Entreprises pour l'Environnement

Scénarios de transition vers un monde économe en carbone en 2050 : quels enjeux pour l'industrie ?

Lancée en 2004, l'étude « Scénarios sous contrainte carbone : Quels enjeux industriels ? » a exploré quels pouvaient être les impacts sur les grands secteurs industriels d'ici 2050 d'une contrainte carbone permettant de suivre une trajectoire de stabilisation de la concentration atmosphérique de CO_2 à 450 ppm. Grâce à une plateforme de modélisation hybride innovante, et à un dialogue itératif entre chercheurs et industriels, l'étude délivre un ensemble de résultats concernant tant les politiques climatiques en général que la réponse économique des secteurs industriels – en particulier la sidérurgie, la production d'aluminium, de ciment et de verre plat, ainsi que le secteur de l'énergie.

LES OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'étude a cherché à examiner quel serait **l'impact, sur les principaux secteurs industriels, d'une forte contrainte carbone** : de l'ordre de celle nécessaire à une stabilisation à 450 ppm CO_2 à la fin du siècle, ce afin de limiter le réchauffement du climat.

En plus des secteurs **énergétiques**, l'étude s'est concentrée sur les secteurs de production **d'acier, d'aluminium, de ciment et de verre plat**, parce que ces matériaux sont des éléments essentiels de la satisfaction des besoins dans les domaines des transports et de l'habitat. Sources importantes d'émissions de GES, ces industries sont susceptibles d'être fortement impactées par la contrainte carbone globale.

Une des originalités de l'étude est de poser la question des transformations industrielles non seulement du côté des technologies de production, mais aussi du côté de la demande adressée à ces secteurs. Une forte contrainte carbone est en effet susceptible d'induire **des bifurcations importantes sur les besoins de matériaux**, via les modifications du bâti, des infrastructures, des réseaux de transport d'énergie, des véhicules.

Les travaux ont également exploré d'autres options de développement, impliquant un ensemble de mécanismes d'incitation dépassant la seule mise en place d'un prix du CO_2, en se concentrant sur **le rôle des infrastructures et de l'organisation spatiale des activités**. Ces éléments reflètent effectivement les choix dont disposent les gouvernements pour influencer le contenu énergétique de leur développement, question cruciale notamment dans les pays émergents.

L'ambition de l'étude exigeait de représenter explicitement tant les potentiels technologiques de réduction des émissions que les effets d'interaction intersectoriels et macroéconomiques ; elle a conduit au développement **d'une plateforme de modélisation hybride** mettant en dialogue le modèle énergétique POLES et le modèle d'équilibre général Imaclim-R, en y incluant des modules spécifiques aux secteurs industriels étudiés.

L'appropriation du travail de recherche par les industriels et l'encadrement de la modélisation des secteurs industriels ont été facilités par **un dialogue itératif en comité de pilotage** tout au long de l'étude.

Trois scénarios ont été réalisés :

REF	Scénario de référence où la croissance économique mondiale est dynamique et où une réelle contrainte carbone est absente.
STAB1	Scénario de stabilisation à 450 ppm CO_2, avec une généralisation du style de développement des pays industrialisés au reste du monde.
STAB2	Scénario de stabilisation à 450 ppm CO_2 en faisant évoluer ce style de développement à l'aide de politiques et mesures appropriées au niveau des infrastructures, du bâti et de l'organisation de espaces. Deux variantes à STAB2 ont été réalisées : **VARCCS** Variante qui écarte l'option du captage et stockage du CO_2. **VARPED** Variante qui retarde de 5 ans la contrainte carbone dans les pays en développement.

