



**HAL**  
open science

## **Evaluer Les Interactions entre Politique climatique et Sécurité énergétique en Europe (ELIPSE)**

Céline Guivarch, Stephanie Monjon, Julie Rozenberg, Adrien Vogt-Schilb

► **To cite this version:**

Céline Guivarch, Stephanie Monjon, Julie Rozenberg, Adrien Vogt-Schilb. Evaluer Les Interactions entre Politique climatique et Sécurité énergétique en Europe (ELIPSE). 2012. halshs-00800492

**HAL Id: halshs-00800492**

**<https://shs.hal.science/halshs-00800492>**

Submitted on 24 Apr 2013

**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.

# Evaluer Les Interactions entre Politique climatique et Sécurité énergétique en Europe (ELIPSE)\*

*Rapport final*  
*Décembre 2012*

**Céline Guivarch\*\* , Stéphanie Monjon\*\*\* ,  
Julie Rozenberg\*\* et Adrien Vogt-Schilb\*\***



20, rue Rosenwald  
75015 PARIS  
Tél. : 01 53 68 14 94  
Fax : 01 53 68 14 93  
E mail : smash@wanadoo.fr

\* : Ce projet a bénéficié d'un financement du Conseil Supérieur de la Formation et la Recherche Stratégiques.

\*\* : Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED).

\*\*\* : PSL\*, Université Paris Dauphine (LEDa-CGEMP), Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED) et Centre d'Etudes Prospectives et d'Informations Internationales (CEPII).



# Evaluer Les Interactions entre Politique climatique et Sécurité énergétique en Europe<sup>1</sup>

## Contenu

Résumé pour décideurs.....	4
Introduction.....	7
1. Les indicateurs de sécurité énergétique .....	8
2. Les scénarios.....	11
2.1. Le contexte international .....	11
2.2. Les hypothèses .....	14
3. Les résultats.....	17
3.1. Analyse générale des scénarios.....	17
3.2. Quelle évolution de la sécurité énergétique en Europe ?.....	27
3.2.1. L'importance de l'horizon de temps.....	31
3.2.2. Les déterminants de la sécurité de la sécurité.....	33
3.3. La diffusion des technologies sobres en carbone .....	39
3.3.1. Les énergies renouvelables .....	39
3.3.2. La technologie de capture et de stockage du carbone (CCS).....	43
3.3.3. Les véhicules électriques .....	43
Conclusion .....	44
Références.....	45
Annexe 1. Hypothèses sur les paramètres .....	46
Croissance du PIB .....	46
Efficacité énergétique induite .....	46
Comportements.....	47
Disponibilité des technologies sobres en carbone.....	47
Prix du charbon et disponibilité des technologies de liquéfaction du charbon.....	48
Rigidités sur le marché du travail .....	49
Annexe 2. Graphiques présentant les hypothèses sur les autres déterminants.....	50

---

<sup>1</sup> Nous remercions Pascal Copin et les membres du comité de suivi du projet pour leurs remarques qui ont permis d'améliorer le rapport.

# Résumé pour décideurs

Les politiques de sécurité énergétique et les politiques climatiques sont souvent considérées comme les deux faces d'une même pièce, leurs objectifs étant identiques, ou tout au moins complémentaires. Pourtant, si ces politiques partagent indéniablement une cause commune, la demande croissante d'énergie de l'humanité, les solutions pour améliorer la sécurité énergétique et réduire les émissions de gaz à effet de serre ne sont pas nécessairement les mêmes et peuvent même s'avérer contradictoires.

L'objectif du projet ELIPSE est de mieux comprendre les conséquences de politiques climatiques mondiales ambitieuses sur la sécurité énergétique de l'Europe. Dans cet objectif, nous définissons un jeu d'indicateurs permettant d'apprécier la nature polysémique du concept de sécurité énergétique et pouvant être renseignés par le modèle énergie-économie-environnement du CIREN, IMACLIM-R. Nous caractérisons le concept de sécurité énergétique selon quatre dimensions :

1. Disponibilité et diversification : Cette dimension rend compte à la fois des ressources existantes d'un combustible et de la diversification des producteurs de ce combustible. Les indicateurs retenus pour caractériser cette dimension sont : l'indicateur production de pétrole sur ressources et l'indice de concentration des importations de pétrole.
2. Dépendance et efficacité énergétiques : Cette dimension rend compte de l'efficacité avec laquelle l'énergie est consommée et la nature des combustibles utilisés dans une économie. Les indicateurs retenus pour caractériser cette dimension sont : l'intensité énergétique du produit intérieur brut et le taux de dépendance énergétique.
3. Coût de l'énergie pour la société : Deux indicateurs agrégeant l'information sur l'évolution du prix des énergies et l'évolution de la consommation ont été retenus pour caractériser cette dimension : le ratio entre les importations d'énergie (en valeur) et le PIB et la part du budget des ménages consacrée à l'achat d'énergie.
4. Acceptabilité : Cette dimension rend compte des problèmes d'acceptabilité sociale que pourraient poser certaines politiques ou le recours à certaines technologies. Nous avons retenu deux indicateurs qui renvoient à des choix technologiques qui pourraient être contestés et qui pourraient s'avérer difficiles à mettre en œuvre : les capacités nucléaires installées en Europe et les capacités éoliennes installées en Europe.

Nous analysons la façon dont ces indicateurs évoluent pour l'Europe une fois qu'une politique climatique mondiale ambitieuse est mise en œuvre, en tenant compte de l'incertitude sur les déterminants des évolutions des systèmes énergétiques futurs. Ces déterminants sont à la fois nombreux et variés : évolution future de la population et de la croissance économique, coûts et potentiel des technologies sobres en carbone (véhicules électriques, énergies renouvelables,...), prix futur du charbon, comportements de

consommation d'énergie, vitesse d'amélioration de l'efficacité énergétique,... L'évolution de ces déterminants peut faciliter, ou au contraire rendre plus difficile le respect de la contrainte imposée sur les émissions mondiales, et avoir des implications complexes sur la sécurité énergétique d'une région.

En se concentrant sur l'Europe, les résultats mettent en évidence deux principaux messages. En premier lieu, il apparaît que la mise en œuvre d'une politique climatique peut dégrader certains indicateurs et en améliorer d'autres. C'est vrai à tous les horizons de temps, mais pas pour les mêmes indicateurs. Cela illustre parfaitement la nature multidimensionnelle de la sécurité énergétique et la difficulté d'avoir une conclusion tranchée sur son évolution. Par exemple, à court terme (2023-2027), le ratio production sur ressources est amélioré par la mise en œuvre de politiques climatiques, alors que la part du budget que les ménages consacrent à l'énergie augmente en raison des prix élevés de l'énergie.

En second lieu, les effets de la politique climatique sur les indicateurs de sécurité énergétique diffèrent fortement en fonction de la période considérée. Par exemple, la diversité des importations de pétrole et le taux de dépendance énergétique sont dégradés par la politique climatique dans tous les cas sur les courts (2023-2027) et moyens (2048-2052) termes, mais s'améliorent, en moyenne, sur le long terme (2073-2077).

La comparaison des scénarios selon les différentes hypothèses faites sur les déterminants des systèmes énergétiques permet également de tirer plusieurs conclusions importantes. Tout d'abord, des hypothèses alternatives sur un ensemble de paramètres n'ont pas forcément un effet similaire sur tous les indicateurs de sécurité énergétique à *un horizon donné*. Par exemple, l'abondance de charbon et l'accès à la technologie pour le liquéfier imposent aux politiques climatiques d'améliorer davantage l'intensité énergétique du PIB. Mais, en limitant l'utilisation de charbon, y compris produit en Europe, les politiques climatiques augmentent la facture des importations d'énergie.

Ensuite, des hypothèses alternatives sur un ensemble de paramètres n'ont pas forcément un effet similaire sur les indicateurs de sécurité énergétique à *travers le temps*. Par exemple, l'hypothèse sur la disponibilité des technologies sobres en carbone a des effets contradictoires sur le ratio entre la production et les ressources de pétrole entre le court terme et les moyens et long termes.

Enfin, les scénarios dans lesquels l'amélioration de l'efficacité énergétique se fait rapidement se caractérisent par une dégradation, en moyenne, de plusieurs indicateurs, comparativement aux cas où l'efficacité énergétique progresse moins rapidement. C'est le cas notamment pour le ratio entre la production et les ressources de pétrole, le taux de dépendance énergétique, ainsi que la facture des importations d'énergie à moyen et long termes.

Au final, les résultats montrent clairement que les politiques climatiques peuvent aggraver certains indicateurs de la sécurité énergétique. Il est néanmoins possible d'identifier les contradictions entre l'objectif des politiques climatiques et celui des politiques de sécurité énergétique, et indiquer quand des politiques

complémentaires peuvent être nécessaires pour concilier les deux objectifs. En particulier, nos résultats mettent en évidence le risque de détérioration de la dimension « coût de l'énergie pour la société » de la sécurité énergétique sur le court terme. Des mesures ciblées pour les ménages modestes, devraient alors être envisagées.

# Introduction

Les problèmes de sécurité énergétique ont été l'une des principales motivations pour mettre une convention climatique sur l'agenda international, lors de la réunion du G7 qui s'est tenue en 1990 à Houston sur l'invitation de George H. Bush en 1990 (Kirton, 2007). A cette époque, il y avait l'espoir que le changement climatique pourrait être utilisé pour convaincre le public américain d'accepter la discipline nécessaire pour réduire la dépendance au pétrole (Schlesinger, 1989). Comme un tour de l'histoire, la sécurité énergétique a connu récemment un regain d'intérêt du fait des prix élevés du pétrole, mais aussi des difficultés à établir une architecture climatique internationale. L'espoir est maintenant qu'un certain soutien aux politiques climatiques puisse être obtenu en invoquant leurs bénéfices en termes de sécurité énergétique.

Les politiques de sécurité énergétique et les politiques climatiques sont en effet souvent considérées comme les deux faces d'une même pièce, leurs objectifs étant identiques, ou tout au moins complémentaires (Hartley et Medlock, 2008).<sup>2</sup>En traitant conjointement les politiques climatiques et les politiques de sécurité énergétique, l'UE est particulièrement impliquée dans une telle approche politique : à la fois le « paquet énergie-climat » et la « feuille de route Energie 2050 » adoptent des objectifs de réductions des émissions de gaz à effet de serre (GES), tout en cherchant à sécuriser l'approvisionnement énergétique de l'UE.

Mais les politiques climatiques et les politiques de sécurité énergétique sont-elles vraiment les deux faces d'une même pièce? Elles partagent indéniablement une cause commune, la demande croissante d'énergie de l'humanité, mais les solutions pour améliorer la sécurité énergétique et réduire les émissions de gaz à effet de serre ne sont pas nécessairement les mêmes. Il peut exister des synergies, mais aussi des contradictions. Par exemple, les technologies d'efficacité énergétique et renouvelables ont été reconnues comme des options visant à promouvoir les deux objectifs simultanément (European Commission, 2001). Au contraire, la limitation de l'utilisation du charbon pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> pourrait avoir des impacts négatifs sur la sécurité énergétique de nombreux pays qui ont d'abondantes ressources de charbon. De la même façon, les politiques climatiques imposent d'éviter le recours aux pétroles non-conventionnels, ce qui augmentera la dépendance mondiale au pétrole du Moyen-Orient (Hartley, 2008). Par conséquent, il n'est pas évident de savoir si les politiques climatiques conduiront à améliorer la sécurité énergétique ou non, et cette question mérite un examen attentif.

L'objectif du projet ELIPSE est de mieux comprendre les conséquences de politiques climatiques mondiales ambitieuses sur la sécurité énergétique de l'Europe. Dans cet objectif, nous définissons un jeu d'indicateurs permettant d'apprécier la nature polysémique du concept de sécurité énergétique et pouvant être renseignés par le modèle énergie-économie-environnement du CIREN, IMACLIM-R. Nous cherchons par

---

<sup>2</sup> Tony Blair a déclaré dans un discours aux Etats Unis le 20 octobre 2006: "Nous devons traiter la sécurité énergétique et la sécurité climatique comme les deux faces de la même pièce. (*"we must treat energy security and climate security as two sides of the same coin"*).

ailleurs à comprendre quel est le rôle joué par différents paramètres du modèle, comme par exemple la disponibilité plus ou moins forte de technologies sobres en carbone, ou la plus ou moins grande abondance du charbon, sur les différents indicateurs retenus.

Dans la première partie du rapport, nous sélectionnons les indicateurs de sécurité énergétique sur lesquels nous nous concentrons. Cette section s'appuie sur la littérature discutant le concept de sécurité énergétique, afin d'identifier les différentes dimensions impliquées dans ce concept polysémique et les indicateurs pertinents pour en rendre compte.

Dans la deuxième partie du rapport, nous cherchons à représenter les incertitudes portant sur les déterminants des systèmes énergétiques futurs. Ces déterminants sont à la fois nombreux et variés : évolution future de la population et de la croissance économique, coûts et potentiel des technologies (véhicules électriques, énergies renouvelables, carburants de synthèse, ...), comportements de consommation d'énergie, vitesse d'amélioration de l'efficacité énergétique,... Nous rappelons rapidement le contexte dans lequel s'inscrit le travail en cours du CIRED sur la construction de nouveaux scénarios d'émissions et le rôle que joueront les scénarios « *Representative Concentration Pathways* » (RCP) dans le prochain rapport d'évaluation du GIEC. Ensuite, nous présentons les paramètres pour lesquels plusieurs hypothèses seront envisagées afin de tester la sensibilité des résultats. L'ensemble de ces jeux d'hypothèses (432 combinaisons) sont tout d'abord intégrés dans le modèle en supposant un monde sans politique climatique. Ces mêmes jeux d'hypothèses sont ensuite examinés en supposant que les émissions de CO<sub>2</sub>-énergie mondiales sont contraintes. Au total, nous construisons une base regroupant 864 scénarios.

Dans la troisième partie du rapport, l'ensemble des indicateurs retenus est utilisé pour analyser la base de données de scénarios, en se concentrant sur l'Europe. Nous montrons qu'il n'existe pas de cas d'amélioration de tous les indicateurs de sécurité énergétique, des arbitrages étant toujours nécessaires. Nous montrons également que l'effet de la politique climatique sur un indicateur de sécurité énergétique peut être très différent selon l'horizon de temps considéré. Enfin, nous examinons quels paramètres ont le plus d'importance pour expliquer l'amélioration ou la détérioration d'un indicateur.

## 1. Les indicateurs de sécurité énergétique

Dans le rapport précédent, nous avons identifié une liste d'indicateurs pouvant être renseignés par le modèle et permettant d'apprécier l'évolution de la sécurité énergétique d'une région. Rappelons que le projet ELIPSE se concentre sur l'insécurité énergétique de long terme, c'est-à-dire celle liée à l'épuisement progressif des combustibles fossiles et à la distribution inégale de ces ressources dans le monde. Cette notion recouvre plusieurs dimensions : la disponibilité physique, l'évolution des prix, la stabilité politique des pays producteurs de pétrole ou de gaz,... Au total, une trentaine d'indicateurs pouvait être utilisée pour évaluer l'évolution de la sécurité énergétique d'une région dans le modèle IMACLIM-R. Ce grand nombre

d'indicateurs rend difficile l'interprétation des résultats. Il a donc été nécessaire de réduire le nombre d'indicateurs présentés afin de faciliter la lecture des résultats. Il est en effet possible de regrouper les indicateurs selon la nature de l'information qu'ils donnent sur la sécurité énergétique.<sup>3</sup>C'est la démarche suivie également par Sovacoll et Brown (2010), Kruyt et al. (2009) et Chester (2010) qui caractérisent la sécurité énergétique en listant les dimensions du concept qu'il convient d'apprécier afin d'en avoir une compréhension exhaustive. Il est alors possible de limiter le nombre d'indicateurs utilisés pour apprécier chaque dimension.

Kruyt et al. (2009) distinguent les dimensions suivantes :

1. **Disponibilité (« availability »)** : Cette dimension englobe des éléments liés à l'existence géologique des ressources fossiles, mais aussi liés à la dépendance d'une économie ou d'un secteur à un type de combustible.
2. **Accessibilité (« accessibility »)** : Cette dimension renvoie aux éléments géopolitiques. La distribution inégale des ressources en pétrole et en gaz est en effet un facteur important pour apprécier la sécurité énergétique.
3. **Coûts de l'énergie pour la société (« affordability »)** : Cette dimension peut regrouper des éléments assez variés influençant à la fois les prix des énergies (concentrations sur les marchés, liquidité des marchés,...) et les quantités consommées.
4. **Acceptabilité (« acceptability »)** : Cette dimension recouvre des éléments sur les impacts environnementaux et l'acceptabilité sociale de l'extraction de l'énergie et des technologies de l'énergie.

Les auteurs classent ensuite les indicateurs usuellement utilisés dans la littérature pour évaluer la sécurité énergétique selon les dimensions identifiées. Un indicateur peut être pertinent pour plusieurs dimensions et le choix des indicateurs pour apprécier une dimension dépend beaucoup du contexte, par exemple de la région étudiée, ou de l'horizon considéré, mais aussi de la capacité à le renseigner.

Chester (2010) discute également des différentes dimensions à retenir pour pouvoir évaluer la sécurité énergétique sans spécifier néanmoins les indicateurs correspondants à ces dimensions. Elle reprend les dimensions de **disponibilité** et de **coûts de l'énergie pour la société** et introduit la dimension de **soutenabilité** qui est proche de ce que Kruyt et al. (2009) appellent acceptabilité. Chester (2010) retient aussi **l'adéquation des capacités** de production et des infrastructures pour répondre à la demande comme dimension, qui renvoie à la dépendance d'une économie ou d'un secteur à un type de combustible, mais aussi à la disponibilité de certaines technologies ou au développement des réseaux de transports.

---

<sup>3</sup> Voir NEA (2010) qui utilise une approche différente, basée sur des indicateurs plus agrégés, pour analyser la contribution de l'énergie nucléaire à la sécurité énergétique. Bohringer et Keller (2011) utilisent une approche similaire à NEA (2010) pour évaluer l'impact de la politique climatique de l'UE sur sa sécurité énergétique.

Dans Sovacoll et Brown (2010), on retrouve les dimensions des **coûts de l'énergie pour la société** (« affordability ») et de **disponibilité** (« availability »), qui renvoie à la fois à l'indépendance énergétique, à la diversification des approvisionnements et à leur fiabilité. Ils introduisent aussi les dimensions de **gestion environnementale** (« environmental stewardship »), qui renvoie à la soutenabilité d'une politique et englobe des indicateurs rendant compte de l'évolution de certaines pollutions (émissions de dioxyde de soufre, émissions de dioxyde de carbone), et d'**efficacité énergétique et économique**.

Même si les classifications retenues dans ces papiers ne sont pas tout à fait les mêmes, les différences restent marginales. Dans le cadre de ce travail, nous avons retenu les dimensions suivantes :

1. **Disponibilité et diversification** : Cette dimension rend compte à la fois des ressources existantes d'un combustible et de la diversification des producteurs de ce combustible. Nous nous concentrons sur le pétrole avec l'indicateur production de pétrole sur ressources<sup>4</sup> et l'indice de concentration des importations de pétrole, mesurée par la somme des carrés des parts de marché des différents producteurs de pétrole (indice de Herfindahl-Hirschmann). Ces deux indicateurs ne sont pas spécifiques à l'Europe.
2. **Dépendance et efficacité énergétiques** : cette dimension intègre à la fois certaines composantes de la dimension « disponibilité » retenue dans Kruyt et al. (2009) et de la dimension « efficacité énergétique et économique » utilisée par Sovacoll et Brown (2010). L'objectif est de rendre compte de l'efficacité avec laquelle l'énergie est consommée et la nature des combustibles utilisés. De nombreux indicateurs pourraient être utilisés pour apprécier cette dimension. Nous avons opté pour des indicateurs permettant de rendre compte de la situation de l'Europe pour l'ensemble des énergies : l'intensité énergétique du produit intérieur brut (PIB) (offre totale d'énergie primaire (OTEP) sur PIB) et le taux de dépendance énergétique (Importations d'énergie (quantité) sur OTEP).
3. **Coût de l'énergie pour la société** : L'évolution des prix des énergies est un indicateur possible pour cette dimension. Néanmoins, cet indicateur ne tiendrait pas compte des quantités consommées des différents combustibles fossiles, qui devraient être fortement impactés par les politiques climatiques. Nous avons retenu deux indicateurs agrégeant l'information sur l'évolution du prix des énergies et l'évolution de la consommation : le ratio entre les importations d'énergie (en valeur) et le PIB et la part du budget des ménages consacrée à l'achat d'énergie.
4. **Acceptabilité** : Nous avons retenu deux indicateurs qui renvoient à des choix technologiques qui pourraient être contestés et qui pourraient s'avérer difficiles à mettre en œuvre : le nucléaire (capacités nucléaires installées en Europe) et l'éolien (capacités éoliennes installées en Europe). L'acceptabilité de la technologie nucléaire est une question depuis longtemps débattue. Ainsi, en 1987, au lendemain de la catastrophe de Tchernobyl, l'Italie avait décidé de sortir du nucléaire civil.

---

<sup>4</sup> Il n'y a pas d'exploration dans le modèle, de sorte que les réserves correspondent aux ressources.

Elle a confirmé cette décision après l'accident de Fukushima au Japon. En 2011, l'Allemagne a également décidé d'arrêter rapidement l'exploitation de centrales nucléaires. Le Japon pourrait prendre prochainement la même décision.

