



Les Cahiers de la Chaire

Chaire Modélisation prospective au service du développement durable

**Transitions énergétiques en France :
enseignements d'exercices de prospective**

**Ruben BIBAS et Jean-Charles HOURCADE
Mars 2014**

Working Paper N° 2014-01-13

Transitions énergétiques en France : enseignements d'exercices de prospective

Contribution au débat national sur la transition énergétique

Ruben Bibas[†], Jean-Charles Hourcade[†]

18 juillet 2013

[†] Centre International de Recherche sur l'Environnement et le développement (CIRED).
Email : ruben.bibas@centre-cired.fr

Contenu

Résumé.....	4
1 Introduction.....	5
2 Principes de construction et d'évaluation des scénarios	7
2.1 Hypothèses sur les technologies et leur coût	7
2.2 Scénario de référence	7
2.3 Du scénario de référence aux scénarios de politiques.....	10
3 Scénario politiques et mesures (PM)	11
3.1 Définition du scénario	11
3.2 Performances énergétiques et environnementales.....	14
3.3 Performances économiques et sociales.....	14
4 Scénario PM.T : PM plus taxe carbone.....	16
4.1 Définition du scénario	16
4.2 Performances énergétiques et environnementales.....	17
4.3 Performances économiques et sociales.....	17
4.4 Scénario PM.TN : PM.T + négociation sociale	20
5 Scénario PM.TN.F : PM.TN + finance carbone.....	21
5.1 Définition du scénario	21
5.2 Performances énergétiques et environnementales.....	22
5.3 Performances économiques et sociales.....	23
5.4 Marges de manœuvre dans le rythme de montée de la taxe carbone.....	24
6 Essai de compromis dynamique : une question de 'tuilage'.....	25
6.1 Définition du scénario : politiques d'infrastructures et mutations comportementales	26
6.2 Performances dynamique et « tuilage » temporel	27
7 Vers des scénarios de sortie du nucléaire ?	30
8 Conclusion	32
Références.....	34
9 Figures récapitulatives	36
9.1 Nomenclature des scénarios.....	36
9.2 Performances énergétiques et environnementales.....	37
9.2.1 Emissions	37
9.2.2 Part du nucléaire dans le mix électrique	37
9.2.3 Puissance installée nucléaire.....	37
9.2.4 Diagramme performance énergétique et environnementale.....	38
9.2.5 Tableau récapitulatif énergie-environnement	38

9.3	Performances économiques et sociales	39
9.3.1	Taux de croissance du PIB réel	39
9.3.2	Emplois	39
9.3.3	Salaires.....	39
9.3.4	Consommation	40
9.3.5	Investissement.....	41
9.3.6	Imports énergétiques	42
9.3.7	Facture énergétique	42

Résumé

Le modèle d'équilibre général Imaclim-R France est utilisé pour examiner différentes stratégies de transition énergétique menant à une trajectoire 'Facteur 4'. Le bilan macroéconomique d'un jeu d'hypothèses sur les conditions techniques de l'offre et la demande d'énergie varie fortement selon qu'il est inséré ou non dans un ensemble de mesures qui ne ressortissent pas du seul domaine des politiques énergétiques : politiques fiscales pour éviter la propagation des surcoûts de l'énergie dans l'appareil de production, négociation sociale et salariale pour gérer le recyclage du produit d'une taxe carbone, réforme des structures de financement, politiques industrielles et de formation aux nouveaux métiers, politiques d'infrastructures et changement comportementaux. Nous montrons ensuite comment une politique de financement baissant le coefficient risque des investissements 'bas carbone' permettrait, en améliorant la crédibilité des politiques publiques, de réduire les craintes qui expliquent la frilosité des acteurs économiques et de déclencher une réorientation des investissements plus rapide vers des équipements sobres en énergie. Le bilan macroéconomique change selon les modalités de la transition mais est positif à moyen et long terme en matière de croissance et d'emploi, ceci en raison de la synergie entre trois mécanismes : baisse des importations d'énergie, économies d'énergie libérant le pouvoir d'achat des ménages en biens et services non énergétiques, baisse du coût du travail permis par une taxe carbone. L'accompagnement économique de la transition est décisif pour passer d'un bilan légèrement négatif à court terme à un bilan positif, ce afin de donner le 'grain à moudre' nécessaire pour réduire ces tensions. L'enjeu est un 'effet crédibilité' venant de la conduite cohérente de politiques de prix et de financement guidant les anticipations des acteurs dans un contexte défavorable. Quant au dossier nucléaire, nous faisons apparaître une grande différence entre un nucléaire contraint par des exigences accrues 'de précaution' et une sortie volontariste à l'horizon 2050 avec interdiction de construction de nouvelles centrales. Cette dernière hypothèse suppose, pour respecter le F4, un développement important et précoce du CCS et conduit à un retard de croissance de 4,5 ans sur 40 ans compte non tenu des coûts de reconversion, et, en sens inverse, de changements profonds des comportements et des structures économiques. Des scénarios 'nucléaire de précaution' limitent sa place autour de 40% du mix énergétique à 2050 et permettent de reculer une décision de sortie ou de nouveau déploiement qui pourra être prise plus tard « en meilleure connaissance de cause ». L'enjeu, aujourd'hui est de se mettre en position de la prendre avec un fort consensus national autour non seulement du choix technologique ultime, quel qu'il soit, mais aussi des politiques économiques et sociales cohérentes avec ce choix.

Mots-clefs : transition énergétique, émissions de gaz à effets de serre, équilibre général, prospective, taxe carbone, anticipations

1 Introduction

Ce qui est présenté ici se veut une contribution aux débats sur la transition énergétique en France. Ces débats se polarisent autour de trois grandes questions : le contrôle des émissions de gaz à effet de serre, l'avenir du nucléaire au sein du mix énergétique français et la sécurité énergétique. Ils se déroulent dans un contexte fait de tensions à court terme affectant notre pays : gestion des dettes publiques et privées, risques de récession et montée du chômage. A la question de la direction à long terme de la transition se rajoute donc celle son impact immédiat sur la compétitivité, l'emploi et le pouvoir d'achat. Va-t-elle introduire des **contraintes supplémentaires dans un contexte tendu**, ou au contraire, peut-elle constituer un **levier de relance économique 'soutenable' ?**

Pour répondre à cette question, on ne peut contourner l'impératif d'une modélisation intégrée des liens entre le secteur énergétique, les autres secteurs de l'économie, les comptes publics et les grands paramètres macroéconomiques. Mais cet impératif impose de se confronter aux incertitudes irréductibles entourant le coût des technologies, la demande énergétique, les contraintes financières et la croissance économique¹.

Il ne faut pas attendre des exercices de prospective qui suivent la détermination de ce que serait un scénario optimal pour la France. Ils visent à apporter des matériaux utiles sur la faisabilité de divers sentiers de transition, mais ne peuvent prétendre fournir des réponses définitives tant les chiffreages présentés pourront toujours être invalidés par des hypothèses différentes sur tel ou tel paramètre. Ils ont en revanche une **visée heuristique** en permettant de mieux comprendre, pour un jeu donné d'hypothèses sur la technologie, quels sont les déterminants des coûts économiques et sociaux d'atteintes d'objectifs à long terme. Ils viseront à montrer en quoi la transition énergétique se joue certes sur le secteur énergétique lui-même mais également sur des paramètres qui lui échappent et qui vont des évolutions dans d'autres secteurs clefs (transports, construction) aux réformes fiscales en passant dans la finance et le marché de l'emploi.

Cet exercice est conduit avec le modèle Imaclim-R France², modèle multisectoriel récursif 'hybride' ayant quatre particularités :

- une comptabilité hybride, en valeur et en prix, des flux d'échange entre secteurs et entre acteurs privés et comptes publics ; cette comptabilité a exigé un travail spécifique d'harmonisation des matrices de comptabilité sociale, des bilans énergétiques et des indicateurs

¹Sur les usages et mésusages de la modélisation prospective, voir (Hourcade, 2007).

²La première version, statique, du modèle Imaclim date de 1992 (Hourcade, 1993). Sa version dynamique date de la fin des années 2000 (Sassi et al., 2010). Le modèle Imaclim a été à la base de plus de trente publications dans des revues scientifiques (The Energy Journal, Energy Policy, Climatic Change, Climate Policy, Revue Française d'Economie, Revue d'Economie et Statistique) ; il participe aux programmes internationaux de comparaison de modèles intégrés (Energy Modeling Forum, Ampere etc ...). Enfin, la documentation de la version récursive du modèle pour la France est exposée dans (Bibas, 2013).

d'activité physique (t/km, v/km etc...) et tient compte, par rapport au modèle GTAP par exemple, de prix différents selon les secteurs et les agents³;

- des 'fonctions réponse' des acteurs économiques (ménages, entreprises, administrations publiques) calibrées pour refléter des 'dire d'experts' sur les contraintes techniques et les comportements. Par rapport au maniement classique de fonctions de production ou d'utilité stables sur tout l'espace de projection, on peut ainsi tester des visions alternatives des coûts des techniques et des comportements à plusieurs points du temps ;
- les secteurs clefs de la transition énergétique sont représentés par des sous-modèles technico-économiques détaillés, validés avec l'aide d'experts sectoriels, afin de détecter les goulots d'étranglement susceptible de bloquer les bifurcations de trajectoires aussi bien que les marges de manœuvre pour les lever ou les contourner ;
- la représentation de sentiers de croissance non optimaux avec possibilité de chômage et de déséquilibre de la balance des échanges extérieurs. Les déséquilibres sont représentés comme des écarts entre une "croissance potentielle" (population active × productivité du travail) et une croissance réelle qui résulte des frictions engendrées par des comportements en information imparfaite et l'inertie des systèmes techniques.

Cette structure de modélisation s'inspire de l'appel de Solow de rechercher *"a hybrid model: at short term scales, I think something sort of 'Keynesian' is a good approximation, and surely better than anything straight 'neoclassical'. At very long time scales, the interesting questions are best studied in a neoclassical framework and attention to the Keynesian side of things would be a minor distraction"* (Solow 2000).

Imaclim-R se prête à des tests de sensibilité sur l'ensemble des hypothèses clefs, en particulier sur les coûts et les performances des techniques. De façon délibérée, nous n'utiliserons pas cette potentialité dans ce document pour nous concentrer sur l'importance des paramètres non strictement technologiques de la transition. Nous prendrons donc pour base, pour les paramètres énergétiques, l'information fournie par les scénarios ENCILOWCARB⁴ issus d'un projet européen (*Engaging civil society in low carbon scenarios*) de construction conjointe de scénarios entre modélisateurs et parties prenantes en France et en Allemagne.

Après avoir vérifié qu'elles ne suffisent pas à conduire une stratégie de transition menant à une trajectoire 'F4' de réduction par quatre des émissions de gaz à effet de serre et/ou de sortie progressive du nucléaire, nous examinerons les politiques nécessaires pour mobiliser des potentiels de maîtrise de l'énergie et de réduction des émissions qui vont au-delà des mesures « à coût négatif ». Celles-ci touchent à des fondamentaux des politiques économiques et sociales et nous évaluerons leur compatibilité avec des politiques de relance économique durable dans un contexte fortement contraint. Enfin, nous examinerons l'hypothèse d'une sortie du nucléaire autour de 2050.

³Cf. (Lefèvre et al., 2013).

⁴(Bibas et al., 2012) décrit le processus de concertation, les mesures issues de ce processus avec les parties prenantes, le scénario « acceptable » qui émane de la concertation ainsi que des analyses de sensibilité.

2 Principes de construction et d'évaluation des scénarios

2.1 Hypothèses sur les technologies et leur coût

Tout exercice de modélisation de ce type repose sur des estimations nécessairement controversées des coûts des technologies à plusieurs horizons temporels. Il eût été préférable de le faire à partir des données des travaux de la *Commission Energies 2050*. Mais, devant les contraintes de temps et d'accès à ces données, nous avons choisi de nous en tenir à des sources publiées en retenant pour l'essentiel des capacités moyennes alors qu'en toute rigueur des courbes reflétant la spécificité des divers sites de production devraient être prises en compte.

Il conviendrait, pour prendre en compte l'incertitude et les controverses sur les coûts et les performances des technologies, de réaliser des tests de sensibilité sur ces paramètres. Il n'y a pas là de contraintes calculatoires. En revanche, pour qu'il ait du sens, cet exercice devrait s'appuyer sur un 'bornage' des incertitudes qui lui-même exige un accord entre experts sur les sources de ces incertitudes voire sur les sources des controverses qui les opposent.⁵

C'est pourquoi puisque nous insistons ici sur les conditions non énergétiques de la transition énergétique nous nous en sommes tenus à un seul jeu d'hypothèses sur le secteur énergétique lui-même. Le Tableau 1 regroupe les hypothèses technologiques pour la production électrique, le Tableau 2 et le Tableau 3 regroupent celles portant sur les bioénergies et les coûts de la rénovation thermique du bâti respectivement.

2.2 Scénario de référence

Les taux de croissance économique ne sont pas une donnée exogène dans Imaclim-R. La croissance y dépend des hypothèses sur la productivité du travail et sur le contexte international qui déterminent à la fois la dynamique des marchés mondiaux et la compétitivité relative des productions « made in France » par rapport à celles d'autres pays. L'écart entre production potentielle (population active x productivité du travail) et production réelle dépend des difficultés d'ajustements entre les décisions passées prises en information imparfaite et la réalité ex-post des marchés, ceci sous contrainte d'inertie des systèmes techniques et des comportements.

Le tableau 4 présente la croissance calculée par Imaclim-R France, compte-tenu d'hypothèses sur le contexte international qui intègrent l'effet de la stagnation économique actuelle. Une fois cette phase passée (après 2015-2020) on obtient un redressement progressif vers des taux de 1.5% par an proche de la croissance potentielle de long terme.

⁵Pour un exemple de test de sensibilités sur les hypothèses technologiques, le lecteur peut se référer au rapport Encilowcarb (Bibas et al. 2012) pour lequel un certain nombre d'alternatives sur les coûts technologiques ont été testées.

