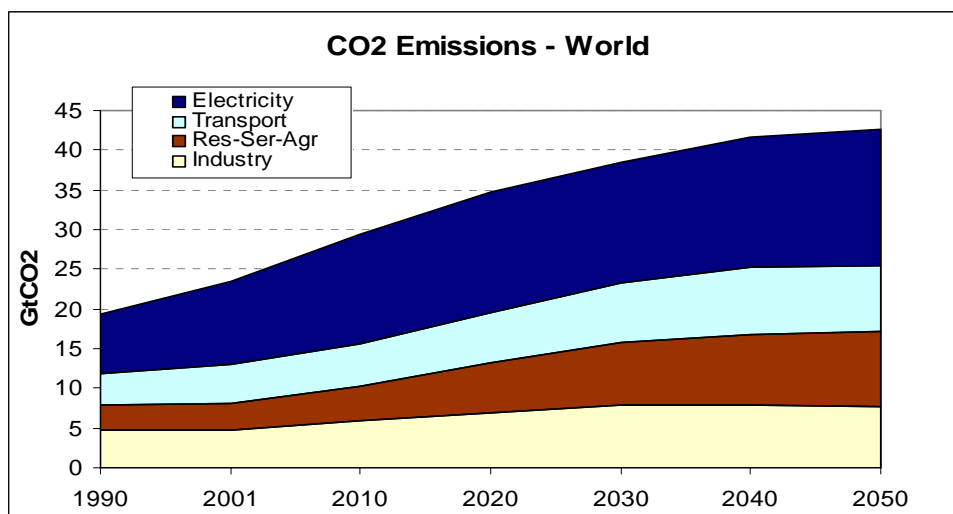
Source : POLES-2005, projection POLES mars 2005

- *L'impact de l'introduction d'une valeur du carbone à 50 €/tCO en 2050*

Dans l'exercice actuel, on a retenu pour simuler des politiques « modérées » de réduction des émissions au plan international **une valeur du carbone égale à 10 €/tCO₂ en 2010, croissant linéairement à 50 €/tCO₂ en 2050 (scénario Valeur du Carbone Croissante – VCC)**. Il s'agit ici d'une valeur déjà élevée (180 €/tC en 2050) susceptible de déclencher des changements importants dans la demande, la compétitivité relative des énergies primaires et des technologies énergétiques.

L'impact du scénario VCC sur les émissions mondiales est net puisqu'il conduit à une réduction de 17 % des émissions en 2050 (Figure 11), il est cependant limité car le scénario de Référence inclut déjà des valeurs du carbone, de 30 €/tCO₂ en 2050 en Europe, 15 €/tCO₂ dans le reste du monde.

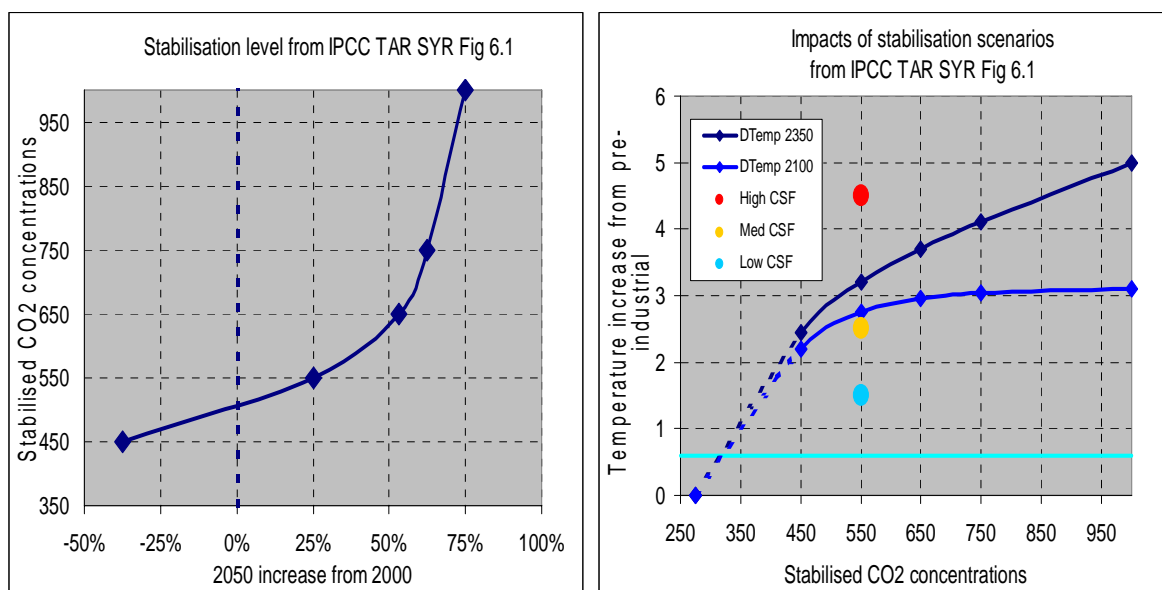
Figure 11: Emissions de CO₂ par région (VCC-Imaclim-Poles)



Source : POLES-2006, projection Imaclim-Poles

L'examen des résultats de ce scénario à la lumière d'une abaque tirée des résultats du Troisième Rapport d'Evaluation du GIEC fait cependant apparaître que ce type de scénario ne pourra conduire à un contrôle réel des évolutions climatiques. Ces abaques montrent en effet qu'**une augmentation de 80 % des émissions en 2050 par rapport à aujourd'hui (contre +120 % dans la Référence) conduirait à un profil de concentration de l'ordre de 1000 ppmv** et donc à des augmentations de température de +3 °C en valeur médiane d'ici la fin du siècle, +5 °C à plus long terme. On est alors bine loin de l'objectif européen, qui avec une limite à +2 °C imposerait un profil de concentration inférieur ou égal à 450 ppmv pour le seul CO₂.