LES RESULTATS

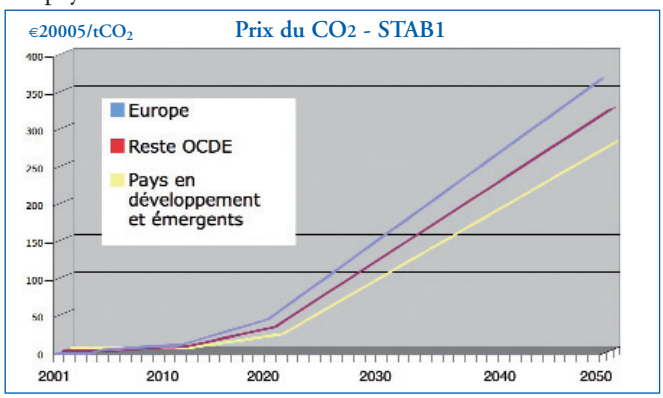
i. Le scénario de référence conduit à une impasse climatique (scénario REF)

Le scénario REF, dans lequel le développement se poursuit suivant les tendances actuelles - i.e. globalement la diffusion à l'échelle mondiale du mode de vie des pays industrialisés - et où la contrainte carbone reste au faible niveau qu'elle connaît plus ou moins aujourd'hui, conduit à une multiplication par 4,5 du PIB mondial en 2050 par rapport à 2001. Mais la croissance forte des besoins énergétiques (multipliée par 2,5) satisfaite par le recours aux énergies fossiles (20 Gtep en 2050 contre 8 Gtep en 2001) induit une trajectoire des émissions de CO_2 (57 Gt en 2050 contre 23,5 en 2001) qui n'est **pas soutenable du point de vue climatique**.

ii. Seule une très forte valeur carbone peut contenir les émissions dans un scénario de développement mondial à l'occidentale (scénario STAB1)

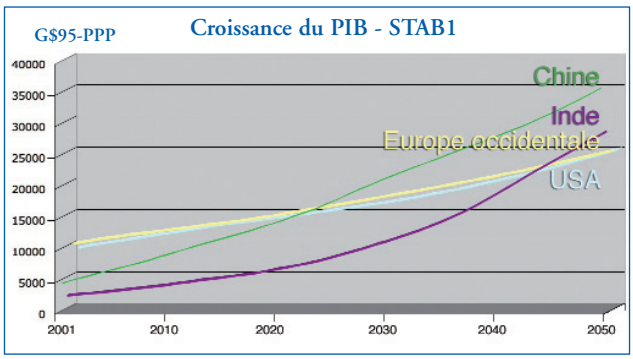
Le scénario STAB1 propose une poursuite du développement suivant le mode des pays industrialisés, mais impose une enveloppe d'émissions de CO_2 conduisant à une stabilisation des concentrations atmosphériques de CO_2 à 450 ppm à la fin du XXIème siècle. Il faut alors déterminer quel profil de la valeur du CO_2 permet d'induire les réductions d'émissions nécessaires.

Dans les modèles, cette valeur du carbone est un indicateur représentatif de l'ensemble des contraintes, y compris la taxation et la réglementation, qui peuvent être mises en place dans les différents secteurs pour induire des réductions d'émissions. La courbe du prix du CO_2 décolle à partir de 2008 en Europe, de 2013 aux USA et de 2017 dans les pays hors OCDE.

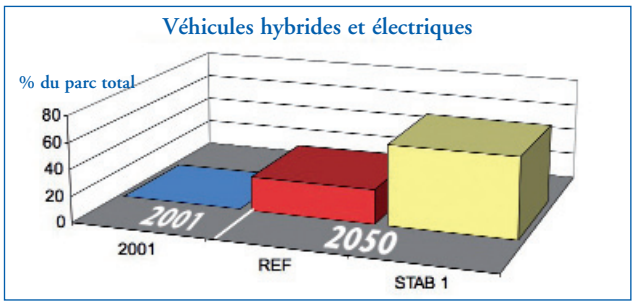


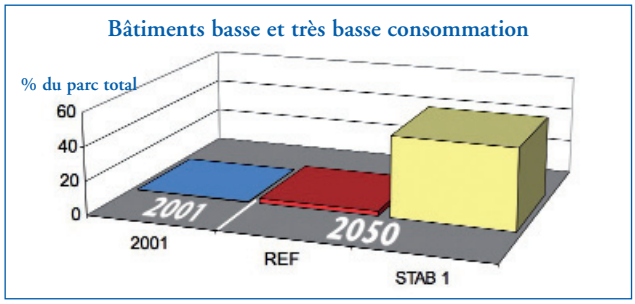
Les enseignements les plus marquants du scénario STAB1 sont :

