



QUE POUVONS NOUS
APPRENDRE DE
L'ENDOGENÉISATION DU
PROGRÈS TECHNIQUE DANS
GEM-E3 ? LE CAS DU
PROTOCOLE DE KYOTO

RAPPORT PRÉPARÉ POUR LE GICC PAR :

ARNAUD FOUGEYROLLAS
PIERRE LE MOUËL
PAUL ZAGAMÉ

INTRODUCTION

Le protocole de Kyoto de décembre 1997 prévoit que l'Union Européenne réduise ses émissions de CO₂ de 8% par rapport à leur niveau de 1990 sur la période 2008-2012. Plusieurs types d'instruments sont envisagés pour atteindre cet objectif dont de nombreuses études ont permis de comparer l'efficacité économique, évaluée généralement en termes de variations de PIB, de bien-être ou encore d'emploi, rapportées aux contraintes imposées sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre par rapport à un scénario de référence. Dans ces études comparatives, qui s'appuient le plus souvent sur l'utilisation de modèles d'équilibre général calculable, la chronique du progrès technique, dont l'évolution influence l'importance des émissions de gaz à effet de serre dans le scénario de référence, est la traduction d'une information exogène, d'origine comptable, économétrique ou encore provenant de « dires d'experts ». En effet, dans l'état de l'art de la modélisation économique appliquée, qu'elle soit d'équilibre général, économétrique ou technico-économique, le progrès technique reste traité comme une variable exogène, la « manne céleste » de la théorie néo-classique traditionnelle de la croissance initiée par Solow [1957]. Les nouvelles théories ont pourtant permis de renouveler la modélisation économique de la croissance, en insistant notamment sur les rôles importants et confirmés empiriquement, tenus par les activités d'innovation endogènes des firmes et par les « externalités technologiques » se diffusant entre firmes, secteurs et pays ; l'essor récent des nouvelles technologies de l'information et de la communication à l'origine d'une part importante du regain de croissance observé dans les principaux pays de l'OCDE, en est encore une illustration récente.

La proposition de recherche à l'origine de cette étude consistait ainsi à examiner dans quelle mesure l'évaluation des politiques de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre étudiées au niveau européen, dans le cadre de l'application des accords de Kyoto, est modifiée lorsque le modèle utilisé, d'équilibre général appliqué ici, prend en compte ces comportements de croissance endogène décrits par les nouvelles théories.

Dans les évaluations habituelles, avec des représentations de la production avec progrès technique exogène, la réaction des entrepreneurs à une politique de l'environnement, qui augmente le prix de l'énergie le plus souvent, est une simple substitution factorielle.

La prise en compte d'une décision endogène de dépenses de R&D élargit par contre le champ des réactions possibles des entreprises qui peuvent avoir intérêt à augmenter leur effort de R&D afin de gagner en productivité et donc en coût ; mais il y a plus : les nouvelles théories de la croissance « endogène » ont mis l'accent sur deux caractéristiques des biens, la variété des produits et leur qualité, qui en créant des utilités génèrent une nouvelle forme de croissance dont le lien avec la production matérielle est modifié : ainsi, l'entrepreneur qui observe une augmentation du prix de l'énergie peut-il opérer des substitutions factorielles, et (ou) augmenter ses efforts de R&D afin de diminuer ses coûts par deux canaux : une innovation de procédé d'abord, qui augmente la productivité des facteurs, mais aussi une innovation de produit (qualité ou variété) qui va augmenter l'utilité des biens sans accroître d'autant la consommation de facteurs. Le coût des politiques de l'environnement peut-il ainsi être surévalué par les modèles qui ignorent ces phénomènes dont rendent compte les nouvelles théories.

Notre travail a alors consisté à calibrer un module de production avec des propriétés de croissance endogène dans le modèle GEM-E3 - endogénéisation de la R&D, innovations de produit

et de procéder mais avec un épuisement des possibilités d'inventions qui, à long terme, imprime des rendements décroissants à la R&D selon la logique de Jones [1999], puis à comparer l'efficacité de différentes politiques de réduction des émissions de CO₂ en Europe selon que la représentation utilisée du progrès technique est endogène ou exogène au modèle. Nous évaluons les réductions de coûts impliquées par les mécanismes de croissance endogène et les subventions à la R&D pour les politiques d'abattement des émissions de gaz à effet de serre.