S'agissant de l'éolien, les problèmes d'acceptabilité de la technologie sont plus spécifiques à la France mais y ont constitué véritablement un frein important au développement de cette technologie (Nadaï, 2007).

Nous avons volontairement restreint le nombre d'indicateurs que nous allons restituer de façon à faciliter la lecture des résultats, tout en couvrant l'ensemble des dimensions du concept de sécurité énergétique.

## 2. Les scénarios

### 2.1. Le contexte international

Ce projet s'inscrit dans le cadre de l'exercice demandé par le GIEC à la communauté scientifique de réaliser de nouveaux scénarios d'émissions dits scénarios « *Representative Concentration Pathways* » (RCP). Ces scénarios devaient être au cœur de la cohérence entre les trois groupes de travail du prochain rapport d'évaluation du GIEC prévu pour 2014. L'objectif des scénarios RCP était que les différentes communautés scientifiques travaillent avec les mêmes hypothèses sur l'évolution temporelle du forçage radiatif<sup>5</sup> (par rapport à l'ère préindustrielle) jusqu'à l'horizon 2300 : les modèles climatiques (Groupe I) calculent les changements climatiques induits par ces trajectoires de forçage radiatif ; les modèles économiques (Groupe 3) reconstruisent des évolutions techniques et socio-économiques compatibles avec ces scénarios de forçage radiatif (et évaluent les coûts et implications macroéconomiques par rapport à un scénario de référence dans le cas de scénarios de stabilisation) ; le groupe II étudie la vulnérabilité, les impacts, l'adaptation et les dommages liés aux changements climatiques projetés par les modèles climatiques dans les « mondes » techniques et socio-économiques projetés par les modèles économiques.

Quatre scénarios RCP ont été sélectionnés : 2.6 W/m<sup>2</sup> (avec un forçage radiatif de 3 W/m<sup>2</sup> au milieu du 21<sup>e</sup> siècle qui diminue à 2.6 W/m<sup>2</sup> à la fin du siècle), 4.5 W/m<sup>2</sup>, 6 W/m<sup>2</sup> et 8.5 W/m<sup>2</sup>. Pour les modèles économiques, un travail devait développer des visions alternatives du monde futur appelées, « *Shared Socio-economic Pathways* » (SSP), sous-jacentes à ces évolutions du forçage radiatif. Elles devaient englober à la fois un jeu d'hypothèses sur des variables dites « de référence », par exemple l'évolution de la population, et

---

<sup>5</sup> Le terme "forçage radiatif" est employé par le GIEC avec le sens spécifique d'une perturbation du bilan radiatif du système climatique de la Terre. Le forçage radiatif est généralement quantifié comme « le taux de transfert d'énergie par unité surfacique du globe, mesuré dans les hautes couches de l'atmosphère », et il est exprimé en « watts par mètre carré » (W/m<sup>2</sup>). Le forçage radiatif mesure l'impact de certains facteurs affectant le climat sur l'équilibre énergétique du système couplé Terre/atmosphère. Le terme « radiatif » est utilisé du fait que ces facteurs modifient l'équilibre entre le rayonnement solaire entrant et les émissions de rayonnements infrarouges sortant de l'atmosphère. Cet équilibre radiatif contrôle la température à la surface de la planète. Le terme forçage est utilisé pour indiquer que l'équilibre radiatif de la Terre est en train d'être déstabilisé.

des éléments qualitatifs, permettant aux différentes équipes de modélisateurs de choisir des valeurs des paramètres de leur modèle cohérentes avec les SSP.

Pour le moment, l'« International Institute for Applied Systems Analysis » (IIASA) a développé un jeu d'hypothèses sur l'évolution de la population mondiale, l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE) un jeu d'hypothèses sur l'évolution des PIB nationaux jusqu'en 2100 et le « National Center for Atmospheric Research » (NCAR) un jeu d'hypothèses sur l'évolution du taux d'urbanisation par pays jusqu'en 2100<sup>6</sup>. Des éléments qualitatifs ont été également choisis dans les différents SSP :

- Le SSP1 (« soutenabilité ») correspond à un monde réalisant des progrès relativement importants vers la soutenabilité, avec des efforts continus pour le développement dans les pays du Sud tout en réduisant l'intensité d'utilisation des ressources et la dépendance aux combustibles fossiles. C'est un monde conscient de devoir protéger l'environnement avec un développement technologique rapide et une forte croissance économique, même dans les pays à bas revenus.
- Le SSP2 (« milieu de la route ») décrit un monde dans lequel les tendances récentes se poursuivent avec quelques progrès réalisés vers des objectifs de développement. La dépendance aux combustibles fossiles décroît doucement. Le développement des pays à bas revenus a lieu de façon très inégale.
- Le SSP3 (« fragmentation ») correspond à un monde qui se divise entre des régions caractérisées par une extrême pauvreté, quelques régions ayant une richesse modérée et un large nombre de pays se battant pour maintenir les conditions de vie de leur population qui croît rapidement.
- Le SSP4 (« Inégalité ») décrit un monde très inégalitaire dans lequel une petite élite mondiale est à l'origine de la majorité des émissions mondiales, alors qu'un large groupe, pauvre et vulnérable aux impacts du changement climatique, y contribue peu. Les efforts de mitigation sont faibles et l'adaptation est difficile du fait d'institutions inefficaces et un faible revenu de la population pauvre.
- Le SSP5 (« développement conventionnel ») représente un monde dans lequel le développement est orienté vers la croissance économique comme la solution aux problèmes sociaux et économiques. Un développement conventionnel rapide conduit à un système énergétique dominé par les combustibles fossiles, résultant en des émissions de GES élevées.

---

<sup>6</sup>Pour plus de détails, voir <https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>.

## Présentation du modèle IMACLIM-R

IMACLIM-R est un modèle d'équilibre général dynamique récursif mondial à 12 secteurs et 12 régions. Il fournit un cadre macroéconomique qui permet d'étudier les relations entre l'économie et le secteur énergétique. L'équilibre sur le marché des biens permet de représenter les interactions entre les secteurs et les régions dans le temps. Celles-ci simulent l'impact économique des changements qui interviennent dans le secteur énergétique aussi bien au niveau macroéconomique (modification du bien-être, gains ou pertes de compétitivité) qu'au niveau microéconomique (poids de l'énergie dans la structure de coûts de production ou dans la dépense des ménages).

La stratégie adoptée pour l'élaboration d'IMACLIM-R repose à la fois sur une architecture récursive et sur la représentation de certains mécanismes en cause dans les fluctuations de court terme : anticipations imparfaites, utilisation incomplète des facteurs de production, inerties à différents niveaux – équipements, techniques, préférences, flux commerciaux ou flux de capitaux. Pour ce faire, l'architecture du modèle est conçue sur deux principes :

- chaque équilibre statique représente un bilan économique annuel (production, consommation, échanges internationaux) à travers un équilibre walrasien de l'économie mondiale;
- entre deux équilibres statiques successifs, des modules dynamiques représentent l'évolution des techniques et des stocks de facteurs de production (capital, travail, ressources naturelles), alimentant ainsi une croissance progressive entre chaque équilibre statique.

Un point fondamental est que chaque équilibre statique ne décrit pas l'optimum collectif de production compte tenu des techniques disponibles. Au contraire l'équilibre est contraint à une situation sous-optimale par différents choix de représentation:

- Une inadéquation entre l'appareil productif et la demande finale peut provenir de l'inertie des équipements et d'allocations imparfaites des investissements entre secteurs, entraînant par exemple des surcapacités de production dans certains secteurs et des sous capacités dans d'autres et créant ainsi des tensions sur les prix et les quantités ; une réallocation immédiate du capital, si elle était possible, permettrait de se rapprocher de l'optimum collectif avec le même état des techniques ;
- Les rigidités du marché du travail et les écarts en quantité et en qualité entre offre et demande de main d'œuvre empêchent d'accéder au plein emploi;
- Les flux de capitaux n'obéissent pas à une règle d'égalisation universelle de la profitabilité marginale de l'investissement et ont un impact sur les termes de l'échange, la disponibilité de l'investissement, la demande finale de biens d'investissement;
- Les taxes préexistantes peuvent créer des distorsions limitant les niveaux de production et d'utilité finale, lorsqu'elles ne visent pas à corriger des externalités négatives ;
- Certaines équations de comportement ne sont pas des équations d'optimisation du profit ou de l'utilité, mais reposent sur des routines de comportement ou des fonctions de parts empiriques.

Dans IMACLIM-R, l'équilibre statique repose sur une représentation de l'économie à la fois en quantités physiques et en valeurs monétaires, les deux grandeurs étant reliées par le jeu des prix relatifs. Plus précisément, les quantités d'énergie sont toujours exprimées dans une unité commune (tonne équivalent pétrole). Les quantités des biens non énergétiques sont exprimées en quantités physiques réelles lorsque le niveau de désagrégation sectorielle le permet (passagers kilomètres, tonnes d'acier, etc.) ou en indice de volume lorsque le secteur considéré est trop large pour être assimilé à un bien cohérent unique (services, industrie manufacturière, etc.).

Des hypothèses détaillant les variables de politiques climatiques, par exemple les types d'instrument de politiques mis en œuvre (taxes, quotas, soutien à l'innovation...), la participation des différents pays aux politiques climatiques, devaient également être faites (dits « *Shared climate Policy Assumptions* » (SPA)), mais rien n'est encore disponible sur ce volet.

Dans le cadre du projet ELIPSE, nous avons repris les hypothèses définies par l'IIASA et utilisé les différents jeux d'hypothèses sur les PIB définis par l'OCDE pour caler les paramètres impactant le niveau de l'activité économique, qui est une variable endogène dans IMACLIM-R. Nous expliquerons ce point dans la suite en détail.

## 2.2. Les hypothèses

Analyser l'impact des politiques climatiques sur la sécurité énergétique nécessite de construire des scénarios de long terme pour l'économie mondiale. Les déterminants potentiels de cet impact sont nombreux et incertains. En effet, l'évolution de la population, des marchés énergétiques, des technologies sobres en carbone ou encore des préférences des consommateurs influence la sécurité énergétique future du monde. Afin de tenir compte de ces incertitudes, nous avons construit une base de scénarios combinant des hypothèses faites sur un nombre important de paramètres du modèle, suivant la méthode proposée par Rozenberg et al. (2012).

Ces différents jeux d'hypothèses sont tout d'abord intégrés dans le modèle en supposant un monde sans politique climatique, puis en supposant que les émissions de CO<sub>2</sub>-énergie mondiales sont contraintes. La trajectoire est choisie en cohérence avec un objectif de stabilisation de la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère de 450 ppm en 2100 : les émissions globales sont maximales en 2020 et diminuent ensuite respectivement de 25% en 2050 et de 75% en 2100 (par rapport à 2000). Comme hypothèse de travail, nous supposons un régime climatique international imposant une taxe carbone globale de façon à respecter la trajectoire d'émissions. Cette trajectoire se situe entre le RCP2.6 et le RCP4.5. La trajectoire d'émissions de CO<sub>2</sub> correspondant au RCP2.6 est extrêmement contraignante : les émissions mondiales nettes sont divisées par deux en 2050 et deviennent négatives entre 2070 et 2080 (ce qui n'est atteignable qu'avec une reforestation massive ou l'usage à large échelle de technologies telles que la biomasse-énergie avec capture et stockage du CO<sub>2</sub>). À l'inverse, la trajectoire d'émissions de CO<sub>2</sub> correspondant au RCP4.5 ne représente pas véritablement une politique climatique ambitieuse, puisque les émissions mondiales continuent de croître jusqu'en 2040, où elles atteignent 170% des émissions de 2000, et sont ramenées au niveau de 2000 entre 2070 et 2080. C'est pourquoi une trajectoire intermédiaire semblait plus intéressante. Cette trajectoire conduit approximativement, selon les incertitudes sur le cycle du carbone, à un forçage radiatif en 2100 de 3.7 W/m<sup>2</sup>. Cela correspond à une probabilité de 50% de rester en dessous d'une augmentation de la température moyenne globale de 3°C à la fin du siècle. Ce choix a été retenu par le CIRED pour l'ensemble

des exercices sur les nouveaux scénarios d'émissions auquel il participe (ELIPSE, Economic Modelling Forum, ...)

Ces jeux d'hypothèses permettent d'analyser le rôle des différents déterminants (comportementales, technologiques, développement,...), mais aussi d'enrichir la représentation des politiques climatiques qui se réduit souvent à un seul instrument dans les modèles utilisés pour de tels exercices : une taxe sur les émissions de CO<sub>2</sub>, qui peut également être interprété comme un marché de permis négociables. Or, la définition des différents jeux d'hypothèses revient à se prononcer sur un nombre d'éléments relevant de choix politiques, climatiques ou non. Par exemple, la disponibilité à une date plus ou moins proche de technologies sobres en carbone dépend des efforts de recherche et développement réalisés, et donc de choix qui vont être faits en matière de politique d'innovation. Cela permet de pouvoir évaluer l'importance de certains déterminants, que ce soit pour la politique climatique ou pour la sécurité énergétique.

Nous listons rapidement les différents jeux d'hypothèses avec lesquels nous avons travaillé. Une description plus précise, notamment des valeurs utilisées pour chaque paramètre, est faite en annexe.

- **Croissance du PIB:** Dans le modèle IMACLIM-R, la croissance du PIB est endogène et dépend notamment de la croissance de la population et de la croissance de la productivité du travail (Solow, 1956). En cohérence avec les hypothèses faites par l'OCDE pour les scénarios SSP, nous travaillons avec un jeu d'hypothèses sur les paramètres suivants :

- la croissance de la population dans les pays à hauts revenus d'une part, et à bas revenus d'autre part<sup>7</sup> ;
- la croissance de la productivité du travail du pays meneur, i.e. les Etats Unis ;
- la vitesse de rattrapage des pays à bas revenus<sup>8</sup>.

La combinaison de ces hypothèses conduit à 9 scénarios possibles.

- **Efficacité énergétique induite** (hors secteurs des transports et de la production d'énergie) : Dans le modèle IMACLIM-R, l'efficacité énergétique est déterminée par les prix de l'énergie. Dans chaque secteur, le pays avec l'intensité énergétique la plus faible est le meneur et l'évolution de son efficacité énergétique est déterminée par les niveaux de prix de l'énergie. Les autres pays rattrapent le leader après un délai. Nous envisageons 3 jeux d'hypothèses possibles portant sur le taux de croissance annuel maximal de l'intensité énergétique dans le pays meneur, la vitesse de rattrapage des pays à bas revenus et le niveau asymptotique de rattrapage.
- **Comportement** : Aussi importante soit-elle, l'efficacité énergétique n'est pas le seul déterminant de la demande énergétique. IMACLIM-R modélise l'impact sur la demande en énergie de l'efficacité

---

<sup>7</sup> La croissance de la population des pays émergents ne fait pas l'objet de variantes dans les scénarios explorés.

<sup>8</sup> Plus la productivité du travail d'un pays est faible par rapport à celle des Etats-Unis, plus elle converge rapidement vers celle des Etats-Unis.

énergétique résultant du progrès technique, mais aussi des changements de leurs habitudes de consommation, dans les technologies qu'ils utilisent et de leurs choix de localisation. Cela permet de tenir compte d'autres déterminants de la demande d'énergie, tels que le prix de la terre et de l'immobilier, ou encore de choix politiques en termes d'infrastructures urbaines. Ces représentations interviennent pour les usages stationnaires (industrie, services et bâtiments) et non-stationnaires (transport des marchandises et des passagers).

Nous travaillons avec deux jeux d'hypothèses sur de nombreux paramètres du modèle en lien avec les comportements de consommation d'énergie des agents :

- les modes de développement : nous introduisons deux hypothèses sur l'évolution des préférences des ménages en termes de logement et de transport (évolution du nombre de voitures par tête, surface par tête dans les pays en développement) et sur les niveaux de saturation de consommation des biens industriels par les ménages.
  - les choix de production : nous envisageons deux hypothèses sur l'évolution du contenu en fret de la croissance économique par l'intermédiaire des coefficients des matrices d'input-output représentant le contenu en transport d'une unité de bien produit.
- **Disponibilité des technologies sobres en carbone** : Nous construisons deux jeux d'hypothèses pour les paramètres décrivant la pénétration de la technologie nucléaire nouvelle génération, des énergies renouvelables, de la technologie de capture et de stockage du carbone (CSC) et des véhicules électriques. Ces paramètres incluent le taux de diffusion et les parts de marché maximales sur la période de la simulation.

Selon l'hypothèse retenue, les technologies sobres en carbone sont disponibles à une date plus ou moins avancée, et pourront représenter, plus ou moins rapidement, une part, plus ou moins importante du marché. Par exemple, sous l'hypothèse de forte disponibilité des technologies sobres en carbone, la technologie CSC est utilisable industriellement à partir 2010 et peut constituer, après 29 ans, au maximum 80% du marché des unités de production d'électricité à partir de combustibles fossiles, alors que, sous l'hypothèse de faible disponibilité, la technologie n'est disponible qu'à partir de 2014, et ne peut constituer, après 33 ans, que 30% de ce même marché.<sup>9</sup>

A noter que, sous l'hypothèse de faible disponibilité des technologies sobres en carbone, il est supposé qu'aucune nouvelle centrale nucléaire n'est installée.

- **Prix du charbon et disponibilité des technologies de liquéfaction du charbon** : Pour les combustibles fossiles, l'incertitude porte surtout sur la disponibilité de substituts au pétrole. Nous construisons deux alternatives combinant des hypothèses sur les élasticités prix du charbon et sur la disponibilité des carburants liquides.

---

<sup>9</sup> Voir l'annexe 1 pour plus de détails.

- **Rigidités sur le marché du travail** : Dans IMACLIM-R, nous représentons les imperfections du marché du travail par l'intermédiaire d'une courbe de salaire liant les niveaux de salaire réel au taux de chômage. Pour les pays en développement, nous faisons deux hypothèses sur l'élasticité de cette courbe de salaire pour tenir compte d'évolutions différentes possibles des rigidités sur leur marché du travail.

La combinaison de ces hypothèses aboutit à  $9 \times 2 \times 3 \times 2 \times 2 = 432$  scénarios.

### La modélisation des chocs

Les hypothèses qui sont envisagées dans le rapport restent dans un intervalle de valeurs « à dire d'experts », plus ou moins favorables, mais n'intègrent pas la possibilité de chocs brutaux, comme par exemple une guerre au Moyen-Orient ou un accident nucléaire majeure en Europe, qui auraient des conséquences radicales sur les indicateurs de sécurité énergétique étudiés.

L'analyse de tels chocs est pertinente et importante pour préparer nos sociétés à l'émergence de crises majeures, mais est au-delà des objectifs de ce projet. Tout d'abord, le modèle IMACLIM-R ne permet pas de tester des chocs trop importants, notamment parce que les mécanismes d'ajustement représentés n'intègrent pas ceux qui pourraient être en mis en place pour gérer l'approvisionnement énergétique. Les mesures qui ont été prises suite à l'accident de Fukushima au Japon ou de la tempête Sandy aux Etats Unis en sont de bons exemples. Ensuite, la représentation de tels chocs (origine du choc, durée, conséquences géopolitique, ...) nécessite une expertise spécifique liée à l'analyse et la gestion des crises.

L'analyse qui est proposée dans ce rapport permet néanmoins d'apprécier la résilience de l'Europe à un choc sur l'offre énergétique. En effet, les indicateurs donnent des informations sur la dépendance d'une économie aux différents types d'énergie, ou du monde à la production énergétique d'une région.

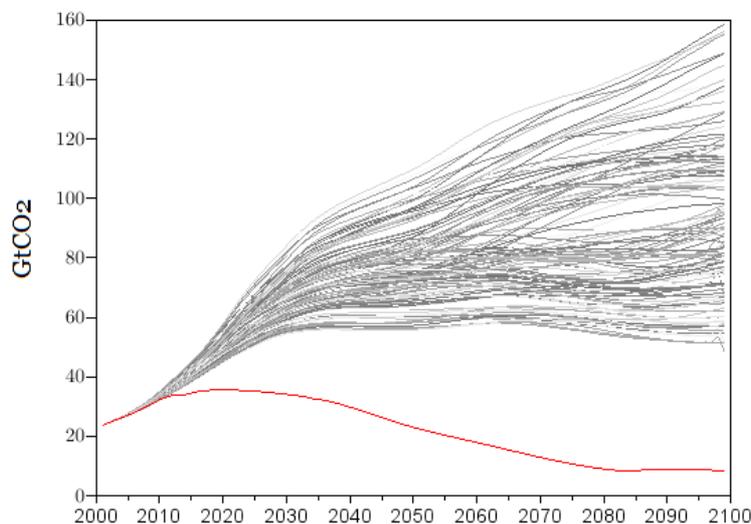
## 3. Les résultats

### 3.1. Analyse générale des scénarios

La contrainte imposée sur les émissions mondiales impose de mettre en œuvre une taxe sur les émissions de CO<sub>2</sub>-énergie dont l'évolution sur un siècle dépend beaucoup du jeu d'hypothèses retenu. Le graphique 1 représente l'évolution des émissions mondiales sur un siècle dans les 432 simulations effectuées sans politique climatique (chaque ligne grise correspond à un scénario) et le plafond imposé sur les émissions mondiales (ligne rouge). Cette trajectoire n'a pas été choisie de façon optimale, mais de façon à respecter des objectifs sur les émissions mondiales en 2020, 2050 et 2100. Selon le jeu d'hypothèses considéré, on

constate que le niveau des émissions mondiales peut différer fortement (entre 50 et 160 GtCO<sub>2</sub> en 2100) et donc nécessiter un effort de réduction des émissions plus ou moins important.

