



Journée de la Chaire du 18 Décembre 2018



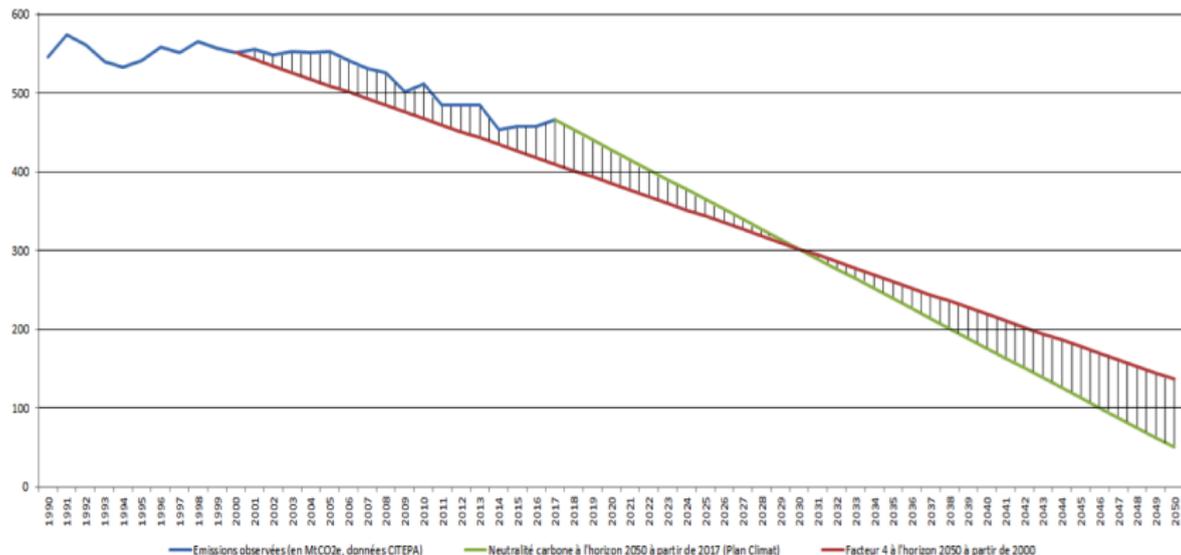
■ Le carbone, ses valeurs et les ambitions françaises de décarbonation

Nadia Maïzi

Centre de Mathématiques Appliquées MINES ParisTech/PSL Research University

Chaire Modélisation prospective au service du développement durable

Trajectoire souhaitée des émissions françaises à l'horizon 2050



Source B. Le Hir. France Stratégie 2018

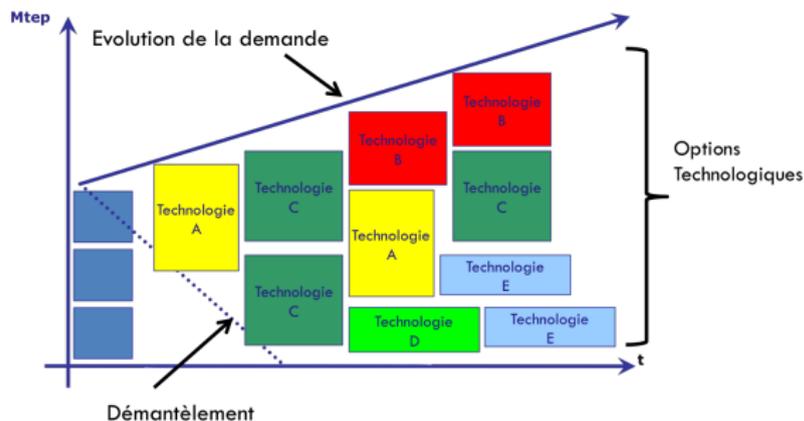
☞ Le modèle TIMES (The Integrated MarkAl (market allocation)-EFOM System)

1. à vocation **technologique**
2. modèle **ouvert**
3. développé dans le cadre de l'**ETSAP** :
Energy Technology Systems Analysis Programme de l'AIE
(depuis 1980)