Après avoir présenté sommairement le modèle GEM-E3 et le module de croissance endogène calibré sur les régions européennes (section 1), nous décrivons plusieurs variantes de mise en œuvre des politiques de réduction des émissions de CO₂ selon le protocole de Kyoto (fiscalité et permis à polluer). La section 2 détaille le scénario de référence utilisé et les mécanismes du modèle sollicités par les politiques étudiées. La section 3 présente les principaux résultats, respectivement dans le cas d'une taxation sur le CO₂ non recyclée, dans le cas d'une taxation recyclée (par abaissement du taux de cotisations sociales des employeurs et par une subvention à la R&D) et dans le cas enfin de permis négociables, en mettant systématiquement en parallèle les résultats obtenus avec l'utilisation du module de croissance endogène avec ceux qui sont obtenus avec un progrès technique exogène sans effets de croissance qualitative. La section 4 présente quelques idées de conclusion.

SOMMAIRE

I.	Le modèle GEM-E3	6
A.	Le cœur du modèle	6
1.	La structure générale	6
2.	Le bloc Production	6
3.	Les ménages	7
4.	Le module environnemental	7
B.	Le module de croissance endogène	8
1.	Le lien entre décisions de R&D et innovations	9
2.	La diffusion des innovations et ses implications macro-économiques	10
II.	La mise en œuvre du protocole de Kyoto pour les pays européens	12
A.	Le scénario de référence	12
B.	Les mécanismes du modèle sollicités par les politiques étudiées	14
III.	Le coût des politiques de l'environnement : croissance exogène versus croissance endogène	16
A.	Les résultats pour la taxation des émissions de CO₂ sans redistribution	17
1.	Le cas du Burden Sharing Agreement	17
2.	Le cas d'une taxe européenne	20
B.	Les résultats pour la taxation des émissions de CO₂ avec redistribution	23
1.	Taxe nationale recyclée par une baisse des cotisations sociales patronales	24
2.	Taxe nationale recyclée par une baisse des cotisations sociales patronales et une subvention à la R&D	28
C.	Le cas des permis d'émissions négociables	32
IV.	Conclusion	36
V.	Références	37

LISTE DES TABLEAUX

Table 1: Le Burden Sharing Agreement, Réduction en 2010 par rapport aux niveaux de 1990	12
Table 2 : Emissions de CO ₂ dans le Scénario de Référence	13
Table 3 Objectifs de réduction des émissions de CO ₂ dans le cadre de l'application du Burden Sharing Agreement	13
Table 4 : Objectifs de réduction des émissions de CO ₂ sans application du Burden Sharing Agreement	14
Table 5 Les politiques étudiées	14