Figure 12: Emissions de CO2 par région (VCC-Imaclim-Poles)



Source : P. Criqui, d'après IPCC SYR, Figure 6.1.

- *Valeur du carbone et impact sur les développements énergétiques*

Dans le scénario « stylisé » présenté ci-dessous, l'hypothèse de l'augmentation de la valeur du carbone modifie le prix à l'utilisateur final, la demande et les équilibres énergétiques dans les différentes régions du monde, avec pour conséquence des changements dans les prix internationaux des énergies fossiles. Toutefois ces changements demeurent limités : par rapport à la projection de Référence : le prix du pétrole est inférieur de 10 % en 2050, alors que les prix du charbon et du gaz naturel sont en variante inférieurs d'environ 5 % sur les différents marchés.

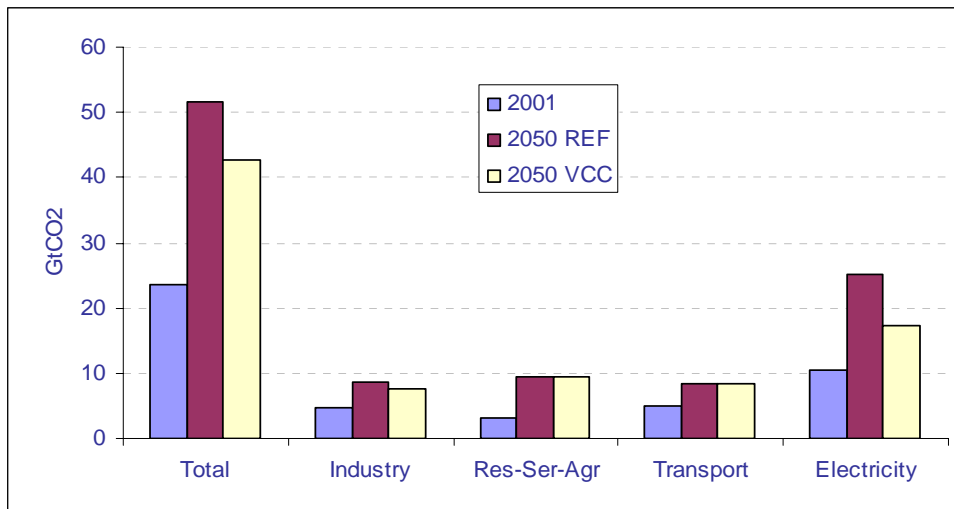
Globalement le niveau de la consommation mondiale d'énergie primaire est peu affecté par le renforcement de la valeur du carbone, elle reste supérieure à 25 Gtep en 2050 et ne diminue que de 3% par rapport à la référence.

De même la contribution du pétrole et du gaz, déjà très contrainte par les ressources en 2050 est peu modifiée pour le pétrole identique pour le gaz naturel. En revanche la contribution du charbon au bilan énergétique mondial passe de 6,5 à 5,5 Gtep, en baisse de 18 % et ce malgré le rôle très important joué par la Capture et Stockage du CO2 (CSC) dans ce scénario (voir infra Figure 15). L'ensemble des énergies non fossiles (énergies renouvelables et nucléaire) augmente significativement, de 5 % pour le nucléaire, 8 % pour la biomasse et pour l'éolien et le solaire.

- *Emissions de CO2 par secteur, Monde et Europe*

Les émissions totales diminuent de 17 % par rapport à la Référence, et la réduction la plus nette est obtenue dans le secteur électrique avec -38%, alors que les émissions de l'industrie diminuent de 11 % et que celles du bâtiment et des transports sont peu ou pas affectées. Ces évolutions se vérifient au plan mondial et en Europe. Dans les deux cas également, une inflexion nette intervient à partir de 2020, date à partir de laquelle la CSC se développe rapidement (voir infra Figure 15).

Figure 13: Emissions de CO2 par secteur (REF et VCC)

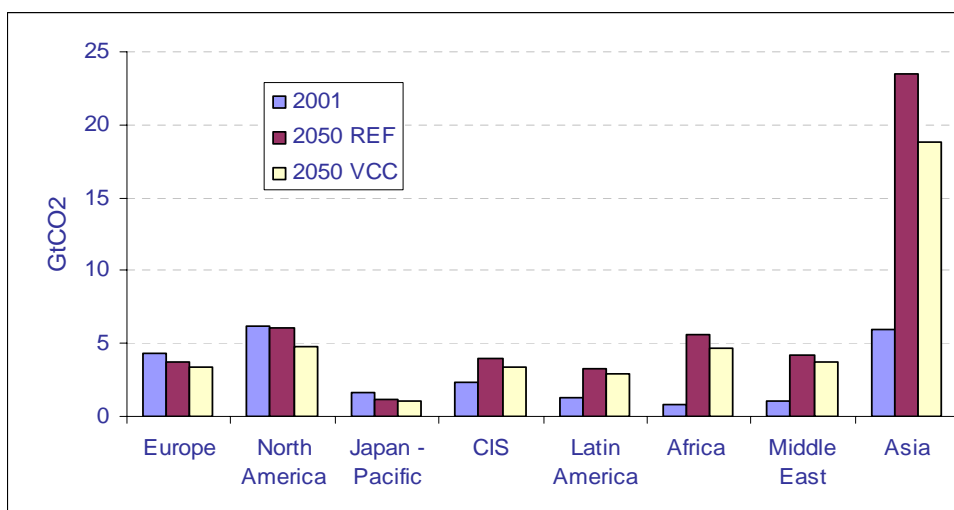


Source : POLES-2006, projection Imaclim-Poles

- *Emissions régionales dans VCC*

La réduction globale des émissions de 17 % n'est pas répartie de manière égale entre les régions du monde alors que la valeur du carbone est identique. Cela témoigne évidemment de **conditions régionales différenciées, que ce soit du point de vue du fuel-mix initial, de la structure des consommations, du niveau des prix ou enfin des potentiels de développement des énergies non fossiles dans chaque région**. On note ainsi des réductions de moins de 10 % par rapport à la référence en Europe et dans l'ensemble Japon-Australasie, 20 % en Asie et en Amérique du Nord, 10 à 17 % dans les autres régions non-Annexe 1 et la CEI.