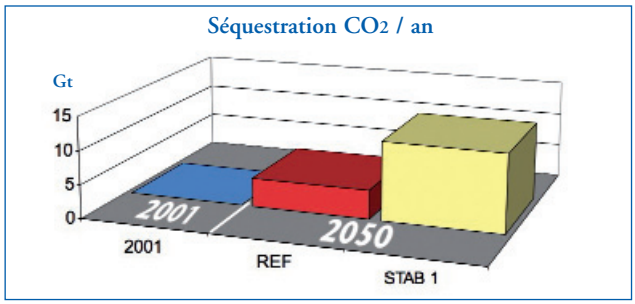
- **le prix très élevé de la tonne de CO_2** (160 à 220€ en 2030, 350 à 430€ en 2050) nécessaire pour obtenir la courbe d'émission souhaitée,
- **le PIB croit partout dans le monde dans le scénario STAB1**, mais derrière cette croissance se cachent des évolutions différenciées. Dans la plupart des régions, le coût de la contrainte carbone entraîne **une faible perte de la croissance du PIB par rapport au scénario REF**, de l'ordre de moins de 5% en 2050. Mais pour certains pays émergents et en développement, Inde et Chine en particulier, l'impact du coût de transition et des coûts de l'énergie sur le budget des ménages est tel que des **mesures d'accompagnement nationales ou internationales seraient nécessaires**, afin d'assurer une distribution plus équitable des efforts,



- ce scénario s'appuie sur des **hypothèses optimistes sur la maturité et la diffusion des technologies permettant de réduire les émissions** : habitat basse et très basse énergie, véhicules électriques, hybrides ou à hydrogène, et surtout la capture et le stockage du CO_2 des centrales électriques (CCS en anglais) qui évite l'émission cumulée de 202 Gt CO_2, séquestrées entre 2020 et 2050. Les graphes suivants récapitulent ces évolutions :







iii. Un modèle différent de développement permet d'alléger la contrainte économique (scénario STAB2 et variantes)

L'hypothèse d'un mode de développement économique et de choix d'infrastructures en partie inchangés, alors même que les gouvernements accepteraient d'imposer un coût du carbone très élevé à leurs populations, a été remise en question à l'issue du scénario STAB1 : ce doute a conduit à la réalisation du scénario STAB2.

L'impact d'un développement et d'une organisation spatiale différents des activités (scénario STAB2)

Ce second scénario de stabilisation à 450 ppm CO_2 a été élaboré en ajoutant à la valeur croissante du carbone **des options de développement différenciées sur les infrastructures de transport et l'organisation des zones urbaines** au sein de chaque région ainsi que sur **une nouvelle organisation des systèmes productifs**. Ces politiques recouvrent des problématiques différentes, avec d'une part des agglomérations déjà pourvues d'infrastructures lourdes et d'autre part, les zones urbaines à organiser dans les prochaines décennies, en particulier dans les pays en développement.

Deux modèles d'organisation urbaine ont été projetés selon les contextes locaux : d'une part une ville étalée qui s'équipe d'un réseau de transport multimodal et d'un réseau de production d'énergie décentralisé, d'autre part une ville concentrée, réduisant les besoins de mobilité quotidienne des personnes et des marchandises. L'hypothèse du choix du second modèle dans la majorité des villes asiatiques en construction permet une diminution importante du besoin de mobilité et une baisse substantielle du trafic automobile par rapport aux autres scénarios.

