



HAL
open science

L'impact des stratégies énergétiques des pays émergents sur les émissions mondiales de carbone

Marie-Hélène Hubert, Isabelle Cadoret, Ujjayant Chakravorty, Carolyn Fischer

► To cite this version:

Marie-Hélène Hubert, Isabelle Cadoret, Ujjayant Chakravorty, Carolyn Fischer. L'impact des stratégies énergétiques des pays émergents sur les émissions mondiales de carbone. [Rapport de recherche] Conseil Français de l'Énergie - CFE (Contrat 86 2017). 2017. halshs-02439893

HAL Id: halshs-02439893

<https://shs.hal.science/halshs-02439893>

Submitted on 14 Jan 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'impact des stratégies énergétiques des pays émergents sur les émissions mondiales de carbone

Rapport final – Contrat CFE 86
2017

Equipe de Recherche

Marie-Hélène Hubert, Maître de Conférences, CREM (UMR CNRS 6211), Université de Rennes 1 (<https://sites.google.com/site/mariehelenehubert/>)

Isabelle Cadoret, Professeur des Universités, CREM (UMR CNRS 6211), Université de Rennes 1

Ujjayant Chakravorty, Professeur, Tufts University

Carolyn Fischer, Chercheur, Resources For the Future

Table des matières

1	Introduction	4
2	Panorama des émissions de CO2.....	6
2.1	Les émissions globales de CO2.....	6
2.2	Les émissions par habitant	8
2.3	Pays en développement et relation entre le PIB par habitant et les émissions de CO2 par habitant.....	10
3	Tendances de long terme des émissions de CO2.....	15
3.1	Cadre d'analyse théorique	16
3.1.1	Emissions de polluants et activité économique	16
3.1.2	Croissance et convergence des émissions de polluants	18
3.2	Données et stratégie d'estimation.....	19
3.2.1	Stratégie d'estimation.....	19
3.2.2	Les Données	22
3.3	Résultats de l'analyse économétrique	27
3.3.1	Analyse de l'équation de convergence conditionnelle	27
3.3.2	Impact des politiques climatique et énergétique.....	30
4	La Politique Energétique de la Chine	36
4.1	Politique climatique et énergétique de la Chine	36
4.1.1	Une politique de développement des énergies renouvelables agressive	37
4.1.2	Politique en faveur du gaz de schiste	39
4.1.3	L'énergie nucléaire et la séquestration géologique du carbone	42
4.2	Modèle d'équilibre partiel des marchés énergétiques mondiaux	43
4.2.1	Description du modèle.....	44
4.2.2	Description des scénarios de politiques énergétique et climatique	47
4.3	Impact des politiques énergétiques et climatiques sur les émissions de CO2 pour 2030.....	47
4.3.1	Le scénario développement du gaz.....	47
4.3.2	Le scénario développement des énergies renouvelables.	49
4.3.3	Le scénario stabilisation de la consommation de charbon.	49
4.3.4	Le scénario taxe sur le CO ₂	50
5	Conclusion et perspective de recherche.....	52
6	Travaux cités.....	54
	Annexe A.....	57
	Annexe B :.....	60
	Annexe C : Description détaillée du modèle d'équilibre partiel des marchés mondiaux de l'énergie..	62

Figure 1 Répartition géographique des émissions de CO ₂ et du PIB	7
Figure 2 Poids économique et environnemental des BRICS	8
Figure 3 Emissions de CO ₂ en tonne par habitant par zone géographique.....	9
Figure 4 Emissions de CO ₂ en tonne par habitant : Etats Unis, Union Européenne et BRICS	10
Figure 5 Corrélation entre les émissions de CO ₂ et le PIB par habitant.....	12
Figure 6 : Intensité en carbone	14
Figure 7 : Beta-convergence conditionnelle des émissions de CO ₂ par tête.....	21
Figure 8 : Taux de croissance annuel moyen des CO ₂ par tête pour chaque pays (1992-2013)	25
Figure 9 : Convergence absolue des émissions de CO ₂ par tête	26
Figure 10 : Effet d'échelle.....	27
Figure 11 : Niveau des émissions par tête d'équilibre pour chaque scénario et pour chaque zone géographique et niveau des émissions en 2013.....	32
Figure 12 : Emissions de CO ₂ par tête des BRICS en 2013 et Cible d'émissions par tête de CO ₂ définies dans le cadre de l'Accord de Paris.....	35
Figure 13 : Niveau des émissions par tête d'équilibre pour chaque scénario et cible d'émissions par tête définies dans le cadre de l'Accord de Paris.....	35
Figure 14 : Portefeuille énergétique de la Chine année 2013	37
Figure 15 : Evolution de la Capacité de production de l'électricité à partir du solaire et de l'éolien en Chine de 2005 à 2015.....	38
Figure 16 : Réserves de gaz de schiste et pipeline	40
Figure 17 : Génération d'électricité à partir de l'énergie nucléaire en TWh	44
Figure 18 : Structure du modèle	45
Figure 19 : Demande finale d'énergie en Chine sous différents scénarios en 2030	48
Figure 20 : Pourcentage de variation des émissions de CO ₂ chinoises sous les différents scénarios comparativement au scénario de base en 2030 (%)	50
Figure 21 : Pourcentage de Variation des émissions de CO ₂ en Amérique du Nord et dans le RDM (%).....	51
Figure 22 : Fuites de CO ₂ en % En Amérique du Nord et dans le RDM.....	51

Liste des Tableaux

Tableau 1 Part des émissions de CO ₂ des BRICS dans leur Région	8
Tableau 2 : PIB par habitant et émissions de CO ₂ par habitant.....	13
Tableau 3 : Les contributions nationales des BRICS	17
Tableau 4 : Statistiques descriptives	24
Tableau 5 : Equation de convergence : Estimateur IV-GMM	29
Tableau 6 : Elasticités du taux de croissance des émissions de CO ₂ par rapport à la consommation énergétique.....	30
Tableau 7 : Hypothèses des différents scénarios définis pour l'ensemble des pays de l'échantillon.....	31
Tableau 8 : Contributions nationales du Brésil, de la Fédération de Russie et de l'Afrique du Sud.....	33
Tableau 9 : Contributions nationales de la Chine et de l'Inde	34
Tableau 10 : Contenu en CO ₂ des ressources fossiles.....	46

1 Introduction

Les pays en développement et notamment les pays émergents sont au cœur des enjeux en matière énergétique et environnementale. Ils doivent poursuivre leur développement économique avec une contrainte environnementale de plus en plus forte. Leurs besoins énergétiques ont connu une très forte hausse ces 10 dernières années entraînant de facto une forte augmentation de leurs émissions de carbone¹. La hausse des émissions de carbone s'étant poursuivie à un rythme effréné, les émissions par habitant de la Chine ont dépassé celle de l'Union Européenne en 2013. Néanmoins, les Etats-Unis sont encore loin devant, un américain émet deux à trois fois plus de carbone qu'un chinois. L'Inde, l'autre grand pays asiatique émergent, a connu une très forte croissance de ses émissions totales portées par une forte croissance économique et une détérioration de son efficacité énergétique au cours de ces dernières années. En 2015, l'Inde émettait environ 6% des émissions mondiales. Parallèlement, la croissance des émissions des pays de l'OCDE est ralentie et, en particulier, celle l'Union Européenne s'est stabilisée. La poursuite des tendances actuelles conduirait à une hausse considérable des émissions de carbone mondiales, du fait en partie, des stratégies énergétiques des pays émergents. Cette perspective éloigne toujours un peu plus la perspective d'un maintien de la hausse des températures sous le seuil des 2 °C, limite fixée par l'article 2 de l'Accord de Paris pour éviter les dommages irréversibles du climat.

Aujourd'hui, le charbon, ressource relativement abondante mais fortement polluante, est la principale source d'énergie des pays en développement et émergents (IEA, 2016b). Leurs politiques énergétique et climatique sont encore naissantes et manquent souvent d'ambition. Dans ce contexte, nous nous demandons sous quelles conditions ces pays pourraient stabiliser leurs émissions de carbone. Il s'agit : i) d'apporter un éclairage sur les évolutions de long terme des émissions de polluants, ii) d'identifier le rôle des facteurs économiques et énergétiques dans ce processus et iii) de déterminer comment agir en termes de politiques climatique et énergétique pour réduire les émissions. Afin de répondre à ces questions, nous allons emprunter les outils économiques à la théorie de la croissance économique. Plus précisément, nous allons estimer le modèle de Ordas Criado et al. (2011) pour tester l'hypothèse de beta-convergence conditionnelle parmi les pays en développement et émergents et celle de l'effet d'échelle qui établit une relation croissante entre le taux de croissance du PIB par tête et celui des émissions

¹ La Chine, l'Inde et le Brésil ont bénéficié d'une croissance de leur PIB par tête entre 1970 et 2010 respectivement de +1800%, +280% et de +118%. Cette croissance s'est accompagnée d'une part de besoins énergétiques croissants avec une augmentation respectivement de 304%, 118% et 92% et, d'autre part, d'une augmentation des émissions de CO₂ par tête de 494%, 360% et 106% (Banque Mondiale, 2016).

par tête. L'échantillon de pays retenu est composé de 67 pays en développement et émergents sur la période 1992-2013. Les résultats du modèle confirment l'hypothèse de beta-convergence conditionnelle, de ce fait, les pays avec des niveaux d'émissions par tête plus faibles devraient expérimenter des taux de croissance des émissions par tête plus élevés. La vitesse de convergence est de 24%. Par conséquent, les émissions de CO₂ par tête pour les pays émergents et en développement devraient se stabiliser vers 2015-2030. L'effet d'échelle est également observé pour l'échantillon de pays retenus, plus précisément, à la suite d'une augmentation de 1 point de pourcentage du PIB par tête, les émissions par tête croissent de 0,27 point de pourcentage. En outre, les élasticités du taux de croissance des émissions par tête conditionnellement au portefeuille énergétique de chaque pays sont estimées. Une augmentation de 1 pourcent de la consommation d'énergie conduit à une augmentation de 0,15 point de pourcentage du taux de croissance des émissions de CO₂. A partir de ces élasticités, nous avons mesuré l'impact de différentes politiques énergétiques sur le niveau des émissions de CO₂.

Notre réflexion se poursuit en se focalisant sur une région phare : l'Asie et, en particulier, sur l'acteur principal du jeu des émissions mondiales de carbone : la Chine.² Pour analyser l'impact des choix énergétiques de la Chine, nous nous interrogerons sur les points suivants : Quels instruments de politique économique favoriseront la modification des choix énergétiques en Chine ? L'encouragement de la consommation de gaz en Chine sera-t-il au détriment de celui des énergies renouvelables ? Cette modification aura des répercussions sur les marchés énergétiques asiatique et mondial et pourrait accélérer les émissions de carbone mondiale. En effet, la Chine consommant plus de la moitié du charbon mondial, une diminution de sa consommation pourrait diminuer le prix mondial du charbon et ralentir la substitution de cette ressource à des énergies moins polluantes. A partir d'un modèle d'équilibre partiel du secteur énergétique mondial, nous analysons l'impact de différentes politiques chinoises sur le niveau des émissions de CO₂ en Chine et dans le Reste du Monde (RDM) pour 2030. D'après les résultats du modèle, une stratégie visant à favoriser l'extraction domestique du gaz contribuerait à une augmentation des émissions chinoises et dans le RDM. En revanche, toute politique visant à stabiliser la consommation de charbon permettrait une baisse significative du niveau des émissions de CO₂. Une taxe sur les émissions de CO₂ de 70 dollars américains par tonne de CO₂ ainsi qu'une politique favorisant le développement des énergies renouvelables devraient conduire à une baisse des émissions.

² En 2013, la Chine émettait 29% des émissions mondiales (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Notre rapport s'articule en 3 sections. La première présente un panorama des émissions de CO₂ dans le monde afin de pouvoir comprendre le rôle des pays en développement et émergents dans le paysage mondial des émissions de CO₂. La seconde vise à analyser les évolutions de long terme des émissions de polluants dans les pays en développement et émergents et à évaluer l'impact des politiques énergétiques et environnementales sur ces évolutions. La dernière s'intéresse plus spécifiquement à l'impact des stratégies énergétiques chinoises sur les émissions de CO₂ en Chine et dans le reste du monde.

2 Panorama des émissions de CO₂

Cette section présente les évolutions des émissions de CO₂ depuis 1992³ par zone géographique et par groupe de pays classés selon leur revenu. L'analyse se concentre sur les émissions de dioxyde de carbone (CO₂). Ces émissions proviennent de la combustion de combustibles fossiles et de la fabrication de ciment. Elles comprennent le dioxyde de carbone produit lors de la consommation de combustibles solides, liquides et gazeux et d'évasement de gaz et représentent près de 70% des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique⁴.

2.1 Les émissions globales de CO₂

La répartition géographique des émissions de CO₂ a évolué depuis la fin de la première révolution industrielle, période à partir de laquelle les émissions anthropiques de CO₂ ont débuté. L'Europe de l'Ouest était le principal émetteur avec plus de 95% des émissions. Au début des années 1900, sa part était d'environ 50%, celle de l'Amérique du Nord de 40% et celle de l'Asie Centrale de 10% (Chancel & Piketty, 2015). En 2013, l'Amérique du Nord représente 17% et l'Europe et l'Asie Centrale 19% des émissions mondiales.

La Figure 1 montre l'évolution de cette répartition entre les principales zones géographiques⁵ depuis 1992. Nous observons une forte augmentation de la part des émissions de CO₂ de la région Asie de l'Est et Pacifique (24% à 42%) qui s'accompagne d'une forte réduction de la part des zones Europe et Asie centrale (35% à 19%) et Amérique du Nord (25% à 17%). Cette évolution est liée au développement économique de cette zone dont la part du PIB dans le PIB mondial est passée de 20% à 31% entre 1992 et 2013. Depuis 1992, le taux de

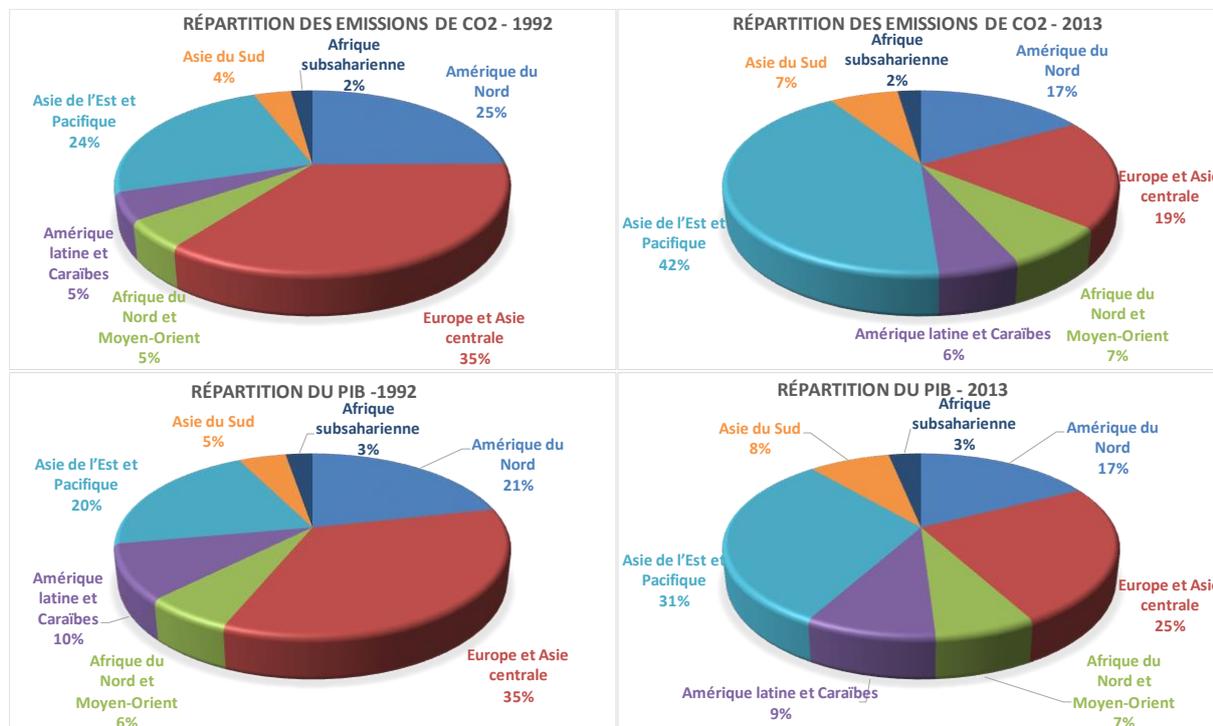
³ Notre projet mettant l'accent sur les BRICS la période d'analyse débute en 1992 afin d'avoir des données détaillées pour les pays de l'Est et notamment pour la Fédération de Russie pays qui appartient aux BRICS.

⁴ Nous utiliserons cet indicateur dans la suite du rapport.

⁵ La répartition est établie entre 6 zones géographiques : Amérique du Nord, Europe et Asie centrale, Afrique du Nord et Moyen-Orient, Amérique latine et Caraïbes, Asie de l'Est et Pacifique, Asie du Sud et Afrique subsaharienne (Banque Mondiale).

croissance du PIB annuel de la zone a été en moyenne de 4%, il a été de 2,5% en Amérique du Nord et de 1,7% en Europe et Asie Centrale.

Figure 1 : Répartition géographique des émissions de CO₂ et du PIB



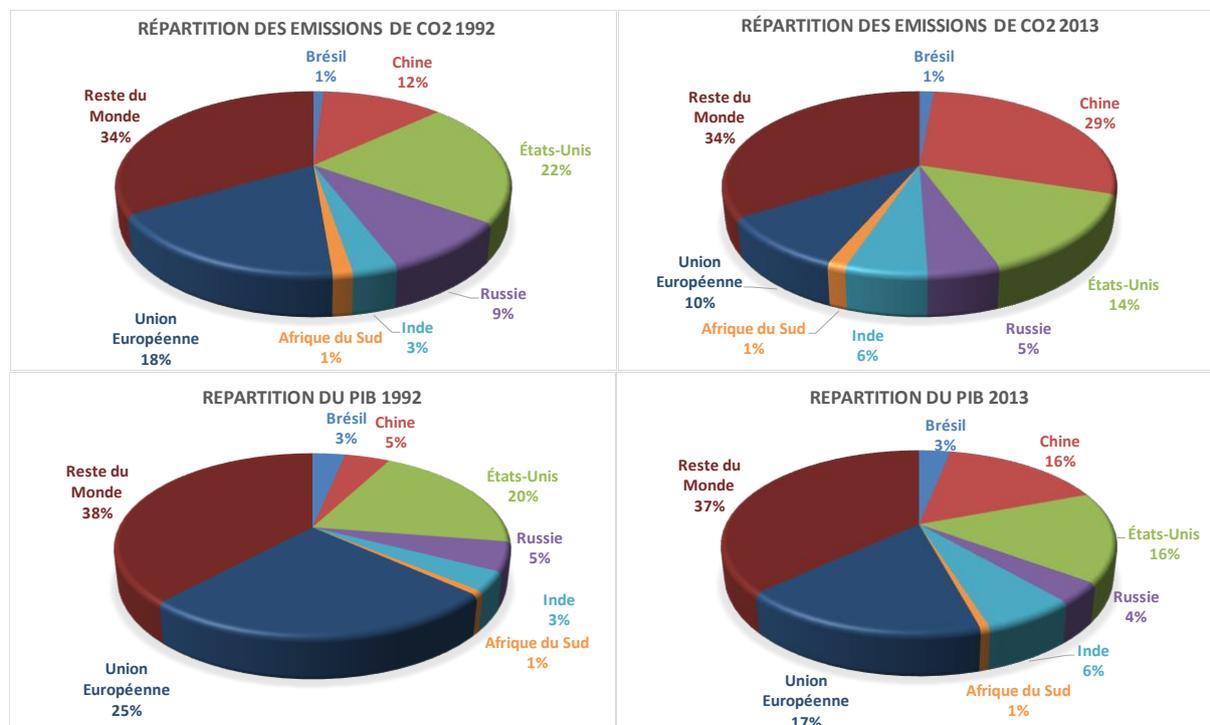
Source : Banque Mondiale (2016)

Au niveau mondial les pays émergents ont un poids économique qui s'accroît (Figure 2). La part du PIB des BRICS (Brésil, Russie, Inde, Chine et Afrique du Sud) dans le PIB mondial est passée de 17% à 30% entre 1992 et 2013 et la part des émissions de 26% à 42%. La Chine a un poids majeur, elle représente 16% du PIB mondial et 29% des émissions mondiales. Son développement économique⁶ s'accompagne d'une forte croissance des émissions car il s'appuie sur un mix-énergétique dominé par le charbon. En effet, l'approvisionnement total en énergie primaire de la Chine est basé à 89% sur les ressources fossiles dont 68% sur le charbon, 16% sur le pétrole et 5% sur le gaz (IEA, 2016b). L'Inde a multiplié par 2 la part de son PIB dans le PIB mondial pour atteindre les 6% en 2013 et par 1,6 la part de ses émissions qui représentent 5% des émissions mondiales. L'Afrique du Sud et le Brésil ont maintenu la part de leur PIB dans le PIB mondial et la part de leurs émissions tandis que la Russie a réussi à diminuer la part de ses émissions dans les émissions mondiales de 9% à 5% tout en maintenant son poids économique. Cette réduction des émissions en Russie est liée au renforcement du

⁶ Le taux de croissance annuel moyen de son PIB depuis 1992 est proche de 10%, il a cependant été plus faible ces dernières années et s'élève à 6,7% en 2016.

secteur des services dont la part dans la valeur ajoutée est aujourd'hui de plus de 63% contre 50% en 1992.

Figure 2 : Poids économique et environnemental des BRICS



Source : Banque Mondiale (2016)

Au sein de leur zone géographique (Tableau 1), les BRICS jouent un rôle majeur notamment de la Chine et l'Inde qui représentent respectivement 72% et 88% des émissions de leur zone.

Tableau 1 : Part des émissions de CO2 des BRICS dans leur Région

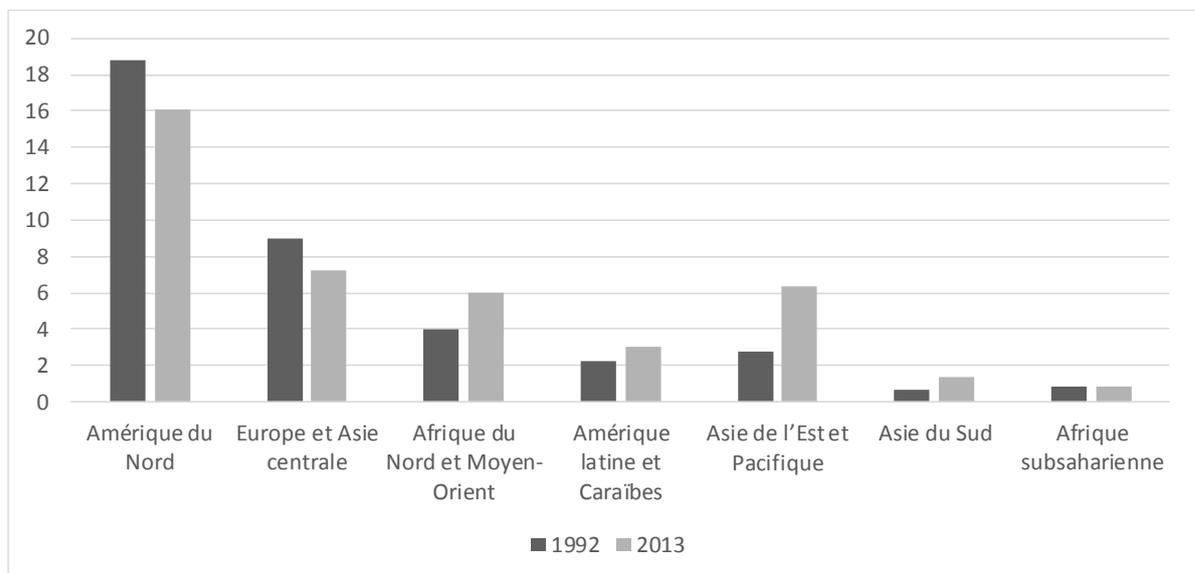
	1992	2013
Brésil / Amérique latine et Caraïbes	21%	27%
Chine / Asie de l'Est et Pacifique	52%	72%
Russie / Europe et Asie centrale	27%	27%
Inde / Asie du Sud	88%	88%
Afrique du Sud / Afrique Sub-Saharienne	67%	60%

2.2 Les émissions par habitant

La région Asie de l'Est et Pacifique est donc devenue la région qui émet le plus de CO₂ et cette évolution est fortement liée au développement économique de la Chine. Rapportée au

niveau de la population autrement dit en raisonnant en termes d'émissions par habitant, sa position est proche de celle de la région Afrique du Nord et Moyen Orient avec un niveau d'émissions de CO₂ par habitant de 6,3 tonnes par habitant en 2013. Les zones les plus fortement émettrices de CO₂ par habitant restent l'Amérique du Nord avec 16 tonnes et l'Europe et l'Asie Centrale avec environ 7,2 tonnes. Cependant, en termes de trajectoire, entre 1992 et 2013 le taux de croissance annuel moyen des émissions par tête de la région Asie de l'Est et Pacifique a été de 4,2% tandis que celui de l'Amérique du Nord a été de -0,8% et celui de l'Europe et Asie Centrale de -1%. Les autres régions sauf l'Afrique Subsaharienne ont eu des taux de croissance positifs +2% pour l'Afrique du Nord et Moyen Orient, +1,5% pour Amérique Latine et Pacifique et +3,6% pour l'Asie du Sud. L'Afrique Subsaharienne a eu un taux de croissance annuel moyen de -0,2% (Figure 3).