Figure 14: Emissions de CO2 par région (REF et VCC)

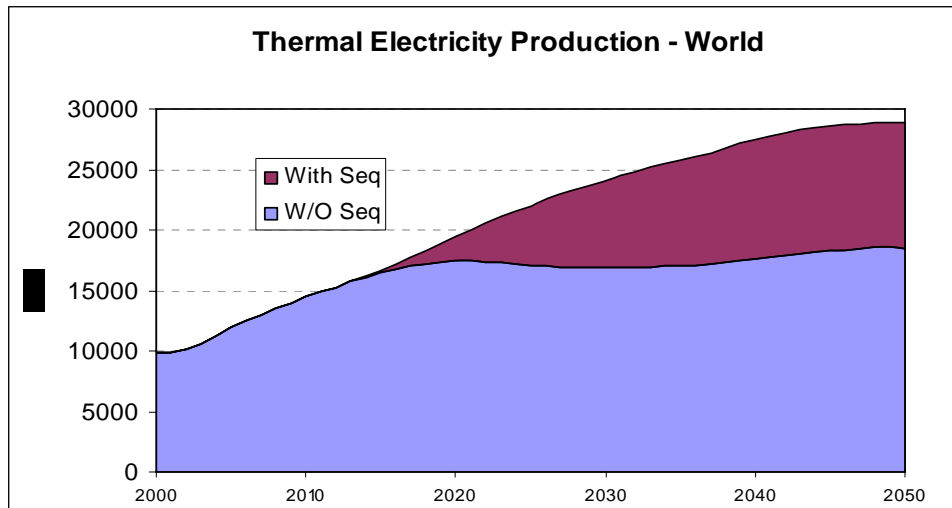


Source : POLES-2006, projection Imaclim-Poles

- Le rôle de la capture et séquestration du CO2

La comparaison de la production thermique d'électricité avec et sans séquestration dans la référence et dans le scénario VCC fait très nettement apparaître l'impact très important de cette option technologique dans les résultats du nouveau scénario : **en 2050 près de 40 % de l'électricité d'origine thermique est produite dans des centrales à CSC.**

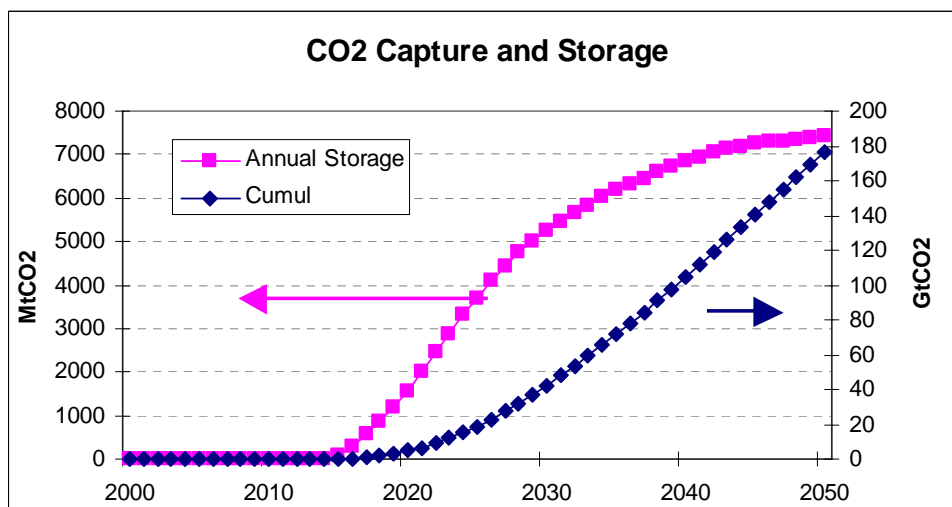
Figure 15: Production d'électricité thermique avec et sans CSC (VCC)



Source : POLES-2006, projection Imaclim-Poles

Entre 2040 et 2050 la croissance de la CSC se ralentit car il est supposé que les coûts de stockage augmenteront avec les quantités stockées. **A partir d'une première estimation des potentiels par région, les quantités stockées en 2050 sont déjà considérables, elles correspondent en effet en 2050 à 14 % des flux annuels** ou quantités cumulées à 8 années d'émission actuelles (Figure 16)

Figure 16: Flux annuel et stock cumulé de CO2 en Capture et Stockage VCC)



Source : POLES-2006, projection Imaclim-Poles

- *VCC un signal prix significatif mais insuffisant*

Le scénario de Référence prenait en compte un premier niveau de limitation des émissions de CO₂, obtenu par les politiques climatiques a minima. En particulier, le scénario de Référence incorpore des modifications importantes dans la production d'électricité à partir de 2020, avec une montée en puissance des renouvelables et du nucléaire qui représentent respectivement près de 30 % et 20 % de la production totale d'électricité en 2050.

Ces transformations sont confirmées dans le scénario VCC, mais il apparaît que **ce scénario se caractérise avant tout par le développement massif de la Capture et Séquestration du CO₂ à partir de 2020** – c'est à dire lorsque la valeur du carbone dépasse 20 €/tCO₂. Ce développement explique près de la moitié des réductions dans la deuxième vague déclenchée par le scénario VCC.

Dans une certaine mesure le scénario VCC fait apparaître à la fois **la puissance et les limites des politiques climatiques fondées uniquement sur un signal-prix et sur un signal-prix unique** ... En effet il apparaît que le signal-prix de 50 €/tCO₂, s'il est un puissant vecteur de réduction dans le secteur électrique et dans une moindre mesure l'industrie, n'a que peu d'impact dans les secteurs où le prix de l'énergie au consommateur est déjà élevé du fait des coûts de transport-distribution et des taxes. L'impact est alors considérablement amorti : pour l'essence, une valeur du carbone de 50 €/tCO₂ ne représente que 12 c/l, on comprend alors que la dynamique des transports soit peu affectée dans le scénario VCC.