### Graphique 1 – Evolution des émissions mondiales



L'introduction d'un plafond sur les émissions mondiales dans chaque scénario impose de trouver pour chaque année un niveau de taxe-carbone qui permet de suivre au plus près leur évolution. Dans l'exercice que nous menons, cette trajectoire n'a pas été optimisée mais a été définie pour respecter un certain nombre de conditions (émissions maximales en 2020, baisse de 25% en 2050 et de 75% en 2100), à l'instar des objectifs pris par l'UE ou dans le cadre des négociations internationales sur le climat. Or, ce plafond sur les émissions mondiales peut s'avérer impossible à respecter. C'est ce qu'il se produit dans un certain nombre de scénarios à partir de 2077.<sup>10</sup> Afin de les conserver tous, nous présentons les résultats jusqu'en 2077. Il faut néanmoins garder à l'esprit que l'objectif visé pour 2100, en termes de réduction d'émissions mondiales, n'est pas atteignable dans certains scénarios et étant donné les hypothèses avec lesquelles nous travaillons.

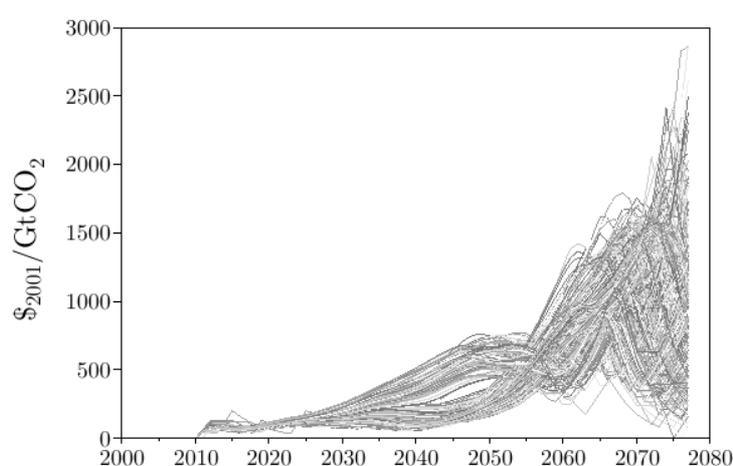
Le graphique 2 présente l'évolution de la taxe carbone jusqu'en 2077 dans chaque scénario considéré. Selon le jeu d'hypothèses appliqué, et donc le monde futur envisagé, la taxe sur les émissions à mettre en œuvre

<sup>10</sup> Ce point illustre une conclusion importante : si la mise en œuvre de politiques climatiques suffisamment ambitieuses continue à être repoussée, certaines options –notamment celle de limiter la hausse de la température mondiale moyenne à +2°C par rapport à l'ère préindustrielle- deviennent alors inatteignables du fait des équipements et des infrastructures très énergivores mises en place. Par exemple, l'Agence Internationale de l'Energie concluait en 2011, dans sa publication « World Energy Outlook » : « Faute d'entreprendre des actions radicales d'ici à 2017, les infrastructures énergétiques déjà en place à cette date atteindront à elles seules la limite d'émissions de CO<sub>2</sub> permises jusqu'en 2035 dans le Scénario 450 [permettant de limiter la hausse de la température à +2°C]. La marge pour la construction de nouvelles centrales, usines ou autres infrastructures serait donc nulle, à moins que ces dernières n'émettent pas de carbone du tout, une possibilité extrêmement onéreuse. En reportant l'action, nous réaliserions de fausses économies : chaque dollar d'investissement non réalisé dans le secteur de l'électricité avant 2020 entraînerait 4,3 dollars de dépenses supplémentaires après cette date afin de compenser l'augmentation des émissions. »

est extrêmement variable. Les différences de taxe entre les scénarios est à son paroxysme après 2070 avec une taxe pouvant être aux environs de 100 USD ou avoisiner les 3000 USD, selon le scénario.

La taxe est très variable non seulement entre les scénarios, mais également dans chaque scénario. L'évolution de la taxe carbone connaît ainsi des périodes de forte augmentation, suivies souvent par des périodes de baisse importante. Cela vient de l'hypothèse faite dans IMACLIM-R que les agents sont myopes et donc ne tiennent pas compte du durcissement futur de la contrainte sur les émissions de CO<sub>2</sub>, quand ils prennent leurs décisions d'investissement. Nous reviendrons sur ce point dans la suite du rapport.

### Graphique 2 : Evolution de la taxe carbone (USD<sub>2001</sub>/tCO<sub>2</sub>)



Il est intéressant d'essayer de comprendre le rôle joué par les différents paramètres présentés précédemment dans l'évolution de la taxe carbone. Sur le graphique 3, nous avons représenté la moyenne de la taxe carbone pour les scénarios partageant la même hypothèse sur un jeu de paramètres :<sup>11</sup>

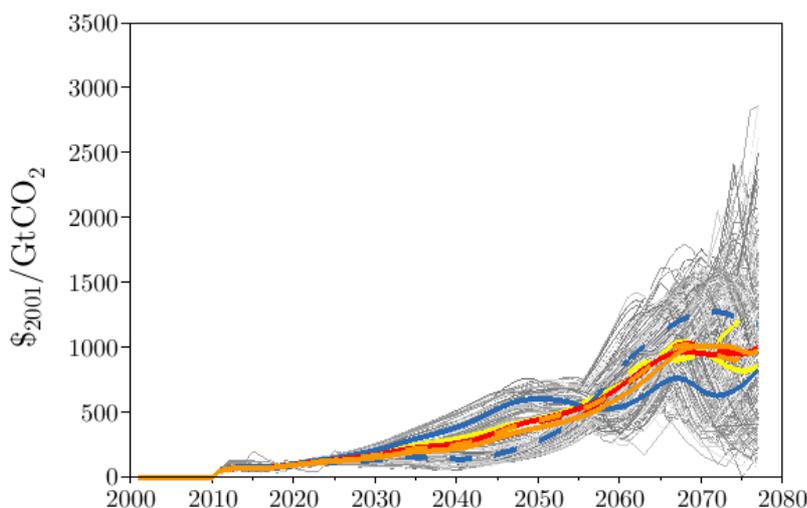
- Le trait continu (respectivement en pointillé) bleu correspond à la moyenne des valeurs de la taxe dans les scénarios supposant une faible (respectivement forte) disponibilité des technologies sobres en carbone.
- Le trait continu (respectivement en pointillé) jaune correspond à la moyenne des valeurs de la taxe dans les scénarios supposant une efficacité énergétique induite faible (respectivement forte).
- Le trait continu (respectivement en pointillé) rouge correspond à la moyenne des valeurs de la taxe dans les scénarios supposant une faible (respectivement forte) disponibilité du charbon et de la technologie de liquéfaction du charbon.

<sup>11</sup> Nous gardons le même code couleur dans l'ensemble du rapport.

- Le trait continu (respectivement en pointillé) orange correspond à la moyenne des valeurs de la taxe dans les scénarios supposant une faible (respectivement forte) croissance de la productivité du pays meneur (Etats Unis).

Les autres jeux d'hypothèses ont moins d'influence sur les différences entre les scénarios et sont présentés dans l'annexe 2.

### Graphiques 3—Déterminants de la variabilité de la taxe carbone



Les hypothèses sur la disponibilité des technologies sobres en carbone sont celles qui expliquent le plus les différences entre les scénarios. Durant la première moitié du siècle, la valeur de la taxe sur les émissions de CO<sub>2</sub> est plus faible, lorsque ces technologies sont fortement disponibles. Ensuite, les courbes s'inversent et la taxe augmente de façon conséquente dans les scénarios avec une forte disponibilité des technologies sobres en carbone.

Comment expliquer ces évolutions ? Il faut garder en tête que toutes les technologies ne seront pas disponibles aux mêmes périodes. Ainsi, une utilisation industrielle de la nouvelle génération de nucléaire et des énergies renouvelables est supposée possible dès le début du siècle, alors que les technologies de CCS et des véhicules électriques ne sont disponibles qu'à partir de 2010 (voire 2014). Ensuite, la diffusion de ces technologies peut être plus ou moins longue. Ainsi, sous l'hypothèse de forte disponibilité des technologies sobres en carbone, la période de « niche » et de croissance est de 90ans pour le nucléaire « nouvelle génération », 22 ans pour les énergies renouvelables, 21 ans pour la technologie de CSC et 46 ans pour les véhicules électriques.<sup>12</sup>

<sup>1212</sup> Voir l'annexe 1 qui présente les paramètres représentant la diffusion d'une nouvelle technologie dans une économie et les hypothèses retenues pour ces paramètres.

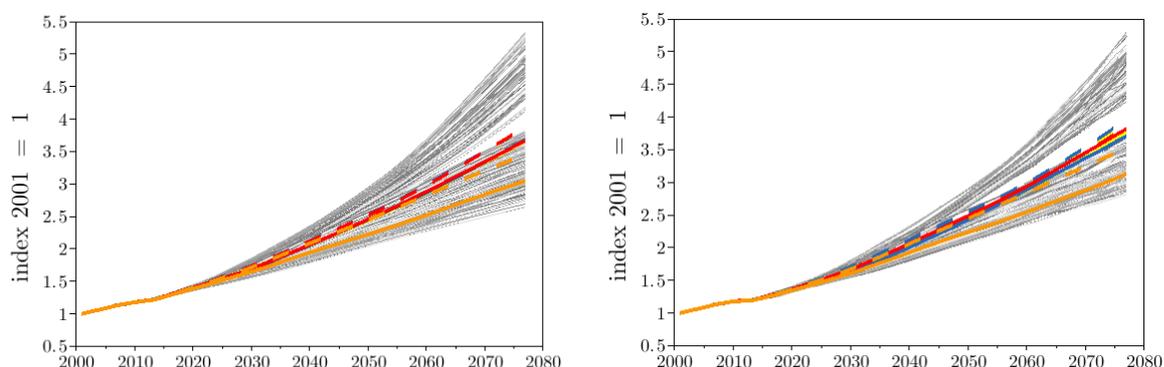
Ainsi, lorsque les technologies sobres en carbone sont fortement disponibles, les réductions des émissions ont lieu, dans un premier temps, majoritairement dans le secteur de production de l'électricité (technologie nucléaire et énergies renouvelables) avec une taxe relativement faible. Cela a pour conséquence que les autres secteurs, notamment celui des transports, ne participent pas beaucoup à l'effort de réduction des émissions dans un premier temps, de sorte que les véhicules électriques ne se diffusent pas beaucoup. Dans un second temps, les baisses d'émission dans le secteur électrique ne suffisent plus et les autres secteurs doivent également être mobilisés. Or, ces derniers disposent d'équipements qui ne permettent pas de réduire facilement et rapidement leurs émissions. Afin d'accélérer la diffusion des technologies sobres en carbone dans ces secteurs, une taxe plus élevée est alors nécessaire, notamment pour accélérer la diffusion des véhicules électriques.

A l'inverse, si les technologies sobres en carbone ne sont pas disponibles, les réductions d'émissions sont plus coûteuses, ce qui impose une taxe carbone plus élevée, dans un premier temps, et vont avoir lieu dans l'ensemble des secteurs. La taxe carbone augmente tout au long du siècle mais de façon plus progressive que dans les scénarios qui supposent une forte disponibilité des technologies sobres en carbone. Les autres jeux d'hypothèses ont moins d'influence sur les différences entre les scénarios.

Les graphiques 4, 5 et 6 présentent l'évolution du PIB européen au cours du siècle (jusqu'en 2077) dans les scénarios sans politique climatique, avec politique climatique et le ratio entre les PIB des scénarios avec et sans politique climatique, pour un même jeu d'hypothèses. Les valeurs moyennes du PIB pour les scénarios partageant le même jeu d'hypothèses sur la disponibilité des technologies sobres en carbone (bleu), sur l'ampleur de l'efficacité énergétique induite (jaune), sur la croissance de la productivité (orange) ou encore sur le charbon (rouge) sont également présentées.

Même si tous les scénarios sans politique climatique exhibent une hausse progressive du PIB de l'Europe, les taux de croissance diffèrent assez fortement entre les scénarios, aboutissant à un PIB en 2077 entre 2,5 fois et 5 fois supérieurs à celui de 2001. L'hypothèse sur la productivité des Etats Unis et la vitesse à laquelle les autres pays se rapprochent de la productivité du leader mondial, joue un rôle important.

## Graphiques 4 et 5– Croissance du PIB de l’Europe dans les scénarios sans politique climatique et dans les scénarios avec politique climatique<sup>13</sup>



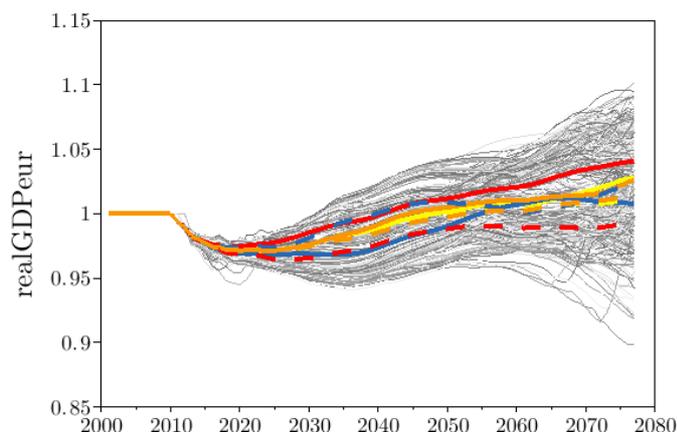
Il est difficile de dire quel est l’effet de la mise en œuvre des politiques climatiques sur le PIB de l’Europe en observant uniquement le graphique 5. En revanche, le graphique 6 montre que l’impact des politiques climatiques peut être positif ou négatif sur le PIB de l’Europe, par rapport au niveau qu’il aurait dans un scénario sans politique climatique.<sup>14</sup> On constate qu’à court terme, il y a des pertes de PIB dans tous les scénarios mais qu’à moyen terme et long terme, un grand nombre de scénarios connaissent des gains de croissance. Ce résultat est dû à la non-optimalité des scénarios de référence. En effet, les agents étant myopes, ils n’anticipent pas l’augmentation du prix des énergies dans le futur et donc font des choix, notamment en termes d’équipements, qui s’avèrent coûteux lorsque les prix des énergies augmentent. Dans certains scénarios, les politiques climatiques permettent de corriger partiellement cela.

Les différents jeux d’hypothèses sur les technologies sobres en carbone (bleu), le charbon (rouge) et la productivité (orange) expliquent les différences entre les scénarios, surtout dans la seconde moitié du siècle. On remarque que les courbes bleues se croisent à deux reprises, alors que le classement des courbes rouges et oranges reste toujours le même. Ainsi, une faible disponibilité de charbon et de la technologie permettant de le liquéfier conduit à un PIB plus élevé avec politique climatique que sans. On a le résultat inverse si le charbon est abondant, notamment parce que les politiques climatiques conduisent à limiter le recours à ce combustible fossile alors qu’il est relativement peu coûteux, et donc largement utilisé dans le scénario sans politique climatique.

<sup>13</sup> Sur le graphique 4, la ligne bleue en pointillés est confondue avec la ligne rouge en pointillés et la ligne bleue pleine, la ligne rouge pleine et les deux lignes jaunes se confondent. Sur le graphique 5, les deux lignes jaunes se confondent, ainsi que les deux lignes rouges.

<sup>14</sup> L’effet est calculé comme le ratio entre la valeur de l’indicateur dans un scénario avec politique climatique et un scénario sans à la même date. Il s’agit donc d’une comparaison entre deux valeurs futures de l’indicateur (la valeur qu’il prendrait à une date future dans un monde avec politique climatique versus la valeur qu’il prendrait à la même date future dans un monde sans politique climatique). La comparaison avec la valeur actuelle de cet indicateur aurait donné une image différente.

**Graphique 6 –Ratio entre le PIB de l’Europe dans les scénarios avec et sans politique climatique**



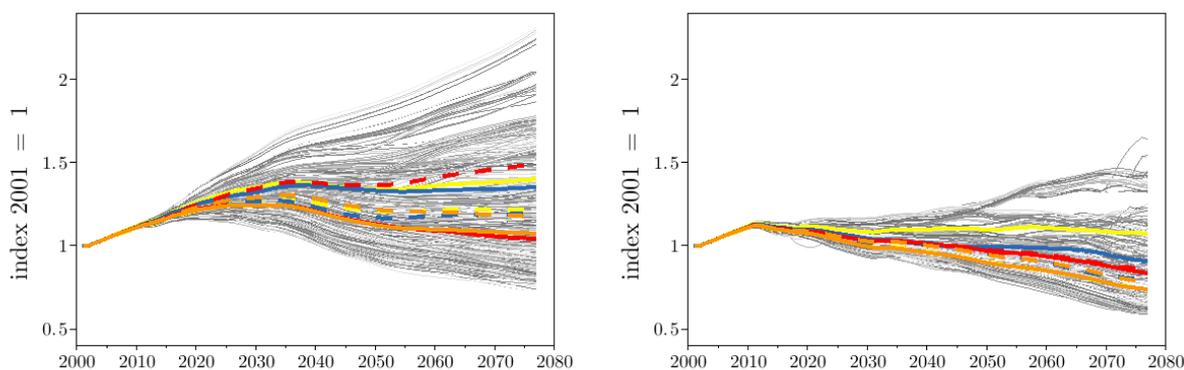
Lorsque la productivité du leader s’améliore rapidement, l’activité économique de l’Europe est plus importante, de sorte que les politiques climatiques pèsent plus sur le PIB que si la progression de la productivité des Etats Unis était plus faible. Concernant les technologies sobres en carbone, on constate que les évolutions sont plus complexes.

Examinons maintenant l’offre totale d’énergie primaire (OTEP) en Europe. Dans les scénarios sans politique climatique, cet indicateur est très variable, avec des valeurs maximales en 2077 près de trois fois supérieures aux valeurs minimales. Le graphique 7 montre que les hypothèses faites sur le charbon (rouge) et l’efficacité énergétique induite (jaune) expliquent une grande partie de cette variabilité.

La faible disponibilité de charbon et de carburants liquides (à partir de charbon) conduit à une baisse de l’OTEP en Europe à partir de 2030, alors que l’hypothèse inverse aboutit à une OTEP beaucoup plus importante. Ce résultat est intuitif.

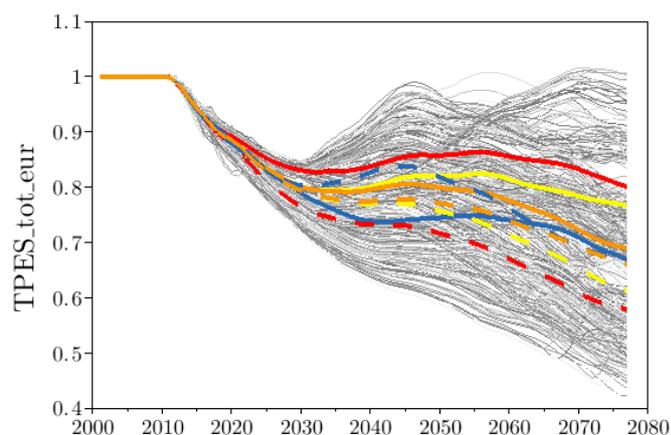
La façon dont l’efficacité énergétique évolue joue également un rôle important : les scénarios reposant sur l’hypothèse d’une faible efficacité énergétique induite conduisent à consommer plus d’énergie en Europe, comme dans le monde.

## Graphiques 7 et 8- Offre totale d'énergie primaire dans les scénarios sans et avec politique climatique<sup>15</sup>



La mise en œuvre d'une taxe carbone infléchit fortement l'offre totale d'énergie primaire, comme on peut le voir sur le graphique 8 et les différences entre les scénarios se réduisent fortement.

## Graphique 9 - Ratio entre l'OTEP de l'Europe dans les scénarios avec et sans politique climatique



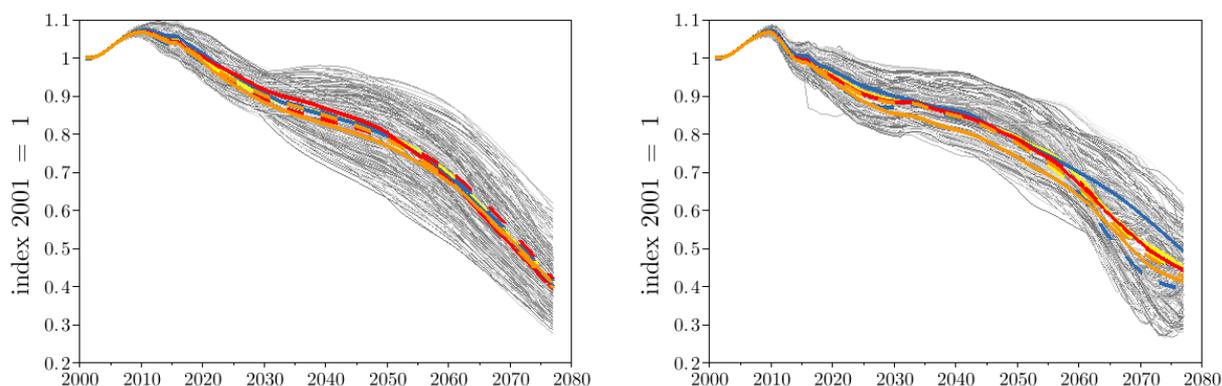
L'examen du graphique 9 confirme la baisse importante de l'OTEP dans les scénarios avec politiques climatiques par rapport aux scénarios sans. L'importance des hypothèses portant sur l'abondance de charbon et la disponibilité de liquéfaction de ce combustible fossile et l'efficacité énergétique induite réapparaît, en raison du rôle qu'elles jouent dans les scénarios de référence.