Le CMA est le laboratoire de référence représentant la France depuis 2005

TIMES

- ▶ piloté par la **demande**
- ▶ horizon **50** à 100 ans
- ▶ **minimisation** du **coût** total actualisé



Evolution du système énergétique

Le **concept d'optimalité** selon lequel :
*un planificateur unique bienveillant sélectionne le panier de
meilleures solutions technologiques pour satisfaire une demande en
énergie*

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}} \mathbf{f}(\mathbf{x})$$

x variable de décision

X espace de contraintes

f objectif

Technologies



Politique



Modes de vie



- ▶ Solutions peu émissives en carbone
- ▶ Efficacité énergétique
- ▶ Solutions *intelligentes*
- ▶ Instruments de marchés
- ▶ Choix technologiques
- ▶ Choix de société
- ▶ Engagements climatiques nationaux et internationaux

TIMES comme **PRIMAL**

$$\min Z = \min cx \quad \text{sous les contraintes} \quad \begin{cases} Ax \leq b \\ x \geq 0 \end{cases}$$

avec A de dimension $m \times n$, les vecteurs x de dimension $n \times 1$, b de dimension $m \times 1$ et c de dimension $1 \times n$.

Le **lagrangien** est défini par la fonction

$$\mathcal{L}(x, y) = \sum_{i=1}^n c_i x_i - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_j a_{ji} x_i + \sum_{j=1}^m y_j b_j$$

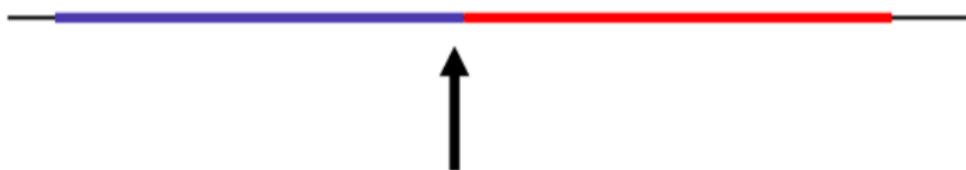
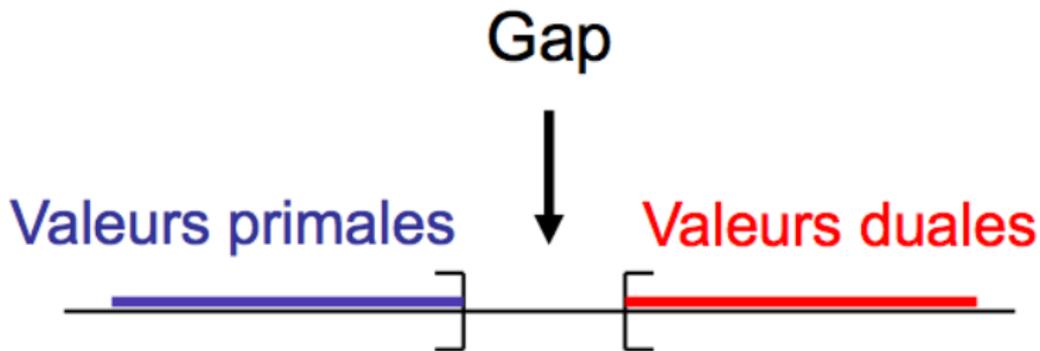
où $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ variables de décisions du PRIMAL et $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_m)$ sont les paramètres de lagrange (ou valeurs duales, variables de décision du **DUAL**).

Résoudre le problème PRIMAL, en vertu du théorème de forte dualité, c'est résoudre le problème d'optimisation :

$$\min_{x \geq 0} \max_{y \geq 0} \mathcal{L}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \max_{y \geq 0} \min_{x \geq 0} \mathcal{L}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$$

de façon explicite en se ramenant à un problème de PL, et à son dual:

où **min** – **max** est le Primal du PL où **max** – **min** est le Dual du PL



Pas de Gap

valeurs de l'objectif

Effet d'une variation à la marge sur une contrainte

Si un PL (standard) admet un optimum fini, il en est de même de son dual et on a

$$Z^* = \sum_{i=1}^n c_i x_i^* = \sum_{j=1}^m y_j^* b_j = z'^*$$

Si la solution optimale primale est non dégénérée (pas de variables de base nulle) alors l'expression de z'^* est unique et

$$\frac{\partial}{\partial b_j} z'^* = y_j^* = \frac{\partial}{\partial b_j} Z^*$$