Technologie	Capacité	Durée de vie	Durée de construction	Rendement	Coûts d'investissement	Coûts Variables	Contenu carbone
	MW	Années	Années	%	€/kW	€/MWh	t/MWh
Charbon CCT	800	40	4	0,46	1200	26	0,96
Charbon CCS	740	40	4	0,38	2030	32	0,14
Cycle combiné Gaz	400	30	2	0,54	610	78	0,36
CCGaz CCS	400	30	4	0,4	1215	102	0,05
Fuel	300	40	4	0,46	1200	103	0,8
TAC fuel	300	30	2	0,38	335	123	0,8
TAC gaz	300	30	2	0,38	328	110	0,8
Nucléaire existant	1600	40	7	1	3391	6	0
Rénovation nucléaire existant	1600	20	1	1	700	6	0
EPR	1630	40	7	1	2900	7	0
Eolien terrestre	45	25	1	1	1200	0	0
Eolien offshore	120	25	1	1	2400	0	0
Solaire	10	25	1	1	3000	0	0
Solaire décentralisé	10	25	1	1	4500	0	0

Tableau 1 : Hypothèses de coûts des technologies électriques

	Prix	Part
Bois de chauffage	41,2 c€/kWh + 1% par an	Endogène (compétition par les prix)
Biogaz	Prix du gaz	De 0% en 2007 à 17% en 2050 si scénario avec contrainte carbone
Biocarburants liquides	Courbe d'offre provenant du scénario de développement des biofuels du <i>World Energy Outlook 2006</i> de l'AIE	Endogène (compétition par les prix)

Tableau 2 : Hypothèses de coûts de la bioénergie

	F	E	D	C	B	A
G	5	150	300	500	750	1050
F	-	110	260	460	710	1010
E	-	-	170	370	620	920
D	-	-	-	230	480	780
C	-	-	-	-	290	590
B	-	-	-	-	-	350

Tableau 3 : Hypothèses de coûts⁶ de la rénovation thermique du bâti (€/m²)

La baisse du taux de croissance sur la période 2040-2050 est due au fait que nous intégrons les conséquences d'une forte hausse des prix du pétrole à cette échéance. Cette hausse ne correspond pas à un « peak-oil » absolu mais à l'épuisement des ressources à bon

⁶Pour un passage des étiquettes de la première colonne aux étiquettes de la première ligne.

marché de pétrole et de gaz. Les trajectoires de prix du charbon du pétrole et du gaz importés provient du scénario énergétique mondial du *World Energy Outlook 2012*, de l'AIE⁷.

Ces faibles taux de croissance engendrent mécaniquement une baisse de 5.7% du taux d'activité de la population. Traduite en équivalent temps plein, cette baisse conduit à un taux de chômage qui passe de 10% à 17%. Dans la réalité, ce chiffre ne sera sûrement pas atteint parce que la société s'adaptera via une évolution du marché du travail et des mécanismes d'insertion, formels ou informels, permettant de 'récupérer' les populations exclues du modèle 'travail à temps plein'. On suivra cependant que l'évolution de cet indicateur dans les scénarios parce qu'il est un marqueur important du caractère socialement négatif ou positif de la transition énergétique.

Période	2010-2015	2010-2020	2020-2030	2030-2040	2040-2050	2010-2050
TCAM ⁸	0.77%	0.83%	1.09%	1.47%	0.85%	1.06%

Tableau 4 : Taux de Croissance dans le scénario de référence

Concernant le secteur énergétique, le groupe « Encilowcarb » n'a pas retenu de prescriptions exogènes spécifiques consommant la demande dans le scénario de référence. Celle-ci résulte de la formation des revenus, de l'évolution de la structure de consommation et des hypothèses de rendement pour le service énergétique entre énergie primaire et énergie finale utile retenues dans Imacim-R France.

En revanche, une **hypothèse explicite** a été faite concernant **la place du nucléaire dans l'offre électrique** : elle peut se résumer par l'absence de politique volontariste de relance cette énergie et un allongement de 20 ans de la durée de vie des centrales pour deux tiers d'entre elles. Sur cette base, la décision de construction de nouvelles centrales dépend dans nos scénarios de l'état des marchés de l'énergie, pour un taux d'actualisation de 8% qui peut paraître élevé mais qu'on peut retenir comme intégrant un facteur risque cohérent avec l'incertitude créée par le moment actuel de régulation des marchés électriques en Europe⁹.

Ceci conduit à une trajectoire où le nucléaire baisse à 50 % de la production électrique en 2025 (il est essentiellement remplacé par des cycles combinés à gaz) pour remonter à 70% en 2050 dans un contexte de relèvement des prix du gaz. Le déclassement progressif du parc électronucléaire s'accompagne dans un premier temps de l'introduction de renouvelables et d'une part plus grande de la production par des cycles combinés à gaz (pour une capacité maximale de 35 GW entre 2027 et 2032). A partir de 2025, une grosse part des centrales

⁷Nous ne testons pas ici l'hypothèse d'une baisse durable des prix des énergies fossiles à cet horizon qui serait entraînée par la généralisation de l'exploitation des gaz et pétroles de schiste à l'échelle mondiale. Nous avons en effet adopté des hypothèses optimistes sur les réserves bon marché d'hydrocarbures qui conduisent à envisager des relèvements inévitables de leurs prix entre 2030 et 2050 (Waisman et al., 2012). Ce qu'on sait aujourd'hui des contraintes qui pèsent sur les gaz et pétroles de schiste dont la difficulté de pénétrer dans des zones à forte densité de population laissent à penser que le relèvement des prix se fera plutôt sur 2040-2050 que sur 2030-2050.

⁸TCAM : Taux de Croissance Annuel Moyen

⁹Les tensions entre politiques de soutien spécifiques à certaines technologies et mécanismes de marché créent de l'incertitude autour du futur du marché électrique, notamment des régulations venir (Finon, 2013).

d'ancienne génération sont déclassées (il en reste moins de 40 GW entre 2015 et 2035). En prévision de la dernière vague de déclassement après 2035, le besoin se fait sentir de reconstruire de nouvelles centrales pour qu'elles rentrent en production à cette date. La puissance installée elle passe de 63 GW en 2010 à 39 GW en 2025 pour se stabiliser autour de 70 GW après 2040

2.3 Du scénario de référence aux scénarios de politiques

Nous avons vu que le dialogue entre modélisateurs et les parties prenantes dans ENCILOWCARB s'est accordé sur une liste de politiques et mesures (sectorielles et de périmètre national) jugées « acceptables » majoritairement « à coût négatif ». Elles sont bien sûr discutables mais nous les prendrons comme telles pour faire apparaître l'influence centrale de leur accompagnement économique sur l'évaluation de leur impact sur l'activité, les revenus et l'emploi. Or malgré ce point fixe, l'écriture de scénarios correspondant à la combinaison de plusieurs objectifs de long terme conduit à une explosion combinatoire puisqu'il faudrait croiser plusieurs hypothèses concernant les objectifs de long terme sur la décarbonisation du secteur énergétique, le rôle du nucléaire et les précautions à prendre sur les gaz et pétroles de schiste ou les biocarburants, et envisager, pour chaque combinaison d'objectifs, le rythme auquel elle sera atteinte (par exemple F4 en 2050, 2075 ou 2100) ou sortie du nucléaire en 2040 ou 2080).

Nous contournerons cette difficulté, en n'essayant pas de couvrir l'ensemble des scénarios possibles contraints par de tels jeux d'objectifs normatifs. On « empilera » un ensemble de politiques et mesures d'accompagnement (depuis celles du scénario Encilowcarb), et on évaluera les scénarios obtenus selon deux dimensions :

- Le niveau de « performance environnementale » sur les deux axes principaux de controverses concernant le futur à long terme du système énergétique, à savoir la trajectoire Facteur 4°C et la sortie du nucléaire. Dans la Figure 1 l'axe horizontal représente les émissions par rapport à 1990 et tout déplacement vers la gauche indique leur réduction par rapport à 1990. L'axe vertical représente la part du nucléaire dans le mix électrique. Ainsi, le scénario décrit dans la Figure 1 conduit en 2050 à une réduction à 45 % de la part du nucléaire dans la production électrique et une baisse d'un facteur trois des émissions de GES.

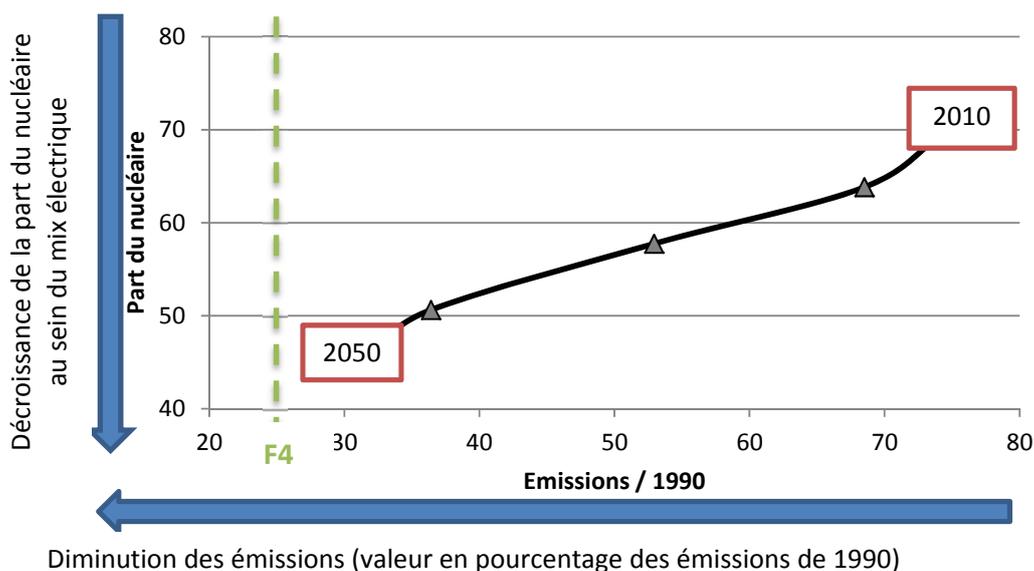


Figure 1 : Diagramme de performance énergétique et environnementale

- Les conséquences économiques et sociales à court, moyen et long terme avec les indicateurs classiques que sont le PIB, l'emploi et la compétitivité économique et la sécurité énergétique synthétisée par la part des importations d'énergie sur le PIB et/ou les exportations.

3 Scénario politiques et mesures (PM)

3.1 Définition du scénario

Dans ce scénario, est intégré l'ensemble des politiques et mesures dites « acceptables » d'ENCILOWCARB, en excluant celles qui impliquent des mutations de la société trop complexes pour être enclenchées « par décret ». Celles-ci (télétravail, découplage de la production et du transport, dématérialisation du contenu de la production) peuvent certes être accompagnées par des politiques sectorielles spécifiques mais ne sont cohérentes qu'avec une modification profonde des préférences individuelles et collectives et des modes de vie.

Cette exclusion des changements sociétaux de ce premier jeu de simulation se justifie aussi par le fait qu'ils ne renvoient pas au même type de coûts et bénéfices que les autres mesures technico-économiques comme les aides à la rénovation thermique, qui sont, dans le modèle, décrites à travers leur ponction sur le budget public et leur contribution à la baisse de la facture énergétique des ménages. Ainsi on peut considérer que la limitation de la vitesse des automobiles constitue une perte d'utilité en restreignant la mobilité individuelle dans une contrainte donnée de budget temps, ou au contraire un gain d'utilité collective en raison de la baisse des accidents. De même, le télétravail peut être vu comme une liberté supplémentaire ou, au contraire, comme un risque supplémentaire d'empiètement du temps de travail sur le temps des loisirs. Devant la difficulté de représenter numériquement de telles variations du bien-être

collectif¹⁰, ces paramètres seront introduits comme contraintes exogènes dans un jeu ultérieur de simulation (cf. scénario PM.T.F.R.A).

Les P&M retenues sont résumées dans l'Encart 1. Elles regroupent à la fois des politiques réglementaires (Réglementation thermique du neuf), des politiques d'incitation financières à la rénovation thermique (crédit d'impôts, éco-prêt à taux zéro, fonds de rénovation thermique obligatoire dans les copropriétés, mécanismes de tiers-financeurs) et les outils fiscaux (éco-redevance poids lourds et taxe sur le kérosène pour le transport aérien).

Dans tous les cas, ces politiques entraînent des coûts immédiats pour les acteurs privés et publics (dépenses de mise aux normes, coût budgétaire des incitations publiques, impacts des taxes) mais, pour l'essentiel, elles regroupent des mesures que la littérature appelle « à coût négatif ». Cette expression est parfois mal comprise ; elle ne désigne pas des mesures « sans effort » et « sans dépenses » mais des mesures qui ont un coût actualisé négatif, c'est-à-dire engendrent des économies nettes sur la durée de vie des équipements auxquels elles s'appliquent. L'existence de tels potentiels repose fortement sur des diagnostics d'ingénieur dont l'optimisme se heurte au scepticisme du bien des économistes sur l'existence de techniques rentables qui n'auraient pas été déjà adoptées par la société¹¹. Sans rentrer dans ce débat, nous signalerons simplement qu'il renvoie à un jugement sur le caractère optimal du fonctionnement des marchés et des institutions actuelles et que « *no-regret is not no pain* ». La pénétration de solutions *ex-post* « à coût négatif », exige en effet *ex-ante* par des mesures entraînent à la fois des coûts de transaction politique et des coûts d'investissements initiaux.

¹⁰Pour donner des évaluations cohérentes de telles évolutions, il faudrait disposer de fonctions d'utilité évoluant dans le temps de façon endogène pour prendre en compte par exemple qu'une société acceptant une taxe carbone de 300 € la tonne ne peut être formée de citoyens ayant les mêmes fonctions de préférence concernant le partage loisir travail, le type de tourisme ou les modes d'habitat et les diètes alimentaires.

¹¹Une bonne introduction à ce débat reste Jaffe and Stavins (1994), débat qui a conduit à une forme d'accord pour le structurer sinon le trancher dans le cadre du GIEC(Hourcade et al., 1996) .