Ce constat devra conduire à la fois à **analyser des dispositifs d'instruments économiques différenciés selon les secteurs⁶ et à incorporer dans les scénarios des éléments de régulation autre que les seuls instruments économiques**. Ces développements doivent cependant être situés dans la perspective de scénarios de réduction beaucoup plus ambitieux et nécessitant la mise en œuvre d'un ensemble de changements structurels, examinés dans la deuxième partie.

2 CHANGEMENTS STRUCTURELS : LES CHOIX DE MODELISATION MATERIAUX, URBANISME, TRANSPORTS

On l'a vu plus haut, le scénario VCC combiné à la projection économique Imaclim-Poles apparaît incompatible avec une stabilisation émissions à un niveau acceptable, en particulier du point de vue des objectifs européens tels que formulés aujourd'hui. Il s'agit maintenant de procéder à la construction de scénarios plus ambitieux, et se rapprochant des objectifs climatiques européens, d'une part en généralisant aux industries de matériaux les approches déjà utilisées pour la sidérurgie⁷ afin :

⁶ Ce qui impose une réflexion sur l'efficacité économique de systèmes d'incitation comportant des valeurs du carbone différentes

⁷ Notamment avec les développements du modèle POLES dans le projet ULCOS, Ultra Low CO₂ Steel-making

- de faire apparaître le rôle potentiel des innovations radicales dans les technologies de process,
- de modéliser les changements probablement requis dans les systèmes d'infrastructures et d'aménagement,
- d'analyser les conséquences pour la demande en matériaux des nouvelles infrastructures et des équipements de type Facteur 4.

Comme rappelé dans le Tableau 4, les principaux changements à prendre en compte renvoient à la demande totale, à sa structure et aux technologies, dans trois domaines-clé : le bâtiment, les systèmes de transport, les industries de matériaux. L'accent doit être mis en particulier sur la représentation de la ligne intermédiaire représentant les changements structurels et les choix modaux.

Tableau 4: Changements structurels dans les sociétés à bas profil d'émission

	Bâtiment / Urbanisation	Urbanisation / Transports		Matériaux
Demande totale	Démographie / urbanisation	Densité urbaine Intensité en logistique		Dé- matérialisation
Structure / Modes	Densité urbaine, habitat collectif / individuel	Choix modaux		Trans- matérialisation
Technologies	Bâtiment BE, TBE	Technologies des véhicules (BE, TBE)		Technologies de process (BE,TBE)

NB : BE = Basses Emissions, TBE = Très Basses Emissions

2.1 Les industries de matériaux : développements à partir du cas de l'acier

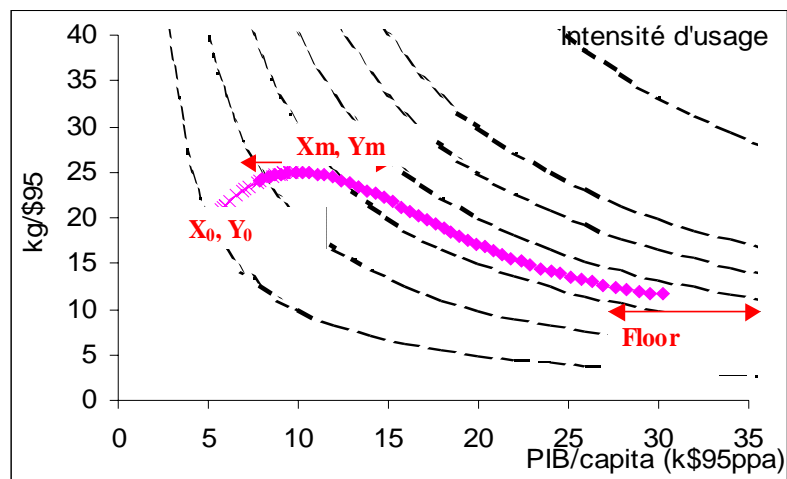
- *Bases de données et projection de la demande globale de matériaux : le module TRANSMAT*

Les projections de consommation de matériaux doivent dans un premier temps s'appuyer sur une étude des séries longues permettant d'analyser l'intensité d'usage de chaque matériaux (rapport entre la consommation apparente en unité physique et le PIB, soit un ratio comparable à l'intensité énergétique). Cette démarche sera de fait menée en s'appuyant sur les nombreux travaux méthodologiques qui ont été consacrés à l'énergie, d'abord pour l'acier avec extension à l'aluminium, au ciment et au verre. Elle est conduite essentiellement par ENERDATA pour la constitution des bases de données et la construction des fonctions de demande globale.

L'application TRANSMAT, développée sous Excel et VENSIM permet de simuler la demande de matériaux à long terme (2030-2050). Le monde est divisé en 8 régions et 12 pays. **L'application utilise donc le ratio des consommations ramenées au PIB (en anglais IoU, pour Intensity of Use) pour l'analyse des déterminants et la projection des évolutions de consommation des**

matériaux suivant en cela les travaux de Malenbaum-IISI [1974, 1978], les compléments apportés par les travaux de Tilton & Tilton et Roberts [1990, 1996] ou encore les travaux de Criqui (1992) pour l'énergie : cette dernière approche permet en particulier de faire apparaître les isoquants de consommations par tête dans le graphique de l'intensité d'acier et donc de rendre compte simultanément de deux variables explicatives.