Examinons maintenant plus en détail l'impact des politiques climatiques sur le pétrole. Même sans politique climatique, l'Europe devrait baisser progressivement sa consommation de pétrole (conventionnel et non conventionnel), du fait de la raréfaction de la ressource et de l'augmentation de son prix. Sur les graphiques

<sup>15</sup> Sur le graphique 8, les lignes rouges sont confondues et la ligne jaune en pointillé est sous la ligne orange en trait plein.

10 et 11, aucun jeu d'hypothèses n'apparaît très discriminant pour expliquer le niveau plus ou moins élevé de cette offre<sup>16</sup>.

### Graphiques 10 et 11 - Offre totale de pétrole (OTP) en Europe dans les scénarios sans et avec politique climatique

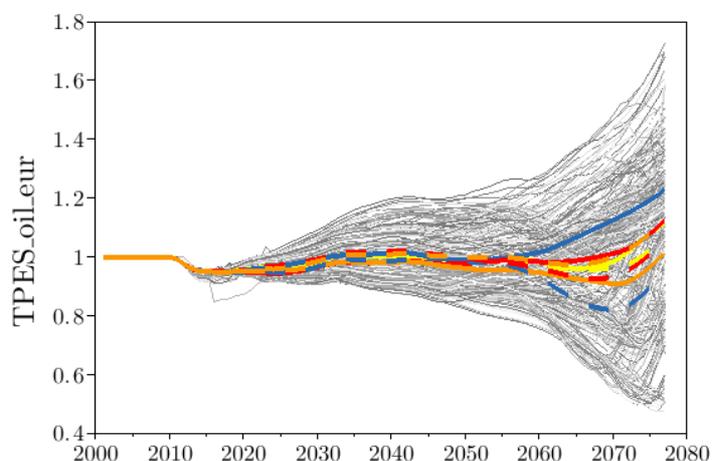


L'examen du graphique 12 révèle un résultat qui peut paraître surprenant : la mise en œuvre de politiques climatiques peut conduire à une offre totale de pétrole supérieure à ce qu'elle serait dans un monde qui ne chercherait pas à lutter contre le changement climatique. Ce résultat s'explique du fait du faible recours au charbon liquéfié comme carburant, lorsque les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> sont plafonnées.

Par ailleurs, la disponibilité et la diffusion des véhicules électriques jouent un rôle important : en cas de faible disponibilité, l'Europe consommera plus de pétrole suite à la mise en œuvre des politiques climatiques.

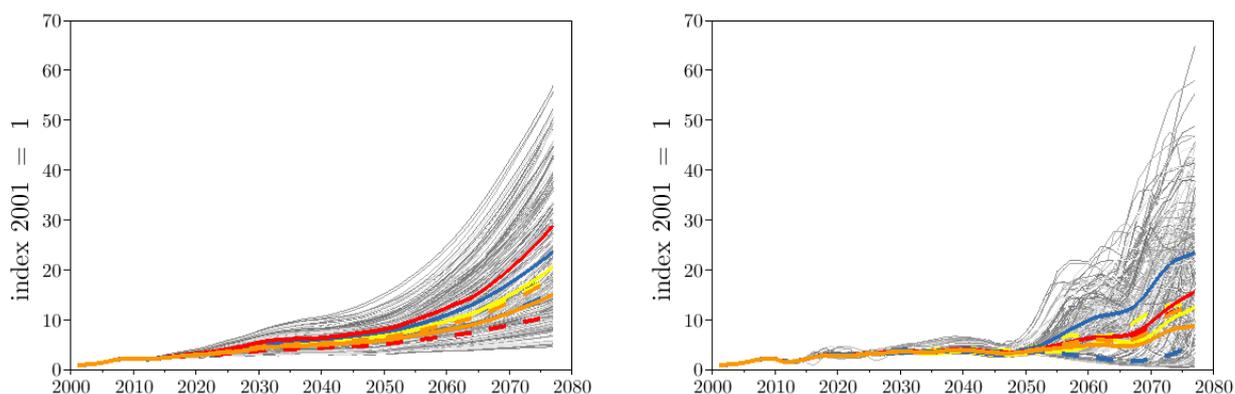
<sup>16</sup> La grande majorité de cette offre correspond à des importations de pétrole.

**Graphique 12 – Ratio entre l’OTP de l’Europe dans les scénarios avec et sans politique climatique**



L'examen de l'évolution du prix mondial du pétrole permet de confirmer et compléter les éléments qui viennent d'être vus pour l'offre totale de pétrole de l'Europe. Le prix mondial du pétrole progresse fortement durant le siècle, y compris lorsque des politiques climatiques sont mises en œuvre. Les hypothèses sur la disponibilité du charbon et des technologies sobres en carbone sont déterminantes dans l'ensemble des scénarios.

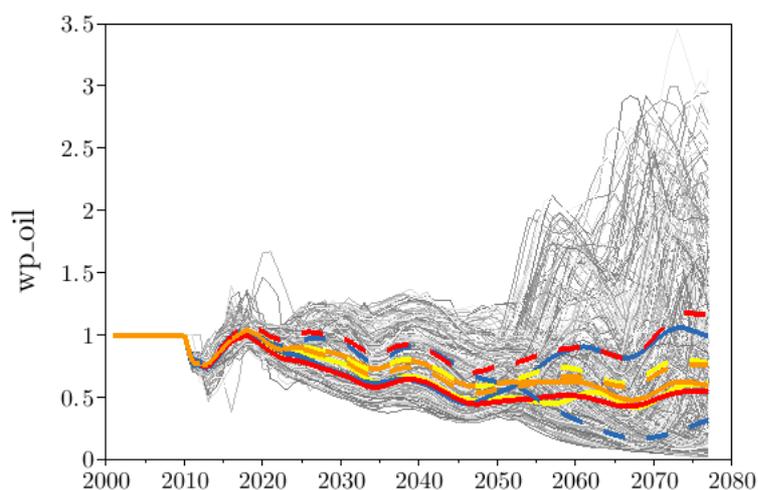
**Graphiques 13 et 14 – Prix mondial du pétrole dans les scénarios sans et avec politique climatique**



Le graphique 15 révèle un résultat intéressant. Les politiques climatiques ont un effet souvent favorable sur le prix du pétrole dès 2020. En revanche, si le charbon est abondant et la technologie de liquéfaction disponible, les politiques climatiques aboutissent à un prix mondial du pétrole bien supérieur à ce qu'il serait

sans plafond sur les émissions mondiales. La hausse du prix mondial du pétrole est davantage modéré dans les scénarios de référence que dans les scénarios avec politiques climatiques du fait d'un recours important au charbon liquéfié, en particulier lorsque le charbon est abondant.

**Graphique 15 – Ratio entre le prix mondial du pétrole dans les scénarios avec et sans politique climatique**



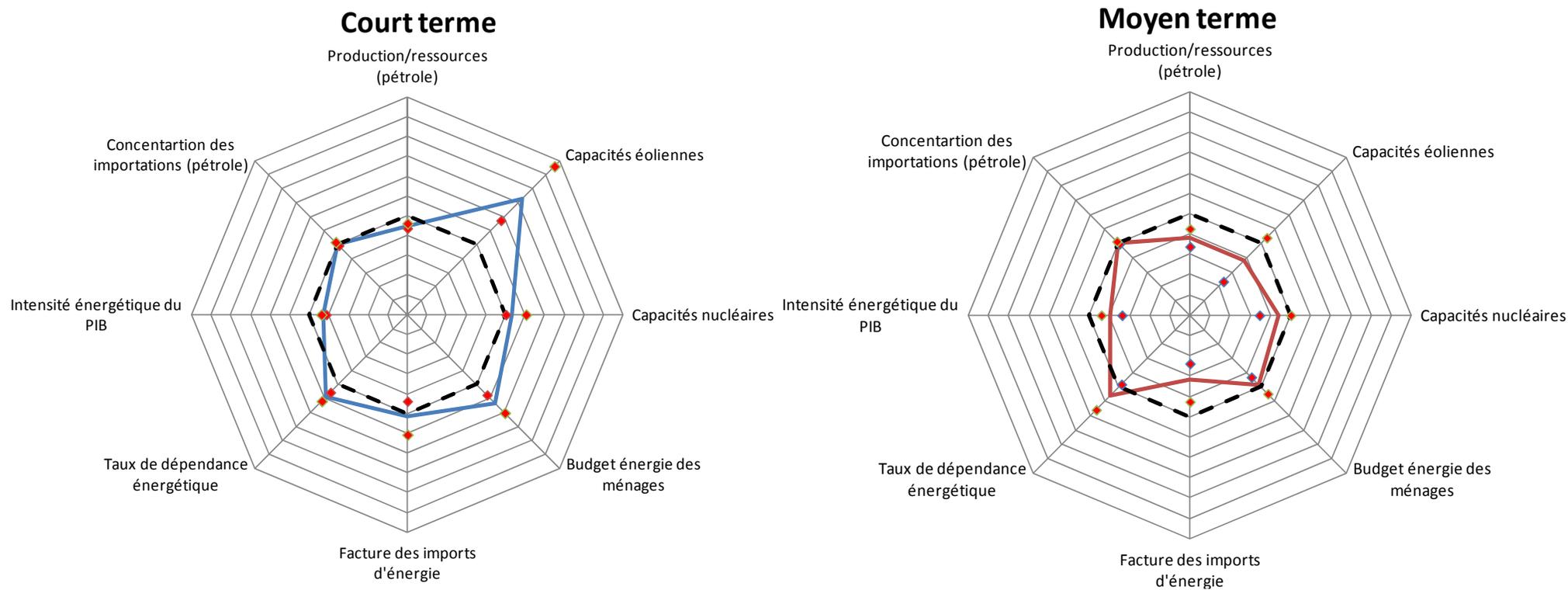
Au final, un premier examen d'indicateurs assez généraux nous permet déjà de tirer plusieurs conclusions. Une première révèle que même avec la mise en œuvre d'une politique climatique ambitieuse, l'offre totale d'énergie primaire, ou encore le prix mondial du pétrole, peut varier de façon très conséquente selon la façon dont le monde évoluera. D'ores et déjà, certaines hypothèses jouent un rôle très important. Elles peuvent renvoyer à des données physiques, comme l'abondance du charbon, mais surtout à des choix politiques, notamment en matière de développement de certaines technologies, qu'il s'agisse de la liquéfaction du charbon, ou de technologies sobres en carbone. On peut également conclure que l'évolution ne sera pas linéaire et qu'une période durant laquelle un indicateur s'est apprécié peut être suivie par une période de dégradation. Nous développons ce point dans la partie suivante.

### 3.2 Quelle évolution de la sécurité énergétique en Europe ?

L'objectif de cette partie est de présenter, d'une façon simple et synthétique, la façon dont la sécurité énergétique évolue en Europe suite à la mise en œuvre de politiques climatiques. Nous nous concentrons sur les huit indicateurs, choisis dans la première partie, permettant d'apprécier les différentes dimensions de la sécurité énergétique. Nous avons calculé les moyennes de ces indicateurs pour l'ensemble des scénarios sans politique climatique d'une part et avec politique climatique d'autre part, en distinguant trois périodes de cinq ans centrées sur 2025, 2050 et 2075 : 2020-2030 ; 2045-2055 et 2085-2095. Nous représentons le

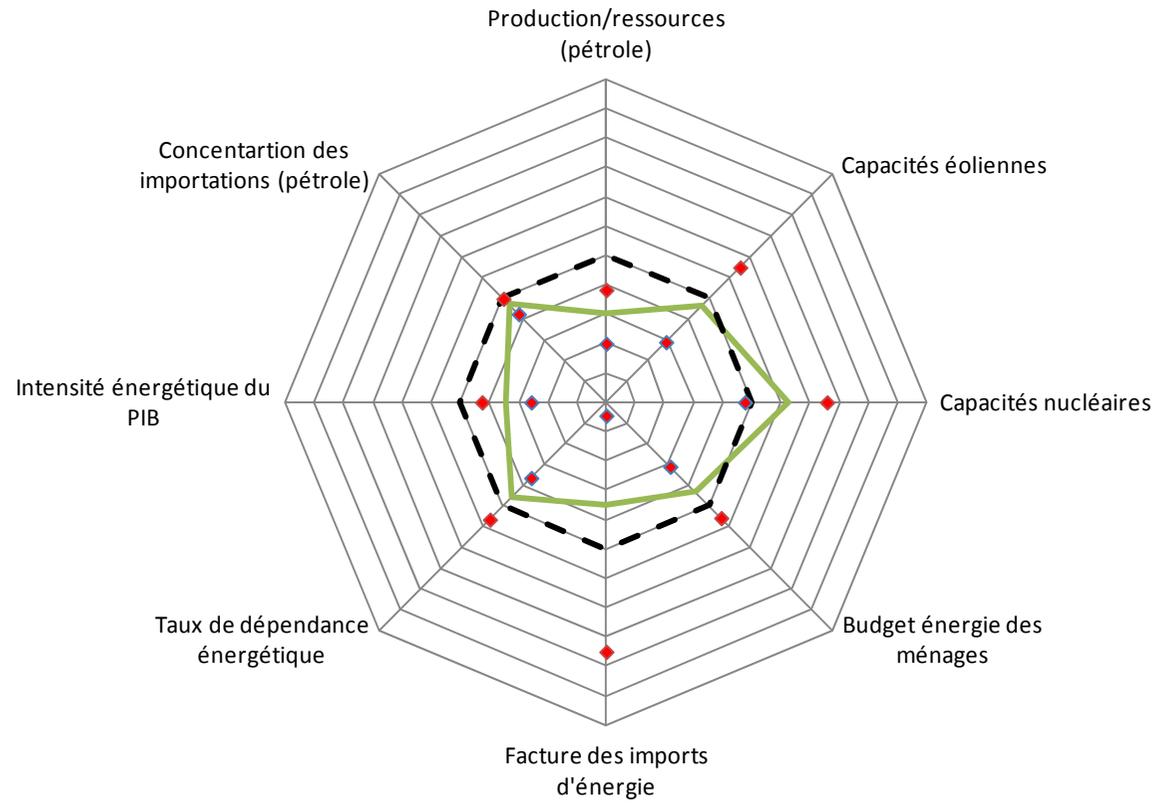
ratio entre la moyenne obtenue pour les scénarios avec politique climatique et celle obtenue pour les scénarios sans politique climatique. La ligne continue bleue représente ce ratio ; les points rouges représentent les ratios obtenus pour les 5<sup>ème</sup> et 95<sup>ème</sup> percentiles. La ligne en pointillée correspond à un ratio égal à 1, c'est-à-dire une situation dans laquelle la politique climatique ne modifierait pas la valeur de l'indicateur. Une évolution vers l'extérieur de cette ligne correspond à une dégradation de l'indicateur de sécurité énergétique, alors que des résultats à l'intérieur de cette ligne témoignent d'une amélioration de l'indicateur. A noter que les indicateurs d'acceptabilité sont considérés comme « dégradés » lorsque le scénario repose sur des capacités nucléaires ou éoliennes plus importantes, qui pourraient être difficiles à mettre en œuvre dans certains pays en Europe. En ce sens, la sécurité énergétique est fragilisée.

Graphiques 16,17 et 18 – indicateurs de sécurité énergétique pour les périodes 2023-2028, 2048-2052 et 2073-2077<sup>17</sup>



<sup>17</sup> Les axes sur les graphiques (de 0 à 2.2) ne sont pas comparables, c'est-à-dire que la variation d'un indicateur ne peut pas être comparée à celle d'un autre. Par exemple, cela n'aurait pas de sens de comparer une dégradation de 20% de la part du budget consacré à l'énergie avec une dégradation de 20% de l'indice de concentration.

# Long terme



### 3.2.1. L'importance de l'horizon de temps

Trois messages marquants se dégagent des graphiques 16, 17 et 18. Premièrement, l'horizon de temps a de l'importance : les effets de la politique climatique sur l'ensemble des indicateurs de la sécurité énergétique diffèrent fortement en fonction de la période considérée. Ensuite, pour la majorité des indicateurs, plus l'horizon est éloigné, plus les marges d'incertitude augmentent. Nous développons ce point dans la partie 3.2.2. Enfin, il apparaît que la mise en œuvre d'une politique climatique peut dégrader certains indicateurs. C'est vrai à tous les horizons de temps, mais pas pour les mêmes indicateurs. Cela illustre parfaitement la nature multidimensionnelle de la sécurité énergétique et la difficulté d'avoir une conclusion tranchée sur son évolution. En particulier, on constate que:

1. Deux indicateurs s'améliorent dans tous les cas et à tous les horizons de temps, lorsque les politiques climatiques sont mises en œuvre: le ratio production sur ressources pour le pétrole et l'intensité énergétique du PIB.

Ce n'est pas un résultat surprenant. En mettant un prix sur le carbone, la politique climatique réduit l'activité économique dans les secteurs intensifs en combustible fossile (pétrole en particulier), ce qui améliore le ratio production sur ressources pour le pétrole. Le prix sur le carbone rend l'énergie plus chère, tout au moins à court terme, mais conduit également à améliorer l'efficacité énergétique, ce qui réduit l'intensité énergétique du PIB.

2. Deux indicateurs sont dégradés par la politique climatique dans tous les cas sur les court et moyen termes, mais s'améliorent en moyenne (mais avec quelques cas de dégradation) sur le long terme: le taux de dépendance énergétique et la diversité des importations de pétrole.

La dégradation de l'indice de concentration des importations de pétrole est néanmoins très faible à court et moyen termes, alors qu'à long terme, on constate une amélioration plus marquée. L'information donnée par cet indicateur agrège deux effets qui ont des effets opposés sur l'indicateur : la baisse mondiale de la demande de pétrole du fait des politiques climatiques et la moindre utilisation des pétroles non-conventionnels. La politique climatique restreint en effet l'extraction de pétroles non conventionnels en raison de la baisse de la demande, ce qui limite la diversité des producteurs. Ce résultat a déjà été mentionné dans Kruyt et al. (2009). A court et moyen termes, ces deux effets se compensent, alors qu'à long terme, le premier l'emporte sur le second.

En Europe, la part des importations dans l'OTEP augmente sur le court terme parce que le prix du carbone incite à remplacer du charbon (en partie domestique) par du gaz (principalement importé) dans la production d'électricité.<sup>18</sup> La substitution se fait plus avec du gaz et moins vers des renouvelables car, pour des prix du

---

<sup>18</sup>Dans le modèle, nous avons supposé que l'Europe dispose de 200 Gtep de charbon, soit 9% des ressources mondiales.

carbone bas, les énergies renouvelables restent moins compétitives que le gaz pour la production d'électricité. L'hypothèse d'anticipations myopes des agents faite dans IMACLIM-R exacerbe ce résultat. Une hypothèse d'anticipations parfaites des prix futurs du carbone modèrerait ce résultat, ce qui conduirait à une pénétration moins forte du gaz à un horizon proche. A court et moyen termes, on constate donc une dégradation de la dépendance énergétique de l'Europe.

La situation s'inverse dans certains scénarios à long terme, du fait de la forte amélioration de l'intensité énergétique du PIB qui permet de baisser la dépendance énergétique de l'Europe, par rapport aux scénarios sans politique climatique.

3. Deux indicateurs, la part du budget que les ménages consacrent à l'énergie et les importations d'énergie sur le PIB, sont aggravés par la politique climatique à court terme, mais sont améliorés ensuite en moyenne, avec quelques cas de détérioration persistante.

La dégradation à court terme du budget énergie des ménages est attribuable aux prix élevés de l'énergie (en raison du prix du carbone) et à la lente adaptation des stocks d'équipements des ménages. Mais, les mécanismes d'apprentissage et l'amélioration de l'efficacité énergétique expliquent que cette dégradation n'est que transitoire. Les prix de l'électricité notamment commencent par augmenter en raison du prix du carbone, mais que cette hausse n'est que transitoire. Sur l'ensemble de la période, les ménages ne sont donc pas forcément face à des prix de l'énergie plus importants que si la politique climatique n'était pas mise en œuvre. Les scénarios dans lesquels l'indicateur est dégradé de façon persistante reposent sur une hypothèse de faible disponibilité des technologies sobres en carbone, comme le véhicule électrique.

L'effet de la politique climatique sur la facture que représentent les importations énergétiques par rapport au PIB de l'Europe présente un large éventail de résultats entre les scénarios. C'est un indicateur complexe dont la variation dépend des interactions entre les effets de la politique climatique sur (i) le volume d'importations d'énergie et la part de chaque type d'énergie dans ces importations, (ii) les prix internationaux de l'énergie, et (iii) le PIB. Sur le court terme, la politique climatique augmente le volume des importations de gaz et réduit le volume des importations de charbon et de pétrole, ce qui augmente le prix international du gaz et réduit les prix internationaux de pétrole et de charbon. A cet horizon, le PIB est par ailleurs plus bas que dans les scénarios sans politique climatique. L'effet sur le gaz a tendance à légèrement dominer, ce qui explique la faible dégradation de l'indicateur en moyenne sur le court terme. Sur le moyen terme, la réduction des prix internationaux de l'énergie (en raison de baisse de la demande) domine pour expliquer la facture des importations d'énergie. L'indicateur est alors fortement amélioré dans tous les scénarios. Sur le long terme, la marge d'incertitude est très large. Le principal effet est lié aux hypothèses faites sur le charbon. Dans les scénarios où il y a une forte disponibilité de charbon, solide et liquide, les volumes des importations d'énergie sont modérés dans les scénarios sans politique climatique par l'utilisation de ressources charbonnières

européennes et l'augmentation du prix des carburants liquides est modérée par le large déploiement de charbon liquéfié. La politique climatique restreint ces deux effets, ce qui augmente les volumes d'importation et les prix à l'importation par rapport au scénario de référence.