Secteur Résidentiel	Crédit d'impôts. Les dépenses de rénovation thermique sont éligibles aux crédits d'impôt sur le revenu. L'augmentation du taux moyen et l'élargissement des critères d'éligibilité sont modélisés au cours de la période 2009-2050 en retenant un taux de crédit uniforme égal à 30% de l'investissement.
	Prêt à taux zéro pour la rénovation thermique. Il s'applique aux programmes de rénovation moyennant un plafond de 30 000€ par logement. Le prêt s'étale sur une durée comprise entre 10 et 15 ans.
	Réglementation thermique des bâtiments neufs. Dès 2012, les nouvelles constructions se voient imposer un niveau maximal de consommation d'énergie primaire voisin de 50 kWh/m ² /an (BBC). Les règles sont intensifiées après 2020 : les bâtiments neufs doivent alors devenir producteurs nets d'énergie (BEPOS).
	Représentation implicite des fonds de rénovation thermique obligatoire dans les copropriétés et d'un mécanisme de financement à long terme par les tiers réduisant l'aversion au risque des agents.
	Biogaz. Cette source d'énergie connaît une pénétration graduelle entre 2012 et 2050, pour atteindre 17% de la consommation de gaz à l'horizon 2050.
Secteur Transports	Taxe sur le kérosène. À partir de 2012, la consommation de kérosène pour le transport aérien est soumise à une taxation, dont le montant est fixé à 400€/tep.
	Taxe écologique sur les poids lourds. Cette écotaxe frappant la consommation de carburant liquide des poids lourds entre en vigueur en 2012. Ses recettes devraient rapporter 1,2 milliards € au cours de l'année 2012.
	Bonus-malus. Cette mesure, prolongée jusqu'en 2050, garantit chaque année l'équilibre financier du dispositif gouvernemental.
Secteur Electricité	Anticipation. Les acteurs du secteur électrique anticipent parfaitement l'évolution de la taxe carbone sur la période et orientent leurs investissements selon son niveau.
	Nucléaire existant et prolongation de durée de vie. La durée de vie de 40 GW des 63GW existants est prolongée de 20 ans pour un coût de 0,7 milliard €/GW.
	Agrocarburants. Leur rythme de pénétration obéit au scénario figurant dans le World Energy Outlook 2006 : la production atteint environ 5 Mtep en 2020 et 16 Mtep en 2050 (respectivement 9% et 39% des produits pétroliers raffinés).
	Tarifs d'achat. Cette incitation financière a pour vocation de faciliter la pénétration des technologies d'énergies renouvelables afin d'accélérer l'effet d'apprentissage. Ils décroissent avec le temps avant d'être supprimés dès que les technologies présentent une compétitivité-prix similaire aux technologies conventionnelles.
	Gestion de la demande. Elle recouvre des mesures implicites (contrats interruptibles, compteurs intelligents) servant à lisser la courbe de demande.
	Interdiction du chauffage électrique à effet Joule. Bien qu'autorisé, l'entrée en vigueur de la réglementation thermique 2012 l'exclut de facto des options technologiques disponibles dans les bâtiments neufs (hors pompes à chaleur).
	Extension du réseau électrique. Le développement des capacités renouvelables justifie de nouveaux investissements dans le réseau de transport électrique, et par là même l'augmentation du prix de l'électricité de 3€/MWh dans le scénario de réduction des émissions. Le réseau de distribution devrait également être amélioré, pouvant induire une dépense additionnelle du même ordre de grandeur.
	Tarifification progressive. Le dépassement du seuil de consommation de 60 kWh/m ² pour les ménages déclenche une élévation de tarif de 5% après 2014 et de 10% après 2030.

Encart 1 : Politiques et mesures du scénario PM

3.2 Performances énergétiques et environnementales

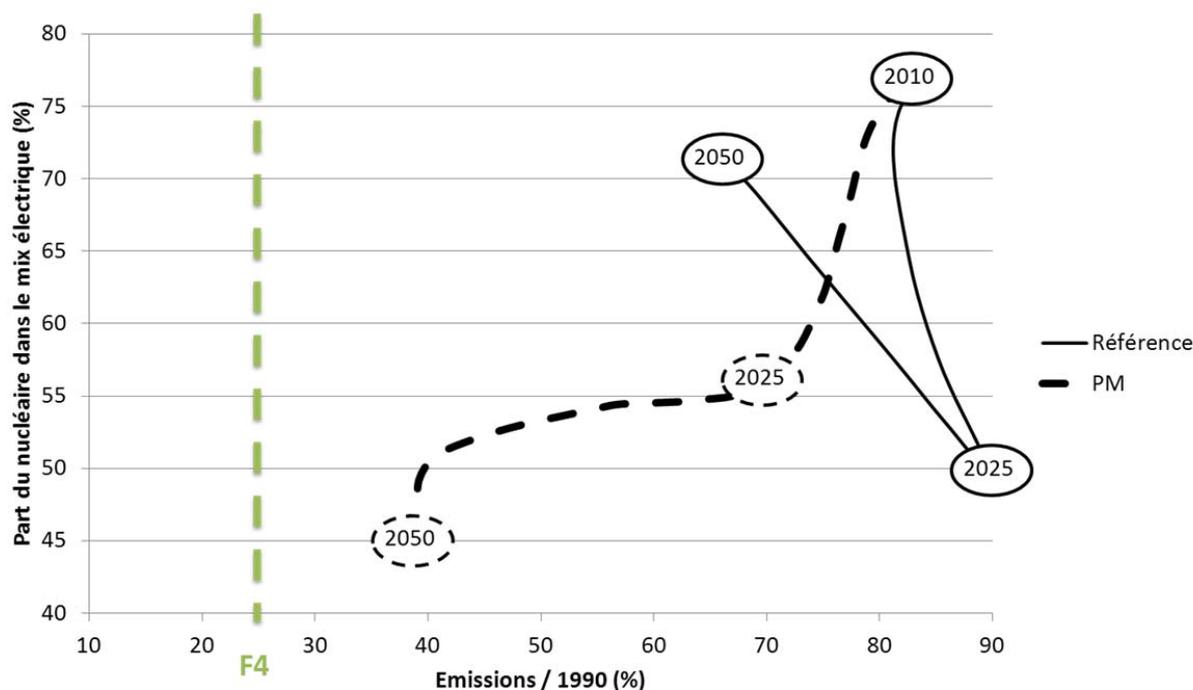


Figure 2 : Performance énergie et environnement du scénario PM

Comme l'indique la Figure 2, ce scénario PM est bien plus performant que le scénario de référence en termes d'émissions de CO₂. Celles-ci sont inférieures de 29% en 2030 et de 42% en 2050. Mais, et c'est un point important, elles ne suffisent pas pour respecter la trajectoire F4. Le scénario PM permet de remplir un objectif F3, avec un fort décrochement des émissions entre 2020 et 2040 puis une sorte de plateau qui marque la résistance à la baisse des émissions dans le secteur des carburants.

Quant au nucléaire, les économies d'énergies et la concurrence des énergies renouvelables entraînent un besoin beaucoup plus limité de centrales nucléaires EPR (15 GW en 2050 contre environ 50 GW en référence). La pénétration des énergies renouvelables passe de 8.2% du mix en référence à 9.5% pour l'hydraulique, de 9% à 30% pour l'éolien et de 0.3% à 9.6% pour le solaire. Cela permet au scénario PM d'éviter la remontée du nucléaire après 2025 dans le scénario de référence, même si on est loin d'un 'scénario de sortie' avec un nucléaire qui représente encore 50% du mix électrique en 2050.

3.3 Performances économiques et sociales

En cumul sur la période, ce scénario conduit à une plus forte croissance du PIB réel (TCAM de 1.15% contre 1.06%) et de l'emploi (+ 307 000). Ces conclusions, qui confortent l'hypothèse d'une « croissance verte » sont la conclusion logique du fait que l'essentiel du paquet de

mesures inclus dans ce scénario est à coût négatif. En outre, elles permettent une réduction de 40% de la part des importations énergétiques du pays sur ses exportations (cf. Tableau 8).

Une analyse du profil temporel de ces effets dans le temps fait apparaître un résultat moins optimiste. Dans les cinq premières années en effet ce scénario conduit à une baisse légère de la croissance et à une baisse de l'emploi (-2 000). Ce chiffre est certes très faible mais pointe à un niveau agrégé une difficulté dont il convient de tenir compte parce qu'il implique des pertes plus fortes dans certains secteurs qui peuvent poser des problèmes de refus des politiques climatiques. Cette difficulté va jouer dans d'autres scénarios et jouerait encore plus si des hypothèses moins optimistes avaient été adoptées sur l'efficacité des mesures, où, pour être plus précis, sur la rapidité de leur déploiement dans le temps.

Période	2010-2015	2010-2020	2020-2030	2030-2040	2040-2050	2010-2050
Référence	0.77%	0.83%	1.09%	1.47%	0.85%	1.06%
PM	0.73%	0.9%	1.32%	1.46%	0.9%	1.15%

Tableau 5 : Taux de croissance annuel moyen du PIB du scénario PM

	2015	2020	2030	2040	2050
PM	-2	26	183	254	307

Tableau 6 : Créations d'emplois dans le scénario PM par rapport à la référence (en milliers d'équivalents temps plein)

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	253	253	257	269	265
PM	253 (+0.23 G€)	262	282	313	318

Tableau 7 : Investissements annuels du scénario PM (G€)

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	14,3	16,0	16,8	12,8	13,6
PM	14,0	14,3	12,1	7,9	8,1

Tableau 8 : Importations d'hydrocarbures (en % de la valeur exports)

Cette difficulté vient en effet de ce que, même si leurs effets bénéfiques se déploient rapidement, les mesures envisagées ont toutes un coût à court terme : c'est le cas des mesures fiscales sur les carburants, des efforts financiers de soutien à la rénovation thermique de l'habitat (comme le Crédit d'impôt) mais aussi du fait que la demande des ménages en biens non énergétiques est contrainte par le déplacement de leurs dépenses en direction des investissements en rénovation.

Certes, ce léger effet dépressif pourrait être réduit par exemple en considérant que l'essentiel des investissements des ménages en rénovation se fait en réduisant d'autres placements de leur épargne et non par baisse de leur consommation. Mais on reste ici dans l'épaisseur du trait. On peut débattre sans fin des hypothèses qui conduiraient à un résultat positif sur le court terme ou à un résultat plus négatif mais ceci reste de second ordre.

La conclusion réelle à tirer de ce scénario est qu'il renforce la croissance de façon significative après 2020, mais qu'il est insuffisant pour un niveau très ambitieux de baisse des émissions de GES objectif environnemental et ne peut garantir une sortie de crise à court terme¹² si on ne maîtrise pas le décalage entre dépenses et effets positifs de ces dépenses.

4 Scénario PM.T : PM plus taxe carbone

4.1 Définition du scénario

Dans ce scénario, nous rajoutons aux mesures précédentes une taxe carbone équivalente à la trajectoire proposée par le rapport Quinet que nous prolongeons jusqu'à 2050 (cf. Encart 2).

Taxe carbone. Son montant s'élève progressivement : de 32€/tCO₂ en 2012, il passe successivement à 56€/tCO₂ en 2020, 100€/tCO₂ en 2030, puis 200€/tCO₂ en 2040 et enfin 300€/tCO₂ en 2050.

Recyclage des revenus de la taxe carbone. La moitié des recettes tirées de l'instauration de la taxe carbone sont reversées aux ménages sur une base forfaitaire. L'autre moitié est utilisée pour réduire les charges sociales sur le travail.

Encart 2 : Détails de la taxe carbone instaurée

Un enjeu central autour de la taxe carbone vient de la sensibilité de son impact économique et social aux modalités de son recyclage dans l'économie et au contenu des politiques budgétaires. Nous renvoyons ici à une étude comparative détaillée de ces modalités telle qu'elle a été conduite par le CIRED dans le cadre des travaux de la mission Rocard¹³. Nous nous en tiendrons à une formule de compromis entre les effets compétitivité de cette taxe et le soutien au pouvoir d'achat des ménages. Elle consiste à recycler pour partie la taxe aux ménages sous forme de chèque vert, pour partie sous forme de baisse des charges sociales (salariales et patronales) pour réduire le coût des productions domestiques¹⁴.

¹²Le modèle utilisé n'intègre pas, dans sa version actuelle, le biais 'intensif en main-d'œuvre' des activités mises en jeu par la transition énergétique, biais mis en évidence par P. Quirion (2013) qui conclut à une création d'emplois de 632 000 en 2030 dans une approche en équilibre partiel. Les 183 000 emplois que nous trouvons résultent de mécanismes liés à la variation du taux de croissance, au changement du poids relatif des industries lourdes et légères et à la variation du coût du travail. Les deux chiffres ne peuvent être agrégés car les effets d'équilibre général, qui prennent en compte les reports entre secteurs et la déformation des coûts, peuvent conduire à résultats très différents d'une analyse en équilibre partiel. De plus, une partie des mécanismes mis en évidence par P. Quirion, sont déjà pris en compte dans Imacim-R et il y a un risque de double compte. Au premier ordre, cependant, on peut dire que, si le modèle Imacim-R intégrait le biais 'intensif en travail' de l'étude de P. Quirion il donnerait des chiffres d'emploi de 5% à 10% supérieurs.

¹³(Combet et al., 2010a, 2010b)

¹⁴Ce type de recyclage est très classique dans les études sur la fiscalité carbone. On se reportera à la synthèse des études réalisées à l'échelle mondiale dans le troisième rapport d'évaluation (TAR) du GIEC (Hourcade et al., 2001).

4.2 Performances énergétiques et environnementales

La Figure 3 présente le diagramme de performance énergie et environnement du scénario PM.T, comparé aux scénarios de référence et PM. Sur la première dimension (cf. Tableau 9), on se rapproche sensiblement de la trajectoire F4 les réductions d'émissions atteignant -68,5% en 2050. C'est le résultat logique de la mise en œuvre de potentiels de réduction qui deviennent profitables en cas de taxe carbone.