Figure 17: Les variables de paramétrage de la fonction

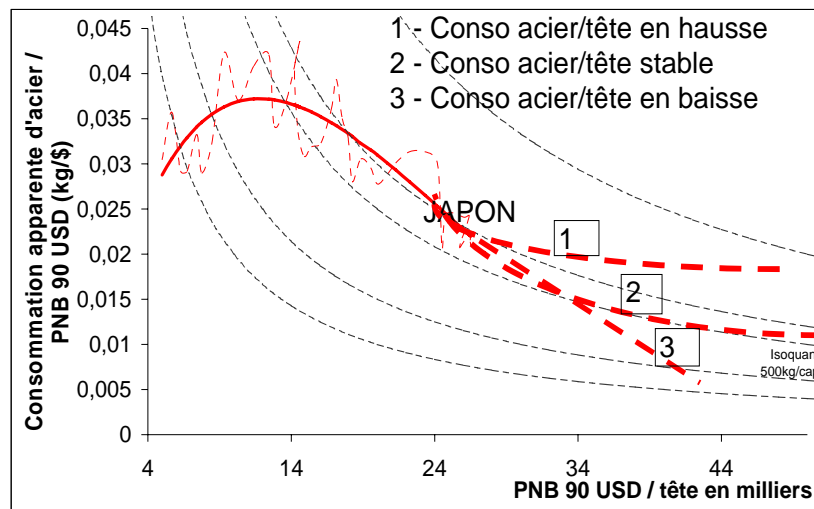


Source : POLES-TRNASMAT

Les hypothèses sont détaillées pour chaque région et les grands pays consommateurs de chaque régions et les trajectoires de la courbe d'intensité d'usage sont différenciées. L'approche choisie permet de simuler trois types à long terme, représentées sur la Figure 18, selon que la courbe d'intensité d'usage. On conviendra alors de la terminologie suivante :

1. Si l'intensité d'usage reste stable, la consommation d'acier par tête augmente avec le PIB et il n'y pas alors de dématérialisation.
2. Si elle suit une isoquant, ce qui correspond à une consommation d'acier par tête constante, il y a dématérialisation « faible ».
3. S'il y a diminution de la consommation d'acier par tête, alors on considèrera que l'on est dans un cas de dématérialisation « forte ».

Figure 18: Evolutions possibles de la courbe d'IoU



Source : Rynkiewicz, Mima, Criqui (2006)

Les analyses historiques de Moreau (2005) montrent une tendance à la convergence entre pays et surtout à la stabilisation des intensités d'acier à des niveaux voisins. Dans les pays à industrialisation ancienne, cette stabilisation implique qu'il n'y a pas dématérialisation forte (les tonnages d'acier consommés augmentent si la population est légèrement croissante). Le comportement général est une stabilisation progressive des intensités mais contrastée selon les régions. La modélisation complète devra permettre d'inclure une sensibilité aux évolutions des prix de des matériaux. Ces simulations de demande vont permettre de modéliser les besoins de capacité de production supplémentaire pour lesquelles s'opèrera la compétition inter-technologies au niveau des process et en fonction des trois classes de coût : investissement, énergie, coût du carbone.

- *Le modèle ISIM (acier), structure et portefeuille technologique⁸*

Le module ISIM (« Industrial Steel Industry Module »), initialement développé à l'IPTS⁹ est un module sectoriel couplé au modèle POLES. L'extension à 2050 ainsi que la discussion des hypothèses et du comportement du modèle ont bénéficié d'interactions avec des experts industriels dans le cadre du projet européen ULCOS. Le modèle ISIM identifie 51 régions regroupées en 11 ensembles régionaux. La demande d'acier est traitée par le sous-module « TRANSMAT » décrit plus haut. Les autres sous-modules interconnectés de ISIM permettent de modéliser le commerce international, l'investissement

⁸ Extrait du chapitre 4 « ULCOS et la compétition technologique dans la sidérurgie mondiale » Rynkiewicz, C., (2006), « Contrainte d'environnement global et changement technique induit : vers des trajectoires d'innovations radicales dans la sidérurgie », Thèse en préparation pour le Doctorat en Sciences Economiques, Université de Grenoble, (septembre 2006)

⁹ Hidalgo I., Szabo L., Ciscar J.C., Soria A., (2005), Technological prospects and CO₂ emission trading analyses in the iron and steel industry: a global model, *Energy* 30 583-610

Hidalgo I, Szabo L, Ciscar JC, Russ P, Soria A. Energy consumption and CO₂ emissions from the world iron and steel industry. (2003), EUR 20686 EN. Seville: Institute for Prospective Technological Studies, Joint Research Center

en capacités de production par région («capacity planning»), la demande d'énergie pour chaque technologies et les émissions de GES.

Les caractéristiques technico-économiques des technologies sont renseignées dans la base de données TECHPOL, avec les autres technologies énergétiques présentées plus haut. Pour la projection à l'horizon 2050, l'évolution de ces caractéristiques (coûts d'investissements et de fonctionnement, efficacité énergétique...) peut être traitée **soit de manière exogène à partir de dires d'experts, soit de manière endogène, en utilisant les « courbes d'apprentissage à deux facteurs »**, incorporées dans le modèle POLES. Une des forces de la modélisation POLES est en effet de permettre une description de la dynamique du changement technique, technologie par technologie.

Tableau 5 : Technologies considérées dans le module ISIM

<ol style="list-style-type: none">1. Acier Martin (OPen Hearth furnace)2. Haut-Fourneau (Blast Oxygen Furnace)3. Haut-Fourneau «technologie avancée» (BOF Advanced)4. Fusion Réduction (Smelting Reduction Process)5. Haut Fourneau avec CCS (BOF with CCS)6. Fusion Réduction avec CCS (Smelting Reduction Process with CCS)7. Fusion réduction / H2 (Smelting Redution Process, H2 based)8. Four électrique (Electric Arc Furnace, conventional)9. Four électrique «technologie avancée» (EAF Advanced)10. Procédé de réduction directe (Direct Reduction Process)11. Procédé de réduction directe / H2 (Direct Reduction Process, H2)
--

Source : Projet ULCOS, base de données TECHPOL

Seules les émissions directes de GES sont comptabilisées dans le modèle, les consommations indirectes d'électricité étant prises en compte dans le modèle POLES principal. Les caractéristiques technico-économiques de ces technologies sont détaillées pour chaque région dans le module ISIM et incluent les investissements, les coûts variables (énergie, matières premières, main d'œuvre...), les coûts de maintenance et de réhabilitation. Les coûts variables de production sont utilisés pour allouer les parts de marché des technologies à chaque période. Les caractéristiques renseignent également le module de décision pour les capacités de production.