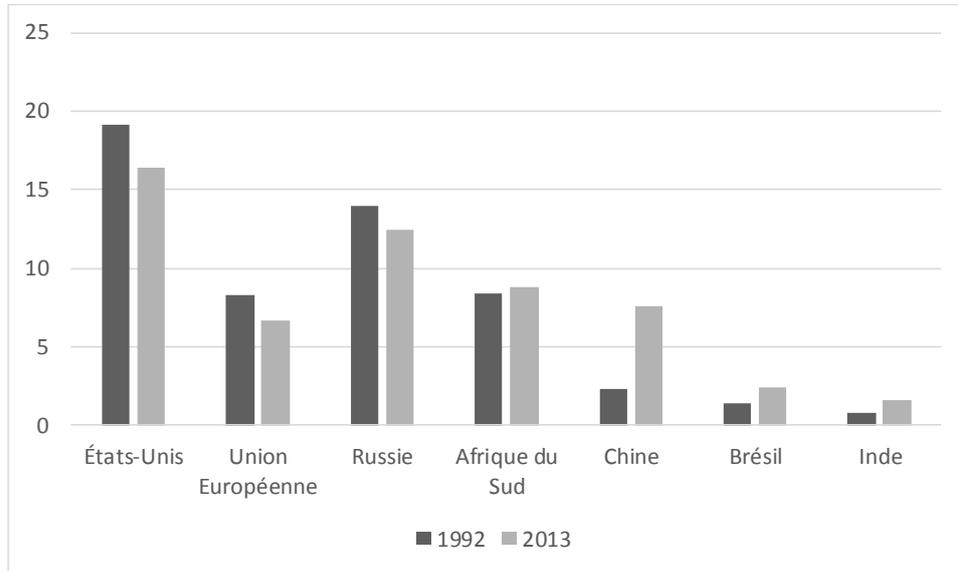
Figure 3 Emissions de CO₂ en tonne par habitant par zone géographique



Source : Banque Mondiale (2016)

La comparaison des émissions par habitant des BRICS avec celle des Etats-Unis et de l'Union Européenne montre que les Etats-Unis restent les plus importants émetteurs. En revanche, il apparaît que l'Union Européenne émet moins de polluants par habitant que la Russie, l'Afrique du Sud et la Chine. (Figure 4).

Figure 4 : Emissions de CO₂ en tonne par habitant pour les Etats Unis, l'Union Européenne et les BRICS



Source : Banque Mondiale (2016)

Le paragraphe suivant complète la présentation des émissions totales et par tête par zone géographique en analysant la corrélation entre les émissions et le PIB par habitant dans les pays en développement et émergents.

2.3 Corrélation entre le PIB par habitant et les émissions de CO₂ par habitant dans les pays en développement et émergents

Figure 5 : Corrélation entre les émissions de CO₂ et le PIB par habitant

Nous travaillons à partir d'un échantillon de 115 pays en développement et émergents classés selon 3 catégories de revenus d'après les critères de la Banque Mondiale⁷: pays à revenus intermédiaires élevés, à revenus intermédiaires faibles et à revenus faibles. L'échantillon de pays est composé de 25 pays à revenus faibles, 43 pays à revenus intermédiaires faibles et 47 pays à revenus intermédiaires élevés. Le groupe des pays à faibles revenus est composé des pays de l'Afrique Sub-Saharienne et le Népal, le groupe des pays à revenus intermédiaires faibles et élevés est plus varié en termes de situation géographique, il inclut des pays des 7 régions. La liste des pays classée par niveau de revenu est détaillée en

⁷ <https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/906519>.

Annexe 1. L'ensemble de ces pays représentent en 2013 plus de 62% des émissions mondiales, la part des pays à revenus intermédiaires élevés étant de 50%.

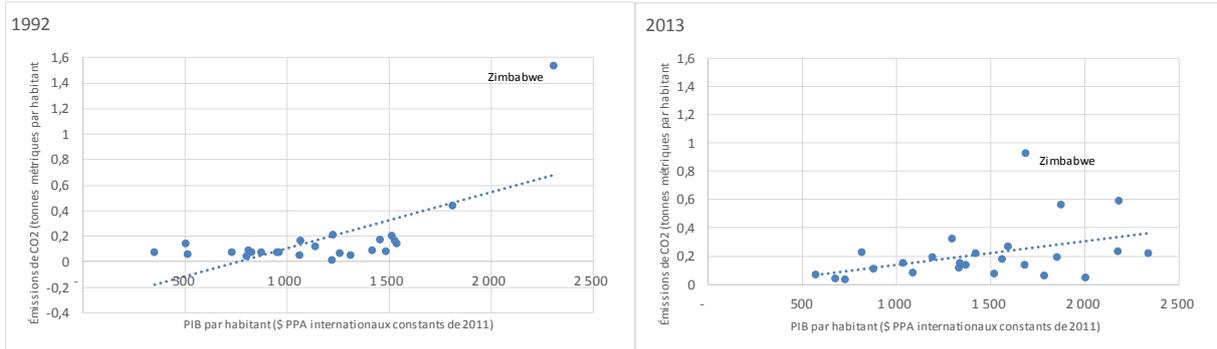
La Figure 5 représente la corrélation entre le PIB par tête et les émissions de CO₂ par tête des pays à revenus faibles et intermédiaires faibles et élevés. En 2013, la corrélation est de 0,40 pour les pays à faibles revenus, 0,52 pour les pays à revenus intermédiaires faibles et 0,58 pour les pays à revenus intermédiaires élevés. Toutefois, nous pouvons noter qu'elle a diminué entre 1992 et 2013 pour les pays à faibles revenus (-38%) et à revenus intermédiaires faibles (-5%) et elle a augmenté pour les pays à revenus intermédiaires élevés (+29%).

Le Tableau 2 présente la moyenne du PIB par habitant et des émissions de CO₂ par habitant par groupe de revenus et pour les BRICS en 1992 et en 2013. Dans les pays intermédiaires à revenus élevés, le PIB par habitant et les émissions par habitant sont 3 fois plus élevés que dans les pays à revenus intermédiaires faibles en 2013. En revanche, l'écart s'agrandit si nous comparons ces mêmes indicateurs pour les pays intermédiaires à revenus élevés et les pays à revenus faibles. Le PIB par habitant est 10 fois plus élevé et les émissions par habitant 20 fois plus.

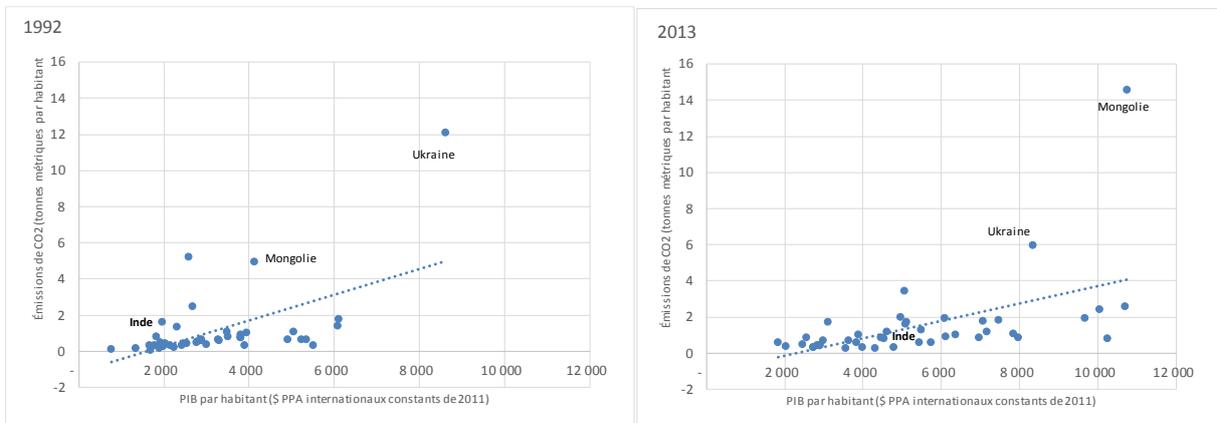
Le taux de croissance annuel moyen des émissions par habitant entre 1992 et 2013 a été de 1% dans les 3 groupes de pays. Il a été identique à celui du PIB dans les pays à revenus faibles et inférieur dans les pays à revenus intermédiaires faibles et élevés. Dans les BRICS, le taux de croissance annuel moyen des émissions par tête dépasse ce taux de 1%, il atteint 3% au Brésil, 6% en Chine et 4% en Inde.

Figure 5 : Corrélation entre les émissions de CO2 et le PIB par habitant

Pays à faibles revenus - 25 pays



Pays à revenus intermédiaires faibles - 43 pays



Pays à revenus intermédiaires élevés - 47 pays

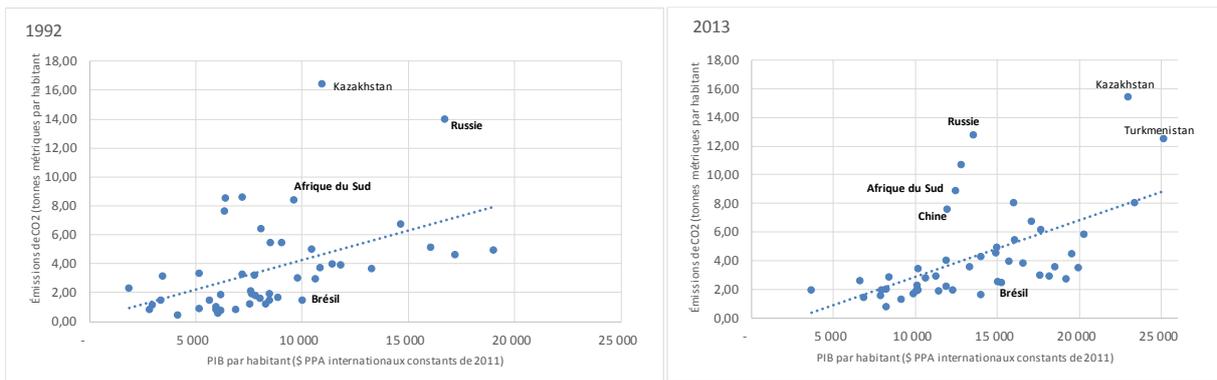


Tableau 2 : PIB par habitant et émissions de CO2 par habitant

	PIB/hab (\$ PPA internationaux constants de 2011)			Emissions de CO2 (tonnes métriques par habitant)		
	1992	2013	TCMA*	1992	2013	TCMA*
Pays à faibles revenus	1 146	1 438	1%	0,17	0,21	1%
Pays à revenus intermédiaires faibles	3 216	5 362	3%	1,12	1,47	1%
Pays à revenus intermédiaires élevés	8 465	13 692	2%	3,64	4,30	1%
Afrique du Sud	9 620	12 454	1%	8,39	8,86	0%
Brésil	10 200	15 282	2%	1,42	2,47	3%
Chine	1 857	11 951	10%	2,31	7,55	6%
Inde	1 815	5 090	5%	0,77	1,59	4%
Russie	16 705	25 144	2%	13,98	12,47	-1%

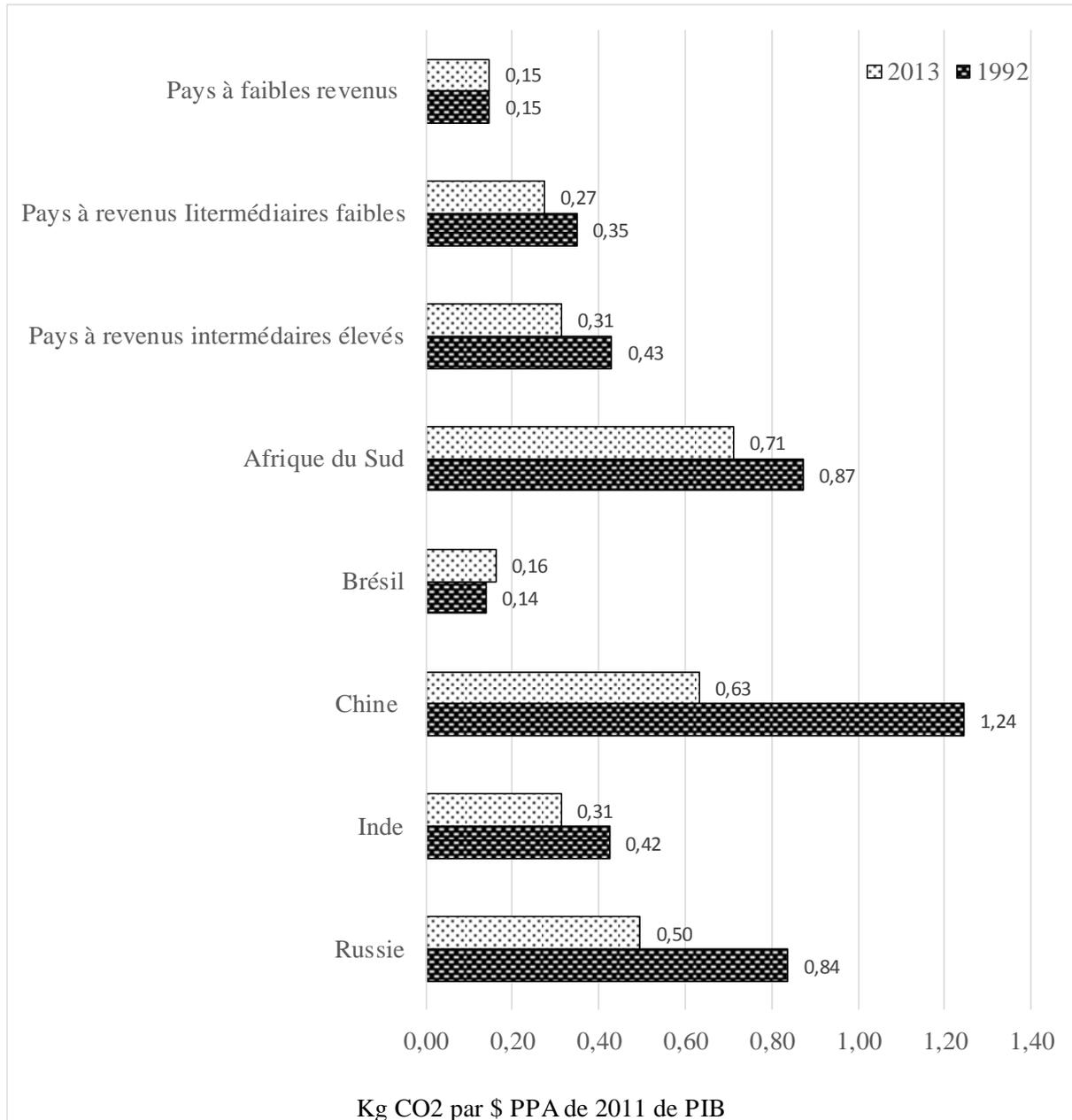
*TCMA : taux de croissance annuel moyen

Source : Banque Mondiale (2016)

La relation entre la croissance économique et les émissions peut également se mesurer à partir de l'intensité en carbone qui calcule la quantité d'émissions de CO₂ par unité de PIB (voir Figure 6). En moyenne dans les pays en développement cette intensité a peu varié. Elle est de 0,31 kg par unité de PIB dans les pays à revenus intermédiaires élevés, 0,27 kg par unité de PIB dans les pays à revenus intermédiaires faibles et de 0,15 dans les pays à faibles revenus en 2013. Parmi les BRICS, l'Inde⁸ se situe dans la moyenne des pays à revenus intermédiaires faibles et le Brésil est bien en dessous de la moyenne des pays à revenus intermédiaires élevés. En revanche, l'Afrique du Sud, la Chine et la Russie restent à des niveaux plus élevés que la moyenne des pays à revenus intermédiaires élevés malgré une baisse de 49% pour la Chine et 41% pour la Russie de 1992 à 2013. A titre de comparaison le niveau de l'intensité carbone des Etats-Unis s'élève à 0,32 kg par unité de PIB et à 0,19 kg par unité de PIB en Union Européenne.

⁸ L'Inde, selon le classement de la Banque Mondiale se situe dans le groupe des pays à revenus intermédiaires faibles, les autres pays Afrique du Sud, Brésil, Chine Russie font parties des pays à revenus élevés.

Figure 6 : Intensité en carbone



Source : Banque Mondiale (2016)

Ce panorama mondial montre que la lutte contre le changement climatique concerne toutes les régions du monde et que certains pays ont un rôle moteur à jouer dans cette lutte notamment les BRICS et principalement la Chine. Les Etats-Unis et l'Union Européenne restent des acteurs majeurs mais nous observons une tendance à la baisse non seulement de leur part dans les émissions mondiales mais aussi de leurs émissions par habitant. Par ailleurs, l'Afrique Sub-Saharienne, en raison de son niveau de développement, est la zone qui rejette le moins d'émissions de polluants. En conclusion, le changement climatique constitue un enjeu

important pour les pays développés et en développement. Le poids de ces derniers dans les émissions mondiales étant devenu plus élevé que celui des pays développés, leur participation active à la réduction des émissions est devenue incontournable.

3 Tendances de long terme des émissions de CO₂

Dans le cadre du Protocole de Kyoto entré en vigueur en 2005, seuls les pays de l'annexe I, c'est-à-dire les pays développés et les pays en transition, s'étaient engagés à respecter une cible de diminution des émissions de CO₂ étant donné qu'ils étaient les principaux responsables des émissions passées, d'une part et que leur processus de croissance pouvait s'appuyer sur des technologies moins polluantes, d'autre part. La plupart des pays en développement et émergents avaient signé et ratifié le Protocole sans toutefois s'engager à respecter une cible de diminution des émissions de CO₂. En décembre 2015 au cours de la Conférence des Parties, la communauté internationale a adopté un nouvel accord sur le changement climatique entré en vigueur le 4 Novembre 2016⁹. Les participants se sont accordés sur les points suivants dans l'Article 2 de l'Accord de Paris : i) limiter l'augmentation de la température moyenne globale en dessous des 2 degrés Celsius par rapport à leur niveau préindustriel, ii) essayer de limiter cette augmentation à 1.5 degrés Celsius, iii) stabiliser les émissions globales le plus rapidement possible, iv) s'engager dans des réductions rapides de polluants par la suite en fonction de la meilleure technologie disponible.

Afin d'atteindre ces objectifs globaux, chaque pays a défini des cibles nationales appelées contributions nationales ou Intentionally Nationally Determined Contribution (INDC) en anglais. Ce sont les premières cibles de diminution des émissions qui s'appliquent non seulement aux pays développés mais aussi aux pays en développement. Elles peuvent être révisées tous les 5 ans si elles sont jugées insuffisantes au regard de l'objectif global visant à limiter la hausse de la température moyenne globale. Selon l'article 4.3 de l'Accord de Paris, les révisions des contributions devront représenter une progression et être plus ambitieuse¹⁰. Les contributions nationales comportent non seulement des cibles en termes de réduction des émissions de CO₂ mais aussi des cibles sur la part minimale des énergies non fossiles dans la consommation primaire d'énergie ou sur les différentes stratégies permettant de diminuer les

⁹ L'Accord est entré en vigueur après la ratification de 55 pays représentant au moins 55% des émissions de CO₂.

¹⁰ Article 4.3 : *Each Party's successive nationally determined contribution will represent a progression beyond the Party's then current nationally determined contribution and reflect its highest possible ambition, reflecting its common but differentiated responsibilities and respective capabilities, in the light of different national circumstances.*

émissions de CO₂ : part minimale des énergies non fossiles dans le portefeuille énergétique, puits de carbone via la conservation des forêts existantes et/ou la replantation de forêt. A titre d'exemple, le Tableau 3 décrit les engagements pris par les BRICS au cours de l'Accord de Paris.

L'objectif est d'identifier les facteurs déterminants de l'évolution de long terme des émissions de CO₂ et d'évaluer le niveau d'émission par habitant vers le lequel converge les pays afin de déterminer si les pays devront engager des politiques énergétiques plus ambitieuses pour respecter leurs engagements.

3.1 Cadre d'analyse théorique

Nous allons décrire le cadre d'analyse théorique permettant d'examiner la dynamique de long terme des émissions. En particulier, nous allons décrire les modèles permettant de comprendre le lien entre l'activité économique et les émissions de polluants. Le premier paragraphe discute de l'Environmental Kuznets Curve qui établit une relation entre le niveau d'activité économique et le niveau de polluants. Quant au deuxième paragraphe, il est consacré aux modèles de croissance économique et au principe de convergence des émissions.

3.1.1 Emissions de polluants et activité économique

Au début des années 90, certains économistes adaptent la Courbe de Kuznets (Kuznets, 1955) qui établit une relation en U-inversé entre le niveau des inégalités et le niveau de revenu pour analyser le lien entre le niveau de pollution ou qualité de l'environnement et niveau de revenu. Ainsi, l'Environmental Kuznets Curve (EKC) décrit une relation en U-inversée entre le niveau de polluants et le revenu¹¹. Au cours des premiers stades de développement, le niveau de pollution augmente avec le niveau de l'activité économique. En effet, la croissance est essentiellement basée sur le secteur agricole puis le secteur industriel, secteurs énergivores qui consomment essentiellement des ressources fossiles. En outre, la qualité environnementale étant un bien de luxe, sa demande est faible. Au-delà d'un certain niveau de revenu, la relation entre le niveau de polluants et le revenu est décroissante. Le secteur des services, plus économe en énergie, occupe une place de plus en plus importante dans le PIB au détriment des secteurs agricoles et industriels. Etant donné que la demande pour la qualité de l'environnement

¹¹ Dans le reste de ce rapport, étant donné que nous centrons notre analyse sur les émissions de CO₂, nous parlerons indifféremment de niveau d'émissions ou de niveau de polluants.

augmente avec le niveau de revenu, la part des énergies renouvelables et autres énergies à faible contenu en CO₂ augmente dans le portefeuille énergétique.

Tableau 3 : Les contributions nationales des BRICS

Pays	Cible sur les émissions	Autres cibles
Brésil	Réduire de 37% les émissions de gaz à effets de serre par rapport à leur niveau de 2005 d'ici 2025.	Accroître la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique à 45% d'ici 2030. Mix-énergétique pour la production électrique composé de 28% à 33% d'énergie renouvelables, hors hydroélectricité, d'ici 2030. Avoir hors hydroélectricité une part des énergies renouvelables d'au moins 23% dans la production d'électricité d'ici 2030.
Chine	Atteindre le pic d'émission de carbone au plus tard en 2030. Réduire les émissions par unité de PIB de 60 à 65% par rapport au niveau de 2005 d'ici 2030.	Accroître la part des combustibles non fossiles dans la consommation d'énergie primaire à 20%. Augmenter le volume de stock de forêt d'environ 4,5 milliards de mètres cubes par rapport à 2005.
Inde	Réduire, d'ici 2030, l'intensité en carbone de 33 à 35% par rapport au niveau de 2005	Disposer d'une capacité de production d'électricité installée basée sur les énergies non fossiles à hauteur de 40%. Créer un puit de carbone additionnel de 2,5 à 3 milliards de tonnes équivalent CO ₂ d'ici 2030 grâce à l'augmentation de sa surface forestière.
Russie	Baisser les émissions de gaz à effet de serre de 25 à 30% d'ici à 2030 par rapport à 1990 en tenant compte des capacités d'absorption des forêts d'ici 2030.	
Afrique du Sud	Niveau des émissions de gaz à effet de serre, pour 2025-2030, doit être entre 398 et 614 millions de tonnes CO ₂ -équivalent.	

Source : <http://cait.wri.org/>

Note : La Russie et l'Afrique du Sud n'ont pas défini des cibles sur le niveau minimal d'énergie renouvelable ou sur la superficie en forêt.