4. Deux indicateurs, les capacités nucléaires et éoliennes installées en Europe, ont des évolutions temporelles plus complexes. , avec, en moyenne, une détérioration à court terme, puis une amélioration sur le moyen terme. A long terme, les capacités nucléaires sont, en moyenne, plus importantes dans les scénarios avec politiques climatique, comparativement aux scénarios sans politique climatique, alors que les capacités éoliennes sont, en moyenne, moins importantes. Ce dernier résultat est très surprenant, mais est caractérisé par de fortes marges d'incertitude.

Les capacités installées nucléaires et éoliennes augmentent sur le court terme suite à la mise en œuvre de la politique climatique, en raison des effets de substitution, mais diminuent à moyen terme en raison de la baisse de la demande d'électricité.

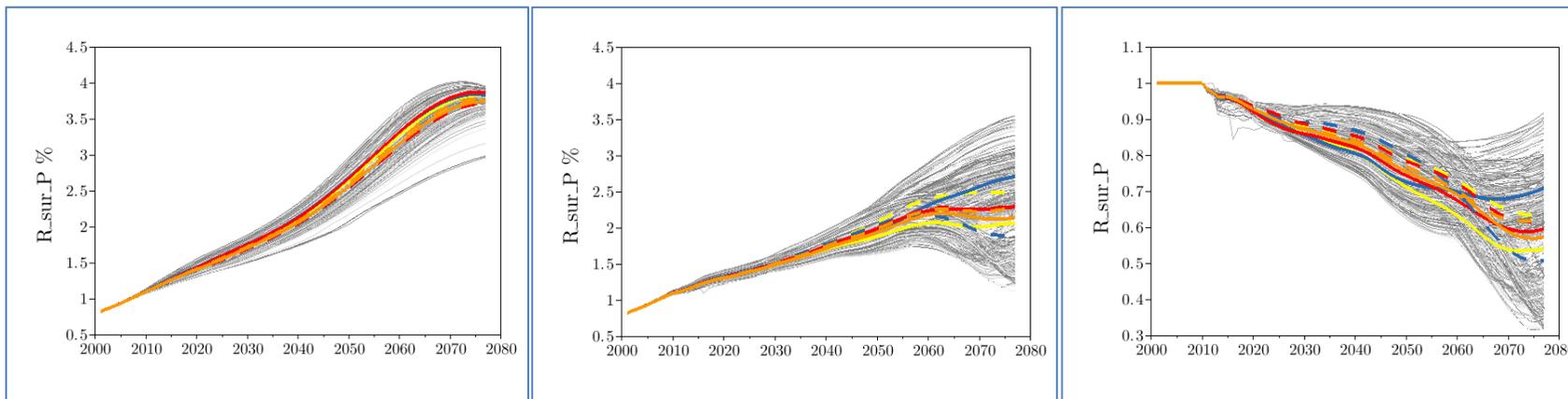
A long terme, l'effet des politiques climatiques sur les capacités nucléaires et éoliennes est plus ambigu et dépend des poids relatifs des effets de substitution entre les technologies de production d'électricité (centrales utilisant des combustibles fossiles avec et sans CSC, renouvelables, nucléaire) et des différentes forces qui jouent sur la demande d'électricité : certains tendent à la réduire, comme l'amélioration de l'efficacité énergétique ; d'autres à l'augmenter, comme le déploiement des véhicules électriques.

### **3.2.2. Les déterminants de la sécurité de la sécurité**

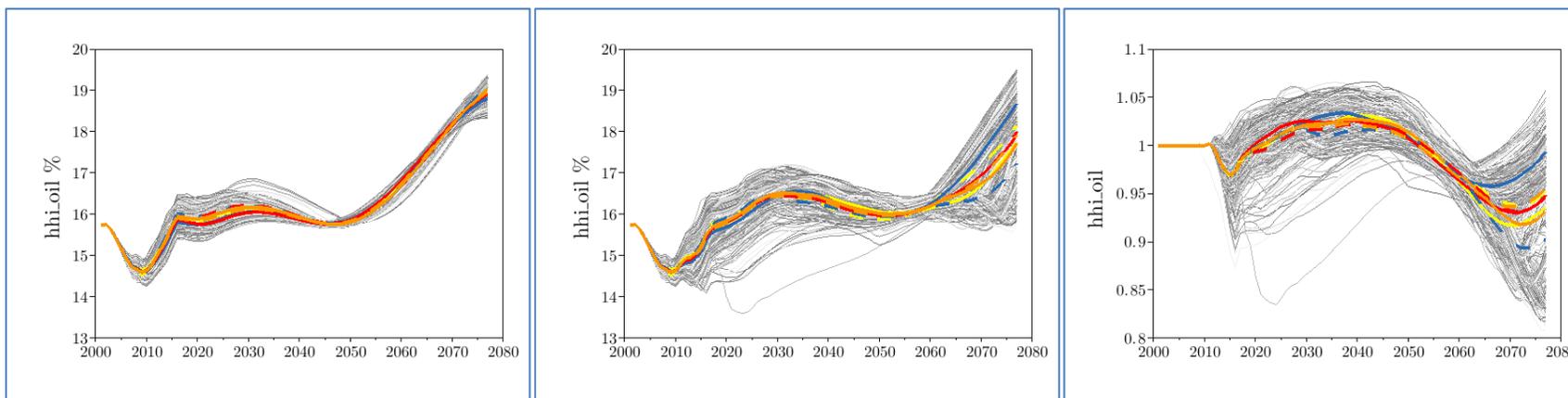
Les graphiques 19-26 présentent maintenant l'évolution des indicateurs de sécurité énergétique entre 2000 et 2077 dans les scénarios de référence et les scénarios avec politique climatique. Nous présentons aussi l'évolution temporelle du ratio entre la valeur de l'indicateur dans le scénario avec politique climatique et dans le scénario de référence. Comme dans la partie 3.1., nous représentons également les moyennes des indicateurs des scénarios partageant la même hypothèse pour un jeu de paramètres afin de mieux comprendre leur rôle dans l'évolution de ces indicateurs. De nouveau, nous ne présentons que les jeux d'hypothèses qui importent le plus pour les résultats.

Graphiques 19 à 26 – Indicateurs de sécurité énergétique (1<sup>er</sup> graphique : scénario sans politique climatique ; 2<sup>ème</sup> graphique : scénario avec politiques climatiques ; 3<sup>ème</sup> graphique : ratio)

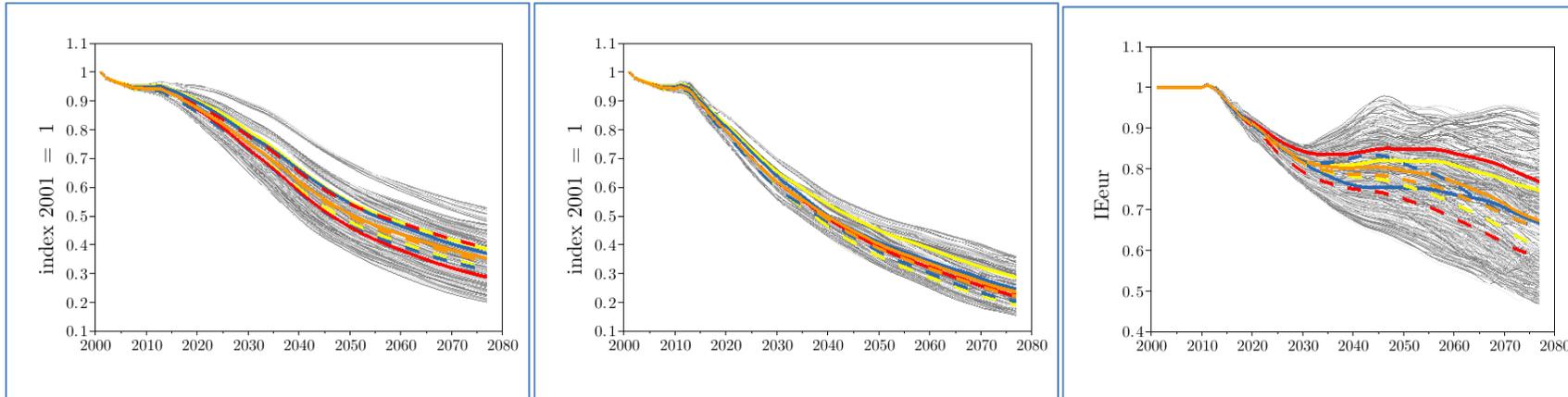
Graphique 19 - Production de pétrole sur ressources



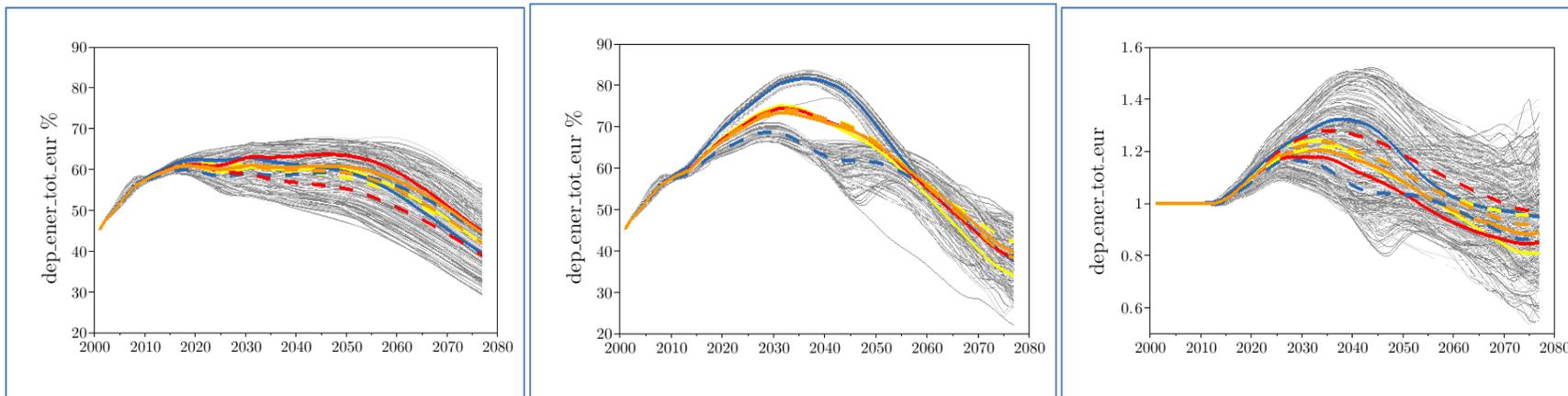
Graphique 20 - Indice de concentration des importations de pétrole



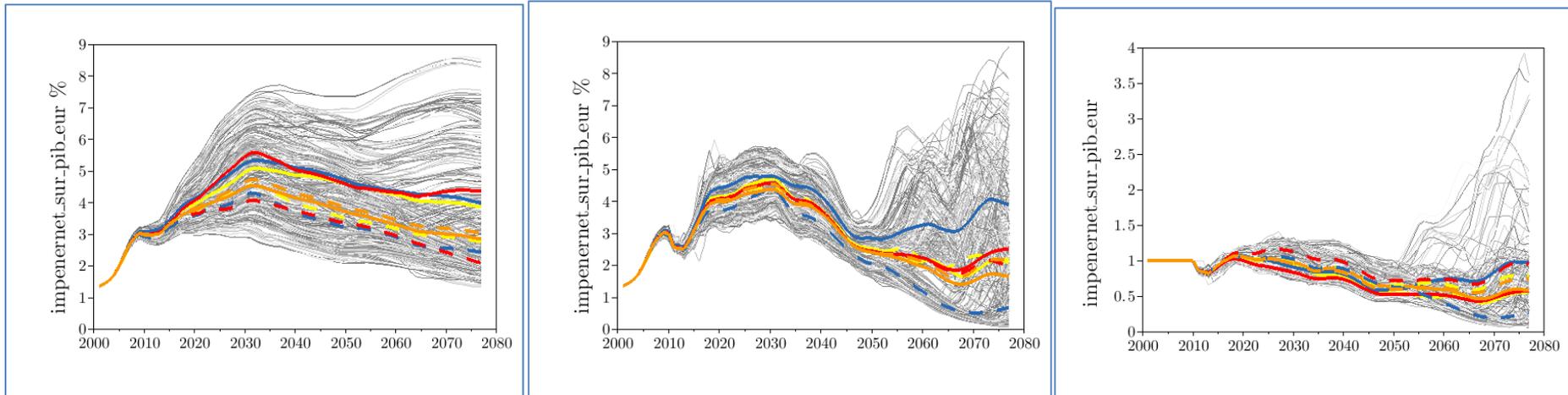
**Graphique 21 - Intensité énergétique du PIB**



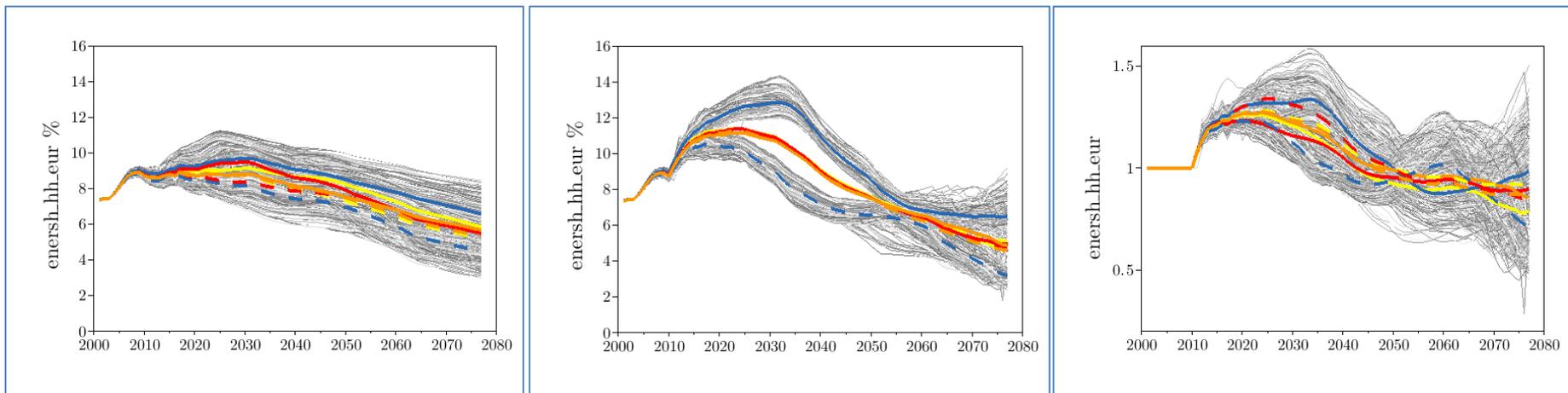
**Graphique 22 - Taux de dépendance énergétique**



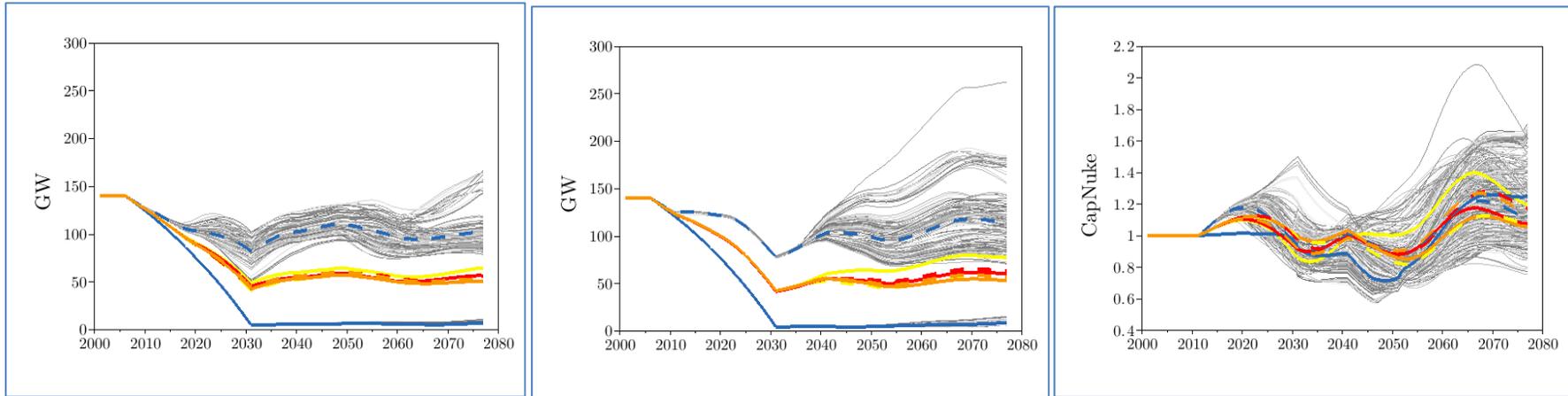
**Graphique 23 –Facture des importations d'énergie (importations d'énergie sur PIB)**



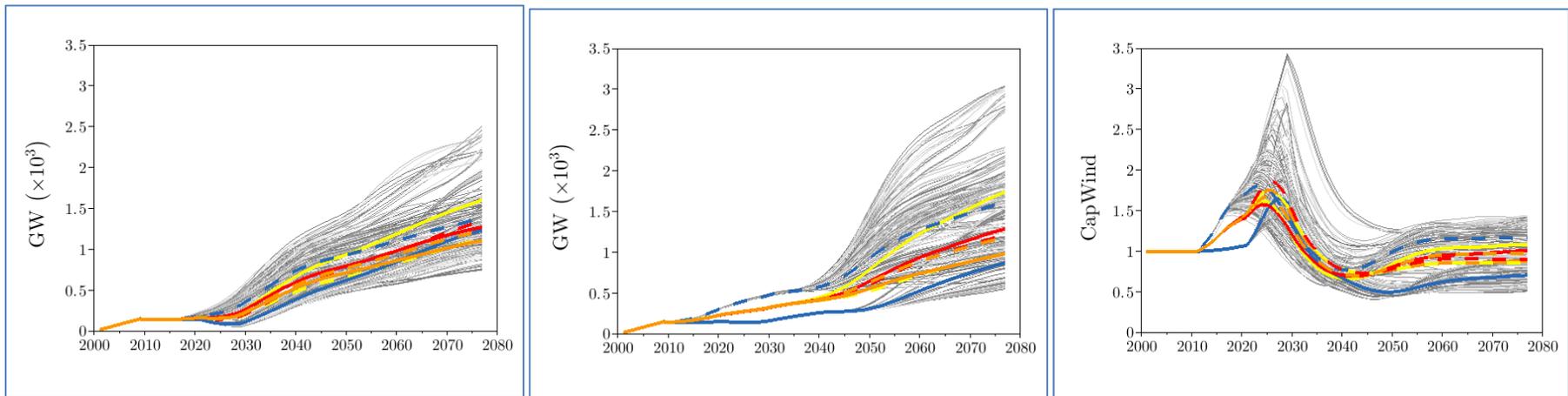
**Graphique 24 - Part du budget des ménages consacrée à l'achat d'énergie**



**Graphique 25 - Capacités nucléaires installées en Europe**



**Graphique 26 - Capacités éoliennes installées en Europe**



Nous ne commenterons pas les graphiques un à un, mais soulignons quelques résultats importants :

**1. Des hypothèses alternatives sur un ensemble de paramètres n'ont pas forcément un effet similaire sur tous les indicateurs de sécurité énergétique à un horizon donné.** Par exemple, le jeu d'hypothèses sur le charbon a des effets contradictoires sur l'intensité énergétique du PIB d'une part, et sur la facture des importations d'énergie d'autre part. L'abondance de charbon et l'accès à la technologie pour le liquéfier se traduisent par des scénarios de référence énergivores et plus carbonés. La politique climatique doit donc améliorer davantage l'intensité énergétique du PIB. Mais, en limitant l'utilisation de charbon, y compris produit en Europe, la politique climatique influence la part des importations dans l'OTEP et la facture des importations d'énergie, d'une manière moins favorable en cas de forte disponibilité du charbon.

**2. Des hypothèses alternatives sur un ensemble de paramètres n'ont pas forcément un effet similaire sur les indicateurs de sécurité énergétique à travers le temps.**

Par exemple, l'hypothèse sur la disponibilité des technologies sobres en carbone a des effets contradictoires sur le ratio entre la production et les ressources de pétrole entre le court terme et les moyens et longs termes. La faible disponibilité des technologies sobres en carbone à court terme a deux conséquences : d'une part, une plus grande part de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> se fait en baissant le niveau de l'activité économique ; d'autre part, relativement plus de réductions des émissions auront lieu dans le secteur des transports. La consommation de pétrole est donc plus réduite suite à la mise en œuvre de politique climatique lorsque les technologies sobres en carbone est faible. En revanche, lorsque les technologies sobres en carbone sont fortement disponibles, une part importante des réductions d'émissions sont réalisées à court terme dans le secteur de la production d'électricité, qui bénéficie en premier de ces technologies, alors que le secteur des transports participe peu à la réduction des émissions. À moyen et à long terme, l'effet est inversé du fait d'une plus grande pénétration des véhicules électriques dans les flottes de véhicules.