Table 6 Résultats des scénarii Taxe nationale non redistribuée, R&D exogène et Taxe nationale non redistribuée, R&D endogène (en grisé).	18
Table 7 Evolution des termes de l'échange	19
Table 8 Evolution du taux de salaire réel	19
Table 9 Résultats des scénarii Taxe européenne non redistribuée, R&D exogène et Taxe européenne non redistribuée, R&D endogène (en grisé).	21
Table 10 Comparaison du coût de la taxe en termes de PIB pour l'Europe entre l'application du BSA et la mise en place d'une taxe européenne	22
Table 11 Comparaison du coût de la taxe en termes d'emploi pour l'Europe entre l'application du BSA et la mise en place d'une taxe européenne	22
Table 12 Comparaison du coût de la taxe en termes de consommation finale pour l'Europe entre l'application du BSA et la mise en place d'une taxe européenne	22
Table 13 Comparaison du coût de la taxe en termes de bien-être pour l'Europe entre l'application du BSA et la mise en place d'une taxe européenne	23
Table 14 Résultats des scénarii Taxe nationale recyclée sur les CS, R&D exogène et Taxe nationale recyclée sur les CS, R&D endogène (en grisé).	24
Table 15 Evolution du taux de salaire réel dans la région 3	25
Table 16 Résultats des scénarii Taxe européenne recyclée sur les CS, R&D exogène et Taxe européenne recyclée sur les CS, R&D endogène (en grisé).	27
Table 17 Comparaison du coût de la taxation recyclée par une baisse des CS employeurs en 2020 pour l'Europe (dans le cas de croissance endogène)	28
Table 18 Résultats des scénarios Taxe nationale recyclée sur les CS, R&D exogène et Taxe nationale recyclée sur les CS et la R&D (en grisé).	29
Table 19 Résultats des scénarios Taxe européenne recyclée sur les CS, R&D exogène et Taxe européenne recyclée sur les CS et la R&D (en grisé).	30
Table 20 Résultats des scénarios Permis nationaux, R&D exogène et Permis nationaux, R&D endogène (en grisé).	33
Table 21 Résultats des scénarios Permis européens, R&D exogène et Permis européens, R&D endogène (en grisé).	34
Table 22 Comparaison du coût d'une taxe nationale non recyclée et d'un système de permis nationaux pour l'Europe en 2020 (dans le cas de croissance exogène)	35
Table 23 Comparaison du coût d'une taxe nationale non recyclée et d'un système de permis nationaux pour l'Europe en 2020, (dans le cas de croissance endogène)	35
Table 24 Comparaison du coût d'une taxe européenne non recyclée et d'un système de permis européen pour l'Europe en 2020 (dans le cas de croissance exogène)	35
Table 25 Comparaison du coût d'une taxe européenne non recyclée et d'un système de permis européen pour l'Europe en 2020 (dans le cas de croissance endogène)	35

I. LE MODÈLE GEM-E3

A. LE CŒUR DU MODÈLE

1. LA STRUCTURE GÉNÉRALE

Le modèle GEM-E3¹ (General Equilibrium Model for Energy, Economy and Environment interactions) est un modèle d'équilibre général calculable développé par un réseau de modélisateurs européen et partiellement financé par la Commission Européenne.

Le modèle représente 14 pays de l'Union Européenne (le Luxembourg n'est pas modélisé) avec 18 secteurs de production, dont 4 producteurs d'énergie, et 13 postes de consommation. La figure suivante présente la structure générale du modèle GEM-E3.