De nombreuses études empiriques ont testé l'EKC pour différents pays ou groupes de pays, pour différents polluants et pour différentes périodes. Les premières analyses empiriques de l'EKC datent du début des années quatre-vingt. Dans l'article fondateur, Grossman & Krueger (1993) établissent une relation en U-inversé entre deux types de polluants par tête (le dioxyde de soufre –SO₂– et les fumées) et le niveau de revenu par tête. Par la suite, de nombreuses études ont testé l'existence d'une EKC en utilisant soit des données en coupe ou des données en panel pour des polluants de l'air ou de l'eau. Dinda (2004) a réalisé une revue de la littérature sur l'EKC afin de présenter les résultats des différentes études empiriques. L'existence d'une relation en U-inversé est vérifiée essentiellement pour les polluants de l'air locaux tels que le dioxyde de soufre, les particules fines, le monoxyde de carbone et le protoxyde d'azote. En revanche, la vérification de cette relation pour le CO₂ dépend de l'échantillon choisi et la période étudiée. Les résultats sont également mitigés pour les polluants de l'eau. Pour finir, l'EKC n'est pas vérifiée pour différents indicateurs de qualité environnementale tels que les déchets, l'assainissement urbain.

L'EKC ne permet pas d'évaluer la dynamique des émissions et de déterminer comment et à quelle date les stabiliser. Or, dans le cadre de l'Accord de Paris, les pays se sont engagés d'une part à stabiliser leur niveau d'émissions de CO₂ le plus rapidement possible (voir Article 2 de l'Accord de Paris) et d'autre part à respecter des objectifs de réduction des émissions de CO₂ à l'horizon 2025/2030, d'autre part. Afin de pouvoir tester vers quel niveau d'émission convergent les pays et ainsi déterminer à quelle date les émissions par tête pourront être stabilisées, d'une part et d'analyser quelles politiques énergétiques permettraient de modifier la trajectoire des émissions et de réduire les émissions, d'autre part, nous allons appuyer notre analyse sur le principe de convergence des émissions.

3.1.2 Croissance et convergence des émissions de polluants

Le concept de beta convergence est dérivé du modèle de Solow (Barro & Sala-i Martin, 1992 ; Durlauf, Johnson, & Temple, 2005)¹². Selon ce dernier, les économies convergent vers un équilibre stationnaire de revenu par tête. On distingue la beta convergence absolue de la beta convergence conditionnelle. Dans le premier cas, les pays ayant des caractéristiques socio-économiques identiques convergent vers un même équilibre autrement dit vers un même niveau de revenu d'équilibre. Dans le deuxième cas, les pays convergent vers leur propre revenu

¹² D'autres types de convergence sont définis. La sigma-convergence s'intéresse à la dispersion des émissions de CO₂ entre les pays au cours du temps. Quant à la convergence stochastique, elle est relative à l'analyse en séries et au concept de cointégration.

d'équilibre conditionnellement à leurs caractéristiques économiques telles que le taux de croissance de la population, le taux de croissance du progrès technique, le taux d'investissement et le taux de dépréciation du stock de capital.

Le concept de beta-convergence pour le niveau de revenu a été adapté pour tester la beta-convergence de différents niveaux de polluants. Si le principe de beta-convergence conditionnelle est vérifié, les émissions de CO₂ par tête devraient converger vers un niveau d'équilibre spécifique à chaque pays pour lequel le taux de croissance est nul. En outre, les pays dont le niveau initial des émissions de CO₂ est le plus faible devraient connaître des taux de croissance des émissions par tête plus élevés. Dans l'article fondateur sur la convergence des émissions, Strazicich & List (2003) ont testé l'hypothèse de beta-convergence conditionnelle et de convergence stochastique parmi les 21 pays industrialisés de 1960 à 1997. Leur résultat confirme l'existence d'une beta-convergence ainsi que de la convergence stochastique. Jobert, Karanfil, & Tykhonenko (2010) examinent l'hypothèse de convergence absolue et conditionnelle pour 22 pays européens sur la période 1971-2006. Leurs résultats confirment également l'existence de convergence conditionnelle parmi les pays de l'Union Européenne.

Criado, Valente, & Stengos (2011) enrichissent le modèle de Ramsey avec pollution pour inclure une technologie d'abattement des émissions endogène ou taux de progrès technique sur le niveau des émissions des polluants. Ainsi, la propension à investir dans la réduction des émissions est endogène comme le taux d'épargne. Le modèle prédit que le long du sentier de croissance optimal soutenable, le taux de croissance des émissions de polluant est relié positivement au taux de croissance de la production (effet d'échelle) et négativement au niveau initial de pollution (effet défensif autrement dit la beta-convergence conditionnelle), ce dernier effet caractérisant le processus de convergence conditionnelle. Ces deux résultats du modèle théorique sont testés pour le dioxyde de soufre et le monoxyde d'azote à l'aide d'un panel de 25 pays pour la période 1980-2005. Nous appuierons notre analyse économétrique sur les résultats du modèle théorique de Criado, Valente, & Stengos (2011). Nous testerons donc l'existence de l'effet d'échelle et de la beta-convergence pour un panel de pays émergents et en développement.

3.2 Données et stratégie d'estimation

3.2.1 Stratégie d'estimation

Afin de tester l'hypothèse de convergence conditionnelle parmi les pays émergents et en développement, d'une part et l'existence de l'effet d'échelle, d'autre part, nous estimerons l'équation basée sur le modèle de Criado, Valente, & Stengos (2011). Pour capturer la

dynamique de long terme des émissions de CO₂ et neutraliser les chocs conjoncturels, la période 1992-2013 a été scindée en 5 périodes : 1992-1996, 1997-2001, 2002-2005, 2006-2009 et 2010-2013. L'équation estimée s'écrit :

$$(1) \quad gCO_{2it} = \beta_0 + \beta_1 \log CO_{it-\tau} + \beta_2 gy_{it} + \beta_3 \log y_{it-\tau} + \gamma' Z_{it} + \alpha_{1i} DP_i + \alpha_{2t} DT_t + \varepsilon_{it}$$

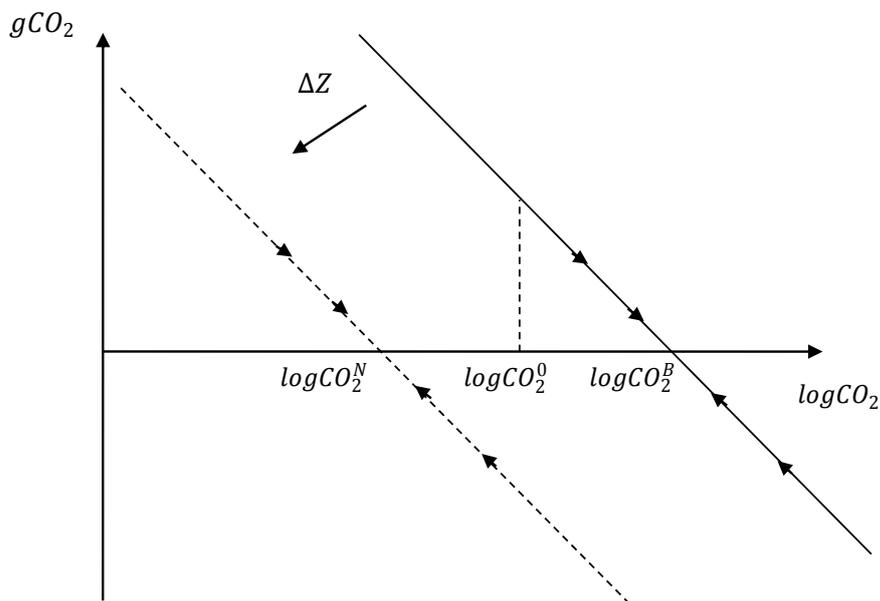
Où t est l'indice de la période et l'indice τ indique le nombre d'années composant la période. Pour chacune des périodes, nous considérons la valeur moyenne de la variable sur la période ou sa valeur au début de la période. gCO_{2it} est le taux de croissance moyen annuel des émissions de CO₂ par tête au cours de la période t , il est calculé ainsi : $gCO_{2it} = \frac{1}{\tau} \log \left(\frac{CO_{2it}}{CO_{2it-\tau}} \right)$, $\log CO_{2it-\tau}$ est le log des émissions par tête au début de la période t ou log des émissions par tête initiales, gy_{it} est le taux de croissance moyen du PIB par tête au cours de la période t , il est calculé ainsi : $gy_{it} = \frac{1}{\tau} \log \left(\frac{y_{it}}{y_{it-\tau}} \right)$, $\log y_{it-\tau}$ est le niveau de PIB par tête en début de période ou niveau de PIB par tête initial, Z_{it} est un vecteur-colonne de variables de contrôle représentant les caractéristiques socio-économiques des pays. La variable DP_i est une variable indicatrice qui prend en compte l'hétérogénéité non observées des pays, elle prend la valeur 1 pour le pays i et 0 sinon. Il s'agit de l'effet-pays. La variable DT_t est aussi une variable indicatrice qui prend la valeur 1 pour la sous-période t et 0 sinon. Elle permet de capturer des ruptures temporelles et des effets temporels spécifiques à chaque sous période. L'effet d'échelle est vérifié si le coefficient β_2 est significatif et positif. Il y a beta-convergence conditionnelle des émissions vers un niveau stable de long terme si le coefficient β_1 est significatif et négatif. Le taux de croissance des émissions de CO₂ étant une moyenne annuelle, la vitesse s'obtient en calculant $-\log(1 + \beta_1)$.

La Figure 7 ci-dessous représente le processus de beta-convergence des émissions de carbone par tête d'un pays conditionnellement à ses caractéristiques socio-économiques telles que le niveau de PIB, la consommation énergétique etc. Toutes choses égales par ailleurs, le niveau des émissions par tête devrait converger vers le niveau $\log CO_2^B$ (niveau pour lequel les émissions de carbone sont stabilisées) si le niveau initial des émissions par tête est $\log CO_2^0$. Le sentier de convergence peut être déplacé suite à une modification de la valeur des variables socio-économiques notée ΔZ , Z étant le taux de croissance du PIB par tête ou le niveau du PIB par tête ou encore les caractéristiques énergétiques des pays. Toute politique énergétique visant à augmenter la part des énergies renouvelables dans le portefeuille énergétique doit conduire à réduire le niveau d'émission de long terme par exemple de $\log CO_2^B$ à $\log CO_2^N$. Le coefficient

γ' de l'équation (1) exprime l'impact de chacune des variables de contrôle sur le taux de croissance des émissions.

Pour atteindre les objectifs de réduction des émissions les pays proposent notamment d'agir sur la consommation et les sources d'énergie ainsi que sur la déforestation. Ces différentes variables sont testées comme variables de contrôle dans l'équation (1) afin d'évaluer leur impact sur le taux de croissance des émissions. Le niveau de consommation d'énergie exprimé en logarithme est introduit en niveau et conditionnellement à la part des sources d'énergies afin de mesurer l'impact d'une croissance de 1% de la consommation d'énergie sur le taux de croissance des émissions conditionnellement aux sources d'énergies. La surface des forêts est testée sous la forme de son taux de croissance et de son niveau initial¹³. Nous introduisons ces différentes variables en tant que variable de contrôle. Ainsi, nous pourrions estimer l'élasticité du taux de croissance des émissions par tête à chacune de ces variables et analyser l'impact de différentes politiques énergétiques (augmentation de la part des énergies renouvelables ou de celle du gaz).

Figure 7 : Beta-convergence conditionnelle des émissions de CO₂ par tête



Notes : gCO_2 représente le taux de croissance annuel moyen des émissions de CO₂ et $\log CO_2$ représente le niveau initial des émissions de CO₂ en log.

¹³ Nous avons par ailleurs testé des variables démographiques (taux de croissance de la population, ratios des +65 ans et -15 ans dans la population des 15-64 ans), la part de la valeur ajoutée des secteurs (agriculture, industrie et service), le taux d'urbanisation, le taux d'ouverture et des variables sur la qualité des institutions (contrôle de la corruption, qualité de la gouvernance et stabilité politique). Ces différentes variables n'ont pas été retenues dans l'estimation finale car elles n'étaient pas significatives.

Etant donné le problème potentiel d'endogénéité entre le taux de croissance annuel moyen des émissions et les variables gy_{it} et $logy_{it-\tau}$ le modèle est estimé avec la méthode IV-GMM. En effet, le niveau du PIB et/ou son taux de croissance impactent directement le taux de croissance des émissions de CO₂. En même temps, le taux de croissance des émissions de CO₂ peut affecter négativement le niveau et le taux de croissance du PIB : une hausse des émissions peut provoquer des problèmes de santé, peut ralentir le niveau de production et ainsi affecter négativement le niveau et le taux croissance du PIB. Les variables instrumentales choisies s'appuient sur les travaux de Barro & Sala-i Martin (1992) et Ordas Criado, S., & Stengos (2011) qui utilisent les variables décalées d'une période comme instruments. Un trend temporel est également inclus pour tenir compte de l'effet du progrès technique sur le taux de croissance des émissions par tête. Un indicateur tenant compte de la qualité des institutions, *Rule of Law*¹⁴, et le taux de croissance de la population en début de période sont également introduits¹⁵.

3.2.2 Les Données

L'échantillon de données inclut 67 pays à revenus faibles et revenus intermédiaires sur la période 1992-2013 : 6 pays de la région Afrique du Nord Moyen Orient, 5 de l'Asie du Sud, 19 de l'Afrique Sub-Saharienne, 7 de l'Asie de l'Est et Pacifique, 17 d'Europe et Asie Centrale et 13 d'Amérique Latine et Caraïbe. La liste des pays pour chacune des zones géographiques est reportée dans le Tableau B1¹⁶.

Les émissions de CO₂ sont exprimées en tonnes par habitant et sont extraites de Banque Mondiale (2016). Le PIB par tête est exprimé en parité des pouvoirs d'achat, les données sont également extraites de la base de données de la Banque Mondiale (Banque Mondiale, 2016). La consommation d'énergie est exprimée en kilogramme équivalent pétrole par habitant, elle est extraite de IEA (2016a). Pour finir, nous calculons la part de chaque ressource dans la consommation finale d'énergie à partir des données de l'IEA (2016a), d'une part, et de la consommation finale d'énergie, d'autre part.

Dans un premier temps, nous allons réaliser une analyse statistique des données. Le niveau moyen des émissions par tête sur l'ensemble de l'échantillon est de 2.51 tonnes de CO₂

¹⁴ Cet indicateur mesure la confiance des citoyens dans les règles sociales et juridiques du pays (Banque Mondiale, 2016).

¹⁵ Le choix du taux de croissance de la population comme instrument fait référence au modèle de croissance de Solow. Nous avons également testé le taux d'investissement en début de période mais cet instrument n'était pas valide d'après les résultats des tests (Barro & Sala-i Martin, 1992).

¹⁶ Certains pays dans la base de données sont manquants car certaines variables n'étaient disponibles pour l'ensemble de la période. Par exemple, dans les pays d'Afrique Sub-Saharienne, l'Ethiopie n'est pas dans l'échantillon de pays étant donné que les données sur le PIB sont incomplètes pour ce pays.

par tête, ce qui correspond au niveau de pollution par tête actuel des pays d'Amérique Latine, hors revenu élevé. A titre de comparaison, les émissions par tête en 2013 dans les pays à revenus intermédiaires élevés était de 4,3 tonnes par habitant alors qu'elle était égale à 3,6 en 1992 (voir Tableau 2). Le PIB moyen sur l'ensemble de l'échantillon et sur l'ensemble de la période est de 7 219 US dollars en PPA. La consommation d'énergie moyenne sur l'ensemble de l'échantillon est de 1 055 kilogrammes tonnes équivalent pétrole par personne et par an. Parmi les variables de contrôle, nous avons introduit la part de l'ensemble des différentes sources d'énergie –énergie fossile, énergie nucléaire et énergies renouvelables--¹⁷. La part moyenne du charbon est de 8% mais elle cache de fortes disparités. Le charbon fournit plus des deux tiers de l'énergie en Chine ou en Inde alors qu'il est absent du portefeuille énergétique dans des pays comme la Côte d'Ivoire, le Togo, la République Démocratique du Congo. La part moyenne du gaz pour l'ensemble de l'échantillon se situe autour des 15%. Le gaz fournit une part importante de la consommation d'énergie dans des pays où les ressources sont importantes comme en Iran ou en Azerbaïdjan. Le nucléaire est assez peu développé dans les pays de notre échantillon étant donné que sa part moyenne est d'environ 1%. Dans les pays émergents et en développement, l'énergie produite à partir de la biomasse est issue principalement biomasse traditionnelle (bois de feu et de charbon de bois) qui relâche des quantités importantes de CO₂ et participe à la déforestation de certaines zones. Par conséquent, nous scindons le groupe des renouvelables en deux : l'énergie renouvelable provenant de la biomasse et l'énergie renouvelable ne provenant pas de la biomasse. Le premier groupe inclut uniquement toutes les énergies renouvelables produites à partir de la biomasse¹⁸. Quant au deuxième groupe d'énergie renouvelable, il inclut l'énergie solaire, l'énergie éolienne, la géothermique et l'hydroélectrique. Dans l'échantillon considéré, 31% de l'énergie provient de la biomasse alors que seulement 7% provient des autres énergies renouvelables. Parmi les autres énergies renouvelables, l'énergie hydraulique occupe une place prépondérante, la place de l'éolien, du solaire et de la géothermie est marginale. Dans les pays où la part des énergies renouvelables hors biomasse est supérieure à un tiers comme l'Albanie, le Paraguay, l'énergie renouvelable provient essentiellement de l'énergie

¹⁷Dans le Tableau 4, nous avons répertorié l'ensemble des différentes sources d'énergie c'est-à-dire les énergies fossiles, renouvelables ainsi que l'énergie nucléaire. Nous n'incluons pas l'ensemble de ces ressources dans l'analyse économétrique pour des problèmes de colinéarité. Toutefois, nous les avons inclus dans l'analyse statistique afin de décrire le portefeuille énergétique des pays de l'échantillon.

¹⁸ La base de données de l'agence internationale de l'énergie ne distingue pas les différents types de biomasse autrement dit biomasse traditionnelle et biomasse moderne/biocarburants. Toutefois, étant donné que la part des biocarburants et de la biomasse moderne est très faible, notre hypothèse ne modifie pas radicalement les résultats.

hydraulique. Enfin, la superficie forestière moyenne des pays de l'échantillon ainsi que la part moyenne de l'industrie dans le PIB sont indiquées dans le Tableau 4.

Afin d'avoir l'intuition de l'évolution dans le long terme des émissions par tête des pays de l'échantillon, nous avons calculé le taux de croissance annuel moyen des émissions de CO₂ par tête par région entre 1992 et 2013. Il est représenté par la Figure 8. Il a été positif et inférieur à 5% dans presque tous les pays. Il dépasse les 5% au Népal, au Bénin, en Chine et au Vietnam. Il a été négatif dans tous les pays d'Europe et d'Asie Centrale sauf en Albanie, en Arménie, en Turquie et dans le Turkménistan. L'intensité énergétique et l'intensité en carbone ont diminué dans ces pays grâce au transfert de leur activité vers le secteur des services, la part de l'agriculture dans la valeur ajoutée¹⁹ est passée de 26% à 12% et celle des services de 36% à 56%. Parmi les BRICS, le taux de croissance annuel moyen a été négatif pour la Russie et proche de 0 pour l'Afrique du Sud. En Inde, le taux de croissance annuel moyen au cours de la période a été environ de 4%, d'un point de pourcentage supérieur à celui du Brésil et d'un point de pourcentage inférieur à celui de la Chine.

Tableau 4 : Statistiques descriptives

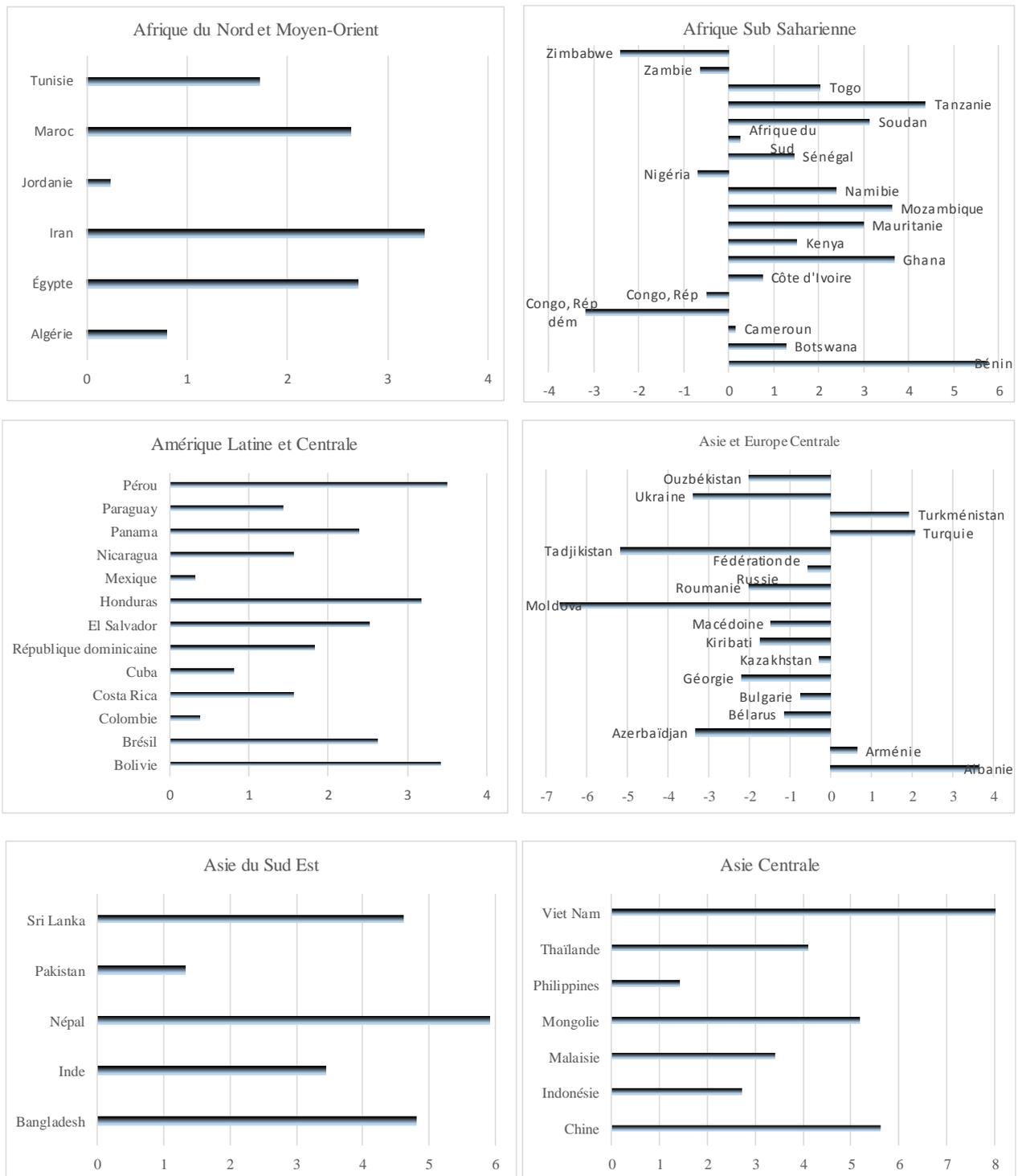
Variable	Moyenne	Ecart-Type	Min.	Max.	Obs.
Croissance des émissions par tête	0,014	0,07	-0,32	0,25	335
CO ₂ (tonnes/tête)	2,51	2,80	0,02	15,43	335
PIB (US inter. dollars 2011)	7 219	5 106	455	25 144	335
Croissance PIB	1,41	1,11	-2,52	4,19	335
Consommation d'énergie (ktoe)	1 055	920	132	5 093	335
Part du charbon	0,08	0,12	0	0,68	335
Part du gaz	0,15	0,20	0	0,80	335
Part du pétrole	0,39	0,20	0,02	0,96	335
Part du nucléaire	1	2	0	0,15	335
Part totale des renouvelables	0,38	0,29	0	0,98	335
Part des renouvelables hors biomasse	0,07	0,01	0	0,66	335
Part des renouvelables avec biomasse	0,31	0,29	0	0,94	335
Superficie forestière (1000 km ²)	387 098	1 174 591	382	8 150 125	335
Croissance superficie forestière	-0,002	0,01	-0,11	0,04	335
Part de l'industrie dans le PIB	0,32	0,10	0,12	0,75	335

Notes : ktoe : kilogramme tonne équivalent pétrole.

Sources : Banque Mondiale (2016) : CO₂ par tête ; PIB ; Croissance du PIB, Superficie forestière, Part de l'industrie dans le PIB ; IEA (2016a) : Consommation d'énergie ; Calcul de la part de chaque ressource dans la consommation d'énergie à partir de IEA (2016a).