Ceci signifie qu'une variation unitaire de la ressource b_j conduit à un nouvel optimum pour le problème Primal :

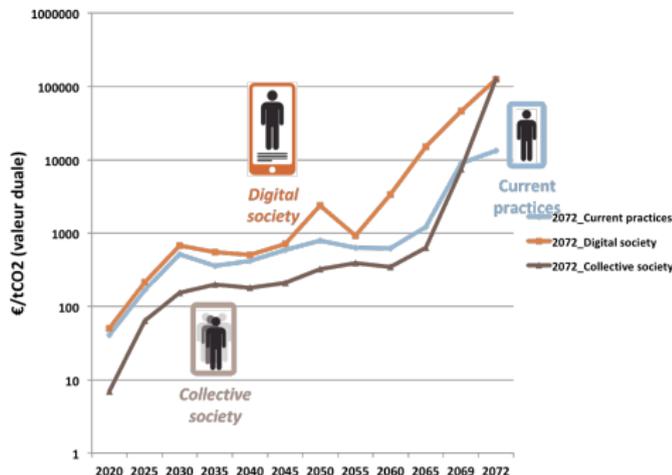
$$Z^* + y_j^*$$

y_j^* est le **prix marginal** de la ressource j à l'optimum. Les variables de décision associées à ce nouvel optimum (argument de l'optimum) varient.

- ▶ Variables en fonction des modes de vie
- ▶ Quel que soit le périmètre d'émissions considéré
- ▶ Egalement avec des hypothèses optimistes

Les leviers de décarbonation incluent
De nouvelles technologies (CCS ...)
Mais aussi une modification de la demande

- ▶ Planifiée (modes de vie)
- ▶ Forcée (élasticité)



Evolution du coût marginal de la contrainte

TIMES taxé à hauteur de la valeur duale \mathbf{y}^* : contrainte par les prix

$$\min_{x \geq 0} cx + \mathbf{y}^* Ax = \min_{x \geq 0} \sum_{i=1}^n c_i x_i - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_j^* a_{ji} x_i = Z^* - \sum_{j=1}^m y_j^* b_j$$

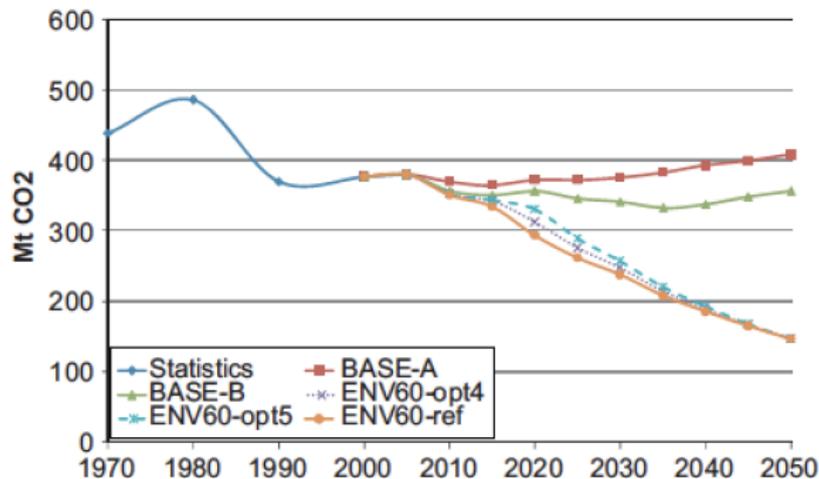
On retrouve

- ▶ la même trajectoire de décarbonation : équivalence avec le contrôle par les quantités
- ▶ la valeur de l'optimum taxé est celle du PRIMAL à une constante près $\mathbf{y}^* \mathbf{b}$ qui traduit le coût du contrôle par les prix
- ▶ le même argument \mathbf{x}^* du minimum : théorème de forte dualité