Compte-tenu de la durée de vie des équipements et de l'importance des coûts d'investissements, il est parfois plus rentable d'optimiser et réhabiliter (« retrofit ») les anciennes installations que de construire de nouvelles usines. **Les besoins de nouvelles capacités sont déduits de la différence entre la demande d'acier et les capacités de production existantes en prenant en compte celles**

qui sont obsolètes ou qui sont réhabilitées. Le choix de la nouvelle technologie de production se fait en fonction des coûts de production de longue période, avec prise en compte de l'option de réhabilitation.

- *La diffusion des technologies dans les grandes régions*

En Europe, l'industrie sidérurgique est vieillissante et majoritairement dominée par le haut-fourneau. Selon les experts du secteur, l'importance des « sunk costs » et la courbe de demande relativement plate implique que le renouvellement du capital sera assez faible. Cette intuition se confirme dans les premières simulations à l'aide de ISIM avec des contraintes carbone modérées. **Dans le cas d'un fort changement de l'environnement de sélection, un phénomène d'hybridation entre anciennes et nouvelles technologies pourrait se produire** et la modélisation doit permettre de représenter ce phénomène. L'étude des mêmes dynamiques est en cours pour les industries sidérurgiques aux USA et au Japon,

En principe il n'y a plus aujourd'hui de raisons à un retard à l'apparition des nouvelles technologies dans les pays émergents où opèrent des firmes multinationales. Toutefois, la viabilité de certaines technologies dépend de l'existence et de la disponibilité (et du prix rendu site) des matières premières. Le cas de l'Inde qui dispose de ferrailles est à ce titre exemplaire alors que la Chine ne dispose pas de stocks de ferrailles dans ferrailles. De plus, certains auteurs soulignent que le processus de diffusion des technologies, et en particulier des technologies radicales restera dépendant des « absorptive capacities » dans les pays émergents. Ces facteurs peuvent entraîner la nécessité d'une modélisation ou d'un paramétrage spécifique pour les pays du Sud. **Ainsi la question de l'adoption des technologies « climate friendly » est un chantier pour l'amélioration du modèle ISIM** et devrait prendre en compte les barrières aux transferts de technologies, voire le rôle des firmes via l'Investissement Direct à l'Etranger (IDE), les mécanismes de CDM, les contrats de « licensing » ou de « joint venture ».

2.2 La modélisation « systèmes urbains – systèmes de transport »

L'objectif est ici de dresser un inventaire des principaux changements structurels qui pourraient caractériser le devenir des sociétés à bas profils d'émission. Le fil directeur retenu pour construire la réflexion sera celui des modifications à apporter aux modèles énergétiques existants afin de les rendre propices à la simulation de ces changements structurels.

Cette réflexion peut-être structurée selon deux problématiques principales :

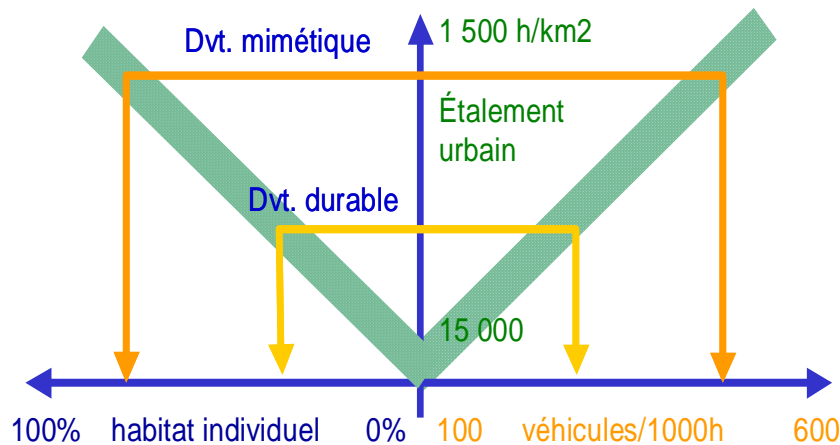
- celle de la **densité urbaine et de ses conséquences d'une part sur l'économie énergétique du cadre bâti et d'autre part sur l'évolution du système de transports** en zone urbaine et péri-urbaine ;
- celle de **l'impact sur la demande en matériaux de l'émergence de nouvelles contraintes d'émission au niveau de la production et de nouveaux produits** aux caractéristiques en partie dictées par le concept TBE (Très Basses Emissions), dans le bâtiment et les transports.

- Le complexe « densité urbaine – type d’habitat – modes de transports »

Il apparaît aujourd’hui de plus en plus clairement que l’exploration des futurs à bas profil d’émission doit conduire au moins à poser la question de **l’impact des modes d’urbanisation et plus précisément des densités urbaines sur l’économie de la consommation d’énergie dans le transport et le bâtiment**. Si l’impact du type de bâti sur les surfaces totales et sur l’intensité des besoins énergétiques dans le bâtiment a été mis en évidence depuis longtemps, diverses recherches en cours¹⁰ mettent également en relief l’impact déterminant de la densité urbaine sur l’intensité des flux de transports, et peut-être de manière encore plus cruciale, sur les choix modaux.

On serait donc en présence d’une relation complexe entre densité urbaine, type de bâtiment et systèmes de transports. L’opposition entre les modèles de ville étalée à dominante de logement individuel et forte intensité de transport et ville dense à logements collectifs et transports en communs est sans doute trop simple. Elle mérite néanmoins d’être explorée et, **sans préjuger a priori des différences d’intensité énergétique globale, il paraît clair que chaque modèle correspond à une économie énergétique très différente**¹¹.