¹⁹ Part moyenne sur les 17 pays de la région Europe Asie Centrale

Figure 8 : Taux de croissance annuel moyen des CO₂ par tête pour chaque pays (1992-2013)

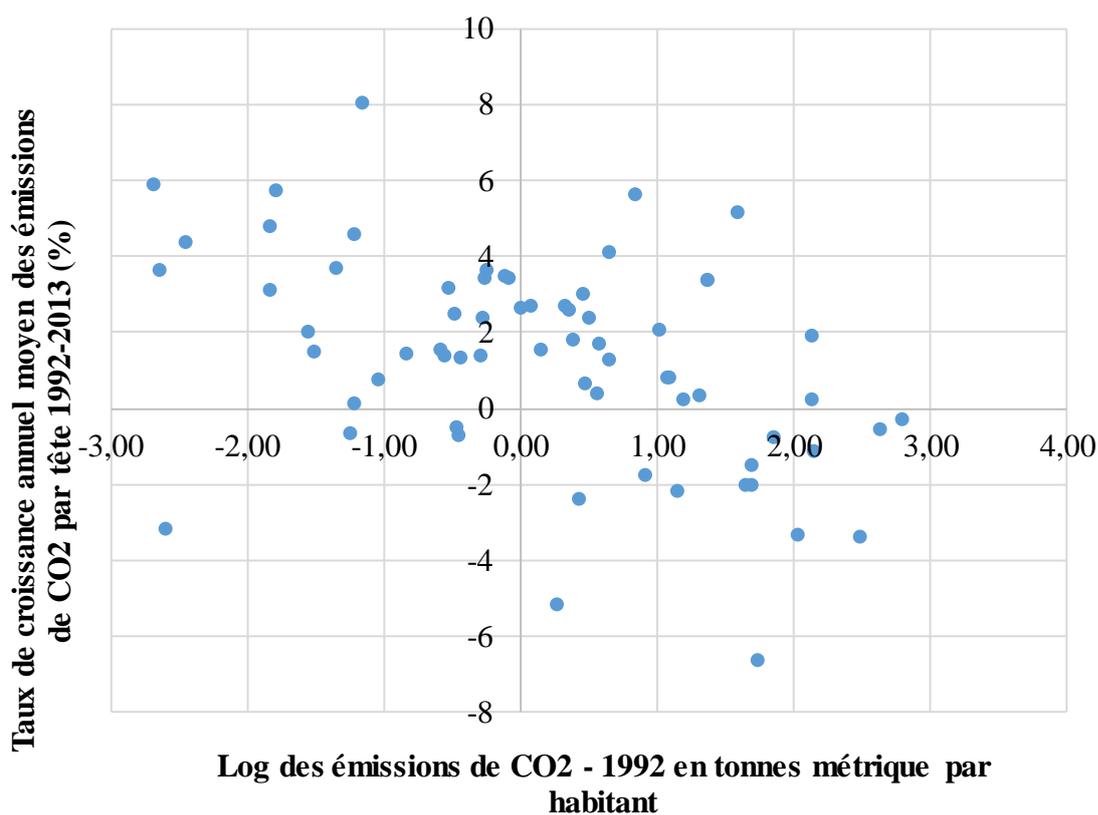


Source : Banque Mondiale (2016).

Dans un deuxième temps, nous allons réaliser une analyse graphique de l'effet défensif ou de la convergence des émissions par tête et de l'effet d'échelle étant donné que des deux effets sont testés dans l'analyse économétrique. La Figure 9 représente le taux de croissance annuel des émissions de CO₂ au cours de la période 1992-2013 en fonction du log des émissions

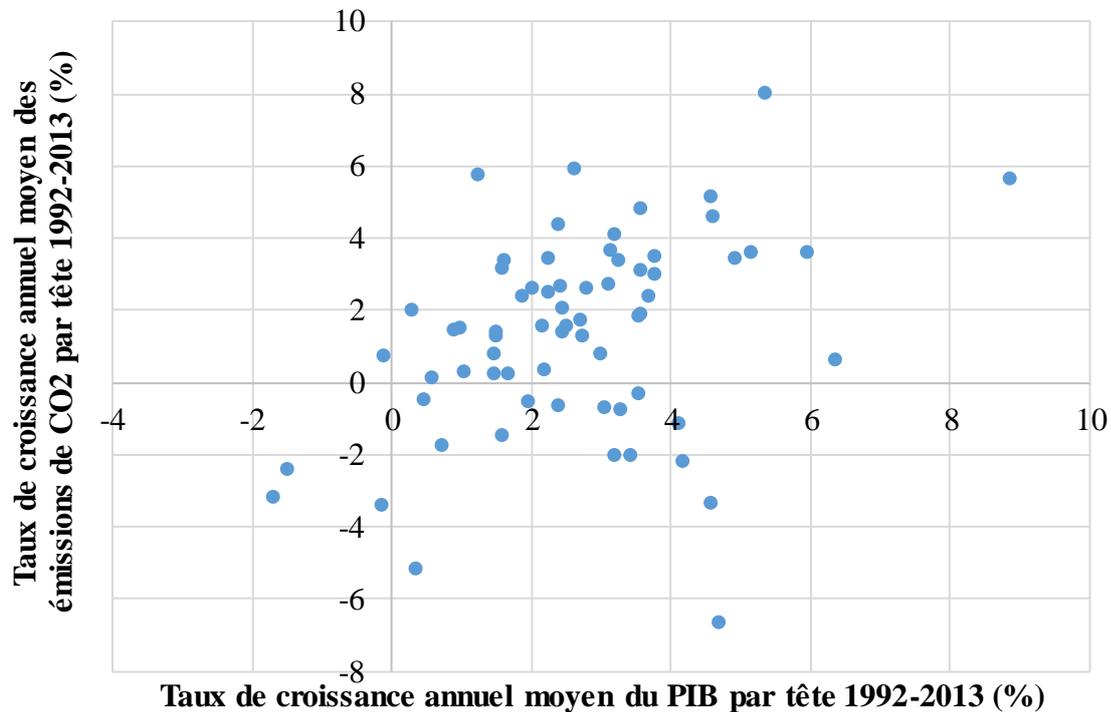
de CO₂ par tête au début de la période soit en 1992. Nous pouvons remarquer que la relation est décroissante, ce qui laisse penser que le principe de convergence des émissions serait vérifié pour l'échantillon de pays retenu. En effet, le taux de croissance des émissions par tête au cours de la période a été plus élevé pour les pays dont le niveau d'émissions était plus faible en 1992, par exemple, Chine et Vietnam. La Figure 10 représente le taux de croissance annuel moyen des émissions de CO₂ sur la période 1992-2013 en fonction du taux de croissance annuel moyen du PIB par tête sur la même période autrement dit il s'agit d'une représentation graphique de l'effet d'échelle. Les pays dont le taux de croissance annuel moyen du PIB par tête est le plus élevé connaissent des taux de croissance annuel moyen des émissions par tête élevés. Parmi ces pays, la Chine et le Vietnam ont connu des taux de croissance des émissions par tête et du PIB par tête importants alors que la croissance des émissions par tête et du PIB par tête Zimbabwe et de la République du Congo a été atone.

Figure 9 : Convergence absolue des émissions de CO₂ par tête



Source : Banque Mondiale (2016)

Figure 10 : Effet d'échelle



Source : Banque Mondiale (2016)

3.3 Résultats de l'analyse économétrique

Dans un premier temps, nous discutons des résultats de l'équation (1) pour vérifier si l'hypothèse de convergence conditionnelle est vérifiée autrement dit l'effet défensif et si l'effet d'échelle sont vérifiés pour notre échantillon (Criado, Valente, & Stengos, 2011). Les résultats de l'estimation de l'équation (1) permettent de mesurer l'impact de la consommation d'une unité d'énergie supplémentaire produite à partir de chaque ressource sur le taux de croissance des émissions de CO₂. Dans un deuxième temps, nous utilisons les résultats de l'estimation de l'équation (1) pour examiner l'impact de différentes politiques énergétiques sur le niveau de long terme des émissions de CO₂.

3.3.1 Analyse de l'équation de convergence conditionnelle

Afin de corriger la présence de biais liés au problème d'endogénéité entre le niveau de PIB, son taux de croissance et le taux de croissance des émissions de CO₂, l'équation est estimée avec l'estimateur IV-GMM.²⁰ La qualité des instruments décrits dans la section précédente est vérifiée avec la statistique de Cragg-Donald qui teste s'ils sont faibles et la statistique de

²⁰ Les résultats avec l'estimateur Within sont présentés dans le Tableau B2 de l'annexe B.

Sargan-Hansen qui vérifie leur exogénéité. Les résultats de l'estimation sont reportés dans le Tableau 5.

L'hypothèse de convergence conditionnelle est vérifiée à travers l'ensemble des spécifications étant donné que le coefficient associé au niveau initial des émissions de CO₂ est négatif et significatif à un seuil de 1% à travers l'ensemble des spécifications (voir colonnes (1) à (4)). En outre, la valeur du coefficient est robuste à travers les différentes spécifications. Ces résultats montrent que le niveau des émissions de CO₂ de notre échantillon de pays devrait converger vers un niveau d'état stationnaire, niveau pour lequel le taux de croissance des émissions de CO₂ est nul. L'effet d'échelle n'est pas vérifié à travers l'ensemble des spécifications. D'après les résultats de colonne (1), les effets temporels ne sont pas significatifs, ce qui signifie qu'il n'y a pas d'effet spécifique à chaque période. D'après les résultats des colonnes (2), (3) et (4), spécifications pour lesquelles les effets temporels ne sont pas inclus dans l'estimation, le coefficient associé au taux de croissance du PIB est significatif et positif confirmant l'existence d'un effet d'échelle. A travers les différentes spécifications, certaines variables ne sont pas significatives. Les variables mesurant l'impact de la forêt sur le taux de croissance des émissions de CO₂ : la superficie forestière et le taux de croissance de la superficie forestière ne sont pas significatives (voir colonnes (2) et (3)). D'après ces résultats, les politiques de séquestration biologique du carbone n'auraient pas d'effet significatif sur le taux de croissance des émissions de CO₂ pour les pays de l'échantillon. Enfin, la part de l'industrie dans le PIB n'a pas un effet significatif sur le taux de croissance des émissions de CO₂. Par la suite, nous ne retiendrons pas les spécifications incluant ces variables de contrôle.

Pour l'analyse du processus de convergence et de l'effet d'échelle, nous retiendrons les résultats de la colonne (4). La vitesse de convergence est estimée à 24%. Par conséquent, les émissions par tête des pays de l'échantillon devraient être à 5 % de leur valeur asymptotique (ou $\log CO_2^B$ de la Figure 7) dans environ 12 ans. Par conséquent, les émissions par tête devraient être stabilisées pour les pays de notre échantillon vers 2025-2030. L'effet d'échelle isolé par Criado, Valente, & Stengos (2011) est vérifié : le coefficient estimé associé au taux de croissance du PIB initial est positif et significatif. Il est égal à 0,27 indiquant qu'à la suite d'une augmentation d'un point de pourcentage du taux de croissance du PIB par tête, le taux de croissance des émissions augmente de 0,27 point de pourcentage pour l'ensemble des pays de l'échantillon.

Tableau 5 : Equation de convergence : Estimateur IV-GMM

	Croissance des émissions de CO ₂			
	1	2	3	4
Log CO ₂	-0,214*** (-12,00)	-0,221*** (-13,42)	-0.227*** (-13.84)	-0.221*** (-13.54)
Croissance PIB	0,454 (1,51)	0,274* (2,09)	0.215+ (1.67)	0.272* (2.08)
Log PIB Initial	0,0660* (2,45)	0,0549*** (3,88)	0.0562*** (3.91)	0.0545*** (3.85)
Log ConsoEner	0,177*** (6,55)	0,166*** (6,50)	0.170*** (6.75)	0.169*** (6.74)
Log ConsoEner*Charbon	-0,0236 (-1,43)			
Log ConsoEner*RenSBio	-0,0354** (-2,93)	-0,0345** (-2,83)	-0.0338** (-2.75)	-0.0345** (-2.83)
Log ConsoEner*RenABio	-0,0570*** (-5,67)	-0,0528*** (-5,24)	-0.0538*** (-5.35)	-0.0533*** (-5.32)
Log ConsoEner*Gaz	-0,0266** (-2,77)	-0,0273** (-2,82)	-0.0250* (-2.52)	-0.0276** (-2.85)
Croissance Forêt (%)	0,0865 (0,33)	-0,00100 (-0,00)		
Log Forêt Initial			-0.0335 (-1.13)	
Part Industrie Initial	0,0276 (0,61)	0,0298 (0,67)		
Période 1 : 1992-1996	0,0148 (0,61)			
Période 2 : 1997-2001	-0,00178 (-0,10)			
Période 3 : 2002-2005	0,00340 (0,32)			
Période 4 : 2006-2009	-0,00964 (-1,08)			
Constante	-1,405*** (-4,87)	-1,292*** (-7,74)	-0.913* (-2.40)	-1.300*** (-7.88)
N	333	333	333	333
R ² Ajusté	0,551	0,534	0.530	0.537
F Cragg-Donald	5,103	22,45	24.28	22.65
HansenJ Pval	0,952	0,977	0.927	0.965

t statistics entre parenthèses + p<0.10 * p<0.05 ** p<0.01 *** p<0.001

Notes : ConsoEner est la consommation d'énergie primaire. Par la suite, nous avons croisé la consommation primaire d'énergie avec la part de différentes ressources : le charbon, les énergies renouvelables hors biomasse («RenSBio»), les énergies renouvelables avec biomasse (« RenABio ») et le gaz.

Par la suite, nous pouvons analyser l'impact de chacune des variables de contrôle sur le taux de croissance des émissions de CO₂ par tête. Une croissance de 1% de niveau initial du PIB par tête induit une hausse de 0,054 point de pourcentage sur le taux de croissance des émissions. Nous pouvons analyser l'impact des politiques énergétiques sur le taux de croissance des émissions de CO₂ par tête. L'impact d'une augmentation d'un pourcent de la consommation d'énergie dépend de la composition du portefeuille énergétique de chaque pays. Il est calculé de la manière suivante :

$$0.169-0.0345*\text{RenSBio}-0.0533*\text{RenABio}-0.0276*\text{Gaz}$$

Où RenSBio est la part des énergies renouvelables hors biomasse, RenABio est la part des énergies renouvelables type biomasse et Gaz est la part de l'énergie provenant du gaz. Par exemple, pour le Brésil, ces parts sont respectivement égales à 16%, 25% et 7% en moyenne pour la période 2010-2013. A la suite d'une augmentation d'un pourcent de la consommation d'énergie, le taux de croissance des émissions de CO₂ augmente de 0,15 point de pourcentage (voir Tableau 6). Les valeurs des élasticités sont proches pour l'ensemble des zones géographique et pour les BRICS.

Tableau 6 : Elasticités du taux de croissance des émissions de CO₂ par rapport à la consommation énergétique.

	Elasticité	Borne Inférieure	Borne supérieure
Brésil	0,15	0,10	0,20
Chine	0,16	0,11	0,21
Inde	0,15	0,10	0,20
Russie	0,16	0,11	0,21
Afrique du Sud	0,16	0,11	0,20
Afrique du Nord et Moyen Orient	0,16	0,11	0,21
Asie du Sud	0,14	0,09	0,18
Afrique Sub-Saharienne	0,14	0,09	0,18
Asie de l'Est et Pacifique	0,16	0,11	0,20
Europe et Asie Centrale	0,15	0,11	0,20
Amérique Latine et Centrale	0,15	0,10	0,20

Note : La valeur de l'élasticité est pour un intervalle de confiance à 95%.

3.3.2 Impact des politiques climatique et énergétique

A partir des coefficients estimés de l'équation (1), nous déterminons le niveau des émissions de CO₂ par tête d'équilibre autrement dit la valeur $\log CO_2^B$ de la Figure 7. Dans ce cas, le taux de croissance des émissions de CO₂ par tête est nul, et la valeur des émissions de CO₂ est donnée par l'équation suivante :

$$(2) \log CO_2^B = \frac{\beta_0}{\beta_1} + \frac{\beta_2}{\beta_1} gy_i + \frac{\beta_3}{\beta_1} \log y_i + \frac{\gamma'}{\beta_1} x_i + \frac{\alpha_{1i}}{\beta_1} DP_i$$

Cette valeur peut varier en fonction de la valeur des variables de contrôle : taux de croissance du PIB, valeur du PIB, consommation d'énergie conditionnelle à la part des différentes sources d'énergie. Par exemple, si la part des énergies renouvelables augmentent la valeur d'équilibre des émissions de CO₂ va diminuer et le point d'équilibre va se déplacer de la valeur $\log CO_2^B$ vers $\log CO_2^N$ (voir Figure 7). Afin d'analyser l'impact de chaque variable de contrôle sur la valeur d'équilibre, plusieurs scénarios ont été définis. Dans le scénario de base qui sert de contrefactuel, le niveau d'équilibre de CO₂ est déterminé pour les valeurs moyennes de la période 2010-2013. Par la suite, nous allons réaliser une analyse en statique comparative pour déterminer l'impact de chaque variable sur le niveau d'équilibre des émissions par tête pour l'ensemble des pays de l'échantillon. A cet effet, nous analysons deux scénarios successifs dont les hypothèses sont répertoriées dans le Tableau 7 ci-dessous.

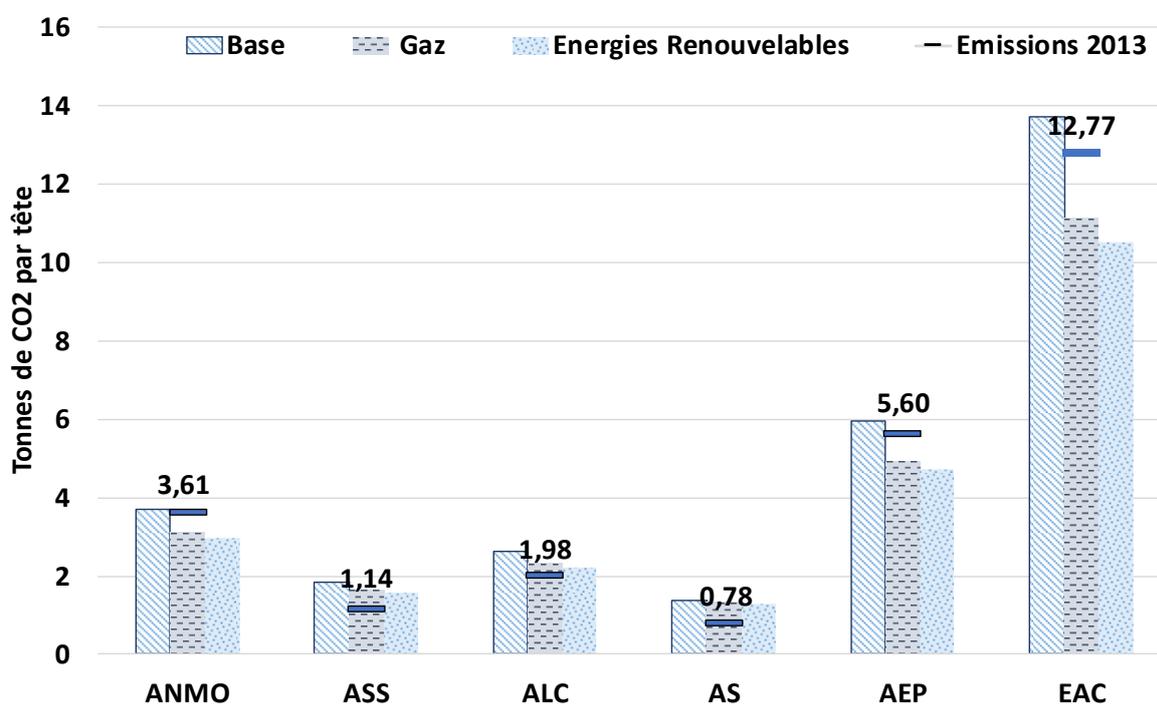
Tableau 7 : Hypothèses des différents scénarios définis pour l'ensemble des pays de l'échantillon

Scénario	Hypothèse
Energie Renouvelable	Augmentation de la part des énergies renouvelables hors biomasse dans la consommation d'énergie de 20 point de pourcentage
Gaz	Augmentation de la part du gaz dans la consommation d'énergie de 20 point de pourcentage

Dans un premier temps, nous allons examiner l'impact des scénarios définis précédemment sur le niveau d'équilibre des émissions de CO₂ pour l'ensemble des pays de l'échantillon par zone géographique. La Figure 11 représente les émissions de CO₂ par tête d'équilibre sous les différents scénarios et pour les différentes zones géographiques comparativement au niveau des émissions de CO₂ par tête de 2013. Dans le scénario de Base, l'Afrique du Nord et le Moyen Orient, l'Asie de l'Est et du Pacifique et l'Europe et l'Asie Centrale avaient en 2013 des émissions par tête proche de leur niveau d'équilibre. En effet, leurs émissions par tête devraient augmenter respectivement de 3%, 6% et 8% pour atteindre leur niveau d'équilibre toutes choses étant égales par ailleurs. Les émissions par tête d'Amérique Latine et Centrale, devraient croître environ d'un tiers avant d'être stabilisées. Enfin, deux zones géographiques devraient connaître des taux de croissance substantiels des émissions par tête : l'Afrique Sub-Saharienne et l'Asie du Sud. Leurs taux de croissance devraient être respectivement égaux à 63% et 77%. Pour l'ensemble des zones géographiques, une augmentation de la part des énergies renouvelables ou celle du gaz toutes choses étant

égales par ailleurs ont un impact proche sur le niveau d'équilibre des émissions par tête. Ce dernier est inférieur à celui du scénario de Base. Plus spécifiquement, pour l'Afrique du Nord et le Moyen Orient, l'Asie de l'Est et Pacifique et l'Europe et l'Asie Centrale, l'investissement dans les énergies renouvelables ou dans le gaz permettrait d'atteindre un niveau d'équilibre inférieur au niveau observé de 2013 autrement dit toutes choses étant égales par ailleurs les émissions pourraient être stabilisées à un niveau inférieur à celui observé en 2013.

Figure 11 : Niveau des émissions par tête d'équilibre pour chaque scénario et pour chaque zone géographique et niveau des émissions en 2013.



Notes : ANMO : Afrique du Nord et Moyen-Orient ; ASS : Afrique Sub-Saharienne ; ALC : Amérique Latine et Centrale ; AS : Asie du Sud ; AEP : Asie de l'Est et du Pacifique ; EAC : Europe et Asie Centrale

Dans un deuxième temps, nous allons examiner l'impact des scénarios définis précédemment sur le niveau d'équilibre des émissions de CO₂ pour les BRICS. Dans le cadre de l'Accord de Paris, ils se sont engagés à réduire leurs émissions de CO₂ d'ici 2030 (voir Tableau 3). Les types de cibles ne sont pas identiques. Par exemple, la Chine et l'Inde ont établi des cibles de diminution des émissions de CO₂ en termes d'intensité en carbone alors que les autres pays Brésil, Fédération de Russie et Afrique du Sud ont défini de cible de diminution des émissions de CO₂ par rapport à une date de référence. Afin de pouvoir les comparer non seulement au niveau des émissions par tête de 2013 mais aussi au niveau des émissions de CO₂ par tête d'équilibre prédit par le modèle économétrique, nous transposons chaque cible en

termes d'émissions par tête. Pour les pays ayant défini une cible de diminution des émissions par rapport à une année de référence, nous calculons le niveau des émissions cible pour 2030 puis nous le divisons par les projections sur la population de la Division Mondiale des Nations Unies pour la Population²¹. Les données relatives au calcul de la valeur cible ainsi que la valeur cible sont reportées dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Contributions nationales du Brésil, de la Fédération de Russie et de l'Afrique du Sud.

	Brésil	Fédération de Russie	Afrique du Sud
Cible définie par l'Accord de Paris	Diminution de 37 % des émissions par rapport à 2005	Baisse de 70% à 74% des émissions par rapport à 1990	Niveau des émissions de gaz à effet de serre, pour 2025-2030, entre 398 and 614 Mt CO ₂ -es
Emissions, Année de référence (10 ⁹ tonnes CO ₂)	347	2 079	--
Niveau cible des émissions (10 ⁹ tonnes CO ₂)	219	540	398-614
Niveau de la population en 2030 (10 ⁹ individus)	223	141	58
Cible des émissions par tête (Tonnes CO ₂ /tête)	0,98	3,83	6,86-10,59

Sources : Banque Mondiale (2016) : Emissions de CO₂ ; Population : UNPD (2016)

Quant à la Chine et l'Inde, nous avons retranscrit les cibles de diminution de l'intensité en émissions par tête en utilisant les projections de PIB de l'Agence Américaine de l'Energie et celle de la population de la Division des Nations Unies pour la Population. Les informations nécessaires au calcul de la valeur cible des émissions de CO₂ par tête ainsi que la valeur de la cible sont répertoriées dans le Tableau 9.

²¹ La Division des Nations Unies pour la Population définit plusieurs scénarios pour les projections sur la population mondiale. Nous retenons ici les projections du scénario médian pour lequel le niveau de la population mondiale devrait atteindre 9 milliards d'individus en 2050.