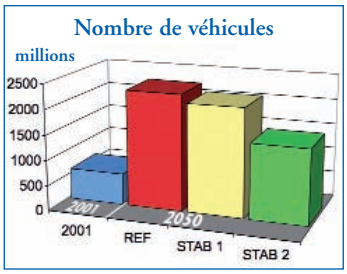
Une nouvelle organisation de l'industrie lourde est basée sur le **rapprochement de la production des lieux de consommation** et dans certains cas de la **production d'énergie *in situ***.

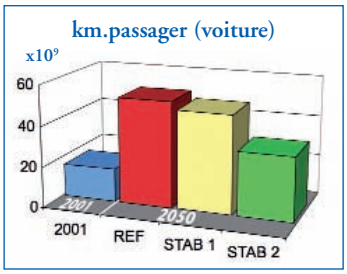
La prise en compte des choix collectifs menant à ces bifurcations d'organisation permet **d'alléger un peu la valeur du carbone nécessaire** au respect de la contrainte d'émissions (-12%).

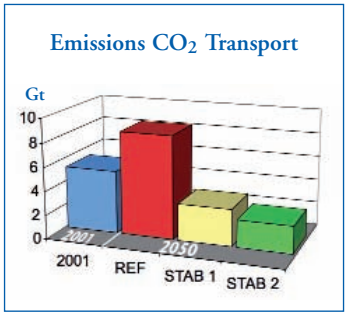
Pour permettre au modèle de la **ville étalée**, inscrit dans le territoire de certains pays développés et plus consommateur d'espace et d'énergie, d'être compatible avec une stabilisation du climat, il est nécessaire de supposer **une diffusion très large des technologies de production d'énergie décentralisée** (solaire en particulier), **une rénovation généralisée de l'habitat** selon des normes très basse énergie et l'adoption de véhicules électriques optimisés pour leur usage dans un système multimodal.

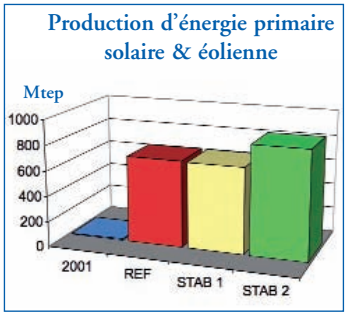
Une **baisse significative de la mobilité** est constatée dans les **villes concentrées**, et tout particulièrement au niveau des véhicules personnels dont le nombre passe en 2050 de 2,3 milliards dans le monde (scénario REF) à 1,5 milliards.

La combinaison du signal-prix croissant sur le carbone et des choix d'organisation urbaine permet de limiter fortement le coût de transition, et génère des opportunités de croissance plus élevée à long terme, grâce à une réduction plus rapide du fardeau énergétique des ménages.









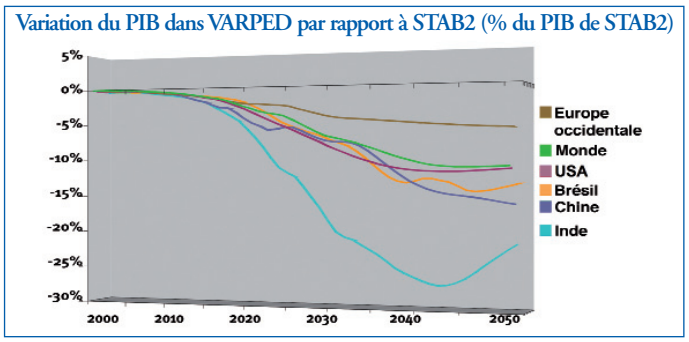
L'importance de la capture et séquestration du CO_2 (variante VARCCS de STAB2)

Le recours complémentaire aux leviers des styles de développement et des choix d'organisation spatiale ne supprime pas **la nécessité d'un déploiement massif des principales technologies de réduction dans le secteur électrique**. Le scénario VARCCS, qui écarte l'option de la capture et séquestration du CO2 dans les centrales électriques, implique une **pénétration plus forte** du **nucléaire** et des **renouvelables**, par rapport à un scénario qui en est déjà richement pourvu. Le surcoût d'investissement global dans ce scénario toucherait surtout les pays émergents riches en charbon et connaissant une croissante très forte de la demande d'électricité.