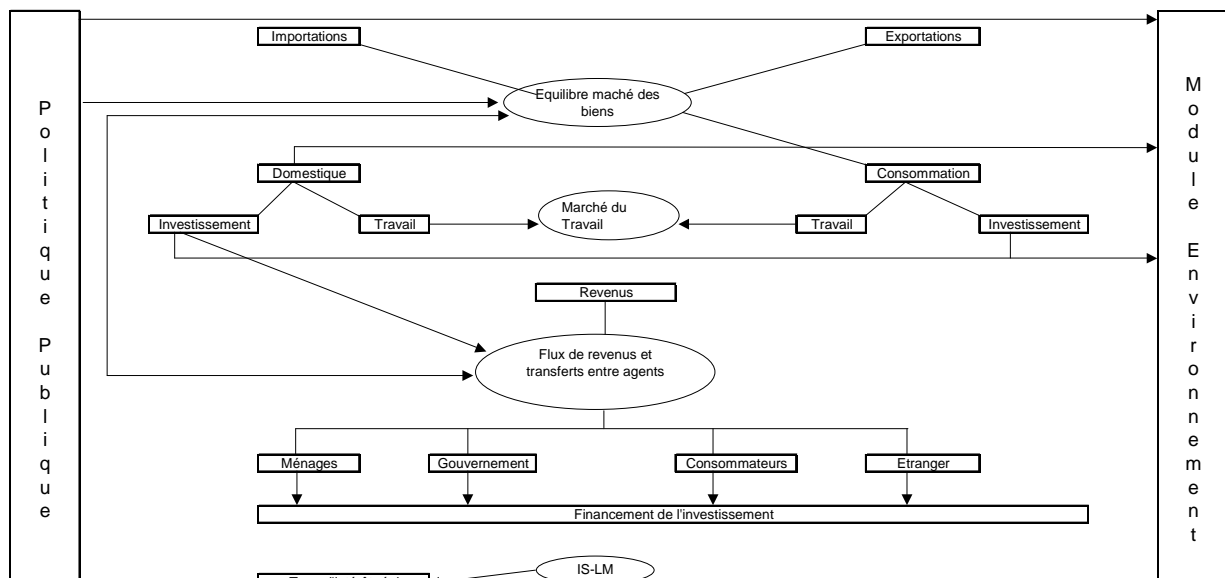
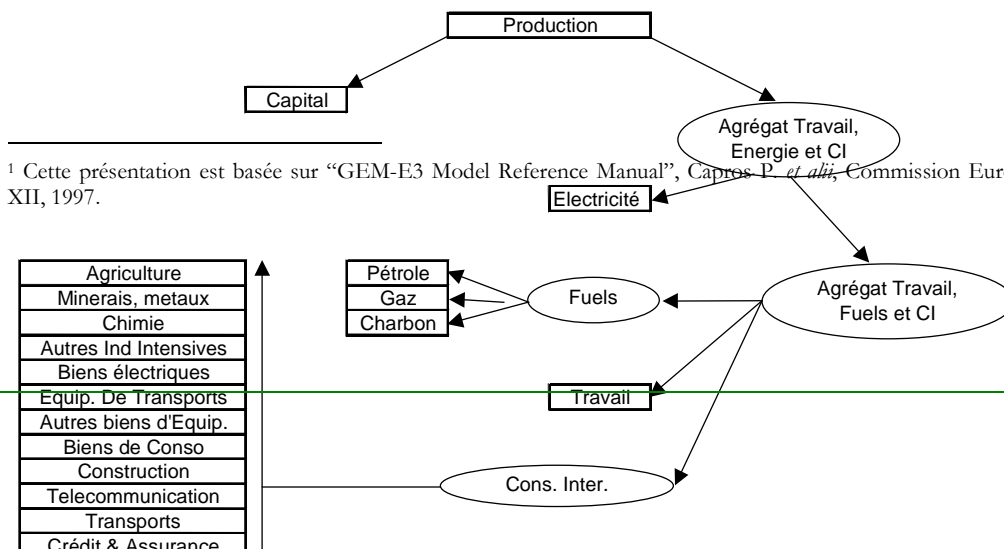


Figure 1 La structure générale du modèle GEM-E3

2. LE BLOC PRODUCTION

Les secteurs de production comportent une firme représentative en situation de concurrence pure et parfaite. Tous les biens produits dans l'économie font l'objet de consommations productives. En plus de ces consommations intermédiaires, la fonction de production des secteurs, de type CES emboîtées à trois niveaux (Cf. figure 2), utilise deux facteurs primaires : le travail et le capital. Un premier niveau sépare le capital de l'ensemble des autres facteurs dont l'électricité est isolée à un deuxième niveau. Le troisième niveau de la structure productive distingue enfin les énergies fossiles des autres consommations intermédiaires qui sont combinées avec le travail. Le modèle utilise des fonctions de coût duales et dérive les demandes de facteurs en utilisant le lemme de Shephard.



¹ Cette présentation est basée sur "GEM-E3 Model Reference Manual", Capros P. et alii, Commission Européenne DG. XII, 1997.

3. LES MÉNAGES

Le comportement des ménages est modélisé pour chaque pays au moyen d'un consommateur représentatif. A chaque période, le consommateur choisit son temps de loisir de façon à obtenir le niveau de salaire qu'il souhaite ; il alloue ses revenus totaux, qui proviennent du travail mais aussi de transferts, entre la consommation et l'épargne (Cf. figure 3). La consommation totale est scindée en deux catégories : bien durables et non durables. Vient s'ajouter une troisième catégorie : la consommation de biens non durables liée à l'utilisation de biens durables (L'essence pour les voitures par exemple) permettant de décrire précisément les usages des différentes catégories d'énergie.