Tableau 9 : Contributions nationales de la Chine et de l'Inde

	Chine	Inde
Cible définie par l'Accord de Paris	Réduire, d'ici 2030, son intensité en carbone de 60 à 65% par rapport au niveau de 2005	Réduire, d'ici 2030, son intensité en carbone de 33 à 35% par rapport au niveau de 2005
Intensité en carbone 2005 (kgCO ₂ /US\$PIB)	0,78	0,33
Intensité en carbone cible (kgCO ₂ /US\$PIB)	0,27	0,22
Niveau de PIB par tête (2030)	25 634	11 402
Niveau des émissions par tête cible (Tonnes CO ₂ /tête)	6,97	2,46

Sources : Banque Mondiale (2016) : Intensité en carbone ; PIB par tête : EIA (2017a)

La Figure 12 reporte la valeur des émissions de CO₂ par tête en 2013 et la valeur cible des émissions par tête telle que définies par l'Accord de Paris. Le Brésil et la Fédération de Russie devront réaliser des efforts conséquents pour atteindre leur cible étant donné que leurs émissions devront diminuer respectivement de 60 et 69 %. La diminution des émissions par tête en Chine et en Inde devrait être faible. Elle devrait être limitée à 8% en Chine. Quant à l'Inde, la cible de diminution de l'intensité en carbone devrait lui offrir la possibilité d'accroître ses émissions par tête de 55% d'ici 2030. Pour finir, l'Afrique du Sud a établi un intervalle de diminution des émissions de CO₂. La cible minimale (6,86 tonnes de CO₂/tête) contraindrait l'Afrique du Sud à réduire ses émissions par tête d'environ 23% alors que la cible maximale (10,59 tonnes de CO₂ par tête) permettrait à l'Afrique du Sud d'accroître ses émissions par tête de 19%.

La Figure 13 présente les émissions par tête des BRICS sous les différents scénarios ainsi que le niveau cible des émissions définies dans le cadre de l'Accord de Paris. Le niveau d'émission par tête d'équilibre dans le scénario de base toutes choses étant égales par ailleurs devrait être supérieure à la valeur cible pour les BRICS (Figure 13). En particulier, elle est 3,5 fois supérieure pour le Brésil et la Russie et environ 1,5 fois supérieure pour la Chine et l'Afrique du Sud. En revanche, elle est proche pour l'Inde. Malgré une augmentation de la part des énergies renouvelables ou de celle du gaz, les émissions par tête d'équilibre resteraient presque trois fois supérieures à la valeur cible pour le Brésil et la Russie. L'Inde respecterait

ses engagements en investissant dans les énergies renouvelables ou le gaz toutes choses étant égales par ailleurs.

Figure 12 : Emissions de CO₂ par tête des BRICS en 2013 et Cible d'émissions par tête de CO₂ définies dans le cadre de l'Accord de Paris

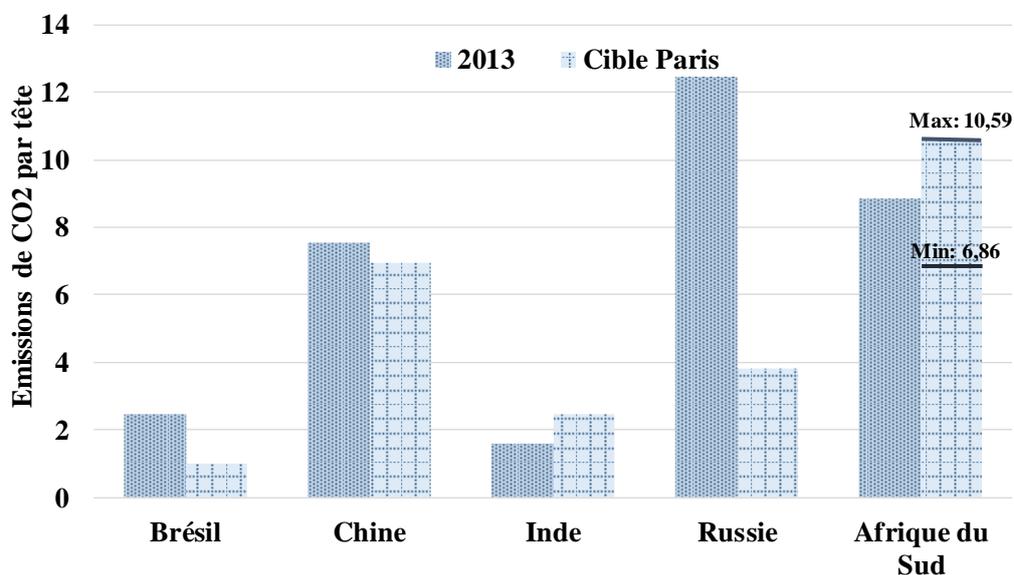
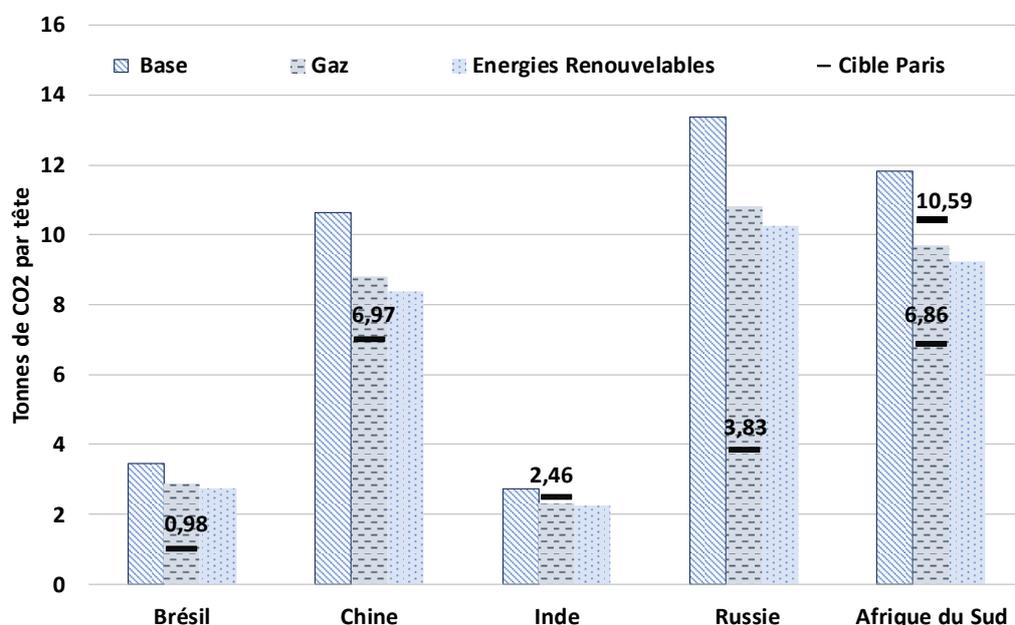


Figure 13 : Niveau des émissions par tête d'équilibre pour chaque scénario et cible d'émissions par tête définies dans le cadre de l'Accord de Paris



4 La Politique Énergétique de la Chine

4.1 Politique climatique et énergétique de la Chine

Au cours des trois dernières décennies, la croissance chinoise a été spectaculaire : le PIB par habitant a été multiplié par 13 en dollars constants et en parité des pouvoirs d'achat pour atteindre 13 400 dollars en 2015. La demande d'énergie par tête a augmenté de 190 % de 1990 à 2013, passant de 766 kilogrammes d'équivalent pétrole à 2 226 (Banque Mondiale, 2016). Les émissions totales de CO₂ ont progressé en moyenne de 6 % par an entre 1990 et 2013. En 2008, la Chine est devenue le premier émetteur mondial de CO₂, suivie par les États-Unis et l'Union Européenne. Les émissions par tête de CO₂ ont également connu une progression fulgurante. En 1990, un citoyen chinois émettait environ 2 tonnes de CO₂ par an, en 2013, sa consommation a atteint 6,6 tonnes. Malgré cette forte progression, la différence d'émissions par tête entre les deux plus gros pollueurs – Chine et États-Unis – est notable. Un citoyen chinois émet environ 10 tonnes de CO₂ par an de moins. La croissance chinoise est moins intensive en CO₂. En effet, pour produire un dollar de PIB la Chine émettait environ 1,24 kilogramme d'émissions de CO₂ en 1992 contre 0,63 kilogramme en 2013²² (voir Figure 6).

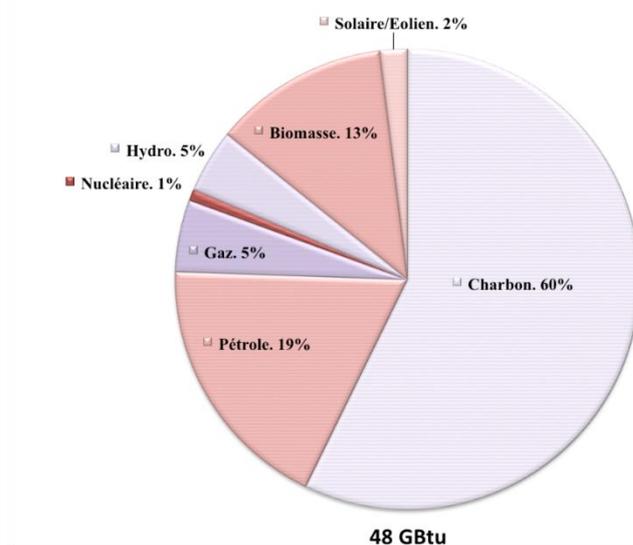
Ces évolutions ont conduit la Chine à s'impliquer dans la lutte contre la pollution et, en particulier, contre le changement climatique. La Chine avait ratifié le Protocole de Kyoto. Cependant, étant donné qu'elle faisait partie des pays de l'annexe n°1, aucune cible de diminution des émissions de CO₂ n'avait été définie (Auffhammer & Gong, 2015). En novembre 2014, elle s'est engagée, avec la signature d'un accord bilatéral avec les États-Unis, à stabiliser ses émissions de carbone d'ici 2030 et en juin 2015, elle a annoncé l'instauration d'une cible de réduction de l'intensité en CO₂ de 60 % à 65 % par rapport à son niveau de 2005²³. Enfin, avec la ratification des accords de Paris en septembre 2016, la Chine s'est engagée à porter la part des énergies non carbonées dans sa consommation primaire d'énergie à 20 %. Afin de respecter l'ensemble de ces objectifs tout en continuant à satisfaire ses besoins croissants en énergie, elle doit modifier sensiblement son portefeuille énergétique. Environ 60 % de l'énergie provient du charbon (voir Figure 14), la part des énergies renouvelables et celle du nucléaire s'élèvent respectivement à 17 % et à 1 %, celle du gaz n'excède pas 5 % en 2013. Afin de respecter ses objectifs de diminution des émissions de gaz à effet de serre, la Chine poursuit des politiques

²² L'intensité en CO₂ du PIB est calculée en utilisant le PIB de 2005 en parité de pouvoir d'achat en dollar. Toutes les données sur les émissions de CO₂ sont extraites de IEA (2015a).

²³ En 2013, l'intensité en CO₂ de la Chine a diminué de 20 % par rapport à son niveau de 2005 (IEA, 2015a).

en faveur des énergies renouvelables mais aussi en faveur du gaz et du nucléaire. Plus récemment, elle a établi une feuille de route pour le développement de la séquestration géologique du CO₂.

Figure 14 : Portefeuille énergétique de la Chine année 2013



Source : (IEA, 2016a).

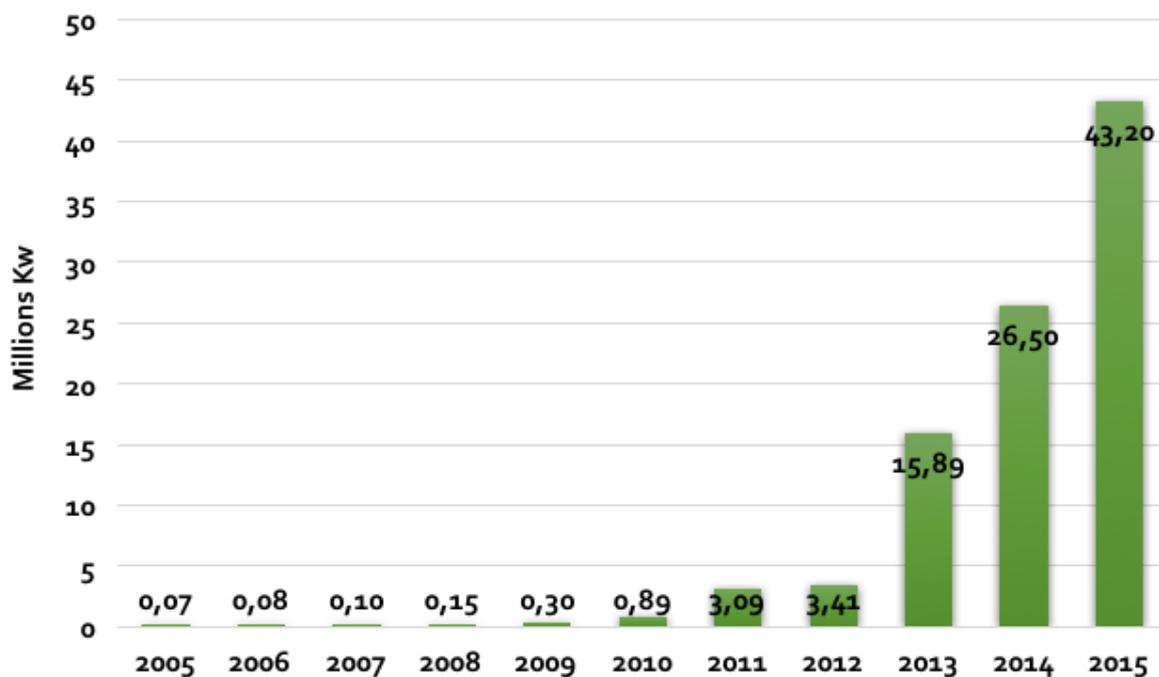
Note : Il s'agit de la part de chaque ressource dans la consommation finale d'énergie.

4.1.1 Une politique de développement des énergies renouvelables agressive

Depuis 2007, une politique d'investissement en énergie renouvelable volontariste est poursuivie. La Chine est le premier investisseur mondial en énergie renouvelable avec 103 milliards de dollars investis en 2015 soit une augmentation de 15 % par rapport à l'année précédente (McCrone & al., 2015). En 2004, la Chine investissait uniquement 2,4 milliards de dollars, soit deux fois moins que les États-Unis et neuf fois moins que l'Europe. Son rattrapage a été spectaculaire étant donné que sur les dix années écoulées, son investissement cumulé a dépassé celui des États-Unis --388 milliards contre 346 milliards de dollars-- (McCrone & al., 2015). L'énergie hydroélectrique fournit environ 82 % de la consommation électrique provenant d'énergie renouvelable. La capacité installée de production hydroélectrique en Chine était la plus importante au niveau mondial atteignant 250 GW en 2015. A titre de comparaison, la capacité de production de l'énergie hydroélectrique aux États-Unis est de 80 GW. Afin de développer les énergies renouvelables, plusieurs initiatives ont été prises au niveau national. Dans le cadre de la loi d'énergie renouvelable de 2005 suivie par le plan de développement à moyen et long terme des énergies renouvelables, quatre mécanismes ont été mis en place : i) une cible nationale de consommation d'énergie renouvelable révisée à la hausse à chaque plan quinquennal, ii) une connexion minimale au grid et une politique d'achat de l'énergie, iii) des

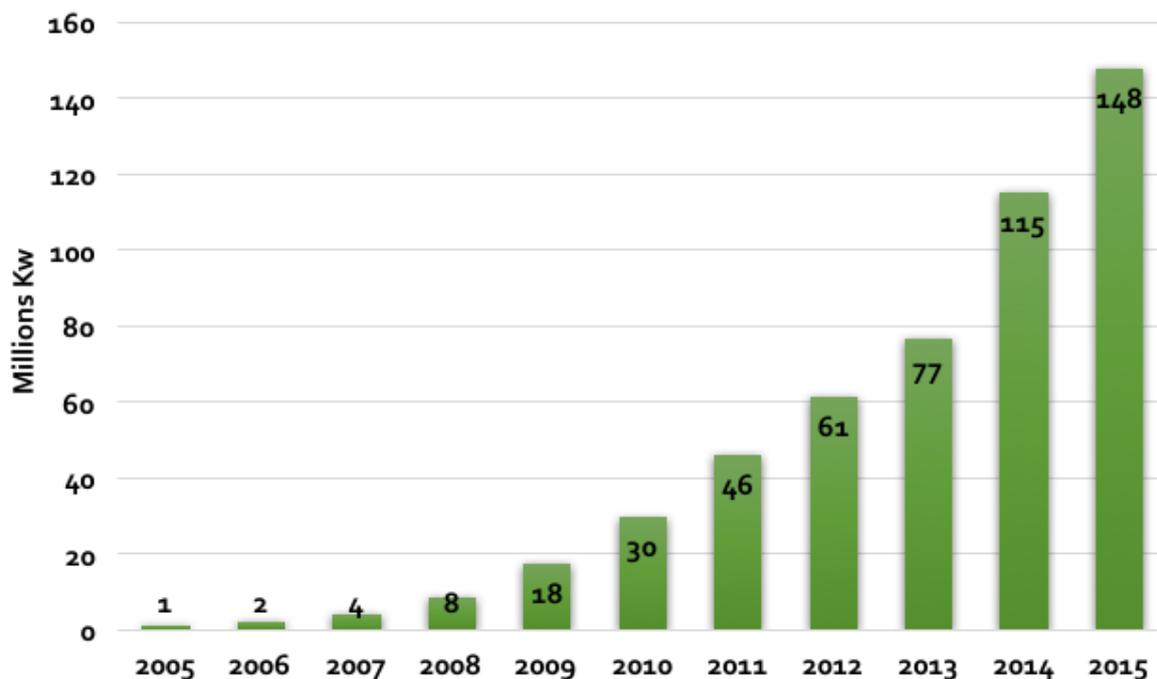
subventions pour l'ensemble les énergies renouvelables (solaire, éolien, biomasse)²⁴, iv) un mécanisme de partage des coûts pour le développement des énergies renouvelables (IRENA, 2014). L'ensemble de ces politiques ont contribué au fort développement des énergies renouvelables en Chine depuis 2005. Les Figure 15a et 2b représentent respectivement la capacité de production de l'électricité à partir de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne. En 2015, la capacité de production de l'électricité en Chine représente 10% de la capacité installée pour la production électrique alors que cette part était proche de 0 en 2005. La capacité installée pour la production électrique à partir de solaire et de l'éolien est supérieure aux capacités installées aux Etats-Unis et dans l'Union Européenne (EIA, 2017b). Aux Etats-Unis, la capacité installée de solaire et d'éolien en 2015 était respectivement égales à 16 et 64 millions de KW. Dans l'Union Européenne, ces mêmes capacités installées étaient supérieures à celles des Etats-Unis et s'élevaient à 96 et 99 millions de KW.

Figure 15 : Evolution de la Capacité de production de l'électricité à partir du solaire et de l'éolien en Chine de 2005 à 2015.



2a Energie Solaire

²⁴ Par exemple, la subvention accordée à l'énergie solaire varie de 0,145 US\$/kWh à 0,161 US\$/kWh en fonction de la province (IRENA, 2014).



2b Energie Eolienne

Source : EIA (2017b)

En mars 2015, le conseil d'État chinois a annoncé un plan pour réformer le secteur électrique en augmentant la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité, encourager la concurrence et améliorer l'efficacité. La Chine devrait aussi mettre en place un système national de quotas des émissions de CO₂ d'ici 2017. Dans le cadre de cette réglementation, chaque province devrait fixer un pourcentage minimal de consommation électrique provenant d'énergie renouvelable non hydroélectrique. En fonction du portefeuille énergétique de chaque province, cette part devrait fluctuer entre 2 % et 10 %.

4.1.2 Une politique en faveur du gaz de schiste

Par ailleurs, le gouvernement envisage de porter la part du gaz naturel dans la consommation énergétique à 10 % en 2020 tout en limitant l'usage du charbon à cinq milliards de tonnes. Au rythme actuel de consommation, les réserves récupérables chinoises en gaz naturel permettraient de satisfaire la demande actuelle de gaz pour les 24 prochaines années (WEC, 2013 et IEA, 2016a). Or, compte tenu de la croissance attendue des besoins énergétiques chinois, la production chinoise de gaz ne pourra pas satisfaire les besoins, les importations devront augmenter. Le gaz est une ressource plus difficilement transportable que le charbon et, est soumis à de fortes contraintes de capacité. Les importations de gaz peuvent s'effectuer par

deux voies. La première, la voie terrestre ou pipeline permet d'importer du gaz de l'Asie Centrale d'une part, et du Myanmar d'autre part (voir Figure 16a)²⁵. La capacité maximale d'importation par pipeline est d'environ 31 milliards de mètres cubes en 2015. La seconde, par voie maritime permet de transporter le gaz sous forme liquéfié. Elle offre la possibilité à la Chine de diversifier ses sources d'approvisionnement (Qatar, Indonésie, Malaisie, Australie). La Chine dispose de dix terminaux méthaniers en opération ayant une capacité maximale de 27 milliards de mètres cube (voir Figure 16b). La Chine est le troisième importateur mondial de gaz liquéfié.

Figure 16 : Réserves de gaz de schiste et pipeline

16a : Répartition géographique des réserves



16b : Pipelines



²⁵ Gazprom et la société chinoise China National Petroleum Corporation (CNPC) ont signé un accord en 2014 pour la construction d'un pipeline qui permettra d'acheminer environ 38 milliards de mètres cube de gaz de la Sibérie vers la Chine d'ici 2017.

Les réserves chinoises de gaz naturel ne pourraient pas être une solution pérenne pour satisfaire les besoins énergétiques et remplacer le charbon dans le portefeuille énergétique. Toutefois, la Chine dispose de réserves importantes de gaz de schiste. En effet, elles représentent environ 20% des ressources mondiales et elles permettraient de satisfaire la demande actuelle chinoise en gaz pour les cent prochaines années (EIA, 2013a et WEC, 2013). Le gouvernement chinois a décidé dès 2010 de favoriser l'exploitation de cette ressource en prenant des mesures institutionnelles mais aussi économiques. D'une part, le gouvernement a réformé le contexte institutionnel et réglementaire (Hu & Xu, 2013). En décembre 2011, le gaz de schiste a été reconnu ressource minérale par le ministère de la Terre et des ressources chinois ouvrant ainsi la voie à son exploitation et à son développement. L'année suivante, le gouvernement a autorisé les investissements privés pour son exploitation. Les deux compagnies nationales autorisées à exploiter les réserves, Sinopec et PetroChina, ne possédant pas les compétences technologiques, ont signé un accord avec les États-Unis pour favoriser l'échange de technologies d'exploration et d'exploitation. D'autre part, le gouvernement dispose d'une batterie d'outils économiques : i) une subvention de 0,06 dollar par mètre cube de gaz extrait est versée aux producteurs (Xin-Gang & Ya-Hui, 2015), ii) des diminutions de droit sur les licences d'exploitation sont octroyées. Des exemptions de droits d'importation pour des équipements servant aux industries exploitant le gaz de schiste sont également accordées.

Néanmoins, l'exploitation du gaz de schiste est encore à son balbutiement et rencontre de nombreux obstacles technologiques et géologiques. La fracturation hydraulique est plus difficilement utilisable en Chine (Yuan, Luo, Xia, & Feng, 2015). En effet, les ressources sont situées dans des régions montagneuses et à des profondeurs plus élevées que les ressources nord-américaines²⁶. En outre, cette technique d'exploitation nécessite de large quantité d'eau, or les gisements sont dans des régions arides telles que le Sichuan (voir Figure 16a). Et des pipelines traversant la Chine doivent transporter le gaz des zones d'extraction du gaz situées à l'ouest vers les zones économiques de l'est (voir Figure 16b). Le développement des gaz de schiste pourrait être limité par le manque de pipelines (Yuan, Luo, Xia, & Feng, 2015).

De fortes incertitudes existent sur le bilan environnemental du gaz de schiste. En comptabilisant uniquement les émissions directes et indirectes de CO₂, c'est-à-dire les émissions au cours de la combustion et celles liées au processus de transformation du gaz en énergie finale, remplacer un MBtu (Million British Thermal Units) d'énergie produit à partir du

²⁶ Certaines ressources chinoises sont situées à plus de 2 500 mètres de profondeur, rendant la fracturation hydraulique plus complexe. De ce fait, le coût d'extraction du gaz de schiste est plus élevé.

charbon permet de réduire de 31 % d'émissions de CO₂. Toutefois, chaque forage d'énergie fossile présente des risques de fuites de méthane et ils sont plus élevés pour le gaz. En comptabilisant les fuites de méthane et les émissions directes et indirectes de CO₂, produire un MBtu à partir de gaz de schiste émet deux fois plus de CO₂ que le produire à partir de charbon (Allen, et al., 2013 et Cathles III, Brown, Taam, & Hunter, 2012). En outre, la fracturation hydraulique présente de forts risques pour les ressources en eau. D'une part, cette technologie requiert de grandes quantités d'eau. D'autre part, elle peut causer des dommages irréversibles aux nappes phréatiques. Au cours du forage, l'eau mélangée à du sable et des additifs chimiques est injectée dans le puits, elle en ressort pour être débarrassée de ses particules et ainsi de suite. Si une fuite a lieu lors de l'injection de l'eau, des polluants peuvent s'infiltrer dans les nappes phréatiques profondes. Enfin, étant donné que la fracturation hydraulique casse la roche, elle peut aussi accroître le risque de séismes dans certaines régions sensibles (Jackson, et al., 2014).