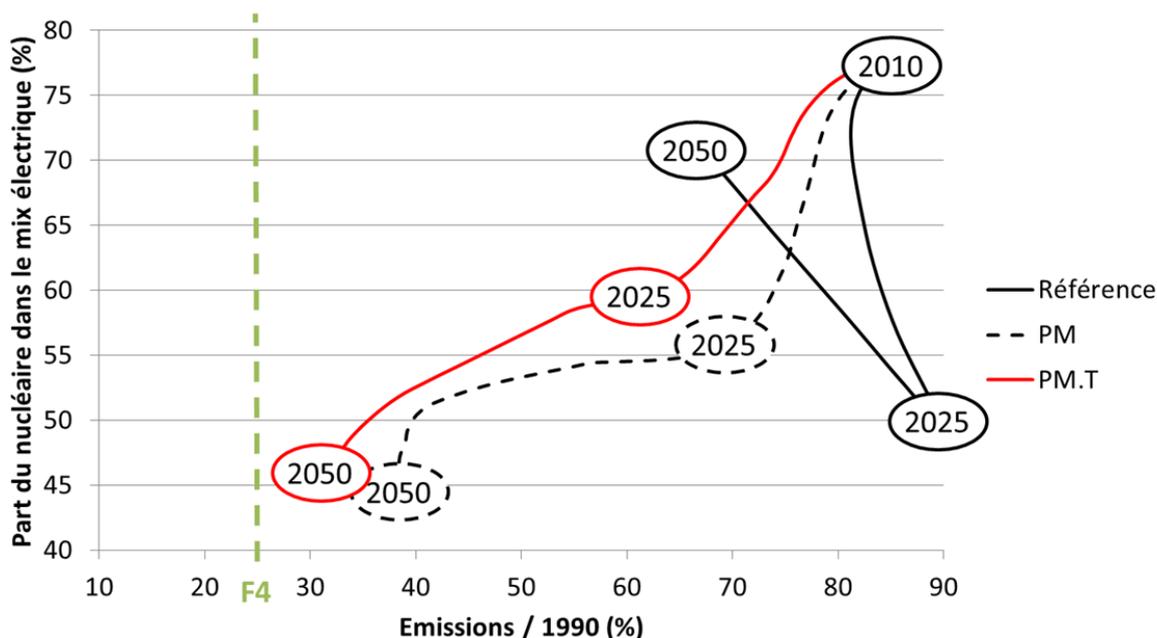


Figure 3 : Performance énergie et environnement du scénario PM.T

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	81.8%	85.6%	86.3%	68.9%	66.9%
PM	77.6%	74.4%	61.0%	41.7%	38.9%
PM.T	74.6%	68.5%	52.9%	36.4%	31.5%

Tableau 9 : Emissions du scénario PM.T (100% correspond aux émissions de 1990)

La part du nucléaire dans le mix électrique est supérieure à celle du scénario PM sur la période, parce que le cycle combiné au gaz est moins compétitif. On remarquera en revanche que les chiffres obtenus 2050 sont très peu différents. Ceci est le résultat logique du fait que la baisse du nucléaire en fin de période est due au déclassement des anciennes centrales, qui a lieu dans les deux scénarios et n'est pas affectée par l'existence d'une taxe carbone.

4.3 Performances économiques et sociales

Sur la deuxième dimension, les résultats sont plus contrastés. Si on s'en tient au PIB réel cumulé sur toute la période projection, on observe une hausse du taux de croissance moyen par rapport à la référence (1,09% contre 1,06%) mais cette hausse est moindre que celle obtenue

avec les seules politiques et mesures (1,15% contre 1,06%). En d'autres termes, les performances environnementales du scénario PM.T sont supérieures à celui du scénario PM mais sont obtenues au prix d'une plus faible croissance globale.

Période	2010-2015	2010-2020	2020-2030	2030-2040	2040-2050	2010-2050
Référence	0.77%	0.83%	1.09%	1.47%	0.85%	1.06%
PM	0.73%	0.9%	1.32%	1.46%	0.90%	1.15%
PM.T	0.69%	0.86%	1.32%	1.32%	0.87%	1.09%

Tableau 10 : Taux de croissance annuel moyen du PIB du scénario PM.T

Le mécanisme à l'œuvre dans cet effet macro-économique négatif de la taxe carbone peut être décomposé en trois temps :

- i) dans un modèle multisectoriel, la taxe carbone se propage à toute l'économie et renchérit les coûts de production
- ii) la compétitivité internationale des productions 'made in France' est affectée
- iii) le pouvoir d'achat des revenus des ménages est contraint par le renchérissement du 'panier de la ménagère' au-delà même de la facture énergétique.

Ce mécanisme peut être bloqué par la baisse des charges sociales puisque l'effet de propagation joue sur le solde net (fiscalité carbone moins charges sociales). Mais il le fait insuffisamment dans ce scénario¹⁵. La baisse de 2 % du PIB en fin de période ne se reporte pas mécaniquement sur l'emploi, qui baisse très peu entre PM et PM.T parce que la baisse du coût salarial pour un salaire net donné (et un niveau donné de transferts sociaux) favorise les secteurs et technologies intensifs en main-d'œuvre.

Le point important est à nouveau que cet effet n'est pas réparti de façon égale dans le temps. L'effet négatif est plus important à court terme parce que, en raison de l'inertie des systèmes techniques et des comportements, le renchérissement immédiat de la facture énergétique des ménages contraint leur pouvoir d'achat. De même, les systèmes productifs des entreprises ne s'adaptent pas immédiatement au nouveau système de prix. Une fois que cette adaptation est faite, l'impact négatif de la taxe devient suffisamment faible pour que, au total, le taux de croissance dans le scénario PM.T soit supérieur à celui du scénario de référence

Cela est vrai même en fin de période où, bien que l'effet négatif de la taxe redevient important lorsque celle-ci atteint des niveaux très élevés (300 €/tCO₂ en 2050). Il ne compense pas l'effet positif des politiques et mesures à coût négatif. Pendant une première période de cinq ans revanche, le PIB croît à un rythme légèrement inférieur (0,04%) à la référence mais le chômage n'augmente pas en raison de l'augmentation de l'intensité en travail du PIB entraînée par la baisse des coûts salariaux.

¹⁵Pour une étude plus fine de la façon dont le recyclage de la taxe carbone permet d'annuler l'effet de propagation voir Combet et al (2009).

	2015	2020	2030	2040	2050
PM	-2	26	183	254	307
PM.T	2	5	166	174	202

Tableau 11 : Créations d'emplois dans le scénario PM / référence (en milliers d'équivalents temps plein)

Dans un contexte déjà tendu, ce mécanisme peut suffire à interdire l'acceptabilité d'une transition qui permettrait pourtant des performances environnementales supérieures tout en maintenant à moyen et long terme une croissance plus soutenue, un chômage plus faible, des importations énergétiques réduites de 52% en 2050 et une hausse de la consommation non énergétique des ménages de 9% en 2050, et de 0,4% en 2015, chiffre très faible mais qui indique au moins une absence de ponction immédiate sur le pouvoir d'achat.

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	14,3	16	16,8	12,8	13,6
PM	14	14,3	12,1	7,9	8,1
PM.T	13,6	13,7	11,1	7,4	6,7

Tableau 12 : Facture des carburants fossiles (en % de la valeur exports)

La taxe carbone impose donc des frictions à l'économie, par rapport au scénario où seules les P&M sont mises en place (cf. Tableau 10) mais cela n'empêche pas une légère amélioration de la consommation des ménages (cf. Tableau 13). Ceci résulte directement du fait qu'une taxe carbone couplée aux P&M permet de diminuer la facture énergétique des ménages et de sauvegarder leur pouvoir d'achat en biens et services non énergétiques.

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	789	845	981	1162	1291
PM	782	844	1010	1232	1383
PM.T	786	849	1021	1243	1406

Tableau 13 : Consommation de bien composite (G€)

Certes on pourrait trouver des modalités de recyclage permettant d'aller plus loin dans le contrôle des coûts de production, y compris en jouant sur la baisse des charges salariales et patronales et non sur la seule baisse des charges patronales. Mais ces modalités, qui ont un réel impact positif à moyen et long terme et ne résolvent pas le problème d'acceptabilité de court terme puisqu'elles passent, dans un premier temps, par une moindre part du produit de la taxe redonnée aux ménages sous forme de 'chèque vert', nous y revenons plus loin.

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	253	253	257	269	265
PM	253	262	282	313	318
PM.T	257	264	289	319	328

Tableau 14 : Investissements annuels (G€)

Enfin, la transition énergétique repose sur le report de l'investissement vers des choix technologiques bas-carbone. Dans les scénarios PM et PM.T, les investissements totaux augmentent considérablement en volume, déclenchés par les P&M, la taxe carbone mais aussi la hausse de l'impact de la croissance. L'augmentation de 32 milliards d'euros en 2030 peut être

comparée à la fourchette de 264 à 563 milliards de dollars du World Development Report 2010 (World Bank, 2009) pour l'ensemble des pays en voie de développement à cette date.

4.4 Scénario PM.TN : PM.T + négociation sociale

Ces résultats apparemment décevants à court terme ne doivent pas surprendre puisqu'ils correspondent aux résultats théoriques sur la non-automaticité d'un double-dividende au sens fort, même en cas de substitution entre taxe-carbone et charges sociales (Goulder, 1995).

En fait, le paramètre central pour éviter cet effet à court terme est la part de la baisse des charges sociales et patronales qui se retrouve en augmentation du salaire net (Combet et al., 2010a). L'enjeu est le suivant : si une trop forte partie de cette baisse se retrouve en hausse du salaire net, l'effet 'amortisseur' de la hausse des coûts énergétiques par une baisse des coûts du travail se trouve réduit, d'où, une perte de compétitivité ; symétriquement, si cette hausse trop faible, le pouvoir d'achat des salariés diminue il y a un effet dépressif immédiat sur la demande domestique. C'est une des raisons fondamentales qui explique que le rapport Rocard ait recommandé « *la mise en place avec une perspective pluriannuelle d'une gouvernance appropriée, comparable aux « Green Tax Commissions» existant à l'étranger, pour institutionnaliser ce besoin de gouvernance, évaluer son impact, et apprécier l'utilisation de cette recette* »¹⁶.

C'est pourquoi, nous présentons ici un scénario PM.TN dans lequel la négociation sociale sur le partage du produit de la taxe permet un réajustement des salaires nets qui assure un équilibre entre ces deux risques. Dans ce scénario, l'effet positif sur la compétitivité des entreprises et l'emploi est plus fort et plus immédiat, ce qui permet ensuite, un relèvement plus important des salaires réels. Les salaires nets, augmentent par rapport au scénario de référence mais moins que dans le scénario PM.T. En revanche, l'emploi augmente de façon très significative dès le court terme (36 000 emplois en 2015, 260 000 en 2020) tendances qui se confirment sur le long terme avec en 2050 une création d'emplois environ trois fois supérieure à celle du scénario PM et un taux de chômage réduit de 10%.

Un point important pour éviter les malentendus et que ce résultat, contrairement aux précédents, n'est pas dû au seul effet des politiques de transition énergétique. On retrouverait un résultat similaire dans tout scénario sans taxe carbone mais avec une négociation sociale et salariale sur le partage de la baisse des charges sociales patronales obtenues par tout autre biais. Le mécanisme serait le même : baisse des coûts du travail et hausse de la demande finale en raison de la hausse des salaires nets et d'une amélioration de la compétitivité internationale.

Mais, si on prend au sérieux les questions de transition énergétique, on constate en revanche que **la taxe carbone fournit une occasion de lancer cette négociation en lui donnant une marge de manœuvre nouvelle via la diversification des bases fiscales**. Cette marge de manœuvre vient du fait qu'une part de la taxe frappe implicitement les revenus non salariaux et du fait le ratio entre importations d'énergie et exportations baisse de moitié.

¹⁶(Rocard, 2009)

En fait, derrière la technicité des chiffres, on notera que le succès d'une négociation sur le partage de la baisse des charges est conditionnée à la façon dont les salariés ont la garantie que cette baisse contribuera réellement à la baisse des coûts de production ou à l'augmentation de marge réinvestie dans l'appareil de production et non à l'augmentation de revenu dédié à des activités spéculatives ou à des investissements à l'étranger. Il y a donc là un problème de confiance politique et sociale qui sort du champ de l'analyse économique.

Période	2010-2015	2010-2020	2020-2030	2030-2040	2040-2050	2010-2050
Référence	0.77%	0.83%	1.09%	1.47%	0.85%	1.06%
PM	0.73%	0.9%	1.32%	1.46%	0.9%	1.15%
PM.T	0.69%	0.86%	1.32%	1.32%	0.87%	1.09%
PM.TN	0.81%	0.96%	1.37%	1.34%	0.88%	1.14%

Tableau 15 : Taux de croissance annuel moyen du PIB du scénario PM.TN

	2015	2020	2030	2040	2050
PM	-2	26	183	254	307
PM.T	2	5	166	174	202
PM.TN	36	260	525	572	628

Tableau 15 bis : Créations d'emplois par rapport à la référence (en milliers d'équivalents temps plein)

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	253	253	257	269	265
PM	253	262	282	313	318
PM.T	257	264	289	319	328
PM.TN	259	266	293	324	334

Tableau 16 : Investissements annuels (G€)

5 Scénario PM.TN.F : PM.TN + finance carbone

5.1 Définition du scénario

Jusqu'ici nos simulations représentent un monde où les agents économiques ne modifient leurs comportements que sur la seule base des prix du carbone. Or, les décisions d'investissement, surtout dans des secteurs très capitalistiques, sont très sensibles au risque, que celui-ci vienne de la volatilité des prix de l'énergie ou des incertitudes qui pèsent sur le demande finale ou les performances réelles des technologies.

C'est pourquoi, ce scénario PM.TN.F examine la mise en place d'une « finance carbone » de grande ampleur garantie par les pouvoirs publics pour réduire le risque d'investissement pris par le propriétaire du logement, l'acheteur de voiture ou le promoteur de centrales éoliennes en jouant sur deux paramètres :

- La réduction du coefficient risque des investissements bas carbone par rapport aux autres investissements ; c'est pourquoi on adoptera plus bas taux d'actualisation dans les choix de projet (4% au lieu de 8 %) ;
- l'amélioration de la crédibilité des engagements publics sur une « valeur du carbone », que celle-ci soit transmise ou non par des taxes ou par l'insertion de cette valeur

dans la création de certificats carbone fondés sur cette valeur¹⁷. Nous modélisons cet 'effet crédibilité' par des décisions d'investissement prises en fonction d'une anticipation de prix pondérant les prix actuels et les prix futurs du carbone annoncés par le gouvernement.