Figure 19: Densité urbaine – habitat – transport, cadre analytique



- Propositions de modélisation : système urbain – bâtiment

La problématique développée pour tenir compte de futurs contrastés pour l’économie énergétique des bâtiments s’appuie donc sur la distinction que l’on peut opérer entre « villes denses » (modèle asiatiques ou européen ancien) et villes étalées (modèle américain et nouveau modèle européen). L’hypothèse centrale à explorer et valider est que :

- Dans la ville dense la proportion de logements collectifs sera beaucoup plus élevée (en fait proche de 100 %) ; que la surface moyenne par foyer et donc les besoins bruts de confort

¹⁰ Voir en particulier la thèse en cours de J. Allaire

¹¹ On peut par exemple considérer que la ville étalée peut présenter des avantages du point de vue de la capitation des énergies flux, en solaire photovoltaïque par exemple ...

thermique seront plus faibles ; mais aussi que les apports d'énergies-flux, en particulier solaire, seront également plus faibles.

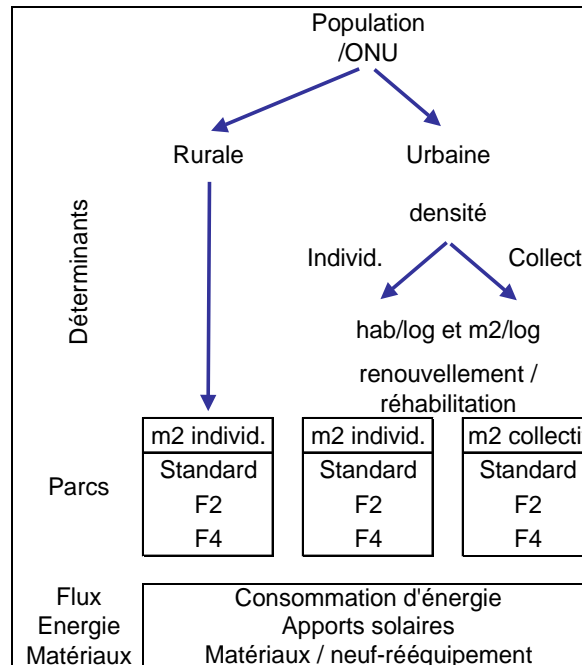
- Inversement, dans la ville étalée et indépendamment du volet transport examiné ci-dessous, la proportion d'habitat individuel sera plus élevée, avec des surfaces moyennes et des consommations de confort thermique plus importants ; ce type d'habitat ouvre néanmoins la possibilité d'un captage solaire plus important, en conception bio-climatique ou systèmes thermique actifs, mais aussi en photovoltaïque intégré (y-compris pour des usages transport).

Le premier enjeu sera tout d'abord de parvenir à construire les bases de données permettant, pays par pays, **d'isoler habitat rural et bâtiments urbains, puis pour ces derniers de définir un indicateur de densité cohérent pour la désagrégation collectif individuel.**

A un deuxième niveau il s'agira **d'identifier – en collectif, tertiaire et individuel – un ou plusieurs bâtiments de type Facteur 2 (120 kWh/m2.an) ou Facteur 4 (60 kWh/m2.an)**, en neuf ou en réhabilitation, ainsi que leurs caractéristiques en termes de vecteur énergétique consommé d'apports solaires et de demande de matériaux.

La modélisation complète devra permettre de simuler l'évolution des parcs – Standard, F2, F4 – et les demandes d'énergie et de matériaux associés en tenant compte de la réhabilitation ou d'un éventuel renouvellement accéléré, pour différents niveaux de contrainte carbone.

Figure 20: Densité urbaine – Habitat, le cadre de modélisation



- Propositions de modélisation : système urbain – transport

Dans le cas du système de transport de passagers, la modélisation vise tout d'abord à opérer une **distinction entre transports occasionnels et transports quotidiens, qui apparaît comme la plus propice pour structurer les choix modaux.**

Dans les deux cas, deux approches sont généralement jugées pertinentes pour modéliser la demande de transports et les choix modaux :

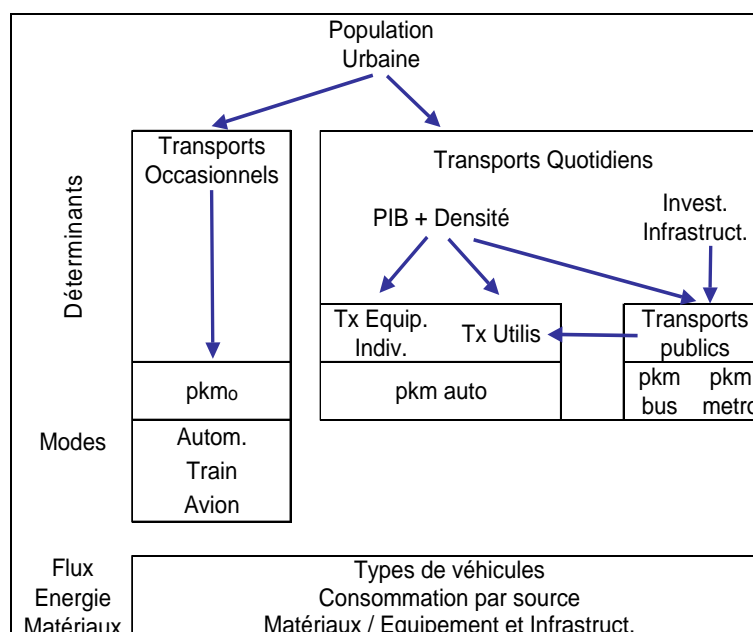
- Celle consistant à estimer la demande totale de déplacement, puis à simuler les substitutions entre les modes à partir de fonctions de coûts généralisés (prenant en compte en particulier le temps).
- Celle procédant plutôt d'une estimation des demandes spécifiques par mode de transport en tenant compte d'effets de substitution partielle (par exemple le fait que la création d'une capacité de transport collectif n'entraîne pas une substitution aux modes individuels sur une base un pour un pkm).