**3. Les scénarios dans lesquels l'amélioration de l'efficacité énergétique se fait rapidement se caractérisent par une dégradation, en moyenne, de plusieurs indicateurs, comparativement aux cas où l'efficacité énergétique progresse moins rapidement.**

C'est le cas pour le ratio entre la production et les ressources de pétrole, le taux de dépendance énergétique, ainsi que la facture des importations d'énergie à moyen et long termes. Sur le long terme, il semble même que, dans les cas où l'efficacité énergétique se diffuse faiblement, le taux de dépendance est amélioré par la politique climatique, alors qu'il est dégradé quand l'efficacité énergétique s'améliore rapidement. Ce résultat est quelque peu surprenant. Il s'explique en fait aisément. En effet, comme l'objectif de la politique climatique correspond à un plafond fixe d'émissions à ne pas dépasser, plus l'efficacité énergétique s'améliore et se diffuse rapidement, moins le secteur de la production d'énergie doit réaliser des efforts de réduction de ses émissions, de sorte que les indicateurs de sécurité énergétique liés à l'offre d'énergie sont dégradés.

**4. L'hypothèse sur la vitesse de la croissance de la productivité des Etats Unis est en général un déterminant de second ordre.** Cela signifie qu'en général, la taille des économies n'a pas tellement d'importance. Ce résultat, quelque peu contre-intuitif, est dû aux rétroactions positives entre la taille des économies et les possibilités d'amélioration de l'efficacité énergétique et du changement technologique en général (du fait d'une rotation plus rapide des capacités productives et des équipements quand les économies sont grandes, et d'un changement technologique plus rapide du fait des effets d'apprentissage).

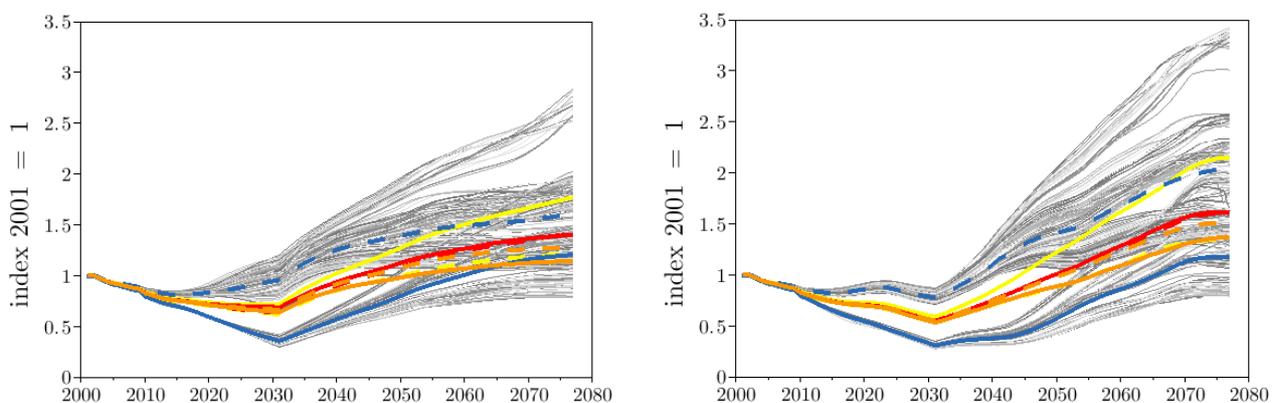
### 3.3. La diffusion des technologies sobres en carbone

Cette dernière partie se concentre sur le rôle joué par les technologies sobres en carbone dans les scénarios. Ces dernières ont en effet un impact important sur la sécurité énergétique des régions, parce qu'elles influencent le mix énergétique et l'intensité énergétique des économies dans lesquelles elles interviennent. La diffusion de ces technologies est une sortie endogène du modèle IMACLIM-R. Elle dépend de leurs caractéristiques techniques et d'un arbitrage entre coût d'investissement et d'utilisation, qui dépend du prix des énergies et de l'intensité de la contrainte-carbone mise en place.

#### 3.3.1. Les énergies renouvelables

Nous présentons la part de l'électricité produite à partir des énergies renouvelables, en distinguant la biomasse des autres renouvelables. Selon le niveau de l'offre totale d'électricité, cette part peut correspondre à une quantité d'électricité produite assez différente. C'est pourquoi nous présentons, dans un premier temps, l'offre totale d'électricité en Europe (graphiques 27 et 28). Dans les scénarios sans politique climatique, l'offre d'électricité est très variable : en 2077, certains scénarios se caractérisent par une quantité inférieure à ce qu'elle était en 2001, et d'autres par une offre 2,5 fois plus importante que son niveau en 2001. Malgré cette grande variabilité, on peut voir une évolution similaire dans la majorité des scénarios : une première période marquée par une baisse, plus ou moins forte, de l'offre d'électricité, suivie par une hausse continue.

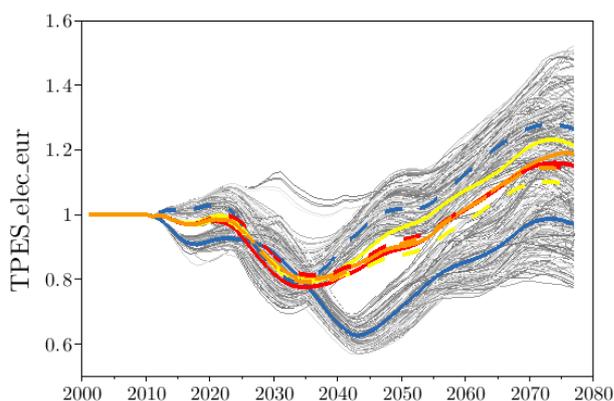
**Graphiques 27 et 28 – Offre totale d'électricité en Europe dans les scénarios sans et avec politique climatique**



Avec la mise en œuvre des politiques climatiques, différentes forces jouent sur la demande d'électricité : certaines tendent à la réduire, comme l'amélioration de l'efficacité énergétique ; d'autres à l'augmenter, comme le déploiement des véhicules électriques. Ainsi, lorsque les technologies sobres en carbone sont fortement disponibles, et notamment les véhicules électriques, l'offre totale d'électricité sera plus importante que si ces technologies étaient moins disponibles.

Les hypothèses sur l'efficacité énergétique induite expliquent également une grande partie de la variabilité : lorsqu'elle est faible, l'offre d'électricité est plus importante. C'est un résultat attendu. En revanche, les hypothèses sur le charbon ne sont pas discriminantes.

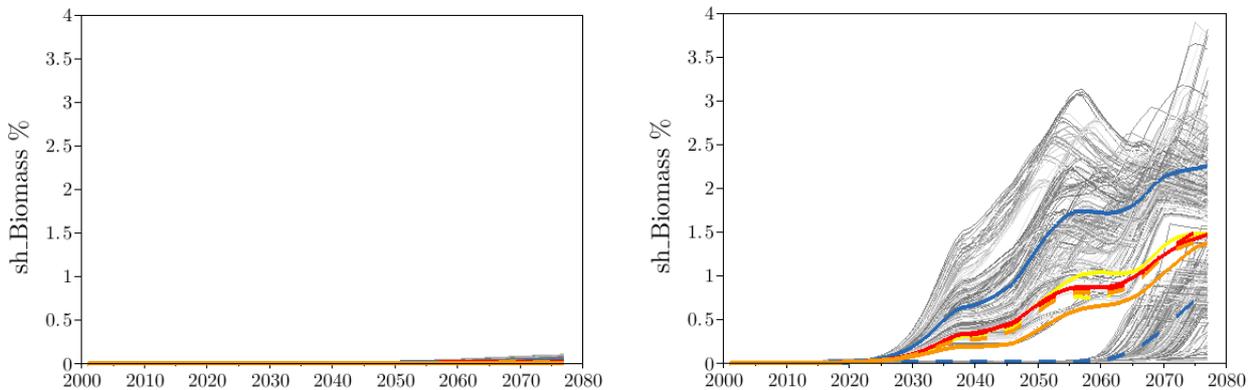
### **Graphique 29 –Ratio entre l'offre totale d'électricité en Europe dans les scénarios avec et sans politique climatique**



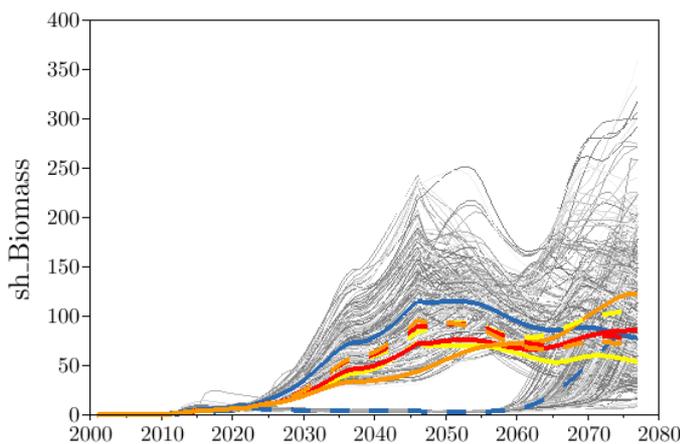
Les graphiques de 30 à 36 donnent les parts d'électricité obtenus à partir de biomasse, d'une part, et d'énergies renouvelables, hors biomasse et hydraulique, d'autre part.

Sans politique climatique, le recours à la biomasse reste très limité en Europe. En revanche, la production d'électricité à partir de biomasse est boostée par les politiques climatiques, en particulier lorsque les technologies sobres en carbone sont peu disponibles. Sous l'hypothèse inverse, la biomasse n'est pas vraiment mobilisée avant 2060 car, comme le montre le graphique 34, le secteur de production de l'électricité se tourne fortement vers les autres énergies renouvelables. En effet, les politiques climatiques vont conduire à solliciter beaucoup les énergies renouvelables (hors biomasse et hydraulique) quand ces dernières sont disponibles.

**Graphiques30 et 31- Proportion de l'électricité produite à partir de biomasse en Europe dans les scénarios sans et avec politique climatique**

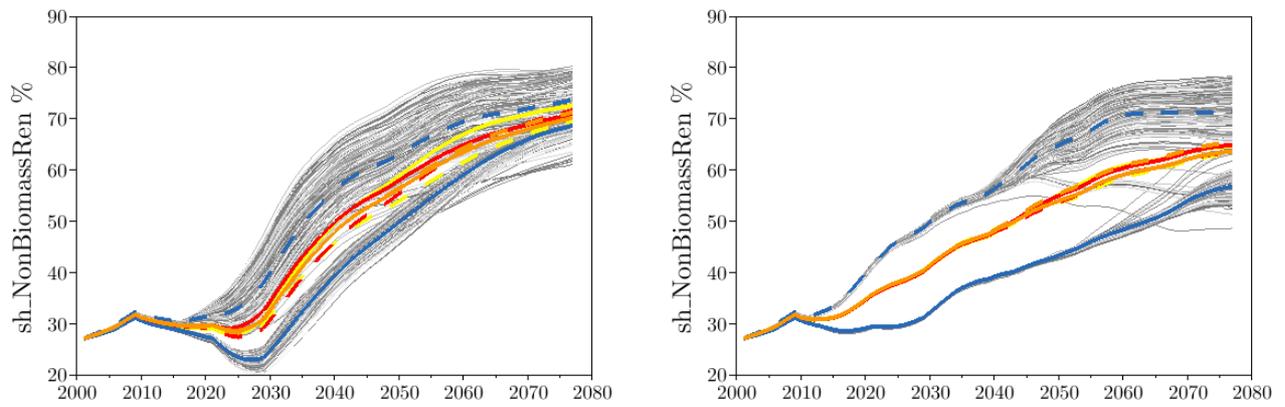


**Graphique 32 –Ratio entre la part de l'électricité produite à partir de biomasse en Europe dans les scénarios avec et sans politique climatique**

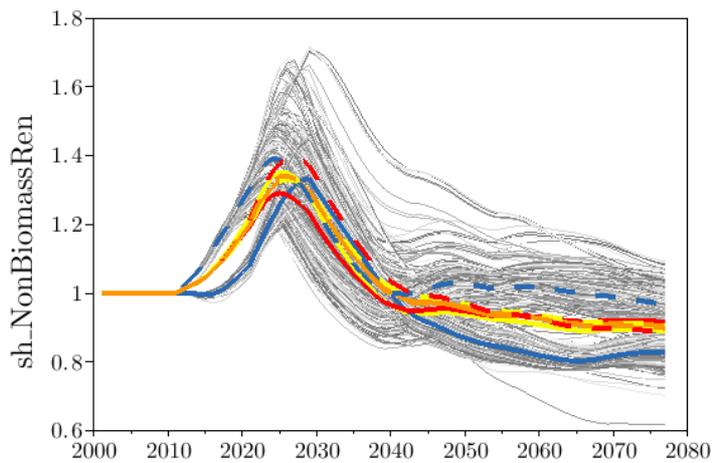


Sur le graphique 35, un résultat peut paraître surprenant car, après 2040, la part de l'électricité produite à partir de renouvelables dans les scénarios de référence n'est pas beaucoup plus basse, et peut même être plus forte, que dans les scénarios avec politiques climatiques. L'explication vient de l'utilisation de plus en plus importante de la technologie CSC, à partir de 2040, du fait de la mise en œuvre des politiques climatiques. Cette dernière technologie n'est en revanche pas utilisée lorsqu'il n'y a pas de politique climatique.

**Graphiques 33 et 34- Proportion de l'électricité produite à partir de renouvelables (hors biomasse et hydraulique) en Europe dans les scénarios sans et avec politique climatique**



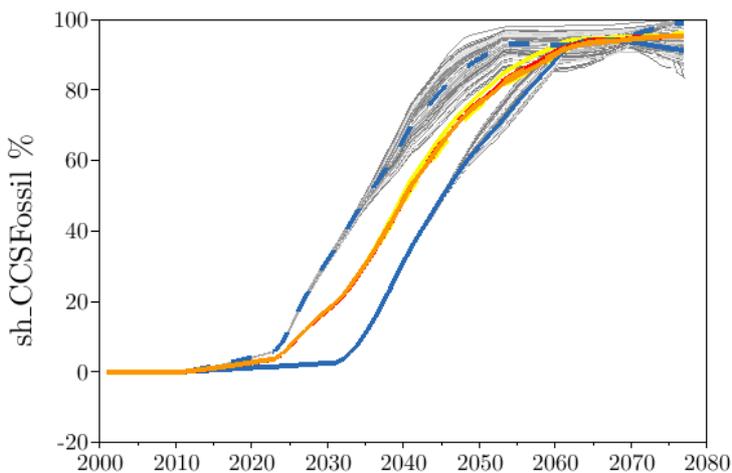
**Graphique 35 –Ratio entre la part de l'électricité produite à partir de renouvelables (hors biomasse et hydraulique) en Europe dans les scénarios avec et sans politique climatique**



### 3.3.2. La technologie de capture et de stockage du carbone (CCS)

Le graphique 36 présente la part d'électricité produite à partir de combustibles fossiles avec la technologie CCS dans les scénarios avec politiques climatiques. Dans les scénarios de référence, il n'y a pas de CSC.

**Graphique 36 – Part d'électricité produite à partir de combustibles fossiles avec la technologie CCS dans les scénarios avec politiques climatiques**



A partir de 2025-2030, le parc de production électrique s'équipe massivement de cette technologie, et ce quel que soit le jeu d'hypothèses considéré. Même sous l'hypothèse d'une faible disponibilité des technologies sobres en carbone, la diffusion de la CSC est rapide. A partir de 2050, quel que soit le scénario, plus de 70% de la production d'électricité à partir de combustibles fossiles se fait à partir d'installations équipées de la technologie CSC.

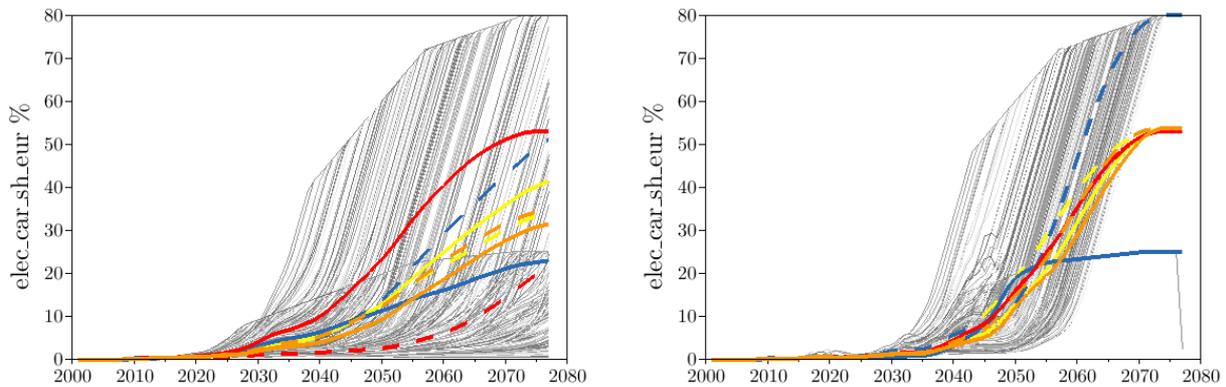
### 3.3.3. Les véhicules électriques

Le graphique 37 présente la part de véhicules électriques dans les flottes européennes lorsque les émissions mondiales ne sont pas plafonnées. Même sans politique climatique, la diffusion de la technologie est importante dans certains scénarios, notamment lorsque le charbon est peu abondant et la technologie de liquéfaction peu disponible. Sous l'hypothèse inverse, la technologie est alors largement moins mobilisée, la substitution au pétrole se faisant plutôt avec du charbon liquéfié. Ainsi, certains scénarios continuent à exhiber des parts très faibles de véhicules électriques jusqu'à la fin de la période considérée.

Comme le montre le graphique 38, les politiques climatiques imposent de ne plus substituer du charbon au pétrole, de sorte que les véhicules électriques sont maintenant mobilisés dans tous les scénarios, même

lorsque les technologies sobres en carbone sont peu disponibles. Sous cette dernière hypothèse, la part de marché maximale de la technologie (25%) est atteinte dès 2050 (voir l'annexe 1).

### Graphiques 37 et 38 – Proportion de véhicules électriques en Europe dans les scénarios de référence et les scénarios avec politiques climatiques



## Conclusion

Ce rapport propose une méthodologie pour analyser les conséquences des politiques climatiques sur la sécurité énergétique, en tenant compte de la nature polysémique du concept et de la grande incertitude sur les déterminants des évolutions des systèmes énergétiques futurs.

En se concentrant sur l'Europe, les résultats mettent en évidence deux messages. Tout d'abord, l'effet de la politique climatique sur les indicateurs de sécurité énergétique dépend de l'horizon de temps considéré. Ensuite, il n'y a pas conclusion univoque car la politique climatique peut améliorer certains indicateurs et en dégrader d'autres. Les décideurs doivent donc bien comprendre que la sécurité énergétique revêt plusieurs dimensions, dont certaines peuvent être aggravées par la politique climatique. Il est néanmoins possible d'identifier les contradictions entre l'objectif des politiques climatiques et celui des politiques de sécurité énergétique, et indiquer quand des politiques complémentaires peuvent être nécessaires pour concilier les deux objectifs. En particulier, nos résultats mettent en évidence le risque de détérioration de la dimension « coût de l'énergie pour la société » de la sécurité énergétique sur le court terme. Des mesures ciblées pour les ménages modestes, par exemple pourraient alors être envisagées.

## Références

- Böhringer, C. et A. Keller, 2011. Energy Security : An Impact Assessment of the EU Climate and Energy Package, University of Oldenburg, working paper V-355-11, May.
- Chester, L., 2010. Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature. *Energy policy*, 38 (2), 887-895.
- EC (European Commission), 2001. Towards an European strategy for the security of energy supply. Green Paper of the European Commission, Brussels, Belgium.
- Hartley, P.R. et K.B. Medlock, 2008. Climate policy and energy security: two sides of the same coin?, James A. Baker Institute for Public Policy, Rice University.
- Hartley, P. R., 2008. Climate policy and energy security: two sides of the same coin? Ph.D. thesis, Department of economics, Rice University.
- Kruyt, B., Van Vuuren, D. P., De Vries, H. J. M., Groenenberg, H., 2009. Indicators for energy security. *Energy Policy*, 37 (6), 2166-2181.
- Nadaï, A., 2007. Planning, Siting and the local Acceptance of Wind Power : Some Lessons from the French Case. *Energy Policy*, 35, 2715–2726.
- NEA (Nuclear Energy Agency), 2010. The security of Energy Supply and the Contribution of Nuclear Energy, OECD, Paris.
- Rozenberg, J., Hallegatte, S., Vogt-Schilb, A., Sassi, O., Guivarch, C., Waisman, H., Hourcade, J., 2010. Climate policies as a hedge against the uncertainty on future oil supply. *Climatic Change* 101 (3), 663-668. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-010-9868-8>
- Schlesinger R., 1989. Energy and geopolitics in the 21st century, communication à la Conférence mondiale de l'Énergie, 14e Congrès, Montréal.
- Solow, R. M., 1956. A contribution to the theory of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 65-94.
- Sovacool, B. K., Brown, M. A., 2010. Competing dimensions of energy security: An international perspective. *Annual Review of Environment and Resources* 35, 77-108.

# Annexe 1. Hypothèses sur les paramètres

## Croissance du PIB

En cohérence avec les hypothèses adoptées dans les SSP, nous construisons des jeux d'hypothèses portant sur la croissance de la population des pays à bas revenus et des pays à hauts revenus, de la croissance de la productivité du leader, et de la vitesse de rattrapage des pays à bas revenus. Les tableaux A et B présentent les hypothèses qui ont été utilisées pour ces paramètres.