Une fenêtre d'opportunité limitée pour induire une bifurcation des émissions (variante VARPED de STAB2)

La fenêtre d'opportunité permettant de faciliter les réductions des émissions de CO_2 en combinant la mise en place d'une valeur croissante du carbone et des stratégies durables de développement des territoires s'avère réduite dans le temps. Dans le scénario VARPED **de démarrage des politiques climatiques repoussé en 2022 dans les pays hors OCDE, l'économie mondiale enregistrerait un ralentissement marqué et durable**.

Ce surcoût est surtout dû au fardeau supplémentaire supporté par les pays émergents, rendus plus vulnérables à un prix croissant du carbone, en raison de l'irréversibilité des choix techniques et organisationnels intensifs en énergie.



LES IMPACTS SECTORIELS DES DIFFERENTS SCENARIOS

Le tableau ci-dessous indique succinctement les consommations en 2050 au plan mondial des principaux matériaux qui ont été étudiés et qui sont les composants essentiels des industries du transport et de l'habitat, ainsi que le mix de la production d'électricité en fonction des divers scénarios examinés. Les sorties des scénarios donnent les évolutions de ces résultats par période et par région.

	unité	2001	2050			
			REF	STAB 1	STAB2	VARPED
PNB réel	G$95	41854	191210	179011	187014	166752
PNB per capita	$95	6847	21262	19905	20795	18542
Emissions CO_2	Gt	23,4	57,4	17,6	17,5	17,1
Consommation d'ACIER	Mt	834	2013	2189	1982	1861
Consommation de CIMENT	Mt	1681	4933	5557	5719	5153
Consommation d'ALUMINIUM	Mt	34,9	122,7	119,6	106,7	99,5
Consommation de VERRE PLAT	Mt	35,2	105,9	127,5	92,6	87,7

On constate très globalement, avec les hypothèses et les données utilisées, que la **recherche de la stabilisation à 450 ppm** de la concentration du CO_2 atmosphérique ne diminue pas mais tend au contraire à **renforcer la demande en matériaux**.

Les scénarios de stabilisation changent la structure de la demande en matériaux et ouvrent de nouveaux marchés pour des solutions à valeur ajoutée supérieure.

Dans le scénario **STAB2**, la demande d'acier est réduite de 10% par rapport à STAB1 en raison d'un **développement moindre de l'automobile**, une baisse partiellement compensée par une croissance de la demande d'acier pour les infrastructures de transport de 2,2% par an.

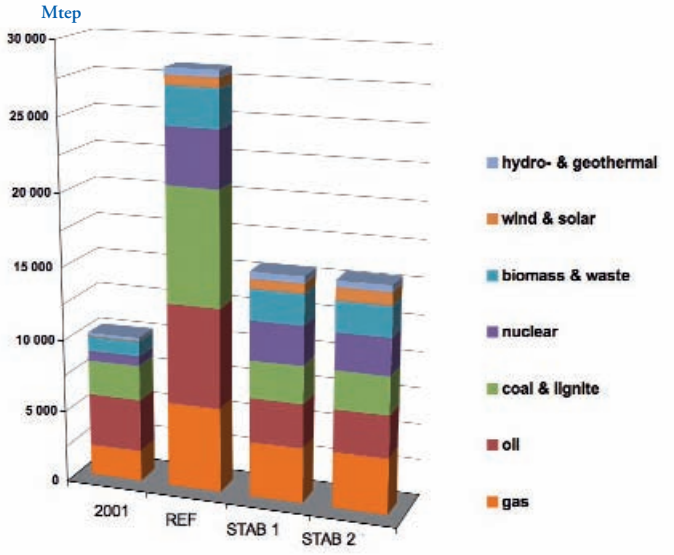
La demande mondiale de ciment croît à un rythme annuel moyen de 2,5% (3,3% par an pour les infrastructures et 2% pour les bâtiments). La croissance de la demande vient à 75% de l'Asie.