Dans le nouveau module transport de POLES on se propose de développer plutôt la deuxième approche, ce qui permettra en particulier de **faire apparaître le rôle-clé de l'investissement de transport public**, pour lequel on prendra en compte :

- Un coût différencié selon la densité urbaine.
- Des taux d'utilisation également fonction de la densité.
- Enfin un effet de substitution aux transports individuels via les taux d'utilisation, mais dans une proportion inférieure à l'unité, en raison de l'accroissement de la mobilité totale lié à toute nouvelle infrastructure.

Ce n'est qu'en aval de cette modélisation détaillée des choix modaux que pourront être pris en compte les autres besoins en infrastructures. Enfin, la représentation des choix technologiques, déjà présente dans le modèle avec six classes de véhicules (du conventionnel au véhicule pile à combustible, en passant par les différents hybrides et le recours aux biocarburants) permettra de construire les demandes d'énergie et de matériaux associées

Figure 21: Densité urbaine – Habitat, le cadre de modélisation



2.3 Transmatérialisation et dématérialisation dans une société à bas profil d'émission

Une fois modélisées les grandes industries de matériaux et prises en compte les changements dans les infrastructures et les équipements durables bâtiments et véhicule, la dernière étape de la modélisation des changements structurels doit permettre de **faire apparaître les modifications induites par des scénarios « Facteur 4 » sur le processus de dématérialisation-transmatérialisation.**

- *Impacts de la diffusion des bâtiments et véhicules TBE et du développement de nouvelles infrastructures sur la demande de matériaux*

Compte-tenu de l'horizon de temps considéré et de l'ampleur des modifications de demande de matériaux qui peuvent être induites par une contrainte de type « Facteur4 », il faut généraliser à l'ensemble des matériaux, l'analyse selon laquelle **« l'évolution à court et moyen terme des consommations d'acier ne peut faire l'économie d'une analyse fine de la consommation spécifique des diverses branches utilisatrices d'acier et de leur contribution au PIB au cours du temps »** (Guy Dollé, 2005). Dans les travaux menés avec le modèle POLES, l'attention sera concentrée sur le bâtiment et les transports (pour les véhicules et les infrastructures).

Les stratégies d'orientation du changement technique peuvent suivre les deux voies complémentaires de l'éco-efficacité (« eco-efficiency ») et de la sobriété (« sufficiency ») suivant l'approche développée par un groupe d'experts pour le rapport « sustainable production » (Berkhout et al, 2002 ; Princen, 2003, 2005). Dans ce dernier cas, les modifications de marché peuvent jusqu'à une évolution vers une « économie de fonctionnalités » (Allenby 1994 ; Stahel, 1997 ; Bourg, 2003). L'enjeu méthodologique est de pouvoir représenter les effets de ces deux stratégies sur les secteurs consommateurs de matériaux, qui peuvent conduire à une dématérialisation plus ou moins forte des différents secteurs ainsi qu'à la transmatérialisation ou substitution entre matériaux (Auty, 1985 ; Ayres et Ayres, 1996 ; Labys, 1986, 2001, 2004 ; Labys et Waddel, 1989).

Alors qu'il apparaît impossible de reconstituer complètement la demande de matériaux à partir d'une logique bottom-up (comme pour l'énergie par exemple) la recherche menée par ENERDATA devra notamment permettre de simuler l'impact des technologies TBE dans le bâtiment ou les transports et des infrastructures associées sur les « fonctions d'intensité d'usage » développés de manière agrégée (top-down). Il faudra de plus tenir compte du fait que les dynamiques seront significativement différentes dans les pays à industrialisation ancienne où il s'agit principalement de renouveler des stocks de matériaux et dans les pays en industrialisation rapide.

3 CONCLUSION

L'application d'un modèle économique sectoriel, régulé par les prix, à l'analyse de trajectoires de contrainte d'émission permet de faire apparaître clairement les atouts et les limitations de ce type

d'outil. Dans le cas des scénarios de contrainte modérée, la logique économique du modèle fait apparaître des potentiels de réduction à bas coût, mais concentrés dans quelques secteurs. Les exercices présentés dans la première partie de ce rapport montrent notamment le rôle très important du secteur électrique pour la mobilisation d'énergies non carbonées et pour les technologies de capture et stockage.

Le fait que ce secteur joue un rôle-clé renvoie à deux types de phénomènes d'ordre très différent et qu'il convient de bien distinguer :

- i Dans la réalité, le système électrique est de fait un secteur de première importance pour la mobilisation de technologies énergétiques zéro ou faible contenu en carbone, à court et à long terme, avec de nombreuses technologies disponibles et des comportements d'investissement économiques par des opérateurs industriels.
- ii Mais le poids relatif de ce secteur est peut-être surévalué par rapport aux potentiels dans d'autres secteurs, dans la mesure où les changements structurels liés aux infrastructures et à l'émergence de nouveaux biens d'équipement sont actuellement représentés d'une manière moins poussée dans les autres secteurs.

La nécessité de rendre compte de l'ensemble des changements structurels se renforce lorsqu'il s'agit de simuler des scénarios de forte contrainte carbone, de type Facteur 4 dans les pays Annexe 1. Dans ces scénarios en effet le recours à une régulation par des prix uniformes conduit à un niveau de signal-prix très élevé pour que celui-ci pèse suffisamment sur la demande et les émissions dans les secteurs transport et le bâtiment.

La simulation des scénarios Facteur 4 impose donc une modélisation plus poussée de ces secteurs, permettant de faire apparaître l'impact des politiques d'infrastructures et d'aménagement urbain qui constitueront très probablement une condition pour le développement de sociétés à très bas profil énergétique.