Approche coût/efficacité pour une trajectoire de décarbonation de la France d'ici 2050

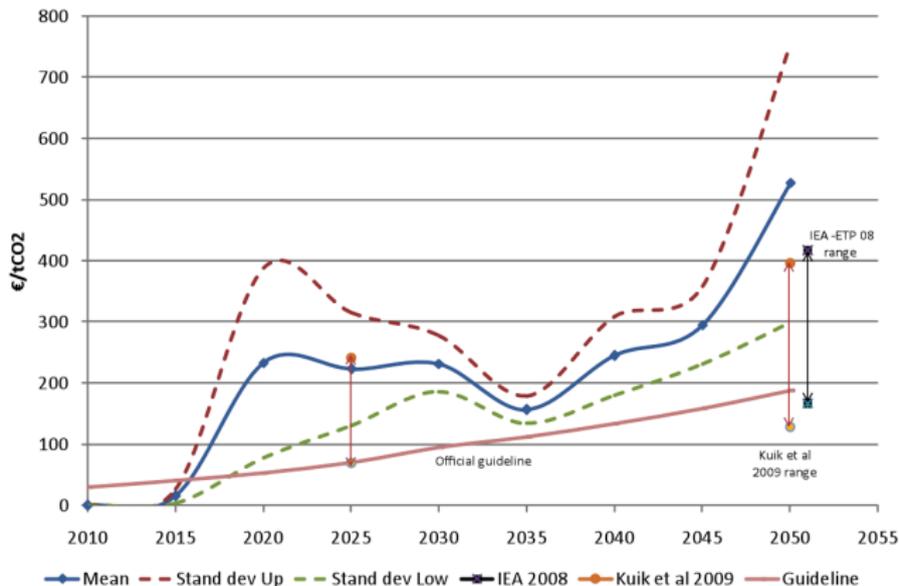
L'évaluation pour un jeu d'hypothèses pour le modèle TIMES-FR

- ▶ Nucléaire: 65 GW ou 98 GW
- ▶ CCS: 20 Mt ou 40Mt
- ▶ Possibilité d'importation de biocarburants
- ▶ Objectif intermédiaire à 2020: 20%, 15%, 10%
- ▶ Intensité des possibilités de réduction de la demande
- ▶ CO_2 d'origine énergétique
- ▶ Réduction de 60% en 2050