C'est la variante avec retard dans la décarbonation des PED (**VARPED**) qui conduit à la **diminution la plus importante de la consommation de matériaux** en raison du ralentissement du développement économique induit.

Les scénarios à 450 ppm de CO_2 s'illustrent par **une déconnection marquée de la croissance économique par rapport à la demande énergétique primaire**, qui est presque deux fois moins élevée dans les scénarios STAB 1 et 2 par rapport au scénario REF à l'horizon 2050. Le recours aux énergies fossiles est quasi stabilisé au niveau actuel (avec une diminution de pétrole et une augmentation du gaz). La production d'énergie nucléaire et renouvelable est également moins élevée que dans le scénario REF, mais prend une part plus importante dans le bilan.

Cette dernière devient très forte dans l'hypothèse du retard de mise en œuvre du CCS (**VARCCS**).

Production d'énergie primaire

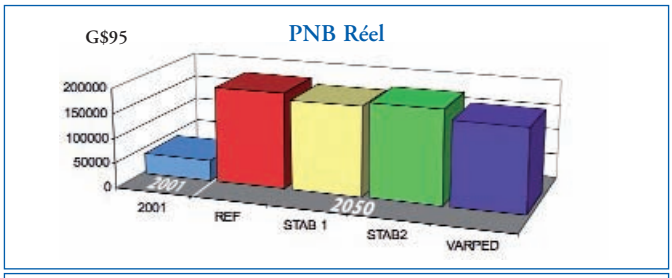


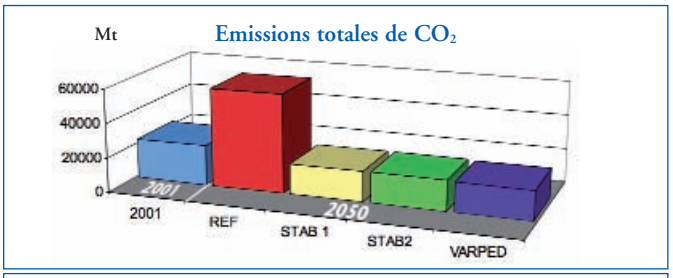
Production d'énergie électrique

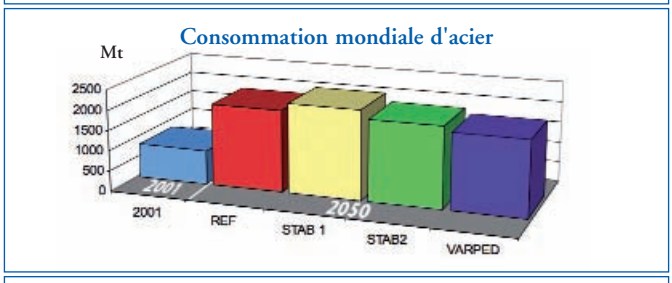
	2001	2050		
		REF	STAB1	STAB2
Production électrique (kTwh)	15,4	74	49,6	51,3
dont combustibles fossiles	*9,9*	*39,5*	*20,2*	*20,4*
dont nucléaire	*2,6*	*18,0*	*12,6*	*11,8*
dont ENR éolien et solaire	*0,04*	*5,4*	*5,6*	*7,4*