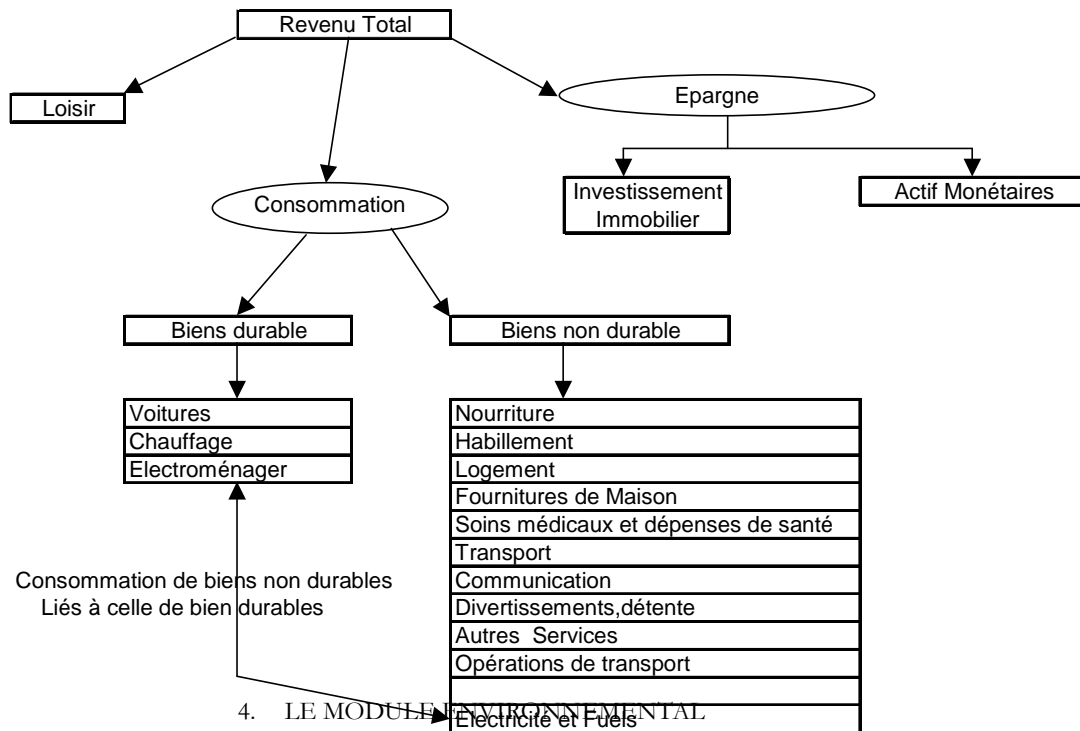


Figure 3 Le comportement du consommateur dans le modèle GEM-E3

1. Un sous-module « état de l'environnement » qui utilise toutes les informations sur les émissions de polluants de manière à les transformer en données sur la déposition

des polluants, leur concentration dans l'air et les dommages qu'ils impliquent. Cette composante a été construite à partir des informations disponibles dans plusieurs sources, principalement le projet européen ExternE.

2. Un sous-module « *politique économique* » avec la description des instruments économiques liés aux politiques environnementales.
3. Un sous-module « *comportement* » modélisant les effets des différents instruments économiques sur le comportement des agents.

Les facteurs d'émissions et autres données liées aux polluants (CO₂, NO_x, SO₂, PM et VOC) sont différenciés par pays, secteurs, fuels et types de biens durables.