5.2 Performances énergétiques et environnementales

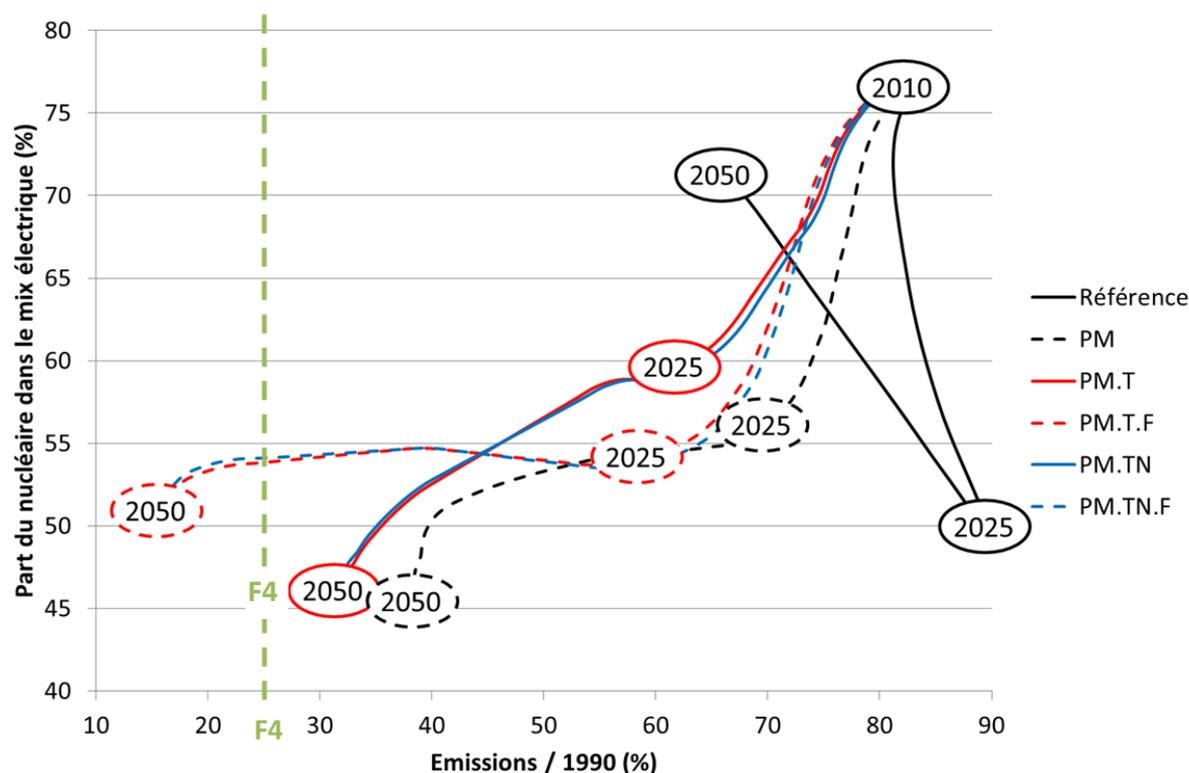


Figure 4 : Performance énergie et environnement du scénario PM.T.F

La Figure 4 présente l'évolution des émissions et de la part du nucléaire dans le mix électrique dans des scénarios (PM.T.F et PM.TN.F) où le levier financier est utilisé en complément de la taxe carbone dans ces deux variantes. Les deux variantes atteignent des performances environnementales quasiment identiques, le point central étant qu'elles dépassent l'objectif Facteur 4 pour aboutir à des réductions d'émissions de -85% (contre -68.5% pour le scénario PM.T). Les instruments financiers améliorent ici grandement la réponse à l'effet signal de la taxe carbone.

La part du nucléaire dans le mix électrique est, elle, légèrement supérieure à celle du scénario PM.T en 2050 pour atteindre environ 50%. Ceci est la conséquence directe de la baisse du taux d'actualisation qui favorise particulièrement une technologie intensive en capital. La puissance installée est de 54 GW dans le scénario PM.T.F en 2050 contre 45 GW dans le

¹⁷Pour la description de ce type d'hypothèse, voir (Hourcade et al., 2012; Zsyan et al., 2012).

scénario PM.T mais on obtient quand même une baisse une significative de la puissance nucléaire installée par rapport aux 69 GW du scénario de référence,.

5.3 Performances économiques et sociales

Sur cette dimension, les résultats des deux variantes sont plus contrastés (cf. Tableau 17), comme l'étaient les résultats des scénarios PM.T et PM.TN.

Si l'on s'en tient au PIB réel cumulé sur toute la période de projection, on observe une hausse du taux de croissance annuel moyen du scénario PM.T.F par rapport à la référence (1,16% contre 1,06%). En d'autres termes, les performances environnementales du scénario PM.T.F sont supérieures à celui du scénario PM.T mais permettent également une croissance plus forte (augmentation de 0.07 points par an du taux de croissance annuel moyen), ceci en améliorant la préparation des agents à l'augmentation futur des prix des énergies. On retrouve le même résultat dans le scénario PM.TN.F, où le niveau moyen de croissance est augmenté de 0.06 points par an sur l'ensemble de la période par rapport au scénario PM.TN.

Période	2010-2015	2010-2020	2020-2030	2030-2040	2040-2050	2010-2050
Référence	0.77%	0.83%	1.09%	1.47%	0.85%	1.06%
PM	0.73%	0.9%	1.32%	1.46%	0.9%	1.15%
PM.T	0.69%	0.86%	1.32%	1.32%	0.87%	1.09%
PM.T.F	0.65%	0.8%	1.38%	1.53%	0.94%	1.16%
PM.TN	0.81%	0.96%	1.37%	1.34%	0.88%	1.14%
PM.TN.F	0.77%	0.9%	1.43%	1.54%	0.94%	1.2%

Tableau 17 : Taux de croissance annuel moyen du PIB des scénarios PM.T.F et PM.TN.F

Cette amélioration de la croissance à long terme se fait encore une fois après une légère dépression à court terme si on compare PM.T.F à PM.T et PM.TN.F à PM.TN. Celle-ci s'explique de façon très simple. En effet, si les ménages et les industries anticipent de manière plus précoce l'évolution de la taxe carbone, elles se préparent mieux à la transition mais au prix de dépenses à court terme qui ont un effet dépressif sur la demande (cf. Tableau 18). La consommation des ménages passe de 786 G€ à 775 G€ entre les scénarios PM.T et PM.T.F. et de 793 G€ à 781 G€ entre les scénarios PM.TN et PM.TN.F en 2015. Ce léger effet dépressif a totalement disparu au cours de la décennie dès 2020. On signalera à nouveau qu'on peut y pallier soit par de recours au crédit, soit en faisant l'hypothèse que les ménages financent leurs investissements en réduisant non pas leur consommation courante mais d'autres placements en France et à l'étranger.

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	789	845	981	1162	1291
PM	782	844	1010	1232	1383
PM.T	786	849	1021	1243	1406
PM.T.F	775	835	1021	1280	1446
PM.TN	793	861	1040	1268	1436
PM.TN.F	781	846	1040	1303	1471

Tableau 18 : Consommation indexée sur les prix du bien composite (G€)

Le mécanisme à l'œuvre ici est le renforcement de la préparation des acteurs économiques aux changements par l'effet crédibilité des outils financiers mis en œuvre. Les investissements croissent significativement, surtout après 2020 et le léger effet dépressif entre PM.TN.F et PM.TN n'empêche cependant pas un gain à court terme (dès 2020) dans le scénario PM.TN.F par rapport au scénario de référence et par rapport au scénario PM.

Un point important de ce scénario est qu'il entraîne une hausse de 100 G€ des investissements en 2050 (dont 7 G€ par an pour la production et transformation d'énergie). A ceci, il faut ajouter l'investissement des ménages pour la rénovation thermique (pouvant aller jusque 25 G€). En cumulé sur la période, cela représente un investissement productif dans le secteur énergétique de 131 G€ (+38%), et pour les ménages 910 G€ (+69%).

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	253	253	257	269	265
PM	253	262	282	313	318
PM.T	257	264	289	319	328
PM.T.F	258	258	296	351	365
PM.TN	259	266	293	324	334
PM.TN.F	259	260	299	356	370

Tableau 19 : Investissements annuels (G€)

En termes économiques, cette augmentation de l'investissement impacte fortement la Formation Brute de Capital Fixe (FBCF). Dans le scénario de référence, le niveau de FBCF des entreprises est réduit pour atteindre 11,9% en 2050. Dans les scénarios PM.T.F et PM.TN.F, le niveau de FBCF atteint 14,8% en 2050. De manière similaire, la FBCF des ménages passe de 0,7% à 1,9%. Au total, la FBCF augmente donc de 4,1%, qui est proche du chiffre annoncé dans le rapport de la Banque Mondiale sur les pays en développement (World Bank, 2009).

5.4 Marges de manœuvre dans le rythme de montée de la taxe carbone

Il est légitime de s'interroger sur le réalisme du scénario précédent qui suggère qu'il serait possible d'aller au-delà du F4. C'est ici qu'il convient de revenir au caractère heuristique d'un exercice qui amène simplement à tirer les conclusions logiques d'une hypothèse où de grandes réductions à coût négatif peuvent se déployer sans trop d'obstacles et sont accompagnées d'une taxe carbone qui passe de 56€/tCO₂ en 2020 à 300€/tCO₂ en 2050, d'une négociation autour du recyclage de cette taxe et d'un effort massif d'investissement. Le degré de réalisme du scénario dépend donc du jugement qu'on peut porter sur la capacité du pays à se mobiliser autour d'une telle combinaison de réformes.

Ce qui est indéniable en revanche est l'importance de la complémentarité entre deux leviers : le signal prix et la finance carbone. Dès lors, puisqu'on sait que la fiscalité carbone s'est historiquement heurtée à des questions d'effets redistributifs entre les ménages et de crainte pour la compétitivité des industries intensives en énergie, il était intéressant de vérifier dans quelle mesure l'effet crédibilité de la finance carbone permettrait une montée plus modérée de la fiscalité carbone pour atteindre l'objectif F4 à 2050.

On trouve alors, une forte diminution de la valeur de la taxe carbone qui passe de 300€/tCO₂ en 2050 à 50€/tCO₂ en 2050. Ceci permet une amélioration significative de la croissance sur le court, moyen et long terme (cf. Tableau 21). Nous ne pouvons prétendre que nos simulations traduisent le bon 'taux de substitution' entre taxe et financements. Ce taux est dépend des secteurs et des procédures de financement elles-mêmes et il y a là place pour des programmes de recherche futurs. En revanche les ordres de grandeur obtenus montrent qu'il serait dangereux, pour la conception même des politiques climatiques, d'ignorer cette nécessité de lier signal-prix et signal financier.

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	82	86	86	69	67
PM	78	74	61	42	39
PM.T	75	69	53	36	32
PM.T.F	72	67	45	21	15
PM.T.F.R	75	71	52	30	24
PM.TN	75	69	54	37	32
PM.TN.F	73	68	46	21	15
PM.TN.F.R	76	72	53	30	25

Tableau 20 : Emissions des scénarios avec taxe réduite (100% correspond aux émissions de 1990)

Période	2010-2015	2010-2020	2020-2030	2030-2040	2040-2050	2010-2050
Référence	0,77	0,83	1,09	1,47	0,85	1,06
PM	0,73	0,9	1,32	1,46	0,9	1,15
PM.T	0,69	0,86	1,32	1,32	0,87	1,09
PM.T.F	0,65	0,8	1,38	1,53	0,94	1,16
PM.T.F.R	0,74	0,87	1,38	1,51	0,98	1,19
PM.TN	0,81	0,96	1,37	1,34	0,88	1,14
PM.TN.F	0,77	0,9	1,43	1,54	0,94	1,2
PM.TN.F.R	0,85	0,97	1,43	1,51	0,99	1,22

Tableau 21 : Taux de croissance annuel moyen du PIB des scénarios PM.T.F.R et PM.TN.F.R

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	253	253	257	269	265
PM	253	262	282	313	318
PM.T	257	264	289	319	328
PM.T.F	258	258	296	351	365
PM.T.F.R	253	261	288	334	346
PM.TN	259	266	293	324	334
PM.TN.F	259	260	299	356	370
PM.TN.F.R	255	263	291	339	352

Tableau 22 : Investissements annuels (G€)

6 Essai de compromis dynamique : une question de 'tuilage'

Les exercices précédents ont fait apparaître que, partant d'un même scénario de référence et d'un même jeu d'hypothèses concernant les potentiels de décarbonisation à coût négatif, on peut introduire des mesures d'accompagnement économique, qui, toutes,

conduisent à des performances environnementales significatives, avec un taux de croissance légèrement supérieur à celui du scénario de référence sur la période 2010-2050. Le point politiquement sensible, pour enclencher la transition, est que ces mêmes politiques conduisent à court terme (sur une période de 5 ans) soit à une baisse des taux de croissance (de 0.12 points de croissance au maximum) soit à une hausse (de 0.04 points de croissance au maximum). L'écart agrégé peut paraître faible mais est un indicateur de tensions qui dans un cas sont allégées, dans un autre sont renforcées et peuvent être importantes pour certaines couches sociales ou segments du système productif.

On aura remarqué que l'écart entre le 'positif' et de 'négatif' vient de l'empilement différent d'outils qui comportent chacun des effets positifs et négatifs distribués de façon inégale dans le temps. Tout l'art de la politique économique consiste donc à **tuiler les mesures pour que ces effets s'équilibrent sans provoquer de phénomène récessif à court terme** qui rendrait la transition politiquement inacceptable. C'est pourquoi nous proposons de boucler notre démarche heuristique en intégrant aux scénarios précédents des paramètres jusqu'ici exclus des simulations précédentes parce qu'ils ne correspondaient à des politiques et changements comportementaux déclenchés dans le seul objectif de la transition énergétique.