Malgré ces difficultés, la progression de la production de gaz de schiste a été notable. Les compagnies de forage chinoises ont extrait cinq milliards de mètres cubes de gaz de schiste en 2015 représentant 4 % de la production chinoise de gaz (EIA, 2015). Même si la quantité extraite de gaz de schiste est encore faible comparativement aux besoins énergétiques, elle a enregistré une forte progression au cours de ces dernières années. En effet, elle s'élevait uniquement à 200 millions de mètres cubes en 2013. Les trois-quarts de la production de gaz de schiste sont situés dans la région du Sichuan.

4.1.3 L'énergie nucléaire et la séquestration géologique du carbone

Le gouvernement envisage d'autres options pour atténuer les émissions de CO₂ comme le développement de l'énergie nucléaire et la séquestration géologique du carbone, elles font partie des engagements pris dans le cadre de leur contribution nationale ou NDC (Nationally Determined Contribution), c'est-à-dire leur engagement de réduction d'émissions de gaz à effet de serre d'ici 2025-2030 pris lors des Accords de Paris. Toutefois, aucune cible minimale pour chacune de ces options n'a été spécifiée, seule une feuille de route a été définie.

L'énergie nucléaire est reconnue comme une énergie à faible contenu en carbone. Selon (IEA, 2015b), son développement a permis d'éviter d'émettre près de 60 Gt de CO₂ à travers le monde²⁷. Elle fournissait en 2013 environ 2 % de la consommation d'énergie en Chine. La capacité de production d'énergie à partir du nucléaire était de 25 GW en 2015, 36 réacteurs étaient en opération et 20 en construction (IEA, 2015b). En 2050, la Chine devrait être le leader

²⁷ Toutefois, l'énergie nucléaire présente de nombreux risques : recyclage des déchets, dommages irréversibles causés à l'environnement en cas d'accident nucléaire.

mondial en termes de capacité de production avec 250 GW installées soit 27 % de la capacité mondiale. IEA (2015b) a estimé que le développement du nucléaire en Chine devrait éviter 32 % des émissions de CO₂ en 2050.

L'autre option retenue est la séquestration géologique du carbone ou technologie de capture et de stockage du CO₂. Cette technologie qui consiste à capter le CO₂ à la source dans les fumées provenant de la combustion des énergies fossiles dans les centrales thermiques et les usines, puis à l'enfouir dans des formations géologiques, sur terre ou en mer, devrait permettre de diminuer d'environ 13 % des émissions mondiales en 2050 (IEA, 2015c)²⁸. Cette technologie est principalement développée aux Etats-Unis et au Canada qui comptent 9 installations sur les 14 installées dans le monde. Les autres pays utilisant cette technologie sont l'Australie, la Norvège et le Royaume-Uni. Cette option technologique pourrait être intéressante pour la Chine étant donné que le charbon fournit un peu plus des deux tiers de l'énergie chinoise (voir Figure 14). Même si la Chine investit massivement dans les énergies renouvelables, la capacité de production des centrales électriques à charbon s'élève à 900 GW, soit un peu plus de la moitié de la capacité installée (EIA, 2017b). De nouvelles centrales à charbon sont en construction et elle devrait augmenter la capacité de production de 200 GW. Force est de noter que les centrales à charbon chinoises sont parmi les plus jeunes au monde, en effet, les deux-tiers des centrales ont été construites après 2005 et devraient fonctionner au cours des trois ou quatre prochaines décennies (OECD/IEA, 2016). Par conséquent, pour relever le défi de réduire ses émissions de CO₂ tout en satisfaisant la demande croissante d'électricité, la Chine envisage de développer la technologie de séquestration et de capture du carbone. Le premier projet d'envergure a été lancé en mars 2017 dans la province de Shaanxi²⁹. Dans un rapport sur les possibilités de développement de cette technologie en Chine, l'agence internationale de l'énergie conjointement avec l'organisation de coopération et de développement économique a estimé que le coût d'équipement des centrales électriques à charbon existantes varie de 34 à 129 dollars américains par Mégawattheure. Les centrales pouvant être équipées représentent environ un tiers de la capacité de production installée soit 310 GW (OECD/IEA, 2016).

4.2 Modèle d'équilibre partiel des marchés énergétiques mondiaux

Afin d'analyser l'impact des différentes stratégies énergétiques adoptées par la Chine, nous construisons un modèle d'équilibre partiel du marché mondial de l'énergie à trois régions

²⁸ Dix pays dont la Chine, le Canada, la Norvège ont explicitement inclus les technologies de capture et de stockage du carbone dans la définition de leur contribution nationale.

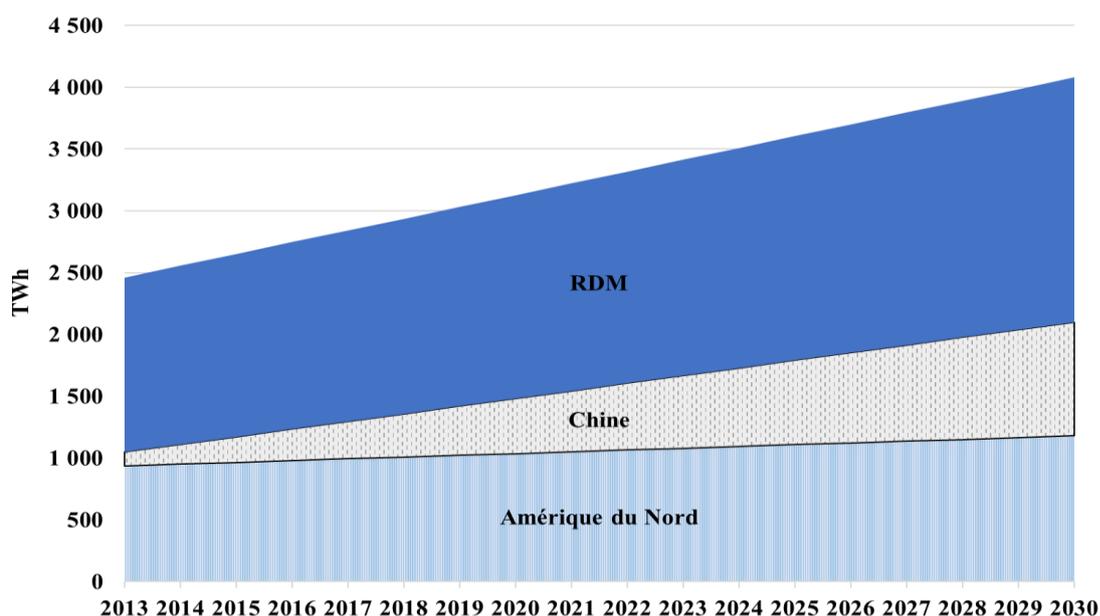
²⁹ <https://www.globalccsinstitute.com/projects/yanchang-integrated-carbon-capture-and-storage-demonstration-project>

(Amérique du Nord, Chine et RDM)³⁰ dont la structure du modèle est décrite par la Figure 18. Nous développons l'intuition économique du modèle dans le paragraphe qui suit. Les détails des formes fonctionnelles employées ainsi que les méthodes de calibration sont exposées dans l'annexe C de ce rapport. Pour finir, le dernier paragraphe de cette sous-section développe les scénarios de politiques climatiques et énergétiques introduits dans le modèle.

4.2.1 Description du modèle

L'énergie est produite à partir de ressources fossiles, fissiles et renouvelables. Dans le groupe des énergies fossiles sont inclus : le charbon, le pétrole et le gaz naturel conventionnel et non conventionnel (ou gaz de schiste). Parmi les énergies renouvelables, nous distinguons l'énergie hydroélectrique de la biomasse et des autres énergies renouvelables telles que le solaire et l'éolien. Nous supposons dans cet exercice que la production d'énergie à partir de la biomasse et de l'énergie hydraulique est donnée. En outre, l'électricité peut être produite à partir d'énergie nucléaire. La génération d'électricité à partir du nucléaire est elle aussi exogène. Elle est caractérisée à partir des données de l'agence internationale de l'énergie (IEA, 2015b). Elle est représentée par la Figure 17 ci-dessous :

Figure 17 : Génération d'électricité à partir de l'énergie nucléaire en TWh



Source : IEA (2015b)

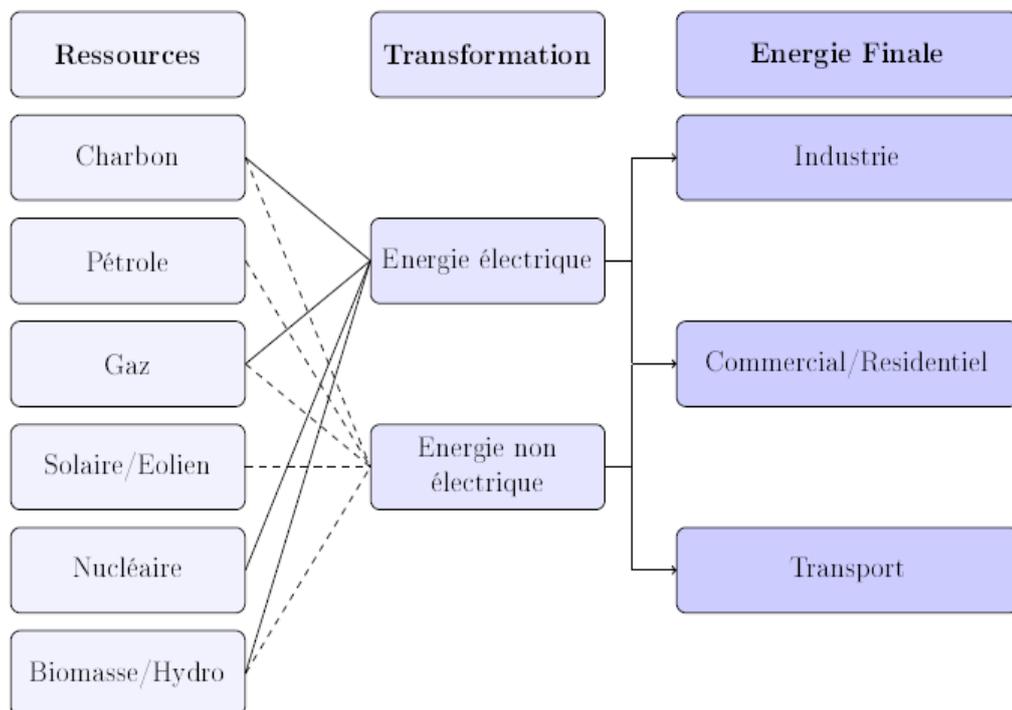
Le coût d'extraction des ressources fossiles est une fonction croissante et convexe du stock de ressource extrait³¹. Ainsi, à mesure que les besoins énergétiques s'accroissent, les

³⁰ La région de l'Amérique du Nord comprend : les États-Unis, le Canada et le Mexique.

³¹ La fonction de coût d'extraction est décrite par l'équation C1 de l'annexe C (Chakravorty, Magné, & Moreaux, 2012).

ressources aux coûts d'extraction plus élevés comme les ressources non conventionnelles deviennent compétitives. En outre, le modèle intègre le commerce international des ressources. Les énergies fossiles peuvent être échangées sur le marché mondial alors que les ressources renouvelables et l'énergie nucléaire sont produites et consommées dans chaque région. Les ressources importées sont des parfaits substituts aux ressources produites dans le pays, en conséquence les exportations nettes sont définies comme la demande nette de chaque ressource. Les coûts de transport ainsi que les contraintes de capacité pour le transport sont considérés.

Figure 18 : Structure du modèle



Note : le pétrole n'est pas utilisé dans la production d'électricité. Le nucléaire, l'énergie hydroélectrique et l'énergie éolienne et solaire sont uniquement transformés en énergie électrique

Afin de modéliser correctement le portefeuille énergétique, les différentes ressources sont supposées imparfaitement substituables³². La production d'énergie se décompose en deux étapes. Dans un premier temps, les ressources peuvent être utilisées soit pour la production électrique soit pour la production directe d'énergie³³. Puis, l'électricité et l'énergie produite à partir d'usage direct des ressources participent à la production finale d'énergie permettant ainsi

³³ La production d'énergie est modélisée *via* une fonction de production à élasticité de substitution constante (voir en annexe C pour le détail de la calibration de la fonction de production ainsi que la valeur de l'élasticité de substitution).

de satisfaire la demande émanant de trois secteurs : industriel, commercial/résidentiel et transport. L'énergie électrique et celle produite à partir d'usage direct des ressources étant des substituts imparfaits, la production finale d'énergie est une fonction de production à élasticité de substitution constante. Pour finir, les émissions de CO₂ induites par chaque ressource fossile sont prises en compte. Le contenu en carbone exprimé en énergie délivré est reporté dans le Tableau 10. Toutefois, les possibles fuites de méthane ne sont pas considérées. Le taux de progrès technique sur les coûts de production des énergies renouvelables et les coûts de transformation est exogène³⁴.

Tableau 10 : Contenu en CO₂ des ressources fossiles

Ressource fossile	Contenu en CO ₂ (kg CO ₂ /MBtu)
Charbon	95
Gaz naturel	54
Gaz de schiste	65
Pétrole	72

Sources : Cathles III, Brown, Taam, & Hunter, 2012 ; EIA, 2013b et Jackson, et al., 2014

Le modèle a été calibré pour l'année 2011, il est programmé jusqu'en 2030 en pas de temps d'une année. Le taux d'escompte est de 1,5 % par an (Chakravorty, Magné, & Moreaux, 2012). Une présentation détaillée des différentes fonctions utilisées, des méthodes de calibration et des données employées est proposée en annexe C.

Le planificateur social maximise la somme du surplus des consommateurs et de celui des producteurs sous les contraintes technologiques et celles d'équilibre sur le marché mondial des ressources. Le modèle permet de faire des prévisions sur l'offre et la demande régionales, les échanges mondiaux et le prix de chaque ressource. La production d'électricité et celle d'énergie à partir d'usage de ressources sont endogènes. Enfin, le modèle prévoit la demande finale d'énergie par secteur, d'une part, et le prix de l'énergie finale, d'autre part. La quantité utilisée de chaque ressource dans le portefeuille énergétique dépend du prix relatif des ressources ; elle est d'autant plus élevée que le prix de la ressource est faible comparativement aux autres ressources. La demande croissante d'énergie dépend du taux de croissance exogène du PIB. Le prix de l'énergie finale augmente, permettant aux ressources les plus coûteuses telles

³⁴ Le progrès technique affecte le coût de production des énergies renouvelables ainsi que les coûts de transformation des ressources en énergie finale. Dans ce modèle simplifié, les améliorations techniques permettant de diminuer le coût d'extraction des ressources et d'améliorer le rendement des gisements sont ignorées.

que les ressources non conventionnelles et les ressources renouvelables de devenir compétitives.

4.2.2 Description des scénarios de politiques énergétique et climatique

Dans le scénario de base, aucune politique énergétique ou climatique n'est introduite dans le modèle. La croissance exogène du PIB accroît la demande d'énergie, quant à l'offre de ressource, elle est modifiée sous l'impulsion du progrès technique. Puis, quatre scénarios sont définis :

- le scénario « développement du gaz de schiste » impose un niveau minimal d'extraction du gaz de schiste en Chine. Nous supposons que la production de gaz de schiste doit être multipliée par 10 en 2030 par rapport au scénario de base. A partir de ce scénario, il est possible de déterminer la subvention qui devra être offerte aux propriétaires miniers ;
- le scénario « développement des énergies renouvelables », la part des énergies renouvelables provenant du solaire et de l'éolien dans la consommation d'énergie finale, doit être au moins égale à 20% en 2030.
- le scénario « stabilisation de la consommation de charbon » impose une stabilisation de la consommation chinoise de charbon à partir de 2020 à 4,5 milliards de tonnes ;
- le scénario « taxe sur le CO₂ » impose une taxe sur chaque tonne d'émission de CO₂ de 70 dollars (dollars de 2005 en parité des pouvoirs d'achat).

4.3 Impact des politiques énergétiques et climatiques sur les émissions de CO₂ pour 2030

Pour les différents scénarii, l'analyse se concentre sur l'interprétation des résultats pour l'année 2030 en mettant l'accent sur l'impact des politiques sur les émissions de CO₂ chinoises et mondiales. Les fuites de carbone en Amérique du Nord et dans le RDM sont également calculées.

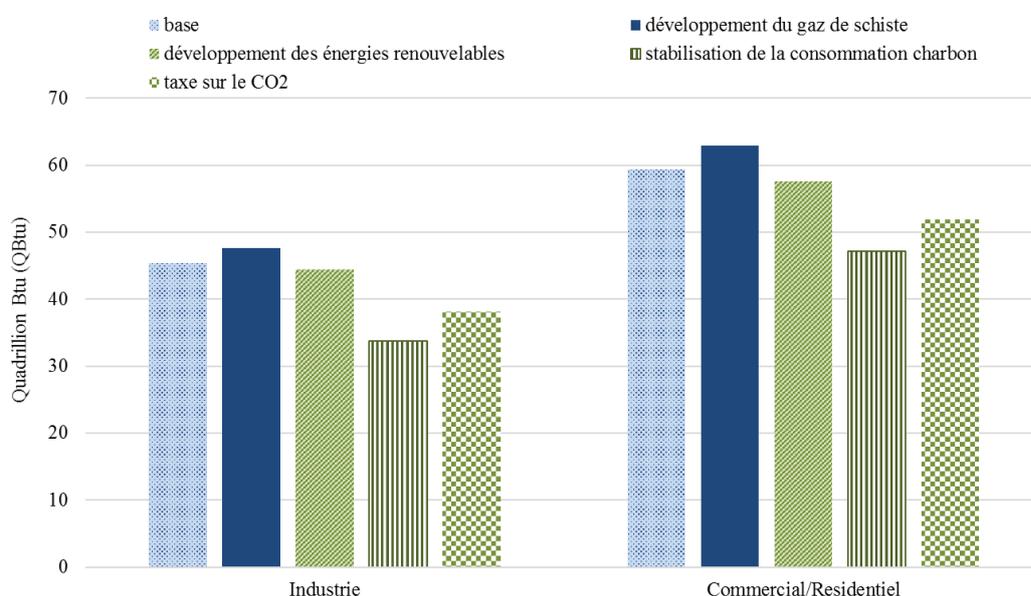
4.3.1 Le scénario développement du gaz.

Pour atteindre la cible sur la production minimale de gaz, le gouvernement doit accorder une subvention à l'extraction du gaz de schiste qui permet de réduire son coût d'extraction de 40% par rapport au modèle de base³⁵. Ainsi le prix domestique du gaz diminue, la demande

³⁵ Pour tenir compte de cette politique, une contrainte est introduite dans le modèle spécifiant la production minimale de gaz de schiste. Le multiplicateur de Lagrange associé à cette contrainte représente la subvention qui

chinoise de gaz augmente et sa part dans la consommation globale d'énergie est portée à 9% alors qu'elle n'excède pas 3% dans le scénario de base.³⁶ Le prix du gaz diminue entraînant également une baisse du prix de l'énergie finale dans les secteurs commercial et résidentiel et dans le secteur de l'industrie, les prix dans ces secteurs diminuent respectivement de 3% et 5%. La baisse de prix est plus marquée pour l'électricité dont le prix diminue de 15%. La demande d'énergie finale augmente comparativement au scénario de base (voir Figure 19). Même si la part de la consommation de gaz de schiste augmente au détriment de celle du charbon, les émissions de CO₂ chinoises croissent de 5% (voir Figure 20).³⁷ L'effet demande : augmentation de la demande finale d'énergie l'emporte sur l'effet offre : substitution d'une ressource moins polluante à une ressource plus polluante.

Figure 19 : Demande finale d'énergie en Chine sous différents scénarios en 2030



Notes : Les résultats pour le secteur des transports ne sont pas reportés étant donné que ce dernier est moins affecté par les politiques mises en place. De plus, la part du gaz dans ce secteur étant minime, les résultats ont moins d'intérêt dans le cadre de cette étude.

En outre, les émissions de CO₂ dans les autres régions augmentent. En effet, suite à la baisse de la demande chinoise de charbon, le prix mondial du charbon diminue de 5% et sa consommation progresse dans le RDM. Par conséquent, les émissions augmentent de 3% en Amérique du Nord et de 1% dans le RDM (Figure 21). L'augmentation des émissions en

doit être accordée aux producteurs. En 2030, le coût d'extraction du gaz de schiste devrait atteindre hors subvention 6 US dollars par MBtu.

³⁶ Dans le scénario de base, le développement du gaz en Chine est paralysé par la faiblesse des coûts de production du charbon.

³⁷ Produire une unité d'énergie à partir de gaz de schiste en remplacement d'une unité d'énergie produite à partir de charbon permet de diminuer les émissions de CO₂ d'environ un tiers (voir Tableau 10).

Amérique du Nord (respectivement RDM) représente 60% (respectivement 19%) de l'augmentation des émissions en Chine (voir Figure 22).

4.3.2 Le scénario développement des énergies renouvelables.

Dans ce scénario, une cible de consommation minimale de l'énergie renouvelable à partir de l'éolien et du solaire est définie. La part des énergies renouvelable dans la consommation finale d'énergie doit au moins être égale à 20% alors qu'elle n'excède pas 9% dans le scénario de base. En incitant les consommateurs à adopter une énergie plus onéreuse, le gouvernement participe à l'accroissement du prix de l'énergie finale conduisant ainsi à une diminution de la consommation d'énergie finale (voir Figure 19). La baisse de la demande d'énergie finale combinée à une recomposition du portefeuille énergétique en faveur d'énergies vertes induisent une baisse de 8% des émissions de CO₂ (voir Figure 20).

Cependant, les émissions de CO₂ dans les autres régions augmentent. En effet, le prix mondial de toutes les énergies fossiles diminue avec une baisse plus accentuée pour le charbon. Leur part dans le portefeuille énergétique augmente entraînant une hausse de 1% des émissions par rapport au scénario de base (voir Figure 21). L'augmentation des émissions de CO₂ en Amérique du Nord et dans le RDM représente environ 12% de la réduction des émissions chinoises (voir Figure 22)

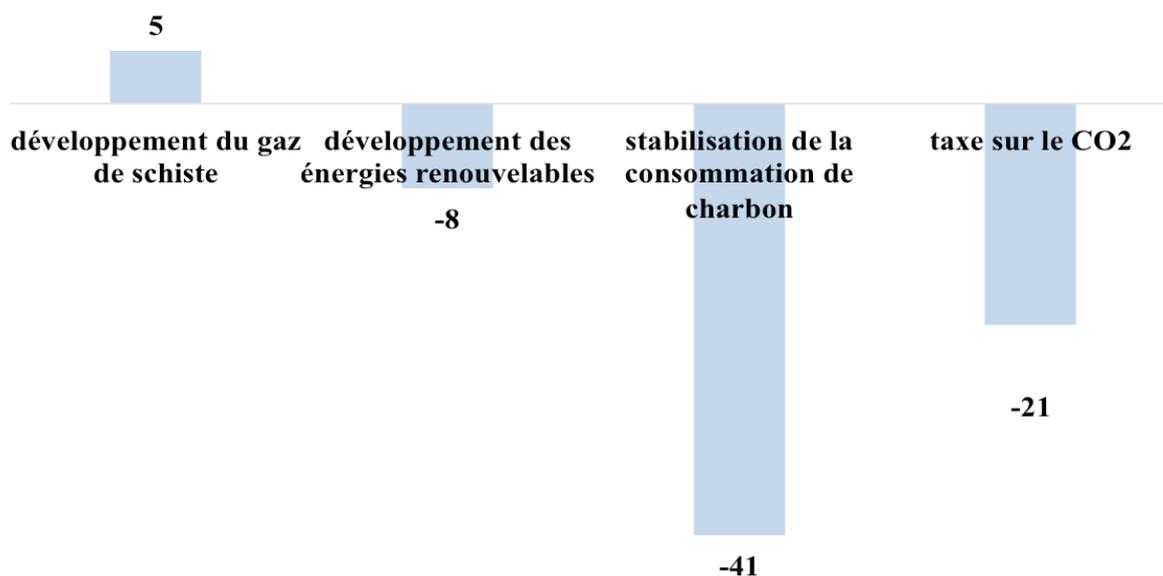
4.3.3 Le scénario stabilisation de la consommation de charbon.