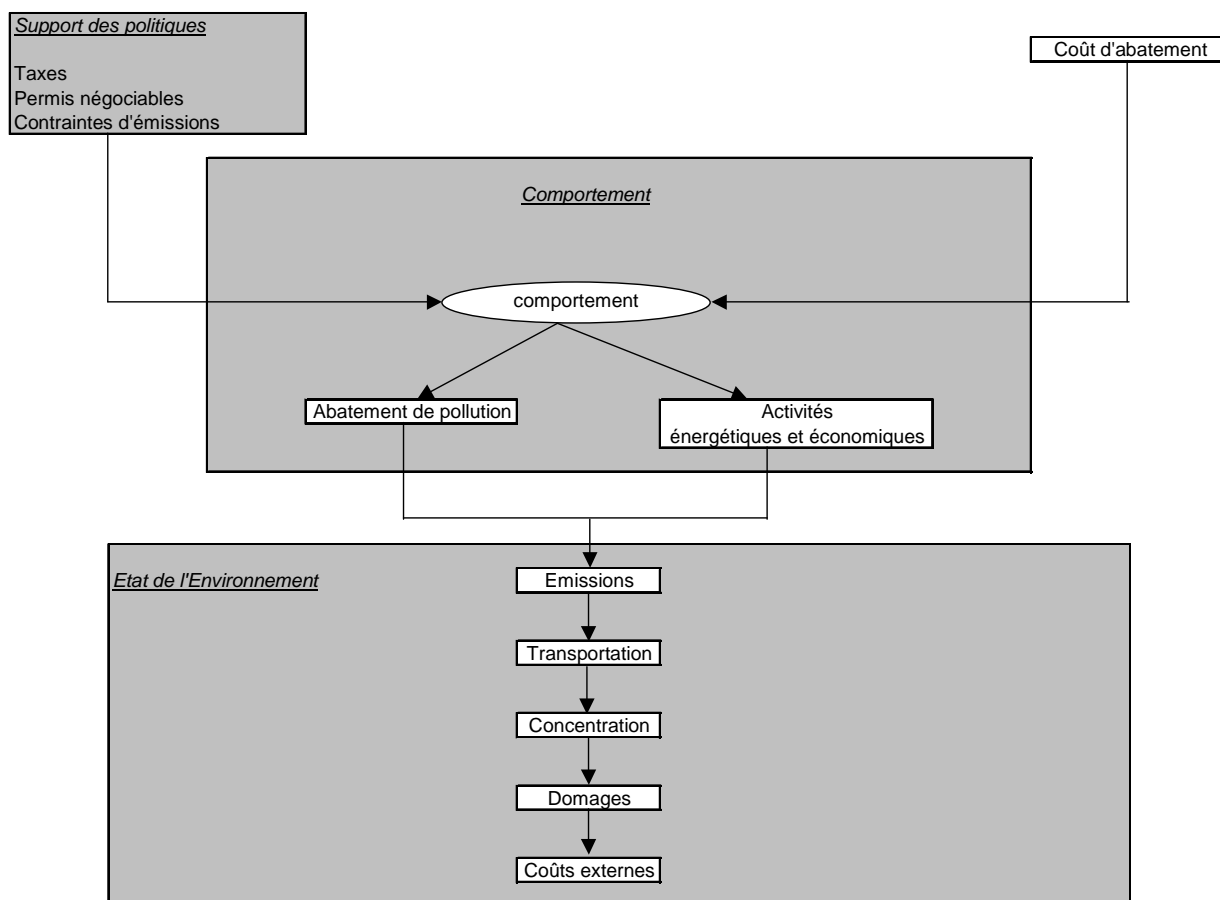


Figure 4 Le module environnemental du modèle GEM-E3

B. LE MODULE DE CROISSANCE ENDOGÈNE

Dans la version standard du modèle GEM-E3, le progrès technique est exogène (avec une approche *putty-putty*).

Cette étude utilise une version modifiée du modèle² dans laquelle a été introduit un module de croissance endogène modifiant, dans chaque secteur, le comportement de la firme représentative pour prendre en compte leurs décisions d'innovation avec leurs conséquences macro-économiques.

1. LE LIEN ENTRE DÉCISIONS DE R&D ET INNOVATIONS

La décision d'innovation de la firme va dépendre des coûts des facteurs de production ainsi que du niveau de l'investissement qui sera réalisé car seuls les nouveaux investissements peuvent permettre de fabriquer les nouveaux produits et de mettre en place de nouveaux procédés (Cf. figure suivante).