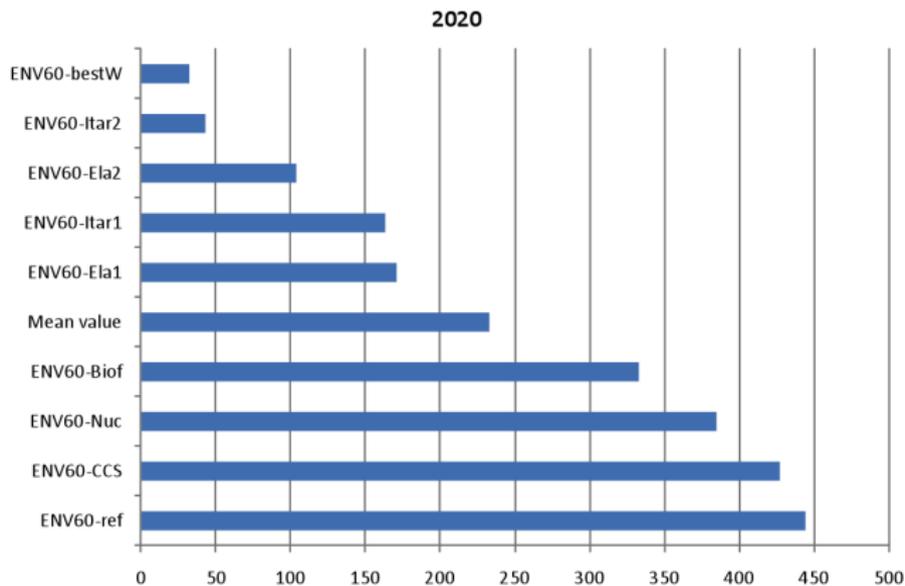


Evolution des émissions de CO2 du secteur énergétique en France

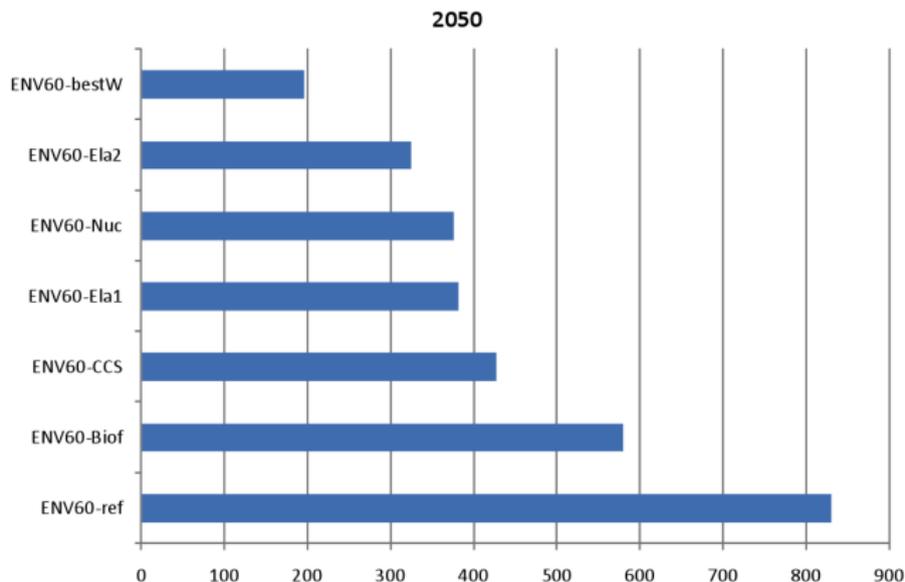
Valeur du carbone évaluée à partir de TIMES-FR