Dans ce scénario, le gouvernement chinois impose une stabilisation de la consommation de charbon à 4,5 milliards de tonnes. En imposant une telle contrainte, tout se passe comme si le gouvernement chinois taxait le charbon³⁸. Le prix domestique du charbon augmente de 30% par rapport au scénario de base et sa consommation diminue d'un peu plus d'un tiers. Pour comprendre l'effet net de cette politique sur les émissions de CO₂, nous devons en comprendre l'effet sur le portefeuille énergétique, d'une part, et sur la demande finale d'énergie, d'autre part. Le charbon étant la ressource la plus polluante, toute politique taxant son usage favorise le développement d'énergie moins polluante. Dans ce scénario, le principal bénéficiaire est le gaz de schiste. La consommation d'énergies renouvelables telles que l'éolien/solaire n'est pas affectée. La taxe implicite sur le charbon accroît le prix de l'énergie finale ainsi que celui de

³⁸ Pour tenir compte de cette politique, nous introduisons une contrainte dans le modèle spécifiant que la consommation de charbon ne doit pas excéder 4,5 milliards de tonnes. Le multiplicateur de Lagrange associé à cette contrainte est interprété comme la taxe sur le charbon.

l'électricité. La demande finale d'énergie décroît (voir Figure 19). Les émissions de CO₂ chinoises diminuent de 41% par rapport au modèle de base (voir Figure 20).

Figure 20 : Pourcentage de variation des émissions de CO₂ chinoises sous les différents scénarios comparativement au scénario de base en 2030 (%)

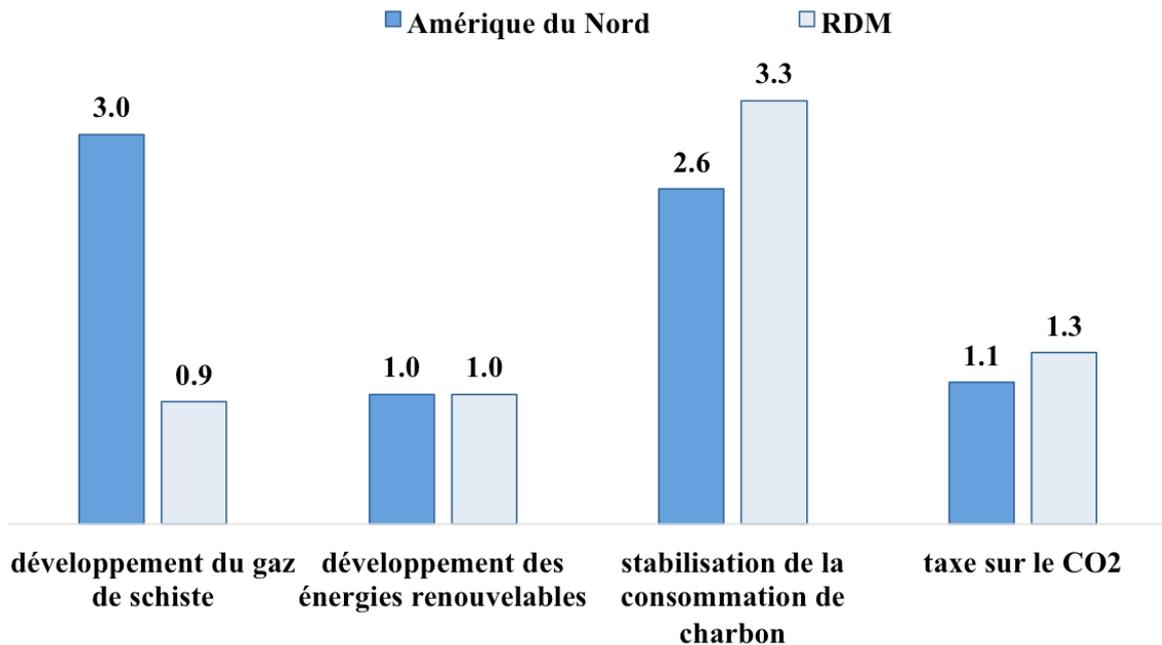


En revanche, les émissions de CO₂ en Amérique du Nord (respectivement RDM) augmentent de 2.6% (respectivement de 3.3%) (voir Figure 21). Les fuites de CO₂ sont positives. L'accroissement des émissions de CO₂ en Amérique du Nord (respectivement RDM) représente 6% (respectivement 8%) de la diminution des émissions de CO₂ en Chine (voir Figure 22)..

4.3.4 Le scénario taxe sur le CO₂.

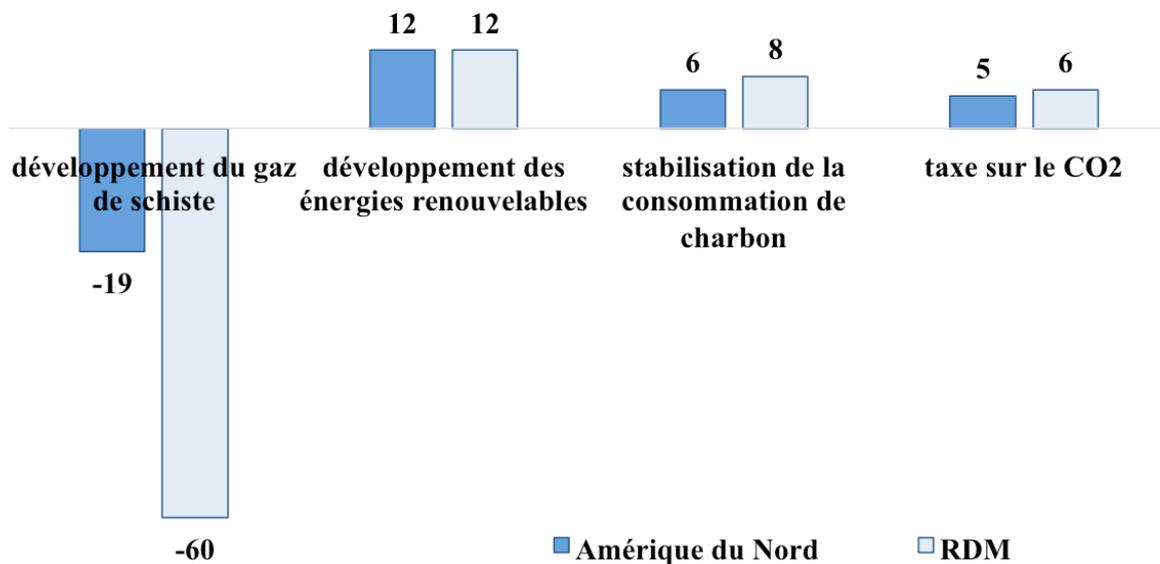
Le gouvernement chinois impose une taxe de 70 dollars sur chaque émission de CO₂ en 2030. De ce fait, ces dernières diminuent de 20% par rapport au scénario de base. Chaque ressource énergétique étant taxée à hauteur de son contenu en CO₂, le prix du charbon augmente plus que celui des autres ressources. La consommation de toutes les énergies fossiles diminue, seule celle des énergies renouvelables (éolien/solaire) croît.

Figure 21 : Pourcentage de Variation des émissions de CO₂ en Amérique du Nord et dans le RDM (%)



Figure

Figure 22 : Fuites de CO₂ en % En Amérique du Nord et dans le RDM



Notes : Les fuites sur le CO₂ sont calculées comme le rapport entre la variation en pourcentage des émissions de CO₂ en Amérique du Nord et dans le RDM par rapport au scénario de base et la baisse en pourcentage des émissions de CO₂ en Chine par rapport au scénario de base, multiplié par 100.

Contrairement à d'autres études, (Henriet & Schubert, 2015) et (Daubanes, Henriet, & Schubert, 2016), notre étude montre que la politique climatique ne favorise pas le

développement du gaz de schiste. La taxe implicite sur le CO₂ freine la demande d'énergie finale (voir Figure 19). Le prix de l'énergie finale augmente d'environ 30% pour tous les secteurs. En revanche, étant donné que la demande chinoise de charbon diminue, son prix diminue. De ce fait, la part du charbon dans le portefeuille énergétique du RDM augmente et les émissions mondiales de CO₂ croissent (voir Figure 21).

5 Conclusion

Ce rapport s'articule autour de deux études. La première s'intéresse à la dynamique de long terme des émissions de CO₂ dans les pays en développement et émergents en mettant un focus sur les BRICS. A cet effet, nous avons utilisé les outils de la théorie économique sur la convergence des émissions de CO₂. Nous avons testé l'existence de la beta-convergence conditionnelle ainsi que l'effet d'échelle pour les pays en développement et émergents sur la période 1992-2013. Les résultats de l'étude économétrique confirment l'existence de la beta-convergence autrement dit les émissions par tête des pays de l'échantillon devraient converger vers un niveau d'équilibre, spécifique à chaque pays, pour lequel le taux de croissance est nul. La vitesse de convergence est de 24%, ce qui suggère que les émissions par tête pour l'échantillon de pays étudié devraient stabiliser leurs émissions par tête d'ici environ 12 ans. L'existence d'un effet d'échelle, relation positive entre le taux de croissance du PIB par tête et des émissions par tête, est également confirmé. En effet, à la suite d'une augmentation d'un point de pourcentage du PIB par tête, les émissions par tête devraient croître de 0,27 point de pourcentage. Les élasticités du taux de croissance des émissions par tête par rapport à la consommation énergétique conditionnellement au portefeuille énergétique pays ont également été estimées. Elles sont environ égales à 0,15, par conséquent, l'augmentation d'un pourcent de la consommation énergétique devrait conduire à une augmentation de 0,15 point de pourcentage des émissions par tête. A partir de l'estimation des différentes élasticités, nous avons réalisé des projections sur les niveaux futurs des émissions par tête à l'équilibre et, ainsi, nous avons pu examiner l'effet de différentes politiques énergétiques sur le niveau des émissions par tête d'équilibre en focalisant notre analyse sur les BRICS. Par la suite, en comparant le niveau des émissions par tête d'équilibre en l'absence de toute politique et le niveau des émissions cible définies dans le cadre de l'Accord de Paris, nous avons déterminé les efforts que les BRICS devront consentir pour respecter leurs engagements. Les cibles de diminution des émissions de CO₂ ne sont pas définies sur la même base. La Chine et l'Inde se sont engagées à réduire leur intensité énergétique alors que le Brésil, la Russie, l'Afrique du Sud ont défini une cible de

diminution des émissions de CO₂. Afin de pouvoir comparer ses différentes cibles, nous les avons transposées en termes d'émissions par tête. Les efforts de diminution les plus importants devront être consentis par le Brésil et la Russie. La baisse des émissions par tête de la Chine devra être limitée à 8% par rapport à leur niveau de 2013. L'Afrique du Sud aura la possibilité d'augmenter ses émissions par tête de 19% et celles de l'Inde pourront augmenter de 55%. En outre, nous avons caractérisé plusieurs scénarios pour mesurer quelles politiques énergétiques permettraient aux BRICS de respecter leurs engagements. Pour respecter leur cible, les BRICS devront investir massivement dans les énergies renouvelables.

La deuxième étude s'intéresse aux différentes options de politique énergétique en Chine visant à réduire les émissions de CO₂ pour 2030. En particulier, nous mettons le focus sur quatre politiques : i) développement du gaz de schiste, ii) développement de l'éolien et du solaire et iii) stabilisation de la consommation de charbon, iv) taxe sur le carbone. Nos résultats montrent qu'une politique visant à favoriser l'extraction du gaz de schiste à grande échelle en Chine conduirait à accroître les émissions de CO₂. En revanche, les émissions chinoises diminuent à la suite d'une politique favorisant le développement des énergies renouvelables ou la stabilisation du charbon à partir de 2020. Ces trois politiques favorisent l'augmentation des émissions de CO₂ dans le RDM.

6 Travaux cités

- Allen, D. T., Torres, V. M., Thomas, J., Sullivan, D. W., Harrison, M., Hendler, A., . . . al., e. (2013). Measurements of methane emissions at natural gas production sites in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(44), 17778-17773.
- Auffhammer, M., & Gong, Y. (2015). China's Carbon Emissions from Fossil Fuels and Market-Based Opportunities for Control. *Annual Review of Resource Economics*, 7(1), 11-34.
- Banque Mondiale. (2016). World Development Indicators . Washington, DC.
- Barro, R., & Sala-i Martin, X. (1992). Convergence. *Journal of Political Economy*, 100(2), 223-251.
- Berntein, M., & James, G. (2005). *Regional Differences in the Price-Elasticity of Demand for Energy*. National Renewable Energy Laboratory .
- Cathles III, L. M., Brown, L., Taam, M., & Hunter, A. (2012). A commentary on "The greenhouse-gas footprint of natural gas in shale gas formations" by R.W. Howart, R. Santoro, and Anthony Ingraffea. *Climatic Change*, 113(2), 525-535.
- Chakravorty, U., Magné, B., & Moreaux, M. (2012). Resource Use under Climate Stabilisation: Can Nuclear power Provide Clean Energy? *Journal of Public Economics*, 14(2), 349-389.
- Chancel, L., & Piketty, T. (2015). *Carbon and inequality : from Kyoto to Paris*.
- Chen, X., Huang, H., Khanna, M., & Önal, H. (2014). Alternative transportation fuel standards: Welfare effects and climate benefits. *Journal of Environmental Economics and Management*, 67(3), 241-257.
- Criado, C. O., Valente, S., & Stengos, T. (2011). Growth and pollution convergence: Theory and evidence. *Journal of Environmental Economics and Management*, 62(2), 199-214.
- Daubanes, J., Henriet, F., & Schubert, K. (2016). More gas to reduce CO2 emissions. *Working Paper* .
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey. *Ecological Economics*, 49, 431-455.
- Durlauf, S., Johnson, P., & Temple, J. (2005). Growth econometrics. *Handbook of Economic Growth*, 555-677.
- EIA. (2013a). *Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries Outside the U.S.* Washington: Energy Information Administration.
- EIA. (2013b). *Carbon Dioxide Emissions Coefficients*. Washington, DC: Energy Information Administration.
- EIA. (2014). *Model Documentation Report: Industrial Demand Module of the National Energy Modeling System*. Washington, DC: Energy Information Administration.
- EIA. (2015). *Four Countries Added to Global Shale Oil and Natural Gas Resource Assessment*. Washington, DC: Energy Information Administration.

- EIA. (2017a). *International Energy Outlook : Projections*. Washington, DC: Energy Information Administration.
- EIA. (2017b). *International Energy Statistics*. Washington, DC: Energy Information Administration.
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1993). Environmental impacts of a North American free trade agreement. Dans P. M. Garber, *The US Mexico Free Trade Agreement* (pp. 163-186). Cambridge Press, MIT.
- Hamilton, J. D. (2009). Understanding Crude Oil Prices. *The Energy Journal* , 30(2), 179-206.
- Henriet, F., & Schubert, K. (2015). Should We Extract the European Shale Gas? The Effect of Climate and Financial Constraints . *Working Paper*.
- Hu, D., & Xu, S. (2013). Opportunity, challenges and policy choices for China on the development of shale gas. *Energy Policy*, 60, 21-26.
- IEA. (2010). *Projected Costs of Generating Electricity, 2010 Edition*. Paris : International Energy Agency.
- IEA. (2013). *Resources to Reserves, 2013*. Paris: International Energy Agency.
- IEA. (2014). *Prices and taxes statistics*. Paris: International Energy Agency .
- IEA. (2015a). *CO2 Emissions from Fuel Combustion: Highlights*. Paris : International Energy Agency .
- IEA. (2015b). *Technology Roadmap: Nuclear Energy*. Paris: International Energy Agency.
- IEA. (2015c). *Energy Technology Perspectives 2015 - Mobilising Innovation to Accelerate Climate Action*. Paris: International Energy Agency.
- IEA. (2016a). *Energy Balances of Non OECD Countries*. Paris: International Energy Agency.
- IEA. (2016b). *Energy Balances of OECD Countries*. Paris: International Energy Agency.
- IEA. (2016b). *Energy Balances of Non OECD Countries*. Paris: International Energy Agency.
- IRENA. (2014). *Renewable Energy Prospects: China*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency .
- Jackson, R. B., Vengosh, A., Carey, J., Davies, R., Darrah, T., O'Sullivan, F., & Pétron, G. (2014). The Environmental Costs and Benefits of Fracking. *Annual Review of Environment and Resources*, 39, 327-362.
- Jobert, T., Karanfil, F., & Tykhonenko, A. (2010). Convergence of per capita carbon dioxide emissions in the EU: Legend or reality? *Energy Economics*, 32(6), 1364-1373.
- Kuznets, S. (1955). Economic growth and income inequality. *The American Economic Review*, 1-28.
- LBNL. (2014). *Key China Energy Statistics*. Lawrence Berkeley National Laboratory .
- Lin, C., & Zeng, J. (2013). *The Elasticity of Demand for Gasoline in China* . Department of Agriculture and Resource Economics.
- McCrone, A., & al., e. (2015). *Global Trends in Renewable Energy Investment 2015*. Frankfurt School of Finance & Management and United Nations Environment Programme .

- OECD/IEA. (2016). *The potential for equipping China's existing coal fleet with carbon capture and storage*. Paris : International Energy Agency .
- Ordas Criado, C., S., V., & Stengos, T. (2011). Growth and pollution convergence : Theory and evidence. *Journal of Environmental Economics and Management*, 62, 199-214.
- Phounin, H., & Shigeru, K. (2014). *Analysis on Price Elasticity of Energy Demand in East Asia: Empirical Evidence and Policy Implications for ASEAN and East Asia*. ERIA Discussion Paper Series. April.
- Strazicich, M. C., & List, J. A. (2003). Are CO2 emission levels converging among industrial countries? *Environmental and Resource Economics*, 24(3), 263-271.
- UNPD. (2016). *World Population Prospects 2016*. Division des Nations Unies pour la Population.
- WEC. (2013). *World Energy Resources: Survey 2013* . London: World Energy Council.
- Xin-Gang, Z., & Ya-Hui, Y. (2015). The current situation of shale gas in Sichuan, China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 653-664.
- Yuan, J., Luo, D., Xia, L., & Feng, L. (2015). Policy recommendations to promote shale gas development in China based on technical and economic evaluation. *Energy Policy*, 85, 194-206.

Annexe A

Tableau A 1 Liste des pays, classement de la Banque Mondiale par rapport au revenu

Pays à revenus faibles	Zone géographique
Bénin	Afrique Sub Saharienne
Burkina Faso	Afrique Sub Saharienne
Burundi	Afrique Sub Saharienne
Comores	Afrique Sub Saharienne
Congo, Rép. Dém.	Afrique Sub Saharienne
Éthiopie	Afrique Sub Saharienne
Gambie	Afrique Sub Saharienne
Guinée	Afrique Sub Saharienne
Guinée-Bissau	Afrique Sub Saharienne
Libéria	Afrique Sub Saharienne
Madagascar	Afrique Sub Saharienne
Malawi	Afrique Sub Saharienne
Mali	Afrique Sub Saharienne
Mozambique	Afrique Sub Saharienne
Népal	Asie du Sud
Niger	Afrique Sub Saharienne
Ouganda	Afrique Sub Saharienne
République centrafricaine	Afrique Sub Saharienne
Rwanda	Afrique Sub Saharienne
Sénégal	Afrique Sub Saharienne
Sierra Leone	Afrique Sub Saharienne
Tanzanie	Afrique Sub Saharienne
Tchad	Afrique Sub Saharienne
Togo	Afrique Sub Saharienne
Zimbabwe	Afrique Sub Saharienne

Pays à revenus intermédiaires faibles	Zone géographique
Arménie	Europe et Asie Centrale
Bangladesh	Asie du Sud
Bhoutan	Asie du Sud
Bolivie	Amérique Latine et Caraïbe
Cabo Verde	Afrique Sub Saharienne
Cameroun	Afrique Sub Saharienne
Congo, Rép.	Afrique Sub Saharienne
Côte d'Ivoire	Afrique Sub Saharienne
Djibouti	Afrique du Nord et Moyen Orient
Égypte	Afrique du Nord et Moyen Orient
El Salvador	Amérique Latine et Caraïbe
Ghana	Afrique Sub Saharienne
Guatemala	Amérique Latine et Caraïbe
Honduras	Amérique Latine et Caraïbe
Îles Salomon	Asie de l'Est et Pacifique
Inde	Asie du Sud
Indonésie	Asie de l'Est et Pacifique
Kenya	Afrique Sub Saharienne
Kiribati	Asie de l'Est et Pacifique
Maroc	Afrique du Nord et Moyen Orient
Mauritanie	Afrique Sub Saharienne
Mongolie	Asie de l'Est et Pacifique
Myanmar	Asie de l'Est et Pacifique
Nicaragua	Amérique Latine et Caraïbe
Nigéria	Afrique Sub Saharienne
Ouzbékistan	Europe et Asie Centrale
Pakistan	Asie du Sud
Papouasie-Nouvelle-Guinée	Asie de l'Est et Pacifique
Philippines	Asie de l'Est et Pacifique
Lao	Asie de l'Est et Pacifique
République kirghize	Europe et Asie Centrale
Samoa	Asie de l'Est et Pacifique
Soudan	Afrique Sub Saharienne
Sri Lanka	Asie du Sud
Swaziland	Afrique Sub Saharienne
Tadjikistan	Europe et Asie Centrale
Tonga	Asie de l'Est et Pacifique
Tunisie	Afrique du Nord et Moyen Orient
Ukraine	Europe et Asie Centrale
Vanuatu	Asie de l'Est et Pacifique
Viet Nam	Asie de l'Est et Pacifique
Yémen, Rép. du	Afrique du Nord et Moyen Orient
Zambie	Afrique Sub Saharienne

Pays à revenus intermédiaires élevés	Zone géographique
Afrique du Sud	Afrique Sub Saharienne
Albanie	Europe et Asie Centrale
Algérie	Afrique du Nord et Moyen Orient
Angola	Afrique Sub Saharienne
Antigua-et-Barbuda	Amérique Latine et Caraïbe
Argentine	Amérique Latine et Caraïbe
Azerbaïdjan	Europe et Asie Centrale
Bélarus	Europe et Asie Centrale
Belize	Amérique Latine et Caraïbe
Botswana	Afrique Sub Saharienne
Brésil	Amérique Latine et Caraïbe
Bulgarie	Europe et Asie Centrale
Chine	Asie de l'Est et Pacifique
Colombie	Amérique Latine et Caraïbe
Costa Rica	Amérique Latine et Caraïbe
Cuba	Amérique Latine et Caraïbe
Dominique	Amérique Latine et Caraïbe
Équateur	Amérique Latine et Caraïbe
Fédération de Russie	Europe et Asie Centrale
Fidji	Asie de l'Est et Pacifique
Gabon	Afrique Sub Saharienne
Géorgie	Europe et Asie Centrale
Grenade	Amérique Latine et Caraïbe
Guyane	Amérique Latine et Caraïbe
Îles Marshall	Asie de l'Est et Pacifique
Iran	Afrique du Nord et Moyen Orient
Iraq	Afrique du Nord et Moyen Orient
Jamaïque	Amérique Latine et Caraïbe
Jordanie	Afrique du Nord et Moyen Orient
Kazakhstan	Europe et Asie Centrale
Liban	Afrique du Nord et Moyen Orient
Macédoine	Europe et Asie Centrale
Malaisie	Asie de l'Est et Pacifique
Maurice	Afrique Sub Saharienne
Namibie	Afrique Sub Saharienne
Palaos	Asie de l'Est et Pacifique
Panama	Amérique Latine et Caraïbe
Paraguay	Amérique Latine et Caraïbe
Pérou	Amérique Latine et Caraïbe
République dominicaine	Amérique Latine et Caraïbe
Roumanie	Europe et Asie Centrale
Sainte-Lucie	Amérique Latine et Caraïbe
Saint-Vincent-et-les Grenadines	Amérique Latine et Caraïbe
Suriname	Amérique Latine et Caraïbe
Thaïlande	Asie de l'Est et Pacifique
Turkménistan	Europe et Asie Centrale
Venezuela	Amérique Latine et Caraïbe

Annexe B :

Tableau B1 Liste des pays de l'échantillon

<i>Afrique du Nord Moyen Orient</i>	<i>Asie du Sud</i>
Algérie	Bengladesh
Egypte	Inde
Iran	Népal
Jordanie	Pakistan
Maroc	Sri Lanka
Tunisie	
<i>Afrique Sub-Saharienne</i>	<i>Asie de l'Est et Pacifique</i>
Afrique du Sud	Chine
Bénin	Indonésie
Botswana	Malaisie
Cameroun	Mongolie
République Démocratique du Congo	Philippines
République du Congo	Thaïlande
Côte d'Ivoire	Vietnam
Ghana	
Kenya	<i>Europe et Asie Centrale</i>
Mauritanie	Albanie
Mozambique	Arménie
Namibie	Azerbaïdjan
Nigéria	Biélorussie
Sénégal	Bulgarie
Soudan	Géorgie
Tanzanie	Kazakhstan
Togo	Kirghizistan
Zambie	Macédoine
Zimbabwe	Moldavie
	Roumanie
<i>Amérique Centrale et Latine</i>	Fédération de Russie
Bolivie	Tadjikistan
Brésil	Turquie
Colombie	Turkménistan
Costa Rica	Ukraine
Cuba	Ouzbékistan
République Dominicaine	
El Salvador	
Honduras	
Mexique	
Nicaragua	
Panama	
Paraguay	
Pérou	

Tableau B 2 : Equation de convergence : Estimateur Within

	Croissance des émissions de CO ₂			
	(1)	(2)	(3)	(4)
Log CO ₂	-0,206*** (-13,36)	-0,208*** (-13,49)	-0,204*** (-13,38)	-0,210*** (-13,74)
Croissance PIB (%)	0,584*** (6,25)	0,578*** (6,20)	0,580*** (6,34)	0,609*** (6,67)
Log PIB Initial	0,0730*** (3,86)	0,0721*** (3,82)	0,0742*** (3,92)	0,0891*** (4,50)
Log ConsoEner	0,182*** (6,09)	0,175*** (6,01)	0,177*** (6,08)	0,184*** (6,50)
Log ConsoEner*Charbon	-0,0197 (-1,06)			
Log ConsoEner*RenSBio	-0,0361** (-2,61)	-0,0343* (-2,49)	-0,0328* (-2,38)	-0,0310* (-2,28)
Log ConsoEner*RenABio	-0,0546*** (-4,80)	-0,0520*** (-4,68)	-0,0498*** (-4,49)	-0,0491*** (-4,61)
Log ConsoEner*Gaz	-0,0281* (-2,56)	-0,0269* (-2,46)	-0,0278* (-2,54)	-0,0228* (-2,03)
Croissance Forêt (%)	0,0872 (0,29)	0,0639 (0,21)	0,0235 (0,08)	
Log Forêt Initial				-0,0621+ (-1,73)
Part Industrie Initial (%)	0,0232 (0,46)	0,0195 (0,39)	0,0193 (0,38)	
Période 1 : 1992-1996	0,0251+ (1,81)	0,0228+ (1,67)		
Période 2 : 1997-2001	0,00448 (0,38)	0,00363 (0,31)		
Période 3 : 2002-2005	0,00631 (0,66)	0,00587 (0,62)		
Période 4 : 2006-2009	-0,00717 (-0,88)	-0,00742 (-0,91)		
Croissance Population	-0,00170 (-0,21)	-0,00141 (-0,18)	0,00251 (0,33)	
Trend temporel			-0,00571+ (-1,70)	-0,00866* (-2,42)
Constante	-1,635*** (-6,87)	-1,596*** (-6,79)	-1,616*** (-7,22)	-1,092** (-2,86)
N	335	335	335	335
R ² Ajusté	0,564	0,564	0,560	0,568
F_absorb	3,331	3,336	3,282	3,421

t statistics entre parenthèses + p<0.10 * p<0.05 ** p<0.01 *** p<0.001

Notes : ConsoEner est la consommation d'énergie primaire. Par la suite, nous avons croisé la consommation primaire d'énergie avec la part de différentes ressources : le charbon, les énergies renouvelables hors biomasse («RenSBio»), les énergies renouvelables avec biomasse (« RenABio ») et le gaz.