6.1 Définition du scénario : politiques d'infrastructures et mutations comportementales

Nous introduirons dans ce jeu de simulations les hypothèses comportementales d'ENCILOWCARB sur des modes de consommation plus sobres en énergie et des politiques d'infrastructures de transports qui contrôlent l'effet rebond de la demande de mobilité basée sur l'automobile et les besoins de transports pour les marchandises avec une inflexion des tendances dans l'organisation des chaînes productives depuis quarante ans. Ces politiques ne se déclencheront qu'après une intégration des problèmes de sécurité énergétique et de prévention des vulnérabilités sociales provoquées par l'éclatement urbain ou par un éclatement spatial trop fort de la production industrielle et agricole. La transition énergétique devient donc ici une composante d'une vision d'ensemble cherchant à réduire les fractures sociales, les coûts d'infrastructure et la désarticulation des tissus productifs de certains territoires.

Le scénario PM.T.F.R.A ajoute donc au scénario PM.T.F.R les politiques d'accompagnement comprises dans l'Encart 3 :

- Politiques d'infrastructures, en particulier en matière de transport, redirigent l'investissement dans les routes pour véhicules individuelles vers les transports collectifs (de manière neutre pour les budgets publics)¹⁸. On introduira en plus une meilleure logistique permet d'améliorer le remplissage de moyens de transport et une plus grande utilisation du rail

¹⁸Il est important de noter que, contrairement aux modifications introduites jusqu'ici, les réorientations d'investissements se font à budget constant du secteur transport.

pour le transport de pondéreux, de même que le développement du télétravail considéré comme diminuant les besoins de transport contraints.

- Une plus grande sobriété des modes de consommation permettant une « dématérialisation de l'économie » et intégrant le fait que, au fur et à mesure de l'enrichissement, les services et achats non matériels représenteront une part de plus en plus importante de la consommation, au détriment des biens matériels (équipement et nourriture).

Urbanisme. Les incitations économiques et la réglementation limitent la croissance de l'étalement urbain jusqu'en 2030. Au-delà, la densité urbaine repart à la hausse.

Programme d'investissements dans les transports urbains. Le montant de ces programmes, qui se traduisent notamment par la mise en service de nouveaux bus et tramways, double à partir de 2012 pour une période de 15 ans.

Télétravail. Il est estimé à un jour ouvré sur dix.

Taux d'occupation des automobiles. Les incitations font passer le taux d'occupation des voitures en milieu urbain de 1,25 à 1,5.

Programme d'investissements ferroviaires. Les investissements dans les infrastructures routières se limitent au seul entretien des infrastructures. Les flux financiers à destination du transport routier sont réorientés vers le transport ferroviaire pendant 20 ans.

Tous les **investissements supplémentaires réalisés dans les transports en commun** proviennent d'une réaffectation partielle des **investissements initialement consacrés aux infrastructures routières**.

Logistique. L'amélioration de la chaîne d'approvisionnement s'accompagne d'un découplage annuel des besoins de transport de marchandises égal à 1% dans tous les secteurs.

Infrastructures. La part du mode de transport de marchandises par voie ferrée n'atteint que 20% en 2030 (hypothèse exogène).

Dématérialisation. Modification des modes de consommation en faveur d'une plus grande consommation de services au détriment de la consommation matérielle.

Encart 3 : politiques d'infrastructures et mutations comportementales additionnelles dans le scénario PM.T.F.R.A

6.2 Performances dynamique et « tuilage » temporel

Dans ces scénarios, nous adaptons la valeur de la taxe carbone pour atteindre un F4 et, sans surprise, des performances environnementales similaires au scénario précédent PM.FN.F.R sont atteintes avec un taux de croissance légèrement supérieur sur la période et, surtout sur la période de transition la plus difficile, c'est-à-dire celle qui précède 2020 avec un taux de croissance annuel supérieur de 0,4 points de pourcentage au lieu de 0,1% sur 2010-2050. Ce résultat s'explique par les deux mécanismes suivants :

- un impact positif à court terme en raison de changements de comportement qui se traduisent par une baisse de la dépense énergétique comme le taux d'occupation des voitures
- un moindre taux de croissance à long terme de la mobilité donc de la dépendance vis-à-vis de l'essence ex-hydrocarbures, source d'émission pour laquelle le pétrole garde une très grande réserve de compétitivité. Les niveaux de taxe nécessaires pour atteindre le F4 sont alors bien moins élevés en fin de période.

Période	2010-2015	2010-2020	2020-2030	2030-2040	2040-2050	2010-2050
Référence	0,77	0,83	1,09	1,47	0,85	1,06
PM	0,73	0,9	1,32	1,46	0,9	1,15
PM.T	0,69	0,86	1,32	1,32	0,87	1,09
PM.T.F	0,65	0,8	1,38	1,53	0,94	1,16
PM.T.F.R	0,74	0,87	1,38	1,51	0,98	1,19
PM.T.F.R.A.	0,76	0,91	1,41	1,49	0,99	1,2
PM.TN	0,81	0,96	1,37	1,34	0,88	1,14
PM.TN.F	0,77	0,9	1,43	1,54	0,94	1,2
PM.TN.F.R	0,85	0,97	1,43	1,51	0,99	1,22
PM.TN.F.R.A.	0,87	1	1,46	1,5	0,97	1,23

Tableau 23 : Taux de croissance annuel moyen du PIB des scénarios PM.T.F.R.A

Ainsi, le taux de croissance du PIB sur l'ensemble de la période s'améliore de 17% par rapport au scénario de référence. Plusieurs facteurs se combinent pour aboutir à ce résultat qui correspond bien à l'idée de 'croissance verte':

- **Une amélioration de l'emploi.** Le scénario de transition PM.TN.F.R.A crée 839 000 équivalents temps plein par rapport au scénario de référence, ceci avec une augmentation du salaire réel qui atteint +18.5% en 2050.

	2015	2020	2030	2040	2050
Population active	25421	25460	25446	25764	25864
Référence	22749	21937	21363	21504	21466
PM	-2	26	183	254	307
PM.T.F.R	33	47	221	347	469
PM.T.F.R.A.	35	77	274	381	500
PM.TN.F.R	59	290	565	699	824
PM.TN.F.R.A.	60	312	604	727	839

Tableau de synthèse 1 : Créations d'emplois par rapport à la référence (en milliers d'équivalents temps plein)

- **Une augmentation de la consommation ;** elle atteint 12.4% sur la période en 2050 et dérive mécaniquement de l'augmentation du pouvoir d'achat des ménages.

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	789	845	981	1162	1291
PM	782	844	1010	1232	1383
PM.T	786	849	1021	1243	1406
PM.T.F.R	779	838	1019	1268	1429
PM.T.F.R.A.	783	843	1023	1266	1428
PM.TN.F.R	785	849	1037	1290	1454
PM.TN.F.R.A.	789	853	1041	1287	1451

Tableau 24 : Consommation indexée sur les prix du bien composite (G€)

	2015	2020	2030	2040	2050
PM	5,0	8,5	16,1	27,4	38,3
PM.T	4,9	8,6	18,1	31,1	43,2
PM.T.F.R	5,4	9,0	19,0	33,4	47,2
PM.T.F.R.A.	5,1	8,6	18,3	32,1	45,5
PM.TN.F.R	5,3	8,8	18,8	33,4	47,1
PM.TN.F.R.A.	5,0	8,4	18,1	31,9	45,4

Tableau 25 : Salaires (rapportés au prix du bien composite)

- **Une hausse de l'investissement** (90 près de 100 milliards en 2050, ce qui représente une augmentation d'un tiers due à la fois aux 'investissements de transition' et à l'augmentation de la croissance qui libère des revenus pour investir et les besoins d'investissement.

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	253	253	257	269	265
PM	253	262	282	313	318
PM.T	257	264	289	319	328
PM.T.F.R	253	261	288	334	346
PM.T.F.R.A.	255	266	297	340	353
PM.TN.F.R	255	263	291	339	352
PM.TN.F.R.A.	256	268	300	344	357

Tableau 26 : Investissements annuels (G€)

- **Une facture énergétique en forte diminution.** Les imports d'hydrocarbures et produits pétroliers sont divisés par trois par rapport au scénario de référence.

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	14,3	16,0	16,8	12,8	13,6
PM	14,0	14,3	12,1	7,9	8,1
PM.T	13,6	13,7	11,1	7,4	6,7
PM.T.F.R	13,7	14,1	11,0	5,7	5,0
PM.T.F.R.A.	13,5	13,7	10,5	5,4	4,6
PM.TN.F.R	13,7	14,1	11,0	5,7	5,0
PM.TN.F.R.A.	13,5	13,8	10,5	5,4	4,9

Tableau 27 : Facture des carburants fossiles (en % de la valeur exports)

Ces résultats semblent confirmer le potentiel positif de transformation de l'économie française via une transition énergétique. Lorsque toutes les mesures décrites sont mises en place, il est possible de profiter de s'affranchir en partie du poids de l'énergie importée, tout en accédant à un niveau élevé de performance environnementale. Bien sûr, des retards et des imperfections dans la mise en place des mesures peuvent amoindrir le caractère positif de ces résultats. Ils montrent en fait l'intérêt d'un tuilage fin des mesures dans le temps pour éviter qu'un choc de court terme ne menace l'enclenchement de la transition.

7 Vers des scénarios de sortie du nucléaire ?

Nous prendrons le risque, dans ce dernier jeu de simulations, d'apporter quelques éléments d'information sur la question de la « sortie du nucléaire ». Nous parlons de prise de risque à la fois parce que le débat est très sensible et provoque des crispations peu propices à la recherche de compromis et parce que nous sommes conscients d'être ici à la limite de ce qu'on peut tirer du modèle IMACLIM-R en l'état actuel de son développement. Une stratégie cohérente de sortie du nucléaire implique en effet une politique industrielle spécifique et des mécanismes de gestion de la reconversion des compétences et de réhabilitation des sites que nous sommes loin de pouvoir représenter. Il est pourtant intéressant d'examiner comment le modèle actuel se comporte face à une telle perspective stratégique, ce qui signifie implicitement que ces problèmes sont surmontés.

Nous testons d'abord deux hypothèses où la France, vu le cumul d'expérience et le stock d'équipement installé sur cette technologie, n'adopte pas d'objectif de sortie mais met en place les outils d'un principe de précaution traduit de deux façons :

- Le scénario N1 où le coût d'investissement du nucléaire est doublé.
- Le scénario N2 qui, en outre, réduit la durée d'extension des centrales nucléaires de 20 ans à 10 ans (pour une durée de vie totale de 50 ans).

Le résultat important est qu'aucune de ces deux mesures ne suffit à changer de façon drastique la part du nucléaire dans l'offre électrique en 2050. Elle passe de 49% dans le scénario précédent à 43%, avec un impact plus important sur les puissance installées qui passent à 38 et 39 GW contre 69 dans le scénario de référence et 53 GW dans le scénario PM.TN.F.R.A.. Ces deux scénarios sont donc des scénarios qui privilégient la « valeur d'option », c'est-à-dire la possibilité de choisir entre organiser une sortie lente du nucléaire après 2050 ou le perpétuer voire le relancer en l'absence d'alternatives crédibles. On peut même penser que, n'exigeant pas de mesures drastiques de reconversion et des mutations structurelles profondes, ces deux scénarios ne sortent pas du domaine de pertinence du modèle.

Tel n'est pas le cas du dernier scénario, qu'il faut tenir comme purement exploratoire, où nous testons une sortie volontariste du nucléaire fondé sur l'interdit de la construction de nouvelles centrales nucléaires sur l'ensemble de la période (scénario N3). L'objectif de sortie du nucléaire est quasiment atteint en 2050 puisqu'il ne reste plus que 2 GW installés. Bien sûr il importe d'en saisir les implications environnementales et économiques dans le cadre des jeux d'hypothèses adoptées ici (dont on rappellera qu'elles cumulent un très important gisement de mesures à coût négatif et une forte mobilisation d'outils fiscaux et financiers).

Pour les émissions de gaz à effet de serre, le Facteur 4 est atteint, mais cela se fait :

- avec 37% de l'offre électrique désormais assurée par des énergies fossiles (principalement du gaz et un peu de charbon), dont les émissions absorbées par la séquestration du carbone. Cela suppose donc un pari sur la disponibilité d'une telle technologie à grande échelle, à un coût acceptable et avec une maîtrise totale des rejets ultérieurs de carbone. Si ce pari n'est pas tenu, et si on adopte des rythmes plus lents de pénétration des

politiques et mesures à coûts négatifs et des énergies renouvelables, la sortie du nucléaire se fera donc un coût réel en termes d'émissions de gaz à effets de serre.

- une dégradation de la dépendance énergétique qui passe de 21 Mtep d'importations dans le scénario PM.TN .F.R.A. à 96 Mtep (contre 86 Mtep en référence) puisque le nucléaire est ici remplacé par du gaz (et un peu de charbon) importé

Economiquement la sortie du nucléaire se fait, par rapport au dernier scénario présenté ici (PM.TN.F.R.A.), avec une baisse de 0.12 points de croissance du taux de croissance moyen sur la période, soit une baisse de 5% du PIB, soit encore un retard de 4,5 ans de croissance.

Il y a deux façons de lire ce résultat. La première est qu'on peut dessiner un scénario de sortie du nucléaire qui ne provoque pas une stagnation économique puisque le taux de croissance obtenu est finalement supérieur au taux de croissance annule de référence (1,11% contre 1,06%). On considère alors, pour parler trivialement, que les mesures du scénario PM.TN.F.R.A. permettent de 'se payer' la sortie du nucléaire. La deuxième est de considérer que le coût net de la sortie est bien quatre ans et demi de retard de croissance sur quarante ans, que ce coût serait supérieur si on intégrait les coûts de restructuration industrielle et de reconversion du potentiel humain et qu'il ne faut oublier ni le pari sur la séquestration du carbone ni l'impact négatif important en matière de sécurité énergétique.