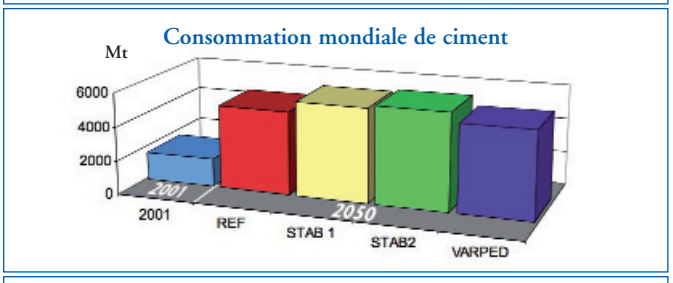
LES MESSAGES A RETENIR DE L'ETUDE

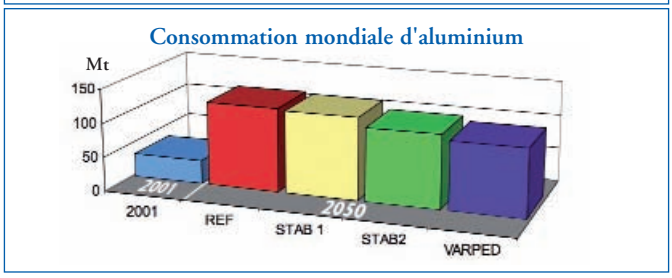
- Une stratégie cohérente de stabilisation des émissions de CO_2 à l'échelle globale passe par un **renforcement et un renouvellement accéléré des infrastructures**. Dans ces conditions, les **grands secteurs producteurs de matériaux**, acier, aluminium, ciment et verre peuvent jouer un **rôle moteur** dans le cadre d'une demande accrue, s'ils adaptent leur outil de production à la contrainte carbone. Outre un **coût du carbone**, un **engagement politique** fort est nécessaire pour enclencher la mutation nécessaire des infrastructures et mobiliser ces secteurs de manière adéquate dans la lutte contre l'effet de serre.
- Un développement économique basé sur l'adoption à l'échelle mondiale du mode de vie des pays de l'OCDE, et **sans contrainte carbone**, induit une trajectoire des émissions de CO_2 (57 Gt en 2050 contre 27 Gt en 2001) qui n'est **pas soutenable du point de vue climatique**.
- La recherche d'une **stabilisation à 450 ppm** de la concentration atmosphérique du CO_2 à la fin du siècle, conjointement avec une poursuite du mode de développement occidental, **représenterait une très forte contrainte sur les émissions de CO_2 d'ici 2050**. Dans ce cas le prix de la tonne de CO_2, pris en tant qu'indicateur de l'ensemble des politiques et mesures, y compris la taxation des émissions, serait de **l'ordre de 400€/t en 2050**.
- Des **options de développement différenciées sur les infrastructures de transport et l'organisation des zones urbaines** au sein de chaque région, combinées avec un signal-prix croissant sur le carbone permettent de **limiter fortement le coût de la transition** vers la stabilisation à 450 ppm du CO_2 et génèrent des opportunités de croissance plus élevée à long terme, grâce à une réduction plus rapide de la facture énergétique des ménages.
- Les scénarios de réduction d'émissions et de stabilisation du CO_2 atmosphérique à 450 ppm nécessitent, en plus d'une augmentation très sensible de l'efficacité énergétique, un **déploiement massif et rapide des nouvelles technologies** : bâtiments à très basse énergie, véhicules électriques, capture et séquestration du CO_2 des centrales thermiques, et recours grandissant au nucléaire et aux énergies renouvelables. L'absence de l'option CCS implique une pénétration plus forte du nucléaire et des renouvelables. Le surcoût d'investissement global toucherait surtout les pays émergents où la croissance de la demande d'énergie est forte.
- Dans la majeure partie des régions du monde, le coût macroéconomique de la contrainte climatique est concentré sur les **deux ou trois décennies de transition** vers un système peu carboné. A l'horizon 2050, la politique climatique permet à la majorité des régions **d'atteindre, voire de dépasser le niveau de PIB du scénario de référence**, grâce notamment à une protection anticipée contre les tensions sur les ressources fossiles.
- Pour certains pays émergents et en développement, le coût de transition est tel que des **mesures d'accompagnement nationales ou internationales seraient nécessaires**, afin d'assurer une distribution plus équitable des coûts de réduction des émissions.
- **Un retard dans le démarrage des politiques climatiques dans les pays hors OCDE entraînerait un ralentissement marqué et durable pour l'économie mondiale**. Ce surcoût serait surtout dû au fardeau supplémentaire supporté par les pays émergents, rendus plus vulnérables à un prix croissant du carbone, à cause de l'irréversibilité des choix techniques et organisationnels intensifs en énergie.