Annexe C : Description détaillée du modèle d'équilibre partiel des marchés mondiaux de l'énergie

Dans cette annexe, nous décrivons le modèle d'équilibre partiel. Nous veillons également à expliciter les différentes fonctions du modèle ainsi que les données employées pour la calibration du modèle. Chaque région du modèle est indicée par r , avec $r = \{\text{Amérique du Nord, Chine, RDM}\}$. La région de l'Amérique du Nord comprend les États-Unis, le Canada et le Mexique. Toutes les unités de production ou de consommation d'énergie sont exprimées en termes d'énergie délivrée, c'est-à-dire en termes de British Thermal Units (Btu). t est l'indice du temps, avec $t = \{0, 1, \dots, T\}$ où 0 est l'année de calibration du modèle soit 2011 et T est la dernière période soit 2030. Nous omettons cet indice s'il n'est pas nécessaire à la compréhension des équations. Nous décrivons les différents blocs du modèle en suivant le schéma descriptif (voir Figure 18). Nous décrivons le processus de production de l'énergie finale pour satisfaire la demande. Chaque secteur est indicé j avec $j = \{\text{Industrie, Transport, Résidentiel/commercial}\}$ à partir de trois types de ressources : les ressources fossiles, les énergies renouvelables et enfin l'énergie nucléaire. Les ressources fossiles sont indicées i avec $i = \{\text{charbon, pétrole, gaz conventionnel, gaz de schiste}\}$. Les énergies renouvelables sont indicées ren avec $ren = \{\text{biomasse, hydro, éolien-solaire}\}$. Enfin, l'énergie nucléaire, est indicée $nuke$ ³⁹.

C.1 Les ressources

Les ressources fossiles sont disponibles en quantité limitée dans le sol. Le coût d'extraction de chaque ressource fossile est supposé croissant et convexe (Chakravorty, Magné, & Moreaux, 2012). Il est de la forme :

$$(C1) \quad C_{i,r}^{\tilde{t}}(s_{i,r}^{\tilde{t}}) = \chi_1 + \chi_2 \left\{ \frac{\sum_{t=0}^{\tilde{t}} s_{i,r}^t}{\bar{S}} \right\}^{\chi_3}$$

Où χ_1 est le coût initial d'extraction de la ressource (ou coût d'extraction de la première unité de ressource) dans la région r ; $\chi_1 + \chi_2$ est le coût d'extraction de la dernière unité de ressource extraite dans la région r , $\sum_{t=0}^{\tilde{t}} s_{i,r}^t$ est le flux de ressource extraite de la date $t = 0$ à la date $t = \tilde{t}$, \bar{S} est le stock régional de ressource in situ au cours de l'année de base (2011)⁴⁰. Pour calibrer la

³⁹ Nous ne modélisons pas le processus d'extraction de l'uranium nécessaire à la production d'énergie nucléaire dans ce modèle.

⁴⁰ Nous supposons qu'il n'existe pas de nouvelles découvertes de ressource a) u cours de la période 2011-2030.

fonction de coût d'extraction de chaque ressource, nous utilisons les données de l'agence internationale de l'énergie (IEA, 2013). Le stock de ressource in situ pour l'année de base 2011 est extrait de (WEC, 2013).

Une contrainte spécifiant que la somme des flux de ressources extraites ne peut pas excéder le stock de ressource in situ est introduite. A chaque date t, elle est de la forme : $\sum_{t=0}^{\tilde{t}} s_{i,r}^t \leq \bar{S}$.

Seules les énergies fossiles sont échangées entre les différentes régions, les ressources renouvelables et le nucléaire sont produits et consommés nationalement. Les échanges commerciaux de chaque ressource sont définis comme les demandes nettes. La condition d'équilibre sur le marché mondial de chaque ressource est donnée par l'équation suivante :

$$(C2) \quad \sum_r (\sum_j q_{i,j,r} + q_{i,e,r} - s_{i,r}) = 0$$

où $s_{i,r}$ est la quantité de ressource i extraite dans la région r, $\sum_j q_{i,j,r}$ est la quantité de ressource i demandée par le secteur j, enfin, $q_{i,e,r}$ est la quantité de ressource i utilisée pour la production d'électricité dans la région r. Des coûts de transport pour le commerce sont introduits pour chaque ressource. Ils correspondent aux différences du prix régional de chaque ressource.

C.2 Production primaire d'énergie

Les ressources peuvent être soit transformées en électricité soit être destinées à produire directement de l'énergie aux trois secteurs.

Production d'électricité Parmi les ressources fossiles, le charbon, le gaz naturel et le gaz de schiste peuvent être utilisés dans les centrales électriques. Toutes les ressources renouvelables peuvent être utilisées pour la production électrique ainsi que le nucléaire. Afin de prendre en compte l'imparfaite substituabilité des ressources, la production d'électricité est déterminée par une fonction de production de type CES donnée par l'équation suivante :

$$(C3) \quad E_r = (1 - Eloss_{e,r}) \lambda_{e,r} \left(\sum_i \theta_{i,e,r} q_{i,e,r}^{\frac{\rho_e-1}{\rho_e}} + \sum_{ren} \theta_{ren,e,r} q_{ren,e,r}^{\frac{\rho_e-1}{\rho_e}} + \theta_{nuke,e,r} q_{nuke,e,r}^{\frac{\rho_e-1}{\rho_e}} \right)^{\frac{\rho_e}{\rho_e-1}}$$

où E_r représente la production régionale d'électricité, $\theta_{i,e,r}$, $\theta_{ren,e,r}$ et $\theta_{nuke,e,r}$ représentent respectivement la part de la ressource fossile i, de la ressource renouvelable ren et de celle du nucléaire dans la production d'électricité⁴¹, $q_{i,e,r}$ est la quantité de ressource i utilisée dans la

⁴¹ Les parts de chaque ressource dans la production d'électricité sont calculées en suivant la méthodologie proposée par Rutherford [2002]. La part de chaque ressource est calculée comme le rapport entre le coût de cette ressource au cours de l'année de base et le coût total de production au cours de l'année de base (ou somme des coûts de

production d'électricité, $q_{ren,e,r}$ est la quantité d'énergie renouvelable ren utilisée dans la production électrique, $q_{nuke,e,r}$ est la quantité d'énergie nucléaire utilisée dans la production électrique⁴²; enfin, ρ_e est l'élasticité de substitution entre les différentes ressources. Elle est égale à 2 (Chakravorty, Magné, & Moreaux, 2012). $Eloss_{e,r}$ est la fraction d'électricité perdue au cours de la transmission. Elle est calculée comme le rapport de la production d'électricité nette (ou électricité distribuée aux consommateurs) et la production brute d'électricité (ou électricité produite par la centrale électrique).

Les coûts de production de l'électricité sont extraits de IEA (2010). Le coût de production inclut le coût de l'investissement (ou coût de construction de la centrale électrique), les coûts d'opération et ceux de maintenance. En revanche, pour les ressources fossiles, il n'inclut pas le prix d'achat de la ressource étant donné que ce dernier est endogène⁴³. Le taux de progrès technique sur les coûts de production de l'électricité est spécifique à chaque ressource, il est identique à celui défini par l'agence internationale de l'énergie (IEA, 2010).

Production d'énergie à partir d'usage direct d'énergie. Les ressources après transformation peuvent être utilisées en usage direct pour satisfaire la demande d'énergie finale. Par exemple, le pétrole peut être raffiné sous forme de diesel ou sous forme de fioul.

Afin de tenir compte de l'imparfaite substituabilité des différentes ressources énergétiques pour la production directe d'énergie, nous supposons que la production d'énergie directe est donnée par la fonction de production de type CES suivante :

$$(C4) \quad Q_{ne,j,r} = \lambda_{ne,j,r} \left(\sum_i \theta_{i,e,r} q_{i,j,r}^{\frac{\rho_{ne}-1}{\rho_{ne}}} + \sum_{ren} \theta_{ren,e,r} q_{ren,j,r}^{\frac{\rho_{ne}-1}{\rho_{ne}}} \right)^{\frac{\rho_{ne}}{\rho_{ne}-1}}$$

où $Q_{ne,j,r}$ est la production d'énergie à partir d'usage direct exprimée en QBtu⁴⁴, $q_{i,j,r}$ est la quantité de ressource i utilisée dans la production exprimée en QBtu, $q_{ren,j,r}$ est la quantité utilisée de ressources renouvelables exprimée en QBtu, $\theta_{i,e,r}$ est la part de la ressource i dans la production directe d'énergie et $\theta_{ren,j,r}$ est la part de la ressource renouvelable ren dans la production directe d'énergie. ρ_{ne} est l'élasticité de substitution, elle est identique pour les

chaque ressource). La méthodologie de calcul des parts de facteur est identique pour toutes les fonctions de production type CES.

⁴² Le pétrole n'est pas une ressource fossile utilisée dans la production d'électricité (voir Figure 18).

⁴³ L'agence internationale de l'énergie ventile le coût total de production d'un Mégawattheure pour chaque ressource en trois composantes : le coût d'investissement, les coûts d'opération et de maintenance, le coût d'achat de la ressource. Le coût d'investissement est un coût fixe calculé pour chaque Mégawattheure produit en tenant compte de la durée de vie de la centrale avec un taux d'escompte de 5%.

⁴⁴ L'indice ne est utilisé pour dire usage non électrique des ressources ou usage direct des ressources.

différents secteurs et égale à 2 (Chakravorty, Magné, & Moreaux, 2012). $\lambda_{ne,j,r}$ est une constante de calibration.

Production d'énergie finale. La production d'énergie finale est une combinaison linéaire de la production d'électricité et de l'usage direct des ressources. La fonction de production de demande finale est donnée par l'équation :

$$(C 5) \quad Q_{j,r} = \lambda_{j,r} \left(\theta_{j,r} Q_{ne,j,r}^{\frac{\rho_j-1}{\rho_j}} + (1 - \theta_{j,r}) Q_{e,j,r}^{\frac{\rho_j-1}{\rho_j}} \right)^{\frac{\rho_j}{\rho_j-1}}$$

où $Q_{j,r}$ est la production d'énergie finale dans le secteur j dans la région r ,

$Q_{ne,j,r}$ est la quantité d'énergie produite à partir d'usage direct de ressource utilisée dans le secteur j , $Q_{e,j,r}$ est la quantité d'énergie produite à partir d'électricité utilisée dans le secteur j à partir d'électricité, ρ_j est l'élasticité de substitution, elle est égale à 2. L'équation (C 5) définit la production globale d'électricité. Pour respecter l'équilibre sur le marché de l'électricité, la condition suivante doit être respectée : $E_r = \sum_j Q_{e,j,r}$.

C.3 Consommation finale d'énergie

La consommation finale d'énergie de chaque secteur j est déterminée par l'équation suivante :

$$(C 6) \quad D_{j,r} = A_{j,r} P_{j,r}^{\alpha_{j,r}} Y_r^{\beta_{j,r}}$$

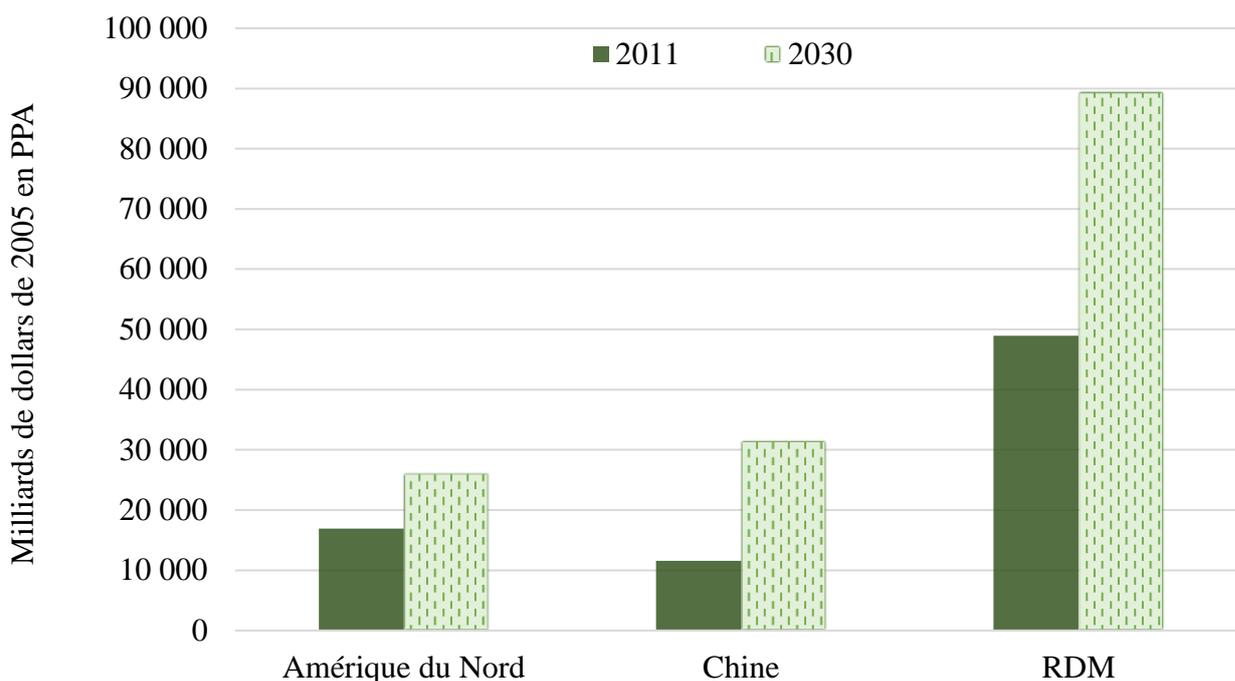
où $D_{j,r}$ est la demande d'énergie par le secteur j dans la région r exprimée en énergie délivrée (QBtu), $P_{j,r}$ est le prix défini en US dollars par QBtu, $\alpha_{j,r}$ est l'élasticité-prix de l'énergie dans le secteur j dans la région r , $\beta_{j,r}$ est l'élasticité revenu de l'énergie dans le secteur j dans la région r , Y_r est le PIB exprimé en dollars constants de 2005 et parité des pouvoirs d'achat, les prévisions sur le niveau de PIB sont celles de l'agence américaine d'information sur l'énergie (EIA, 2017a), le PIB prévu en 2011 et 2030 est représenté par la Figure C Pour une version très détaillée de l'ensemble des données utilisées et un descriptif minutieux des méthodes de calibration, le lecteur est invité à lire (Chakravorty, Fischer et Hubert [2016]).¹ Enfin, $A_{j,r}$ est une constante de calibration (2011). Les données nécessaires à la calibration de cette fonction sont reportées dans le Tableau C 1.

Tableau C 1 : Calibration des fonctions de demande finale d'énergie, année 2011

	Industrie	Transport	Commercial/Résidentiel
Amérique du Nord			
Demande (QBtu)	8,75	26,40	11,40
Prix (US \$ par MBtu)	12	26	24
Elasticité-prix	-0,30	-0,50	-0,26
Elasticité-revenu	0,50	1,00	0,60
Chine			
Demande (QBtu)	23,75	9,40	14,50
Prix (US \$ par MMBtu)	11	40	14
Elasticité-prix	-0,40	-0,49	-0,50
Elasticité-revenu	0,70	1,05	0,80
RDM			
Demande (QBtu)	34,40	55,50	49,50
Prix (US \$ par MMBtu)	7,50	19	16
Elasticité-prix	-0,40	-0,60	-0,50
Elasticité-revenu	0,60	0,70	0,50

Notes : MMBtu : Million de British Thermal Units. QBtu : Quadrillion de British Thermal Units. Par souci de simplicité, le prix de l'énergie finale dans chaque secteur est reporté en MMBtu même si le modèle est calibré en QBtu. Sources: Les demandes d'énergie finale pour chaque secteur sont extraites du bilan énergétique des pays de l'OCDE pour l'Amérique du Nord (IEA, 2016b) et du bilan énergétique des pays non membres de l'OCDE et pour la Chine (IEA, 2016a); Pour calculer la demande finale d'énergie du RDM, nous effectuons la différence entre la demande finale d'énergie mondiale et celle de l'Amérique du Nord et de la Chine ; Le prix de l'énergie finale pour chaque secteur est disponible pour l'Amérique à partir de la base de données sur les prix de l'énergie de l'AIE (IEA, 2014) et pour la Chine (LBNL, 2014); Les prix de l'énergie finale dans le RDM sont extraits de (Chakravorty, Magné, & Moreaux, 2012); L'élasticité-prix dans le secteur industriel pour l'Amérique du Nord : (EIA, 2014); L'élasticité-prix dans le secteur des transports en Amérique du Nord : (Hamilton, 2009) et (Chen, Huang, Khanna, & Önal, 2014); L'élasticité-prix dans le secteur résidentiel en Amérique du Nord : (Berntein & James, 2005); L'élasticité-prix et de revenu dans le secteur des transport en Chine : (Lin & Zeng, 2013); L'élasticité-prix dans le secteur commercial et résidentiel en Chine : (Phounin & Shigeru, 2014); Les élasticités-prix et de revenu dans tous les secteurs pour le RDM : (Chakravorty, Magné, & Moreaux, 2012).

Figure C 1 : PIB régional en 2011 et 2030



Source : (EIA, 2017a); Note : Le PIB est exprimé en Parité des Pouvoirs d'Achat (PPA) soit en Milliards de Dollars US constant de 2005.

C.4 Fonction de surplus

La fonction de surplus social est déterminée par l'équation suivante :

$$(C 7) \quad \sum_r \left[\sum_j \left(\int_0^{D_{j,r}} P_{j,r}(D_{j,r}) dD_{j,r} - \sum_i c_{i,j,r} q_{i,j,r} - \sum_{ren} c_{ren,j,r} q_{ren,j,r} \right) - \sum_i c_{i,e,r} q_{i,e,r} - \sum_{ren} c_{ren,e,r} q_{ren,e,r} - c_{nuke,e,r} q_{nuke,e,r} - C_{i,r}(S_{i,r}) \right]$$

où $\sum_j \int_0^{D_{j,r}} P_{j,r}(D_{j,r}) dD_{j,r}$ est le surplus brut des consommateurs, $c_{i,j,r}$ est le coût de production d'une unité d'énergie en usage direct de la ressource i pour le secteur j , $c_{ren,j,r}$ est le coût de production en usage directe de la ressource ren pour le secteur j , $c_{i,e,r}$ est le coût de production d'une unité d'énergie électrique par la ressource i , $c_{ren,e,r}$ est le coût de production d'une unité d'énergie électrique par la ressource ren , $c_{nuke,e,r}$ est le coût de production d'une unité d'énergie électrique à partir de l'énergie nucléaire.

C5 Programmation d'optimisation

L'équilibre du modèle à chaque période est la solution du problème ci-dessous :

$$\text{Max} \int_0^T \sum_r \left[\sum_j \left(\int_0^{D_{j,r}} P_{j,r}(D_{j,r}) dD_{j,r} - \sum_i c_{i,j,r} q_{i,j,r} - \sum_{ren} c_{ren,j,r} q_{ren,j,r} \right) - \sum_i c_{i,e,r} q_{i,e,r} - \sum_{ren} c_{ren,e,r} q_{ren,e,r} - c_{nuke,e,r} q_{nuke,e,r} - C_{i,r}(s_{i,r}) \right] dt$$

SC :

$$(C 8) \quad D_{j,r} = Q_{j,r}$$

$$(C 9) \quad Q_{j,r} = \lambda_{j,r} \left(\theta_{j,r} Q_{ne,j,r}^{\frac{\rho_j-1}{\rho_j}} + (1 - \theta_{j,r}) Q_{e,j,r}^{\frac{\rho_j-1}{\rho_j}} \right)^{\frac{\rho_j}{\rho_j-1}}$$

$$(C 10) \quad E_r = \sum_j Q_{e,j,r}$$

$$(C 11) \quad E_r = (1 - E_{loss,e,r}) \lambda_{e,r} \left(\sum_i \theta_{i,e,r} q_{i,e,r}^{\frac{\rho_e-1}{\rho_e}} + \sum_{ren} \theta_{ren,e,r} q_{ren,e,r}^{\frac{\rho_e-1}{\rho_e}} + \theta_{nuke,e,r} q_{nuke,e,r}^{\frac{\rho_e-1}{\rho_e}} \right)^{\frac{\rho_e}{\rho_e-1}}$$

$$(C 12) \quad Q_{ne,j,r} = \lambda_{ne,j,r} \left(\sum_i \theta_{i,e,r} q_{i,j,r}^{\frac{\rho_{ne}-1}{\rho_{ne}}} + \sum_{ren} \theta_{ren,e,r} q_{ren,j,r}^{\frac{\rho_{ne}-1}{\rho_{ne}}} \right)^{\frac{\rho_{ne}}{\rho_{ne}-1}}$$

$$(C 13) \quad \sum_r (\sum_j q_{i,j,r} + q_{i,e,r} - s_{i,r}) = 0$$

Où 0 correspond à l'année de base ou année de calibration soit 2011 dans notre modèle et T est la dernière période soit 2030 de notre modèle. Les variables de contrôle sont $D_{j,r}$; $q_{i,j,r}$; $q_{ren,j,r}$; $q_{i,e,r}$; $q_{ren,e,r}$; $q_{nuke,e,r}$. L'équation B8 spécifie que la demande finale d'énergie dans le secteur j doit être égale à l'offre finale d'énergie dans ce secteur. L'équation (C 9) est la fonction de production d'énergie finale. L'équation (C 10) décrit l'égalité entre la production globale d'électricité et la somme de l'électricité utilisée par chaque secteur dans chaque région. La production régionale d'électricité est déterminée par l'équation (C 11). La production d'énergie à partir d'usage direct de la ressource est déterminée par l'équation (C 12). L'équation (C 13) définit l'égalité sur le marché mondial de chaque ressource i .