**Tableau A- Hypothèses sur la croissance de la productivité du travail du leader et de la population des pays à hauts revenus (données de population disponibles à <https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb>)**

	Option 1	Option 2	Option 3
<b>Croissance de la productivité du leader</b>	faible	Moyenne	Forte
<b>Croissance de la population</b>	SSP3	SSP2	SSP5

**Tableau B – Hypothèses sur la vitesse de rattrapage et la croissance de la population des pays à bas revenus (données de population disponibles à <https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb>)**

	Option 1	Option 2	Option 3
<b>Temps de rattrapage (en années)</b>	300	200	150
<b>Croissance de la population</b>	SSP3	SSP2	SSP5

## Efficacité énergétique induite

Dans chaque secteur, le pays avec l'intensité énergétique la plus faible est le leader et l'amélioration de son efficacité énergétique dépend des prix des énergies. Les autres pays rattrapent le leader avec un certain retard. Nous construisons trois hypothèses (voir tableau C) en utilisant les paramètres suivants : le taux d'amélioration annuel maximal du leader (en termes d'efficacité énergétique), la vitesse de convergence des autres pays (% de l'écart initial après 50 ans) et le niveau asymptotique de rattrapage (% de l'efficacité énergétique du leader).

**Tableau C – Hypothèses sur les paramètres d'efficacité énergétique**

	Option 1	Option 2	Option 3
<b>Taux d'amélioration annuel maximal du leader (%)</b>	1,5	0,7	1,5 pour les pays de l'OCDE ; 0,7 pour les autres pays
<b>Vitesse de convergence des autres pays (% de l'écart initial après 50 ans)</b>	10	50	10 pour les pays de l'OCDE ; 50 pour les autres
<b>Niveau asymptotique du rattrapage (% de l'efficacité énergétique du leader)</b>	95	60	95 pour les pays de l'OCDE ; 60 pour les autres

## Comportements

Pour les comportements, nous supposons deux jeux d'hypothèses sur les paramètres qui décrivent la consommation de transports, de logements et de biens industriels des ménages et le contenu en fret de la croissance économique.

**Tableau D – Hypothèses sur les paramètres de comportement**

		<b>Option 1</b>	<b>Option 2</b>
<b>Transports</b>	Elasticité du taux de motorisation par rapport au PIB par tête	Valeurs tirées des données de l'agence internationale de l'énergie (Fulton et Eads, 2004)	Augmentation de 50% des valeurs de l'option 1
<b>Bâtiments</b>	Elasticité revenu de la croissance du stock de bâtiments	0,7	1
	Asymptote de la surface par tête en Chine et en Inde	40	60
	Année de démarrage et prix du combustible pour une baisse contrainte de la consommation de pétrole dans ce secteur	2010/1000\$/tep	2020/1300\$/tep
<b>Biens industriels</b>	Niveau de saturation de la consommation de biens industriels par les ménages [min-max]	[1-2]	[1,5-3]
<b>Contenu en fret de la croissance économique</b>	Coefficient du transport de transport par unité de bien produit	Décroissance avec la croissance de la productivité du travail dans le secteur du bien composite et avec l'efficacité énergétique dans le secteur industriel	Constant dans tous les secteurs

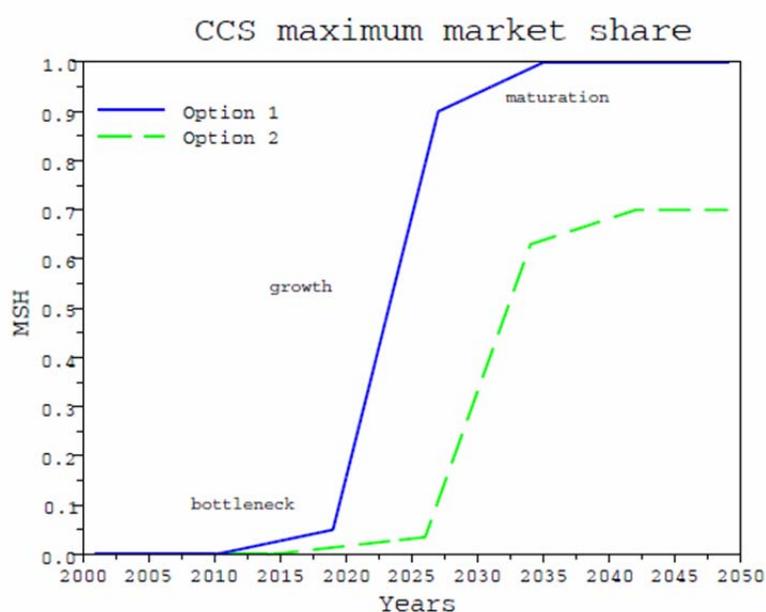
## Disponibilité des technologies sobres en carbone

IMACLIM-R distingue trois phases différentes lors de la diffusion des technologies sobres en carbone : une première période durant laquelle la technologie est exploitée sur un marché de « niche », ensuite une période de croissance, et finalement une période de maturation. A la fin de la période de maturation, on suppose que la technologie ne peut pas représenter plus qu'une certaine part de marché, qui est un paramètre du modèle (voir le tableau E). Par ailleurs, pour les deux premières phases, on suppose que la technologie ne peut représenter au maximum qu'un certain % de cette part maximale : 5% à la fin de la phase « niche » et 90% à la fin de la période « croissance ».

**Tableau E – Hypothèses sur les paramètres de diffusion des technologies sobres en carbone**

	Nucléaire (nouvelle génération)		Energies renouvelables		CCS		Véhicules électriques	
	Option 1	Option 2	Option 1	Option 2	Option 1	Option 2	Option 1	Option 2
<b>Date de démarrage</b>	2001		2001	2001	2010	2014	2010	2010
<b>Phase « niche » (ans)</b>	15		2	3	13	17	6	6
<b>Phase de croissance (ans)</b>	75		20	65	8	8	40	40
<b>Phase de maturation (ans)</b>	25		15	25	8	8	16	16
<b>Part de marché maximale à la fin de la phase de maturation (%)</b>	30	0	60	50	80	30	80	25

Le graphique suivant illustre les deux options considérées pour la diffusion de la technologie de la CSC :



## Prix du charbon et disponibilité des technologies de liquéfaction du charbon

A la différence des marchés du pétrole et du gaz, la production cumulée de charbon a une influence faible sur les prix du charbon du fait de ressources mondiales considérables. Les prix du charbon dépendent donc de la production courante (élasticité de la croissance du prix par rapport aux variations de production) : un marché du charbon tendu correspond à une forte élasticité.

**Tableau F – Hypothèses sur les paramètres influençant le prix du charbon et l'utilisation des technologies de liquéfaction du charbon**

		<b>Option 1</b>	<b>Option 2</b>
<b>Charbon</b>	Elasticité de la croissance du prix par rapport aux variations de production	2	1,5
<b>Technologies de liquéfaction</b>	Marge appliquée au coût de production dans l'équation de prix	0,4	0,3
	Ratio entre le coût du capital et le coût du charbon dans l'année de calibration	1,5	1

## Rigidités sur le marché du travail

Dans IMACLIM-R, nous supposons que le marché du travail est imparfait. Notamment, les salaires ne sont pas complètement flexibles : les rigidités salariales sont liées aux contrats de travail, le pouvoir des syndicats, les lois sur le salaire minimum,...

Les imperfections sur le marché du travail sont représentées par l'intermédiaire d'une courbe des salaires qui lie les niveaux de salaire réel au taux de chômage. Cette représentation est fondée sur les théories développées dans les années 1980 et au début des années 1990. Dans le modèle, le taux de salaire horaire,  $w/p$ , est lié au taux de chômage,  $z$ , par l'équation suivante :  $w/p = a \cdot z^{-\alpha}$  où  $\alpha$  est l'élasticité de la courbe des salaires.

Le taux de chômage,  $z$ , ou plus précisément le niveau de sous-utilisation de la force de travail, est donné par :  $z = 1 - (I \cdot Q) / L$ , où  $Q$  est la production totale et  $L$  l'offre de travail totale.

L'élasticité de la courbe des salaires est importante dans la réponse des économies à une augmentation des prix des énergies, car elle détermine l'équilibre entre l'ajustement de l'économie en prix (forte élasticité) et en quantités (faible élasticité). En d'autres termes, l'élasticité de la courbe des salaires représente la capacité à modérer la hausse des prix de production, suite à une augmentation des prix des énergies, en transférant une partie de cette augmentation en une baisse des salaires.

Pour tenir compte de l'incertitude sur le marché du travail des pays en développement, nous supposons deux valeurs possibles de l'élasticité de la courbe des salaires dans ces pays : soit 0,55, soit 2.

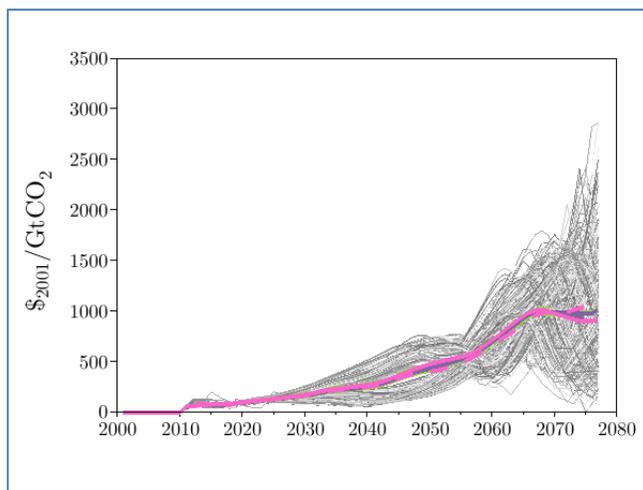
## Annexe 2. Graphiques présentant les hypothèses sur les autres déterminants

Nous avons représenté la moyenne des indicateurs pour les scénarios partageant la même hypothèse sur un jeu de paramètres :

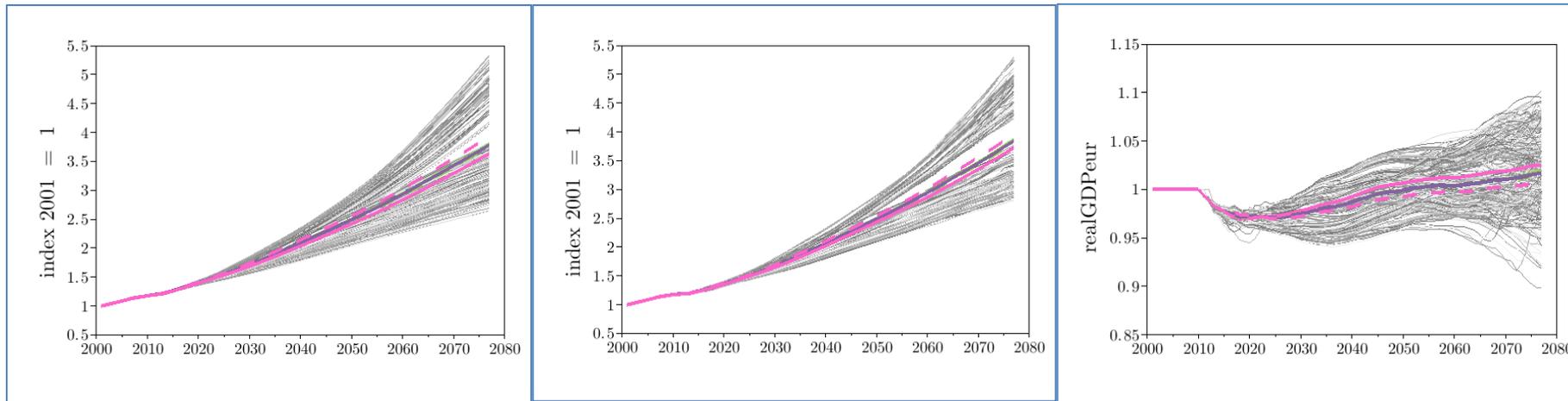
- Le trait continu (respectivement en pointillé) violet correspond à l'hypothèse d'une faible (respectivement forte) vitesse de rattrapage des pays à bas revenus.
- Le trait continu (respectivement en pointillé) rose correspond à l'hypothèse de faible (respectivement forte) consommation de transports, de logements et de biens industriels des ménages et à un faible (respectivement fort) contenu en fret de la croissance économique.
- Le trait continu (respectivement en pointillé) vert correspond à l'hypothèse de faibles (respectivement fortes) rigidités sur le marché du travail des pays en développement.

Pour la majorité des indicateurs, nous présentons trois graphiques : le premier présente l'indicateur dans les scénarios sans politique climatique, le deuxième dans les scénarios avec politiques climatiques et le troisième le ratio entre les valeurs de l'indicateur dans les scénarios avec et sans politique climatique.

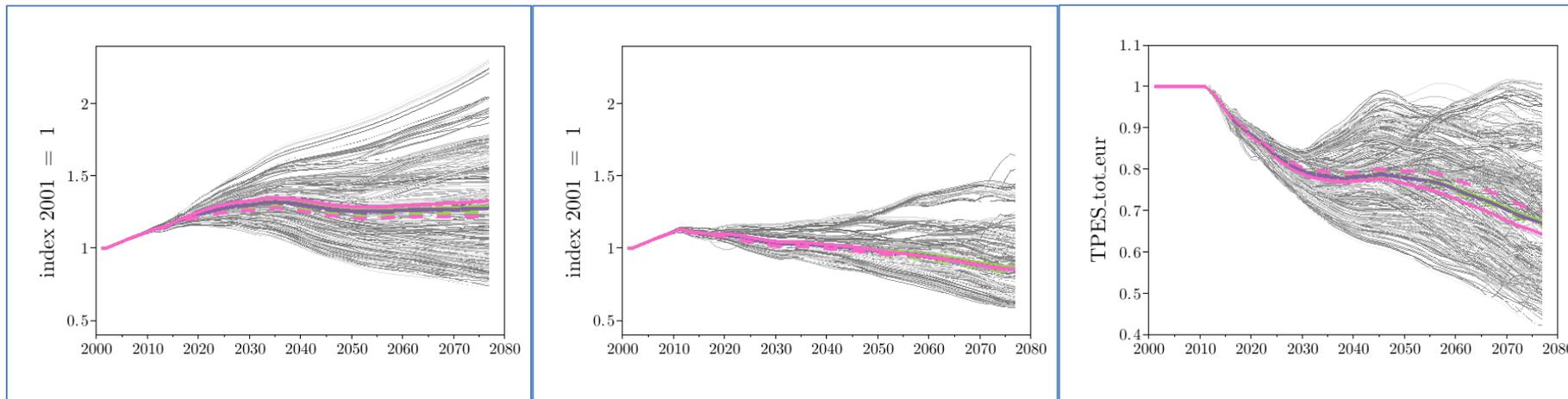
### Taxe carbone (USD2001/tCO<sub>2</sub>)