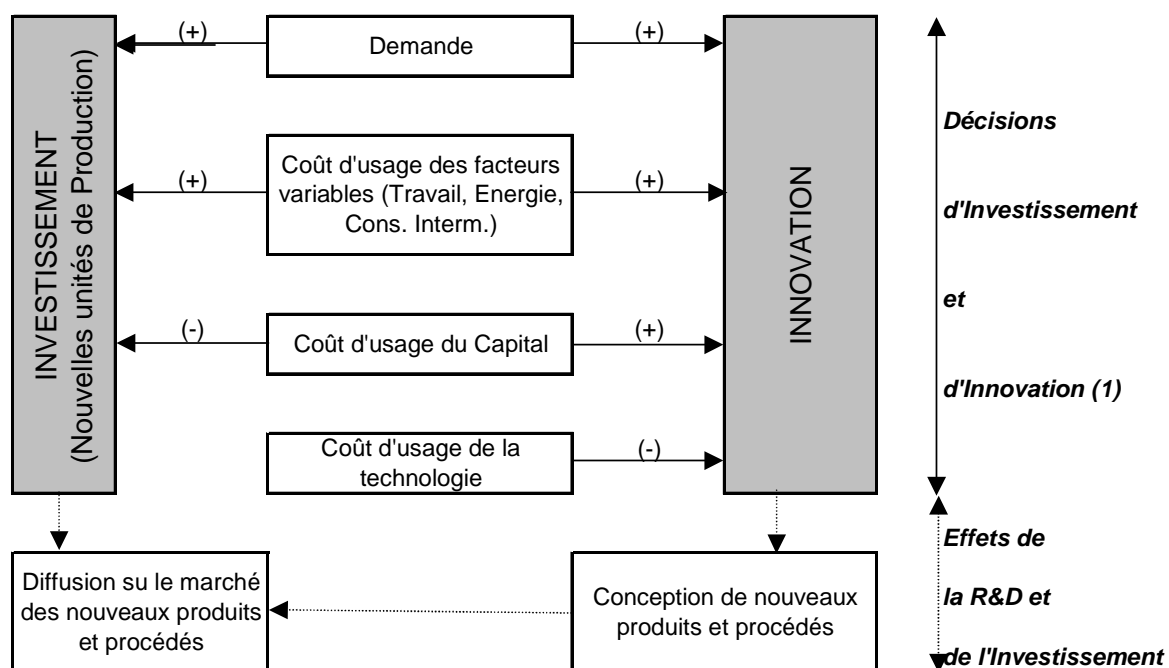


Figure 5 Détermination et effets des décisions d'investissement et de R&D

Le lien entre les dépenses de R&D et leurs conséquences en termes d'innovations résulte de deux phénomènes :

- Le premier, qui augmente la productivité de la R&D tient à l'avancement technologique du secteur, résumé dans la variable « connaissances », qui dépend de l'accumulation de la R&D dans le secteur, mais également dans les autres secteurs et à l'étranger par le biais des externalités de connaissances ou « *spillover effects* » ;
- Le second, qui diminue la productivité de la R&D, tient à « l'exhaustibilité » des innovations (*fishing out effect*).

L'équation qui conduit du flux de dépenses de R&D à l'innovation I_t s'écrit :

² Cf. A. Fougeyrollas, P. Le Mouél et P. Zagamé [2001].

$$I_t = \alpha SI_{t-1} \frac{EC_t}{FE_t} RD_t, 0 < \alpha < 1,$$

avec $SI_{t-1} = SI_{t-2} + I_{t-1}$ l'ensemble des innovations déjà réalisées, $EC_t = KNOW_t^\varphi, \varphi > 0$ les externalités de connaissances ($KNOW_t^\varphi$) dont bénéficie le secteur et $FE_t = SI_{t-1}^\beta, \beta > 0$ l'effet de « *fishing out* » qui diminue la productivité de la R&D (RD_t).

Les externalités de connaissances reçues dans un secteur donné sont reliées au stock de R&D des autres secteurs par l'intermédiaire des matrices technologiques de Verspagen [1997] ; elles sont reliées aux stocks de R&D des autres pays par l'intermédiaire des matrices technologiques de Verspagen et de la structure géographique des importations. On peut donc résumer ces divers phénomènes par le schéma suivant :