Mais le résultat le plus important est peut-être que les impacts négatifs de la sortie sont négligeables à court terme vu l'inertie des systèmes énergétiques. En termes d'action publique, la comparaison des scénarios N1, N2 et N3, montre que le choix de la bifurcation sur la sortie du nucléaire ne se présente qu'à partir de la décennie 2020, puisque les investissements dans de nouveaux équipements nucléaires se déroulent à cette période.

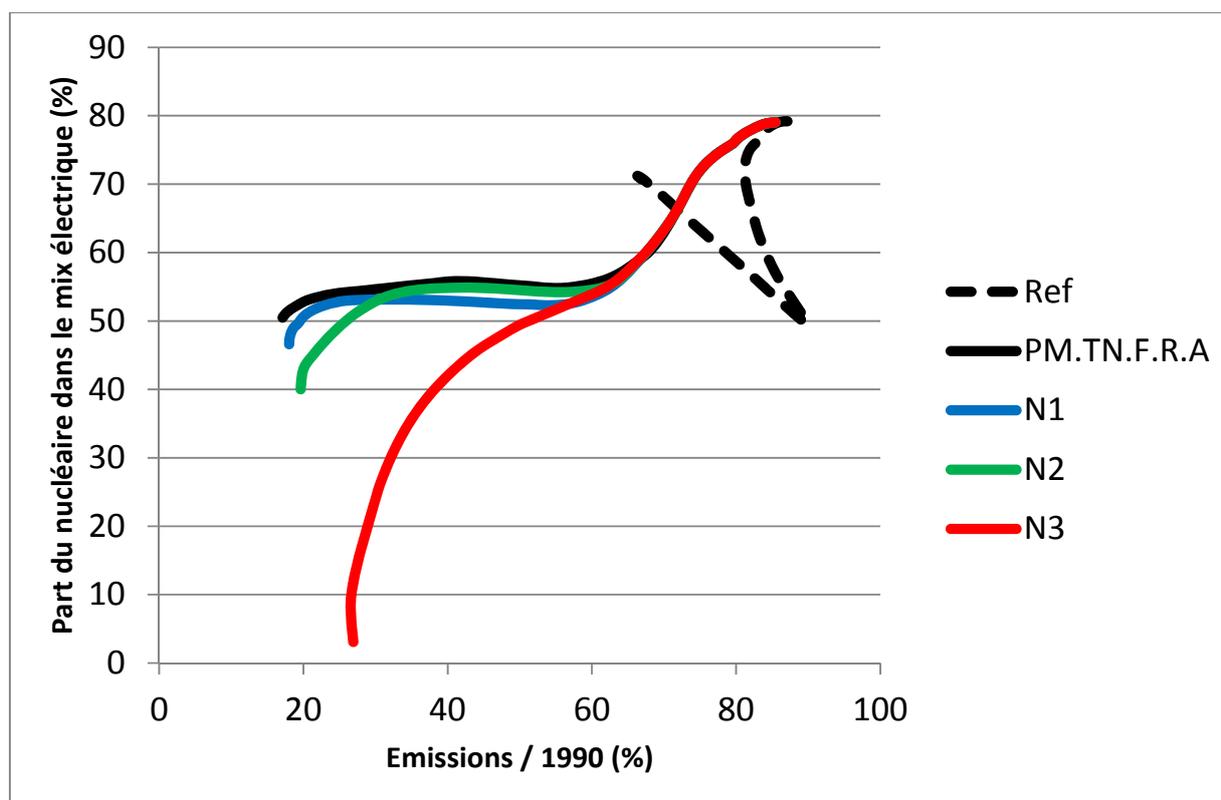


Figure 5 : Performance environnementale et énergétique des scénarios alternatifs sur le nucléaire

	Emissions / 1990	TCAM du PIB	Capacités nucléaire	Part du nucléaire	Capacité CSC	Part du mix élec CSC
PM.TC.F.R.A	17%	1,23%	53 GW	49%	2 GW	1%
PM.TC.F.R.A + N1	18%	1,21%	38 GW	43%	10 GW	5%
PM.TC.F.R.A + N2	18%	1,22%	39 GW	43%	16 GW	6%
PM.TC.F.R.A + N3	25%	1,1%	2 GW	2%	37 GW	37%

8 Conclusion

Le message central des exercices numériques présentés dans cette étude est que des hypothèses optimistes sur le ratio coût/efficacité des technologies d'offre énergétique et sur les potentiels d'économie d'énergie 'à coût négatif' ne suffisent pas à garantir une réduction par quatre des émissions de GES et à faire de la transition énergétique un levier de croissance.

On montre d'abord que le bilan macroéconomique d'un même jeu d'hypothèses sur les conditions techniques de l'offre et la demande d'énergie varie fortement selon qu'il est inséré ou non dans un ensemble de mesures qui ne ressortissent pas du seul domaine des politiques énergétiques : politiques fiscales pour éviter la propagation des surcoûts de l'énergie dans l'appareil de production, négociation sociale et salariale pour gérer le recyclage du produit d'une taxe carbone, réforme des structures de financement, politiques industrielles et de formation aux nouveaux métiers, politiques d'infrastructures en particulier dans le domaine du transport et des politiques urbaines et changement comportementaux.

Nous montrons ensuite comment une politique de financement baissant le coefficient risque des investissements 'bas carbone' permettrait, en améliorant la crédibilité des politiques publiques, de réduire les craintes qui expliquent la frilosité des acteurs économiques et de déclencher une réorientation des investissements plus rapide vers des équipements sobres en énergie. Le F4 devient alors envisageable en mettant en jeu des réductions de consommations d'énergie et des offres peu carbonées qui vont au-delà des mesures à coût négatif.

Le bilan macroéconomique change selon les modalités de la transition mais est positif à moyen et long terme en matière de croissance et d'emploi, ceci en raison de la synergie entre trois mécanismes : baisse des importations d'énergie, économies d'énergie libérant le pouvoir d'achat des ménages en biens et services non énergétiques, baisse du coût du travail permis par une taxe carbone. En revanche, les impacts économiques peuvent être légèrement défavorables à court terme, en raison du décalage entre les coûts des politiques et leurs bénéfices. De possibles tensions peuvent en résulter avec certaines couches sociales et des secteurs industriels intensifs en énergies et exposés à la concurrence internationale. L'accompagnement économique de la transition est alors décisif pour passer d'un bilan légèrement négatif à court terme à un bilan positif qui, pour léger qu'il soit donnerait le 'grain à moudre' nécessaire pour réduire ces tensions.

Un tuilage dans le temps des mesures est ici un élément clef de gestion des tensions en permettant une montée en puissance plus lente d'une taxe carbone et la mise en place de mesures de compensation pour les populations et activités vulnérables. L'enjeu est un 'effet crédibilité' venant de la conduite cohérente de politiques de prix et de financement guidant les anticipations des acteurs dans un contexte défavorable. Cet effet crédibilité sera renforcé si la transition énergétique s'inscrit dans une vision d'ensemble de réduction des fractures sociales, des coûts d'infrastructure et de la désarticulation des tissus productifs de certains territoires.

Quant au dossier nucléaire, nous faisons apparaître une grande différence entre un nucléaire contraint par des exigences accrues 'de précaution' et une sortie volontariste à l'horizon 2050 avec interdiction de construction de nouvelles centrales. Cette dernière hypothèse suppose, pour respecter le F4, un développement important et précoce du CCS et conduit à un retard de croissance de 4,5 ans sur 40 ans compte non tenu des coûts de reconversion, et, en sens inverse, de changements profonds des comportements et des structures économiques. Des scénarios 'nucléaire de précaution' limitent sa place autour de 40% du mix énergétique à 2050 et permettent de reculer une décision de sortie ou de nouveau déploiement qui pourra être prise plus tard « en meilleure connaissance cause ».

En fait, mais ceci sort du domaine de pertinence d'un exercice de prospective numérique, la crédibilité politique d'un report de la décision de sortie et de toute fermeture prématurée de centrales nucléaires suppose que soient lancés des efforts réels de recherche, recherche & développement et d'enclenchement de mécanismes d'apprentissage sur des filières alternatives. Sans cela un report de décision serait interprété comme un leurre et préparerait un renforcement des crispations.

Il y a donc place pour un enclenchement de la transition énergétique donnant priorité à la maîtrise des consommations d'énergie et à la décarbonisation des systèmes énergétiques sans que cet enclenchement soit bloqué par des crispations autour de décisions symboliques préparant le terrain pour des remises en cause futures. Une décision lourde sur le nucléaire devra, en tout état de cause, être prise dans dix ans. L'enjeu, aujourd'hui est de se mettre en position de la prendre avec un fort consensus national autour non seulement du choix technologique ultime, quel qu'il soit mais aussi des politiques économiques et sociales cohérentes avec ce choix.

Références

Bibas, R. (2013). Imaclim-{R} France model documentation.

Bibas, R., Mathy, S., and Fink, M. (2012). Élaboration d'un scénario bas carbone pour la France : Une approche participative pour intégrer l'acceptabilité sociale et économique (CIRED RAC-F).

Combet, E., Gherzi, F., Hourcade, J.C., and Thubin, C. (2010a). Économie d'une fiscalité carbone en France, éléments d'un débat toujours nécessaire. Publ. Ires *Rapport réalisé avec le soutien de la Cfdt et de l'Ademe.*, 36–40.

Combet, E., Gherzi, F., Hourcade, J.C., and Théry, D. (2010b). Carbon Tax and Equity: The Importance of Policy Design. *Crit. Issues Environ. Tax.*

Finon, D. (2013). The transition of the electricity system towards decarbonization: the need for change in the market regime. *Clim. Policy* 13, 130–145.

Goulder, L.H. (1995). Environmental taxation and the double dividend: a reader's guide. *Int. Tax Public Finance* 2, 157–183.

Hourcade, J.C. (1993). Modelling long-run scenarios: Methodology lessons from a prospective study on a low CO2 intensive country. *Energy Policy* 21, 309–326.

Hourcade, J.C. (2007). Les modèles dans les débats de politique climatique: entre le Capitole et la Roche tarpéienne. In *Les Modèles Du Futur. Changement Climatique et Scénarios Économiques: Enjeux Politiques et Économiques*, (Paris: A. Dahan-Dalmédico), pp. 140–164.

Hourcade, J.C., Shukla, P., and al. (2001). Chapter 8: Global, regional, and national costs and ancillary benefits of mitigation. In *Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*, B. Metz, O. Davidson, and J. Pan, eds. (Cambridge: Cambridge University Press), pp. 499–559.

Hourcade, J.C., Fabert, B.P., and Rozenberg, J. (2012). Venturing into uncharted financial waters: an essay on climate-friendly finance. *Int. Environ. Agreements Polit. Law Econ.* 12, 165–186.

Hourcade, J.-C., Richels, R., and Robinson, J. (1996). Chapter 8: Estimating the Costs of Mitigating Greenhouse Gases. In *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change*, J.P. Bruce, L. Hoesung, and E.F. Haites, eds. (IPCC),.

Jaffe, A.B., and Stavins, R.N. (1994). The energy-efficiency gap What does it mean? *Energy Policy* 22, 804–810.

Lefèvre, J., Combet, E., and Hourcade, J.-C. (2013). Construction de matrices entrées-sorties en indicateurs physiques et en valeur monétaire pour les modèles d'équilibre général hybrides : application à l'économie brésilienne. (Chaire "Modélisation prospective au service du développement durable").

Rocard, M. (2009). Rapport de la Conférence des Experts et de la Table Ronde sur la Contribution Climat et Énergie (Paris, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer, de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi).

Sassi, O., Crassous, R., Hourcade, J.-C., Gitz, V., Waisman, H., and Guivarch, C. (2010). Imaclim-R: a modelling framework to simulate sustainable development pathways. *Int. J. Glob. Environ. Issues* 10, 5–24.

Waisman, H., Rozenberg, J., Sassi, O., and Hourcade, J.-C. (2012). Peak Oil profiles through the lens of a general equilibrium assessment. *Energy Policy*.

World Bank (2009). *World Development Report 2010: Development and Climate Change* (Washington DC: World Bank).

Aglietta M., Hourcade J.C.: Can Indebted Europe Afford Climate Policy? Can It Bail Out Its Debt Without Climate Policy? (2012). *Green growth. Intereconomics* 47, 140–164.