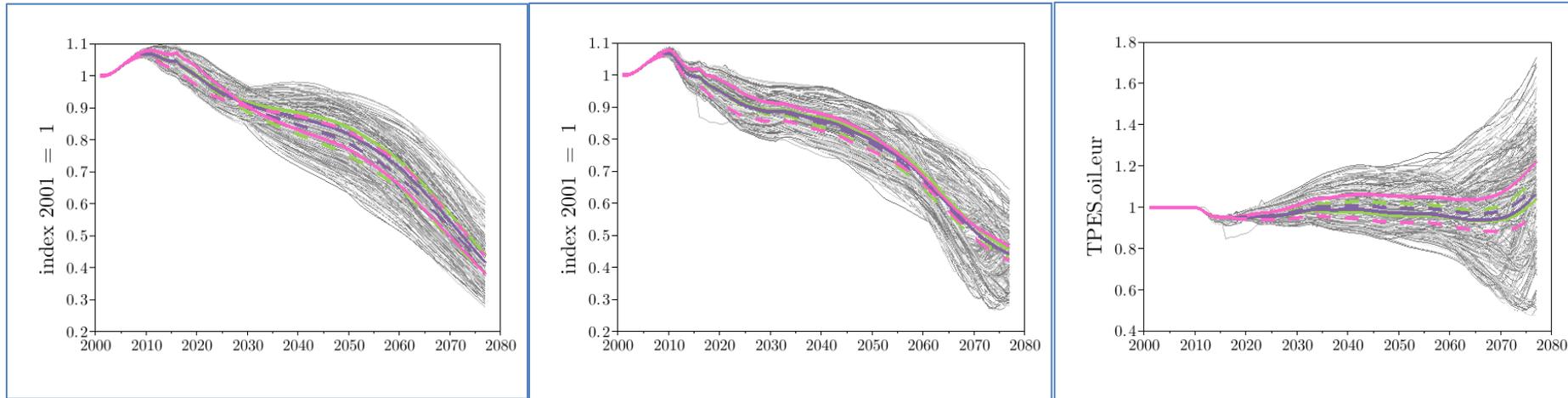
## Croissance du PIB de l'Europe



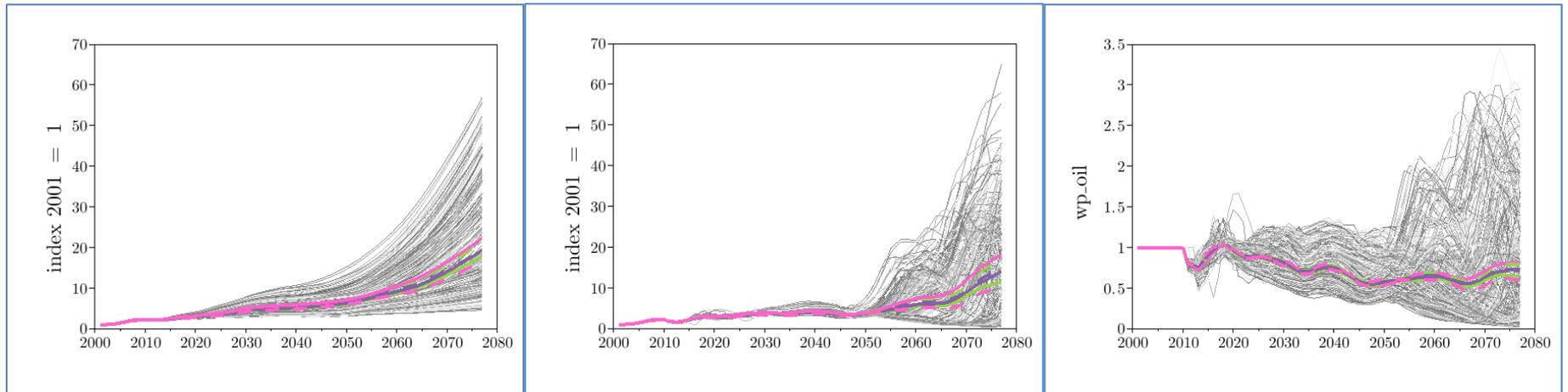
## Offre totale d'énergie primaire



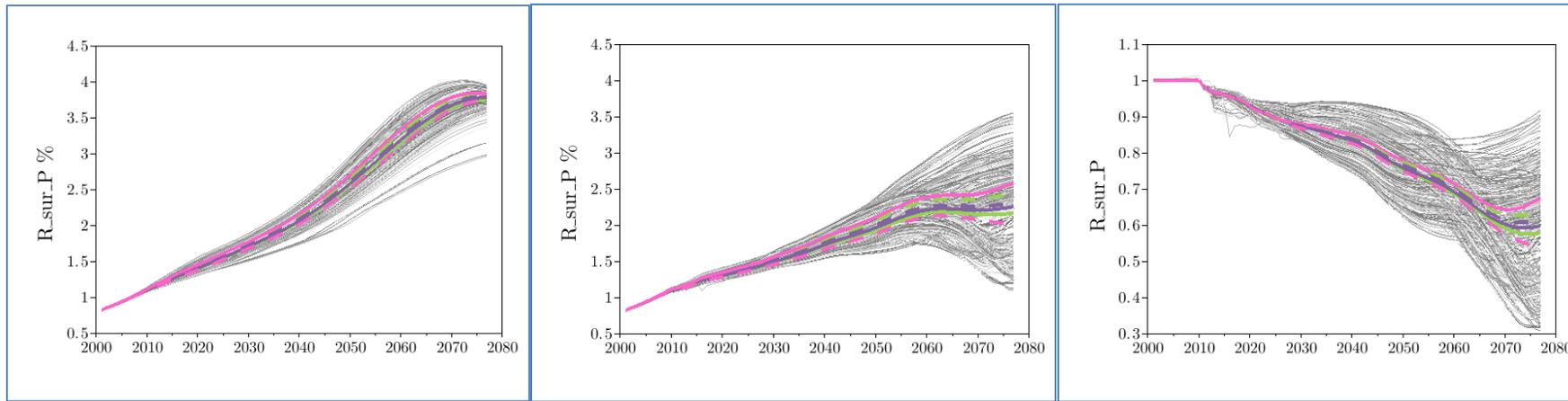
## Offre totale de pétrole en Europe



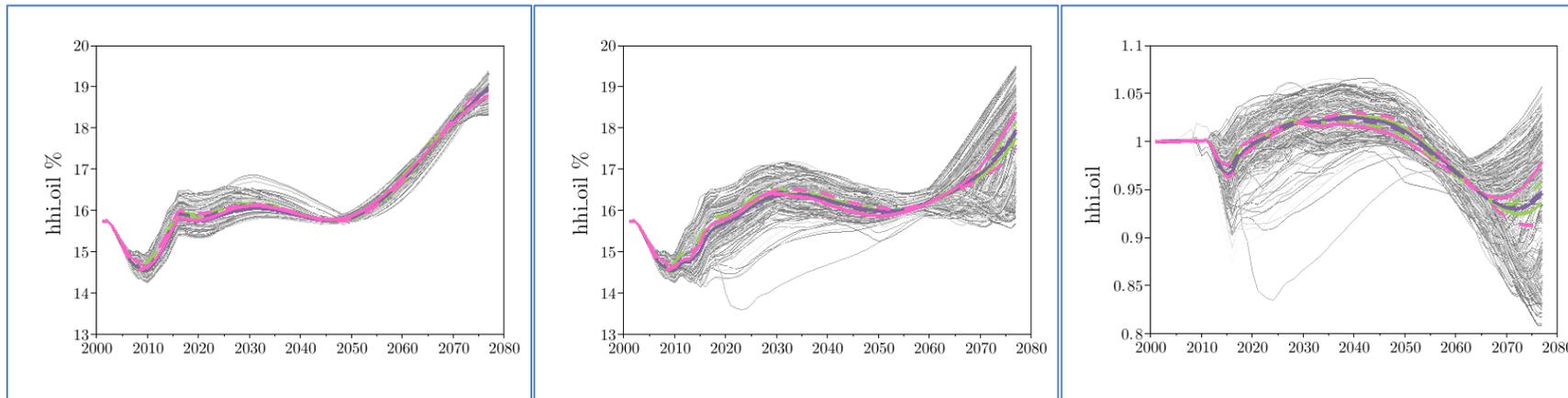
## Prix mondial du pétrole



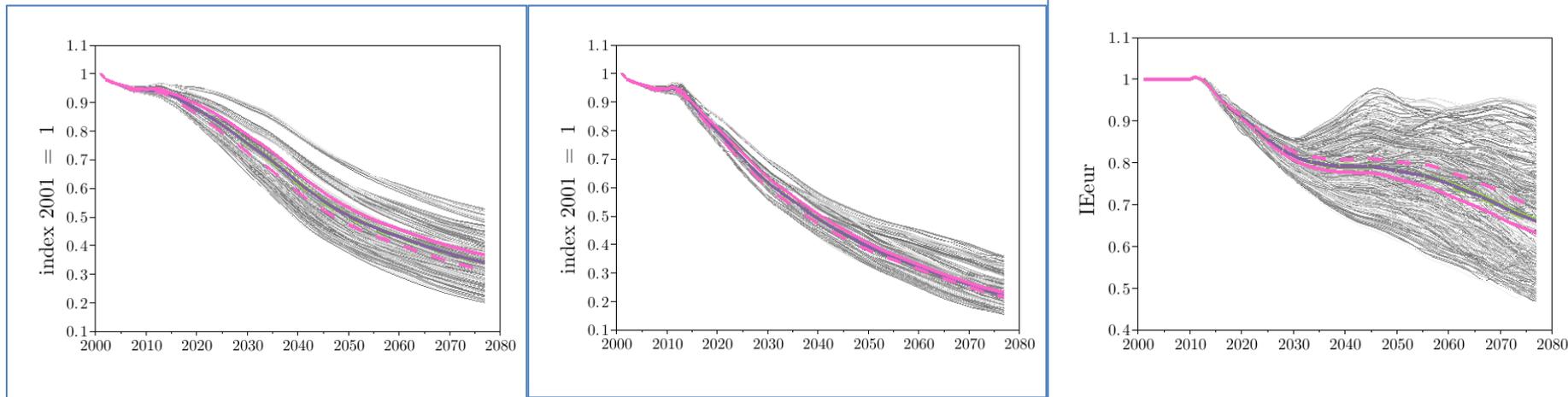
## Production de pétrole sur ressources



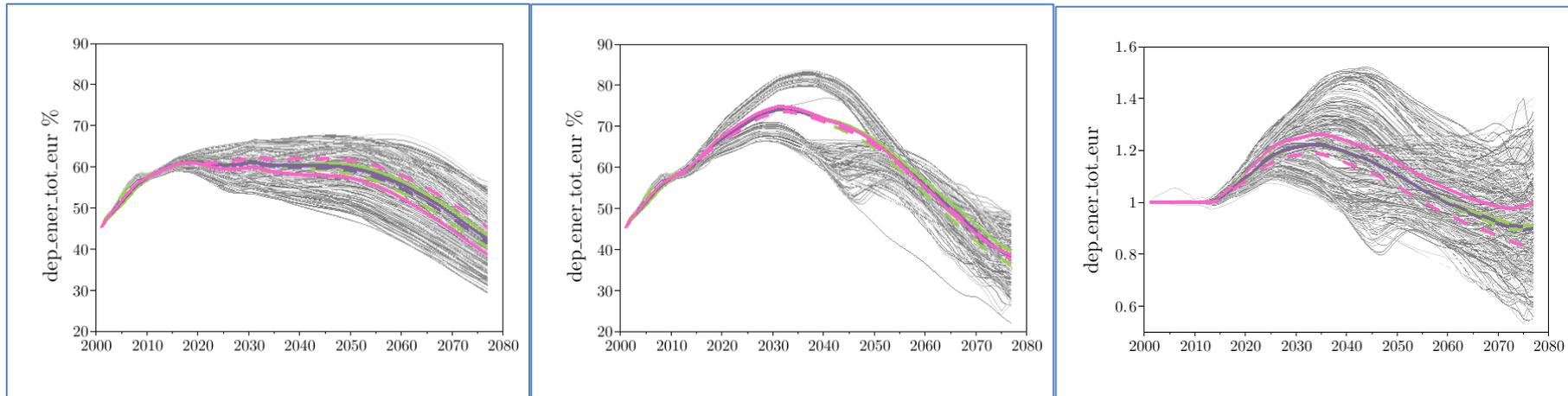
## Indice de concentration des importations de pétrole



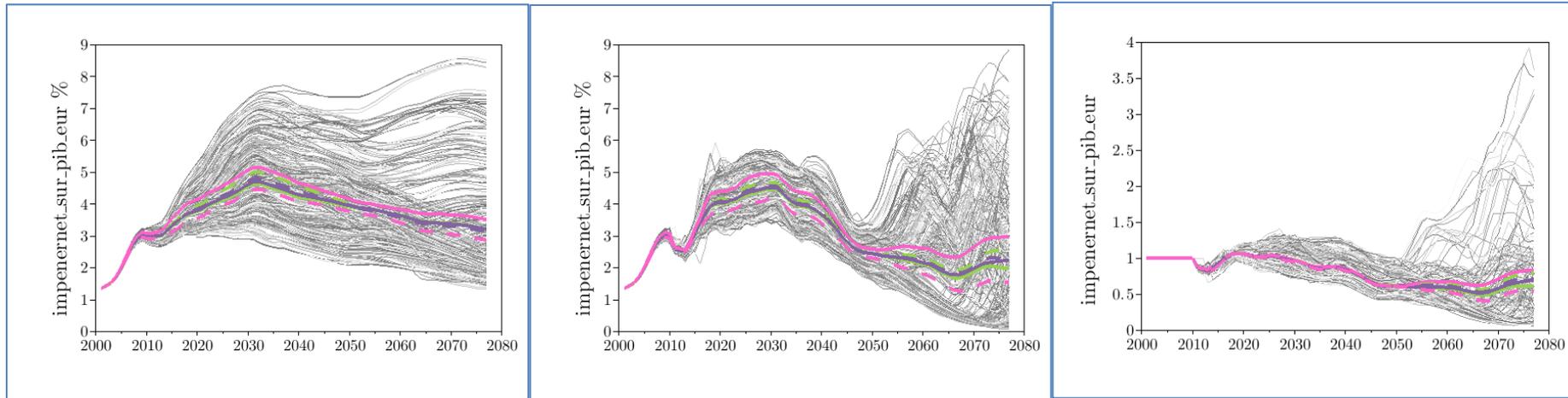
## Intensité énergétique du PIB



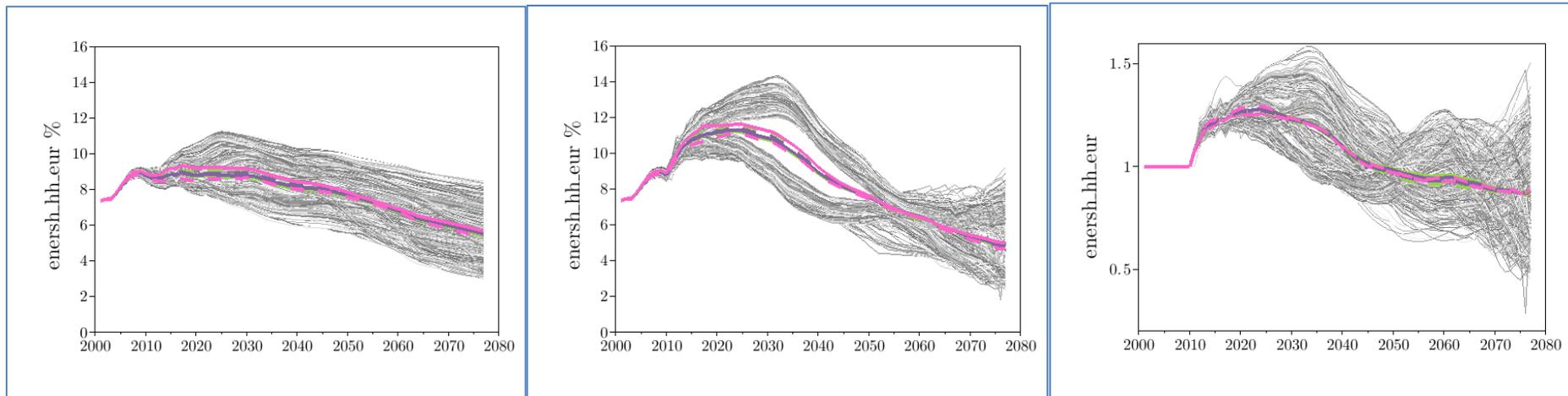
## Taux de dépendance énergétique



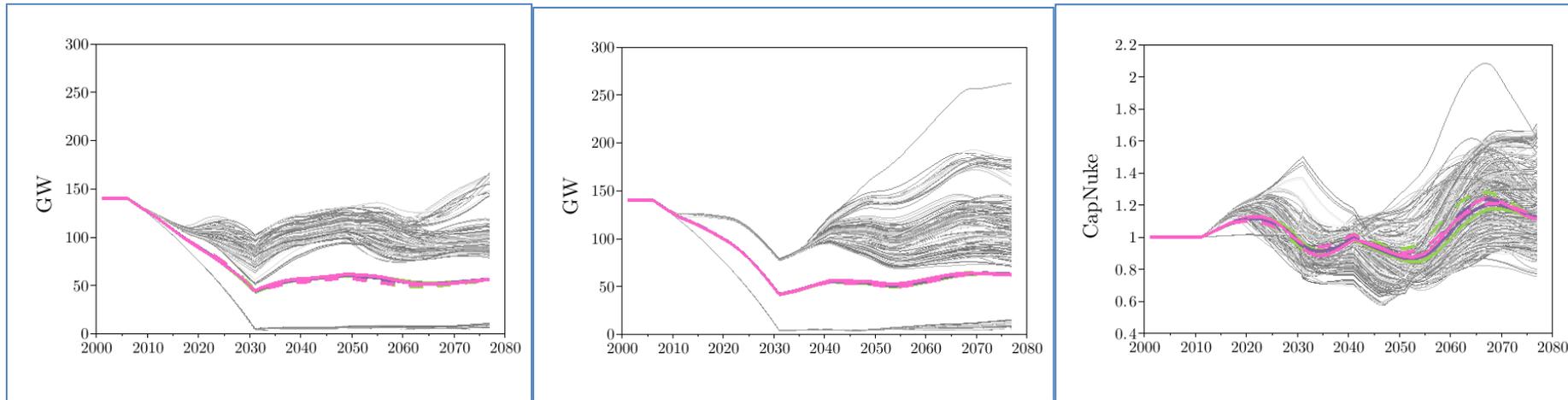
## Facture des importations d'énergie (importations d'énergie sur PIB)



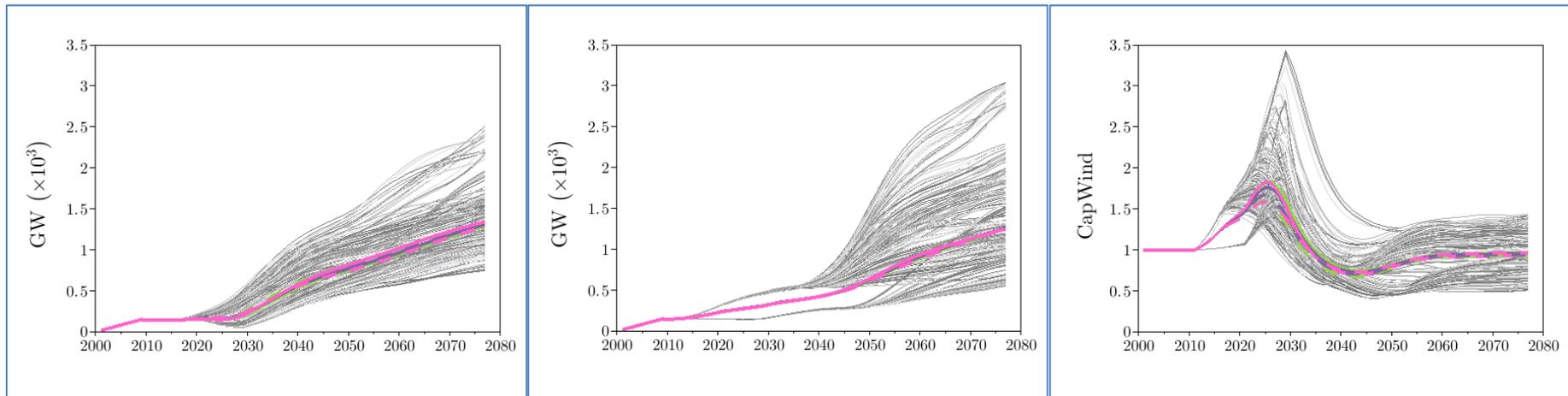
## Part du budget des ménages consacrée à l'achat d'énergie



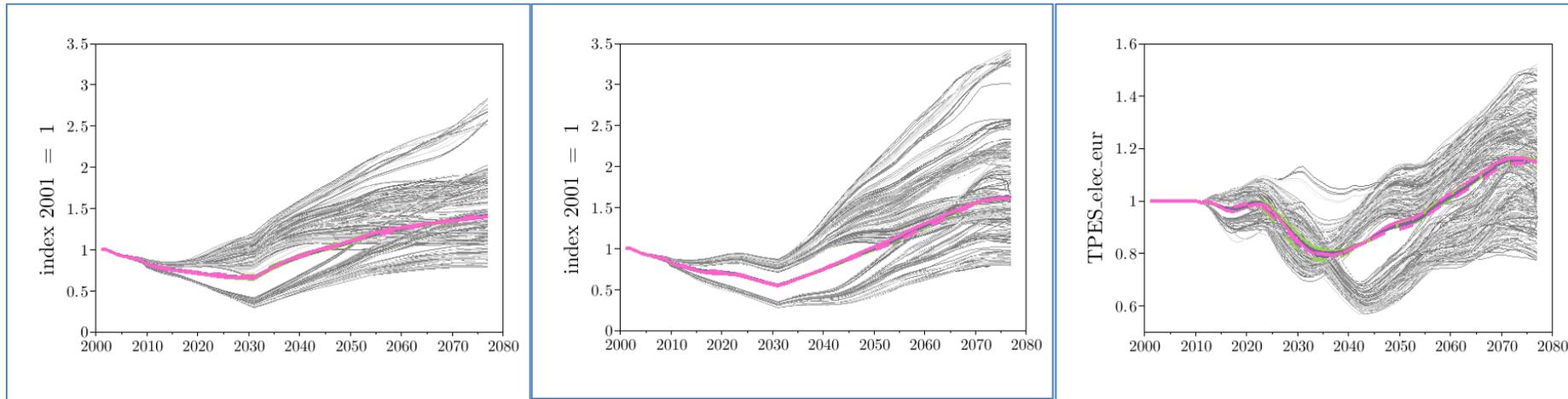
## Capacités nucléaires installées en Europe



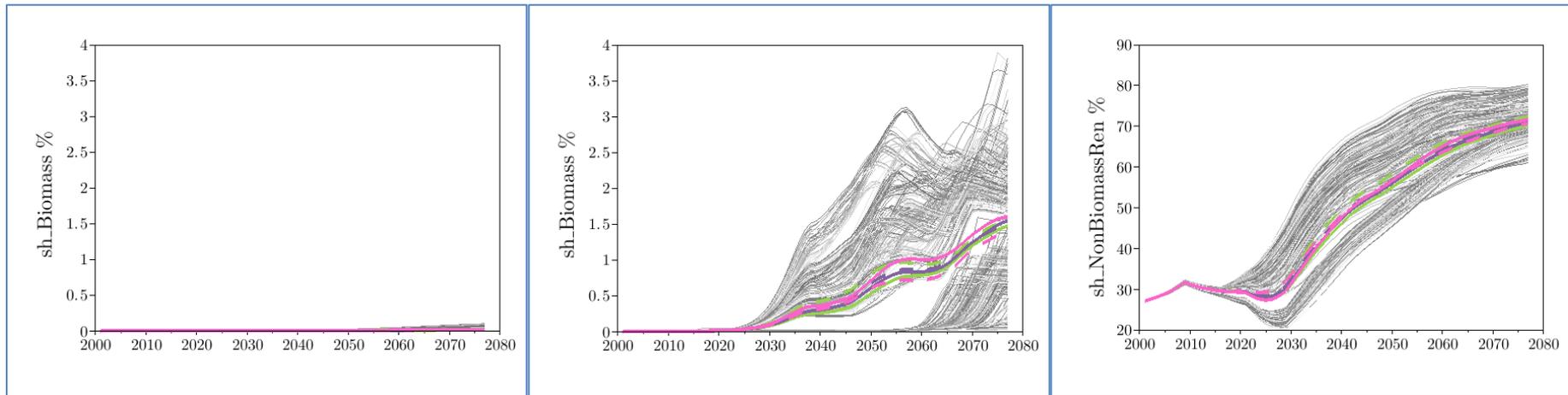
## Capacités éoliennes installées en Europe



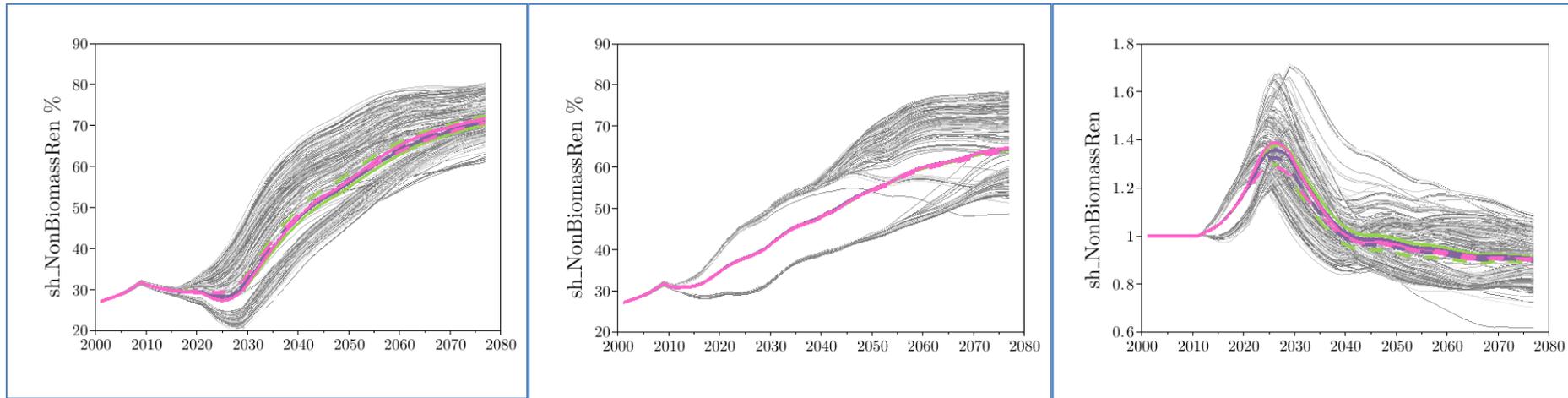
## Production d'électricité en Europe



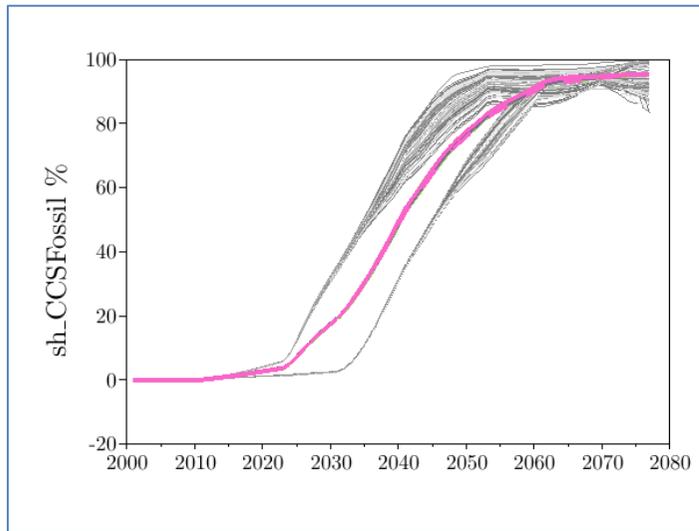
## Proportion de l'électricité produite à partir de biomasse



### Proportion de l'électricité produite à partir de renouvelables (hors biomasse)



### Part de l'électricité produite à partir de combustibles fossiles avec la technologie CCS



## Proportion de véhicules électriques