Positionnement relatif des valeurs issues l'ensemble des exercices

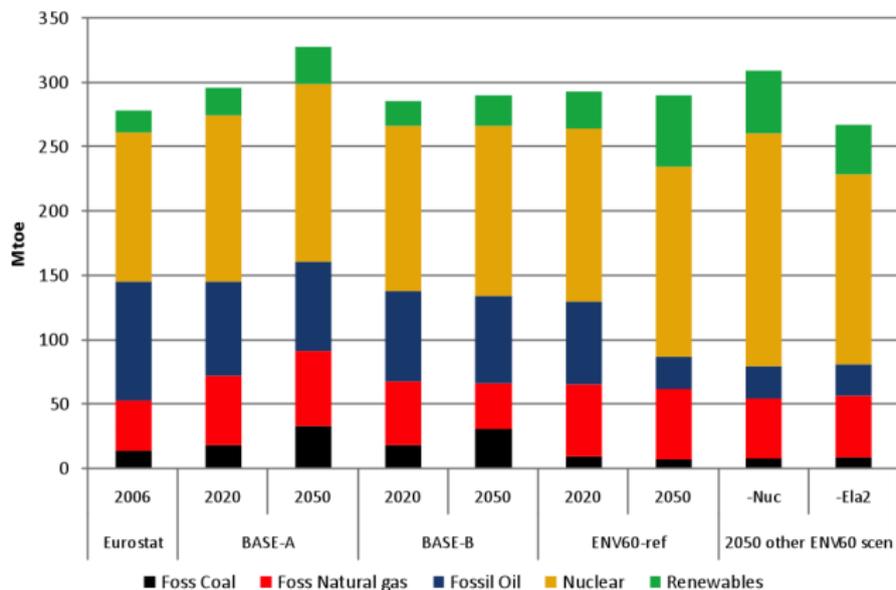


Valeurs du carbone en 2020 pour TIMES-FR

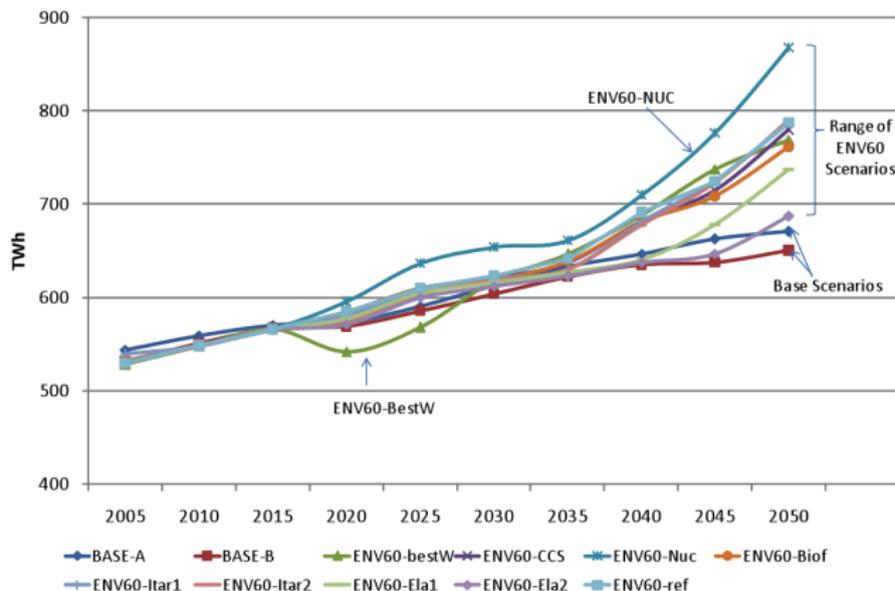


Valeurs du carbone en 2050 pour TIMES-FR

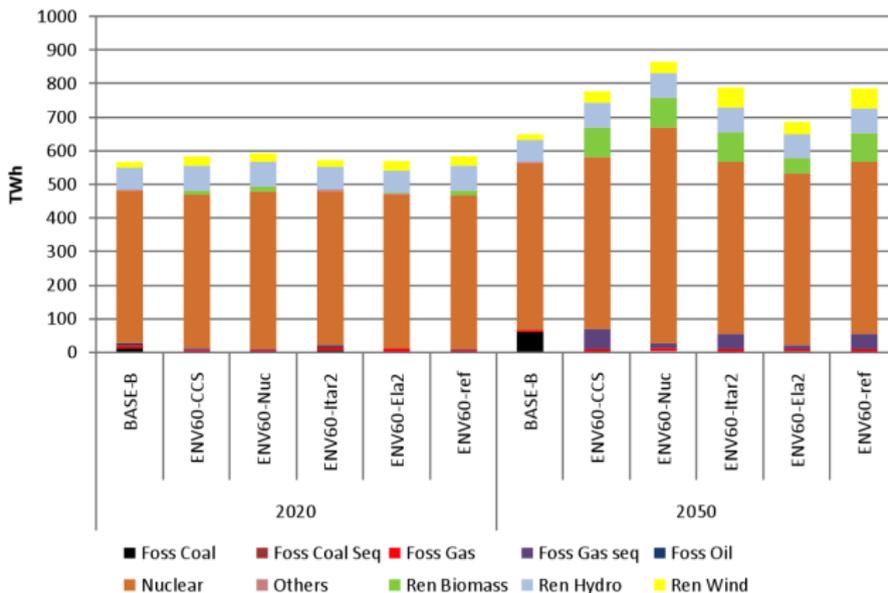
Sensibilité de la consommation d'énergie primaire aux scénarios