9 Figures récapitulatives

9.1 Nomenclature des scénarios

Dénomination	Contenu du scénario
Référence	Scénario sans politiques et mesures particulières (continuation des tendances actuelles)
PM	Scénario comprenant l'ensemble des politiques et mesures dites « acceptables » dans les scénarios ENCILOWCARB, en excluant celles qui impliquent des mutations de la société trop complexes pour être enclenchées « par décret ».
PM.T	Scénario PM auquel est rajoutée la taxe carbone (valeurs préconisées par le rapport Quinet).
PM.TN	Scénario PM.T avec négociation salariale renforcée.
PM.T.F	Scénario PM.T avec « finance carbone » (réduction du coefficient risque des investissements bas carbone et amélioration de la crédibilité de l'engagement public sur la taxe carbone)
PM.T.F.R	Scénario PM.T.F avec taxe réduite pour atteindre un F4
PM.T.F.R.A.	Scénario PM.T.F.R avec politiques d'accompagnement (politiques d'infrastructure et sobriété de la consommation)
PM.TN.F	Scénario PM.TN avec « finance carbone » (réduction du coefficient risque des investissements bas carbone et amélioration de la crédibilité de l'engagement public sur la taxe carbone)
PM.TN.F.R	Scénario PM.TN.F avec taxe réduite pour atteindre un F4
PM.TN.F.R.A.	Scénario PM.TN.F.R avec politiques d'accompagnement (politiques d'infrastructure et sobriété de la consommation)
N1	PM.TN.F.R.A où le coût d'investissement du nucléaire est doublé
N2	N1 qui réduit la durée d'extension du nucléaire existant à 10 ans (la durée totale de vie atteint 50 ans)
N3	N2 avec interdiction d'installation de nouvelles capacités nucléaires

Tableau de synthèse 2 : Dénomination des scénarios dans le document

9.2 Performances énergétiques et environnementales

9.2.1 Emissions

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	82	86	86	69	67
PM	78	74	61	42	39
PM.T	75	69	53	36	32
PM.TN	75	69	54	37	32
PM.T.F	72	67	45	21	15
PM.T.F.R	75	71	52	30	24
PM.T.F.R.A.	74	68	50	28	23
PM.TN.F	73	68	46	21	15
PM.TN.F.R	76	72	53	30	25
PM.TN.F.R.A.	74	69	51	28	23

Tableau de synthèse 3 : Emissions (100% correspond aux émissions de 1990)

9.2.2 Part du nucléaire dans le mix électrique

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	70	59	51	68	71
PM	71	62	55	52	46
PM.T	72	65	58	51	46
PM.TN	72	65	58	52	47
PM.T.F	69	59	54	54	51
PM.T.F.R	70	61	55	53	48
PM.T.F.R.A.	70	61	55	53	48
PM.TN.F	69	59	54	54	51
PM.TN.F.R	70	61	55	53	49
PM.TN.F.R.A.	70	61	55	53	49

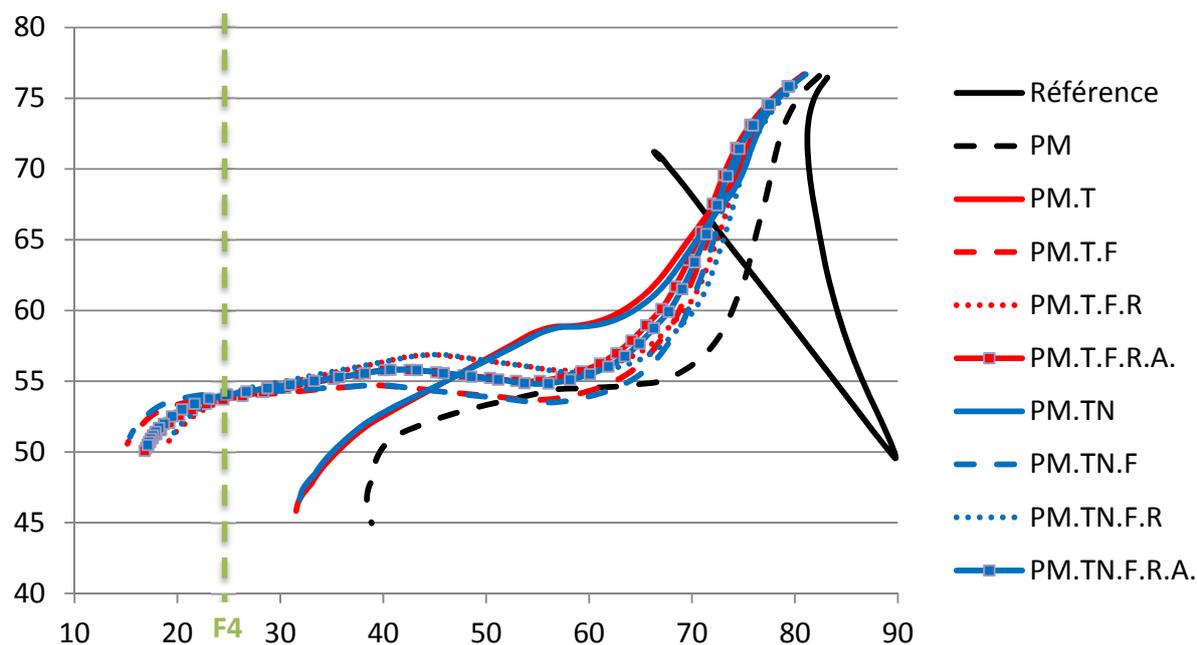
Tableau de synthèse 4 : Part du nucléaire dans le mix électrique (%)

9.2.3 Puissance installée nucléaire

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	54	41	39	69	69
PM	54	41	42	59	33
PM.T	54	41	45	71	45
PM.TN	54	41	45	72	46
PM.T.F	54	41	42	71	54
PM.T.F.R	54	41	44	72	46
PM.T.F.R.A.	54	41	44	72	46
PM.TN.F	54	41	42	71	54
PM.TN.F.R	54	41	44	72	49
PM.TN.F.R.A.	54	41	44	72	46

Tableau de synthèse 5 : Part du nucléaire dans le mix électrique

9.2.4 Diagramme performance énergétique et environnementale



9.2.5 Tableau récapitulatif énergie-environnement

	Emissions / 1990	Consommation d'énergie finale / 2010	Part du nucléaire dans le mix électrique
Référence	67%	+2%	71%
PM	39%	-20,1%	45%
PM.T	32%	-25,4%	46%
PM.TN	32%	-24,6%	47%
PM.T.F	15%	-36,2%	51%
PM.T.F.R	24%	-29,7%	48%
PM.T.F.R.A.	23%	-31,2%	48%
PM.TN.F	15%	-35,5%	51%
PM.TN.F.R	25%	-29,0%	49%
PM.TN.F.R.A.	23%	-30,5%	48%

Tableau de synthèse 6 : Récapitulatif des indicateurs énergie et environnement pour l'année 2050

9.3 Performances économiques et sociales

9.3.1 Taux de croissance du PIB réel

Période	2010-2015	2010-2020	2020-2030	2030-2040	2040-2050	2010-2050
Référence	0,77	0,83	1,09	1,47	0,85	1,06
PM	0,73	0,9	1,32	1,46	0,9	1,15
PM.T	0,69	0,86	1,32	1,32	0,87	1,09
PM.TN	0,81	0,96	1,37	1,34	0,88	1,14
PM.T.F	0,65	0,8	1,38	1,53	0,94	1,16
PM.T.F.R	0,74	0,87	1,38	1,51	0,98	1,19
PM.T.F.R.A.	0,76	0,91	1,41	1,49	0,99	1,2
PM.TN.F	0,77	0,9	1,43	1,54	0,94	1,2
PM.TN.F.R	0,85	0,97	1,43	1,51	0,99	1,22
PM.TN.F.R.A.	0,87	1	1,46	1,5	0,97	1,23

Tableau de synthèse 7 : TCAM du PIB réel (%)

9.3.2 Emplois

	2015	2020	2030	2040	2050
Population active	25421	25460	25446	25764	25864
Référence	22749	21937	21363	21504	21466
PM	-2	26	183	254	307
PM.T	2	5	166	174	202
PM.TN	36	260	525	572	628
PM.T.F	37	14	194	354	461
PM.T.F.R	33	47	221	347	469
PM.T.F.R.A.	35	77	274	381	500
PM.TN.F	62	265	544	707	818
PM.TN.F.R	59	290	565	699	824
PM.TN.F.R.A.	60	312	604	727	839

Tableau de synthèse 8 : Créations d'emplois par rapport à la référence (en milliers d'équivalents temps plein)

9.3.3 Salaires

	2015	2020	2030	2040	2050
PM	5,0	8,5	16,1	27,4	38,3
PM.T	4,9	8,6	18,1	31,1	43,2
PM.TN	5,3	9,3	19,3	32,4	44,9
PM.T.F	5,3	9,1	19,1	32,3	44,9
PM.T.F.R	5,4	9,0	19,0	33,4	47,2
PM.T.F.R.A.	5,1	8,6	18,3	32,1	45,5
PM.TN.F	5,1	8,8	18,8	32,5	45,9
PM.TN.F.R	5,3	8,8	18,8	33,4	47,1
PM.TN.F.R.A.	5,0	8,4	18,1	31,9	45,4

Tableau de synthèse 9 : Salaires (rapportés au prix du bien composite)

9.3.4 Consommation

	Carburants	Autres tpts	Résidentiel	Constr. Rénov.	Conso
Référence	94	34	48	12	792
PM	92	34	46	22	785
PM.T	95	34	48	22	791
PM.TN	95	35	48	22	798
PM.T.F	95	34	46	32	783
PM.T.F.R	93	34	45	26	789
PM.T.F.R.A.	90	34	45	26	793
PM.TN.F	95	34	46	32	790
PM.TN.F.R	93	34	45	26	795
PM.TN.F.R.A.	90	34	45	26	799

Tableau de synthèse 10 : Consommation 2015 (valeur nominale)

	Carburants	Autres tpts	Résidentiel	Constr. Rénov.	Conso
Référence	106	36	57	13	952
PM	92	34	46	27	1009
PM.T	97	35	48	27	1026
PM.TN	98	35	48	27	1044
PM.T.F	86	34	43	38	1031
PM.T.F.R	88	34	44	29	1029
PM.T.F.R.A.	82	40	44	30	1040
PM.TN.F	87	34	43	38	1048
PM.TN.F.R	89	34	44	30	1046
PM.TN.F.R.A.	83	40	44	30	1056

Tableau de synthèse 11 : Consommation 2030 (valeur nominale)

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	789	845	981	1162	1291
PM	782	844	1010	1232	1383
PM.T	786	849	1021	1243	1406
PM.TN	793	861	1040	1268	1436
PM.T.F	775	835	1021	1280	1446
PM.T.F.R	779	838	1019	1268	1429
PM.T.F.R.A.	783	843	1023	1266	1428
PM.TN.F	781	846	1040	1303	1471
PM.TN.F.R	785	849	1037	1290	1454
PM.TN.F.R.A.	789	853	1041	1287	1451

Tableau de synthèse 12 : Consommation indexée sur les prix du bien composite (G€)

9.3.5 Investissement

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	253	253	257	269	265
PM	253	262	282	313	318
PM.T	257	264	289	319	328
PM.TN	259	266	293	324	334
PM.T.F	258	258	296	351	365
PM.T.F.R	253	261	288	334	346
PM.T.F.R.A.	255	266	297	340	353
PM.TN.F	259	260	299	356	370
PM.TN.F.R	255	263	291	339	352
PM.TN.F.R.A.	256	268	300	344	357

Tableau de synthèse 13 : Investissements annuels (G€)

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	6,86	7,11	12,83	8,73	3,21
PM	11,46	12,15	13,39	6,97	6,26
PM.T	12,04	14,14	15,18	6,79	5,51
PM.TN	12,07	14,16	15,54	6,79	5,51
PM.T.F	11,47	12,84	17,92	8,82	5,26
PM.T.F.R	11,97	13,28	15,84	6,69	5,38
PM.T.F.R.A.	11,78	13,05	15,8	6,69	5,36
PM.TN.F	11,5	12,87	17,91	8,82	5,27
PM.TN.F.R	11,89	13,17	16,53	7,42	5,38
PM.TN.F.R.A.	11,81	13,08	15,8	6,69	5,27

Tableau de synthèse 14 : Investissements annuels dans l'énergie (hors ménages) (G€)

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	15,5	14,5	13,5	12,7	11,9
PM	15,5	14,9	14,3	14,3	13,7
PM.T	15,6	14,9	14,4	14,4	13,9
PM.TN	15,6	14,8	14,4	14,4	13,9
PM.T.F	15,6	14,6	14,7	15,4	14,8
PM.T.F.R	15,4	14,8	14,4	14,8	14,3
PM.T.F.R.A.	15,4	15,0	14,7	15,0	14,5
PM.TN.F	15,6	14,6	14,7	15,3	14,8
PM.TN.F.R	15,4	14,8	14,3	14,8	14,3
PM.TN.F.R.A.	15,4	14,9	14,7	14,9	14,5

Tableau de synthèse 15 : Poids de l'investissement total dans le PIB (%)

Période	Energie (hors ménages)	Total
Référence	346	10733
PM	426	11814
PM.T	453	12048
PM.TN	458	12195
PM.T.F	477	12563
PM.T.F.R	457	12214
PM.T.F.R.A.	454	12433
PM.TN.F	477	12698

PM.TN.F.R	465	12344
PM.TN.F.R.A.	454	12560

Tableau de synthèse 16 : Investissement cumulé sur la période (G€)

9.3.6 Imports énergétiques

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	99	115	120	85	92
PM	97	101	80	49	53
PM.T	93	95	71	45	41
PM.TN	94	97	73	45	42
PM.T.F	91	94	62	22	17
PM.T.F.R	95	99	72	34	31
PM.T.F.R.A.	93	95	67	32	28
PM.TN.F	91	96	63	22	18
PM.TN.F.R	95	100	73	35	30
PM.TN.F.R.A.	93	96	68	32	30

Tableau de synthèse 17 : Investissements annuels (G€)

9.3.7 Facture énergétique

	2015	2020	2030	2040	2050
Référence	14,3	16,0	16,8	12,8	13,6
PM	14,0	14,3	12,1	7,9	8,1
PM.T	13,6	13,7	11,1	7,4	6,7
PM.TN	13,6	13,8	11,1	7,3	6,7
PM.T.F	13,3	13,7	10,0	3,8	3,0
PM.T.F.R	13,7	14,1	11,0	5,7	5,0
PM.T.F.R.A.	13,5	13,7	10,5	5,4	4,6
PM.TN.F	13,3	13,7	10,1	3,8	3,1
PM.TN.F.R	13,7	14,1	11,0	5,7	5,0
PM.TN.F.R.A.	13,5	13,8	10,5	5,4	4,9

Tableau de synthèse 18 : Facture des carburants fossiles (en % de la valeur exports)



Les Cahiers de la Chaire

Chaire Modélisation prospective au service du développement durable

Contact

Nadia MAÏZI

Directrice du Centre de Mathématiques Appliquées (CMA)

MINES ParisTech / CMA
Rue Claude Daunesse
BP 207
06904 Sophia Antipolis

Tel: +33(0)4 97 15 70 79 / Fax: +33(0)4 97 15 70 66
Courriel: nadia.maizi@mines-paristech.fr

Jean-Charles HOURCADE

**Directeur du Centre International de Recherche sur
l'Environnement et le Développement (CIRED)**

CIRED
Campus du Jardin Tropical
45 avenue de la Belle Gabrielle
94736 Nogent sur Marne Cedex

Tel: +33(0)1 43 94 73 63 / Fax: +33(0)1 43 94 73 70
Courriel: hourcade@centre-cired.fr

Site Web: <http://www.modelisation-prospective.org>

Contact de la Chaire: contact@mail.modelisation-prospective.org