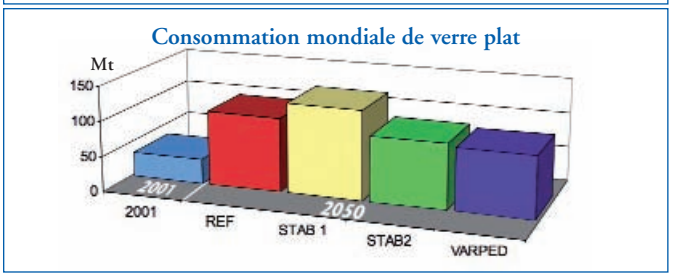












L'étude a été réalisée dans le cadre de la Fondation pour le Développement durable et les relations internationales (Fonddri)

Elle a bénéficié du soutien financier d'ArcelorMittal, Caisse des Dépôts, EdF, GdF-Suez, Lafarge, Saint-Gobain, SNCF, Total, Veolia Environnement, et EpE.

Le Comité de Pilotage de cette étude associait EpE, l'Iddri, ArcelorMittal, Caisse des Dépôts, EdF, GdF-Suez, Lafarge, Saint-Gobain, SNCF, Total et Veolia Environnement. Il était animé par Patrick Nollet et Richard Baron.

Contact : Patrick Nollet, pnollet@epe-asso.org

Les travaux ont été réalisés par :

Le CIRED est une unité mixte de recherche fondée en 1971 commune à l'Ecole des Ponts, d'AgroParisTech-ENGREF, de l'EHESS, et associée au CNRS-UMR 8568, ainsi qu'au CIRAD.

Contact : Renaud Crassous, crassous@centre-cired.fr

Le Laboratoire d'Economie de la Production et de l'Intégration Internationale (LEPII) est une unité mixte de recherche (5252) du Centre National de la Recherche Scientifique CNRS) et de l'Université Pierre Mendès France de Grenoble (UPMF).

Contact : Patrick Criqui, patrick.criqui@upmf-grenoble.fr

ENERDATA est un cabinet d'études et de conseil indépendant, spécialisé dans les secteurs de l'énergie et de l'environnement. Créé en 1991, la société a intégré dans son activité la gestion et le suivi de la banque de données internationale Enerdata®, en opération depuis 1986.

Contact : Bertrand Château, bertrand.chateau@enerdata.fr

Cette étude est une initiative conjointe de :

Entreprises pour l'Environnement (EpE) est une association créée en 1992 qui regroupe près d'une cinquantaine de grandes entreprises qui veulent mieux prendre en compte l'environnement dans leurs décisions stratégiques et dans leur gestion courante et progresser dans le sens du développement durable. Ses membres appartiennent à tous les secteurs de l'économie, industrie et services.
EpE est le partenaire français du *World Business Council for Sustainable Development*.
Pour en savoir plus : www.epe-asso.org

Contact : Séverin Fischer, sfischer@epe-asso.org

A l'interface de la recherche et de la décision, l'Iddri (Institut du développement durable et des relations internationales) instruit les questions du développement durable qui nécessitent une coordination mondiale, comme le changement climatique ou la disparition des ressources naturelles.
Sa mission est triple : éclairer les décisions ; identifier les sujets de demain ; ouvrir un espace de dialogue à des acteurs aux intérêts souvent divergents : organismes de recherche, acteurs privés et publics de la vie économique, syndicats, ONG.

La Fondation pour le développement durable et des relations internationales (Fonddri) est une fondation reconnue d'utilité publique. Elle conçoit et met en œuvre des programmes de recherche permettant d'approfondir les thématiques de l'Iddri et de leur apporter un éclairage novateur.

Contact : Michel Colombier, michel.colombier@iddri.org

Ce document a été publié en novembre 2008 sur papier recyclé