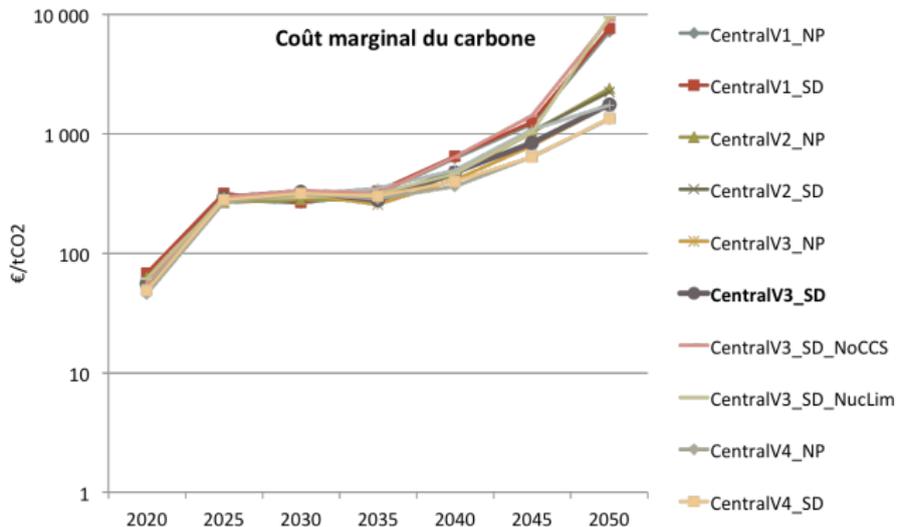
Mix de la consommation d'énergie primaire



Evolution de la production d'électricité



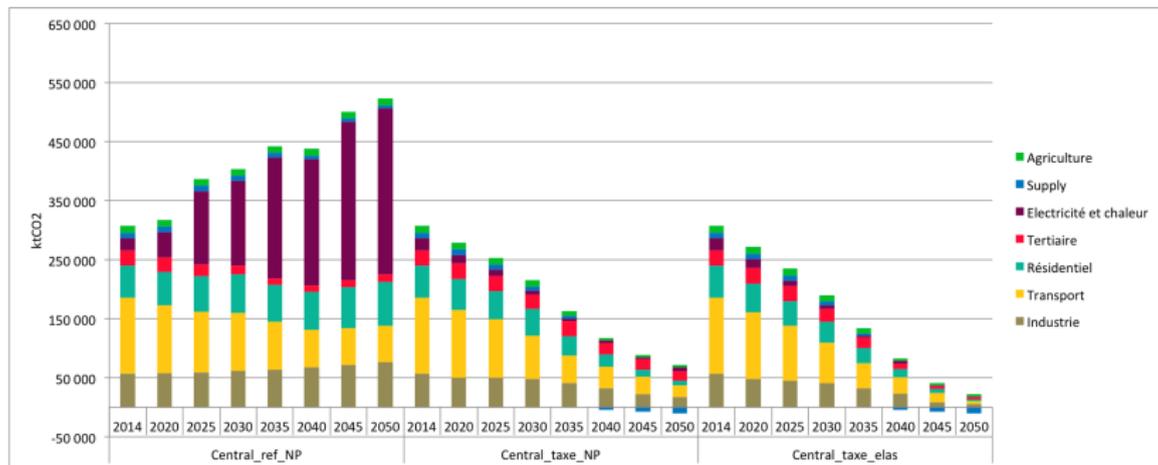
Evolution du mix de la production d'électricité



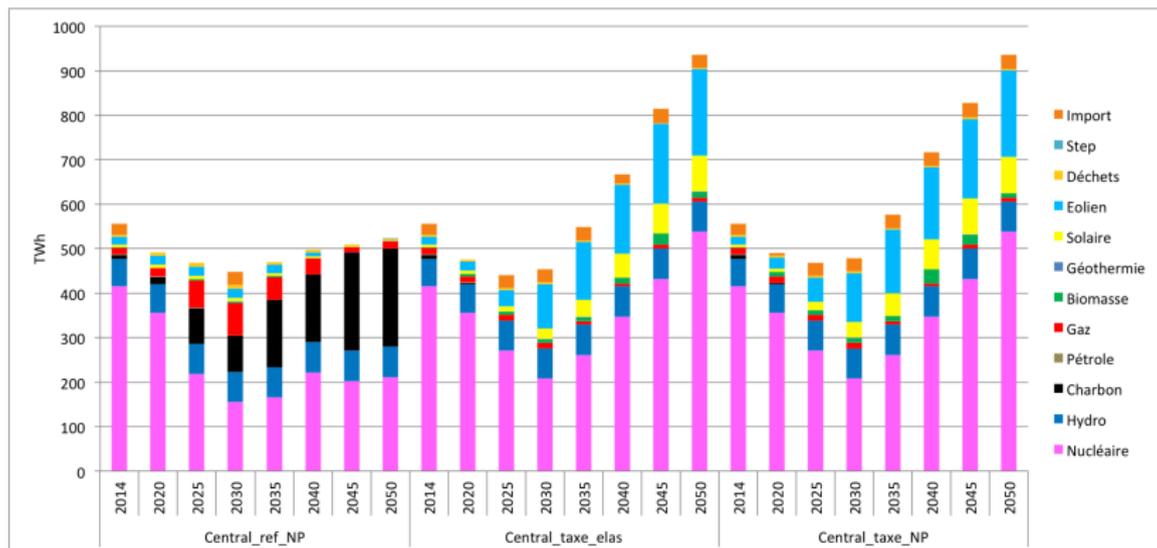
Evolution du mix de la production d'électricité

Ce que l'on peut dire de la neutralité carbone en 2050

- ▶ scénario de référence (pas de taxe)
- ▶ ajout d'une taxe qui suit la trajectoire conseillée par la Commission Quinet
- ▶ ajout d'une élasticité en plus de la taxe

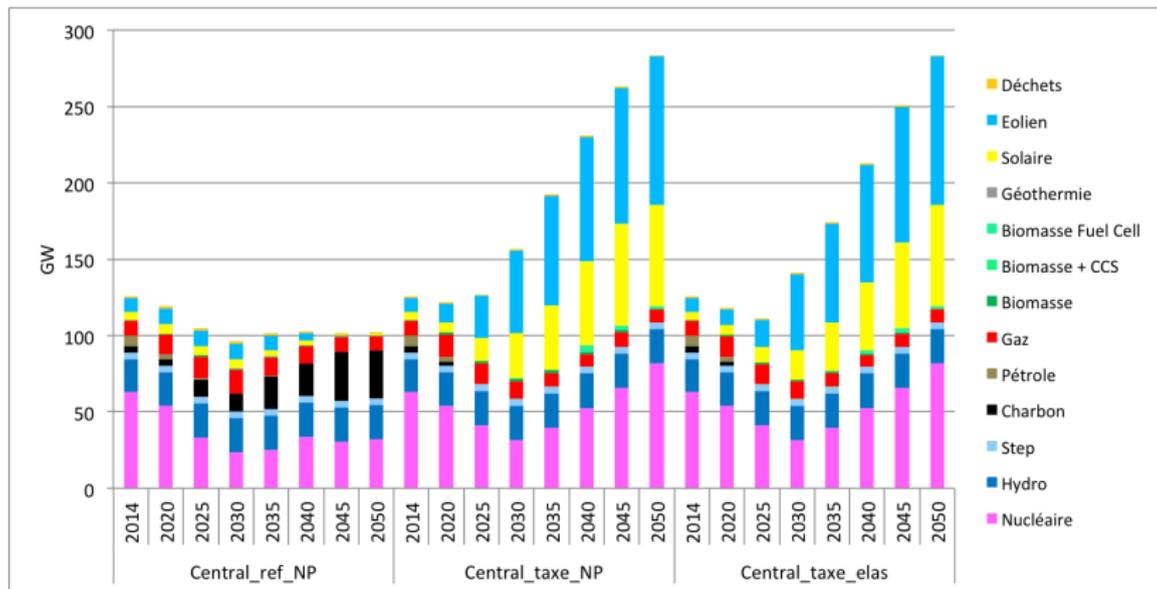


émissions de CO2



Production d'électricité

Les capacités installées



Capacités

la neutralité carbone sera difficile à atteindre pour la France en 2050

- ▶ parce que nous n'avons pas commencé à infléchir la trajectoire
- ▶ parce que le choix d'orientations technologiques n'est pas fait
- ▶ parce que nous n'avons pas décidé des investissements à concéder pour adapter nos infrastructures
- ▶ parce que nos modes de vie ne se sont pas adaptés
- ▶ parce que nous avons de hautes exigences pour la qualité de la fourniture en électricité

et parce que nous ne nous dotons pas d'un cadre de réflexion **prospectif** à la hauteur de nos ambitions pour élaborer **une trajectoire bas carbone** compatible avec l'enjeu climatique.