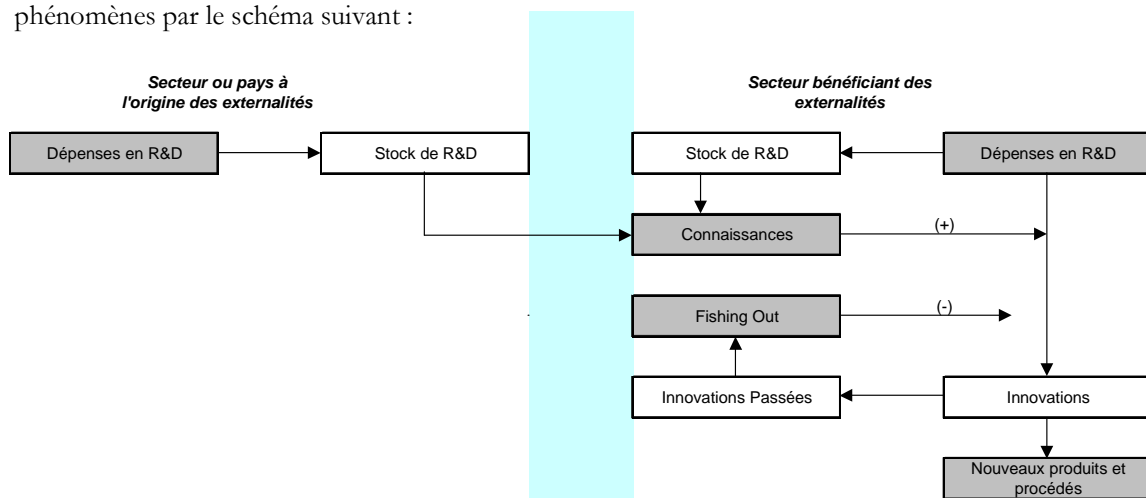


Figure 6 La genèse de l'innovation : le rôle de la R&D, des *spillovers* de connaissances et du *Fishing*

Le calibrage des effets de la R&D sur l'innovation et donc la croissance de la productivité totale des facteurs dans le modèle retient l'hypothèse d'une croissance de l'ordre de 1,5% des innovations en Europe, avec des différences entre les régions proportionnelles à leurs intensités respectives en R&D.

De façon similaire, la capacité d'innovation des secteurs de production européens est reliée positivement à leurs intensités respectives en R&D (dépenses de R&D en % de la production) ; le nombre des innovations augmente de 1,5% par an en moyenne mais avec des différences importantes entre les secteurs : la croissance du nombre d'innovations est seulement de 0,2% par an dans l'Agriculture ; elle atteint 1,5% dans le secteur des Télécommunications et jusqu'à 11% dans celui des Biens Électriques.

2. LA DIFFUSION DES INNOVATIONS ET SES IMPLICATIONS MACRO-ÉCONOMIQUES

Les implications macroéconomiques du comportement endogène d'innovation des firmes que nous avons introduit dans GEM-E3 est décrit dans la figure 7.

II. LA MISE EN ŒUVRE DU PROTOCOLE DE KYOTO POUR LES PAYS EUROPÉENS

A. LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE

Nous avons considéré dans cette étude les résultats pour trois régions européennes et la France prise séparément. Les trois régions ont été formées en regroupant les pays ayant des objectifs de réduction de leurs émissions de CO₂ similaires, comme définis dans le « *Burden Sharing Agreement* » :

- La première est formée des pays de l'Union Européenne qui doivent réduire leurs émissions de CO₂ de plus de 10% en 2010 par rapport à leur niveau de 1990.
- La deuxième est composée des pays qui doivent ou stabiliser leur niveau d'émission, ou le réduire de moins de 10% par rapport à 1990.
- La troisième regroupe enfin les pays pour lesquels une augmentation des émissions a été prévue dans le cadre du *Burden Sharing Agreement*.

Chaque région est ainsi caractérisée par un objectif en terme d'émissions de CO₂ résultant des niveaux d'émissions devant être atteints dans chacun des pays qui la composent.

Région 1		-17,50%
	Autriche	-13,00%
	Allemagne	-21,00%
	Danemark	-21,00%
	Angleterre	-12,50%
Région 2		-6,00%
	Belgique	-7,50%
	Pays-Bas	-6,00%
	Italie	-6,50%
	Finlande	0,00%
Région3		+16,50%
	Grèce	+25,00%
	Irlande	+13,00%
	Portugal	+27,00%
	Espagne	+15,00%
	Suède	+4,00%
France		0,00%

Table 1: Le *Burden Sharing Agreement*, Réduction en 2010 par rapport aux niveaux de 1990

L'évolution des émissions dans le scénario de référence reproduit celle du modèle énergétique PRIMES (Cf. Kapros [2000]), utilisé notamment pour l'élaboration du *Burden Sharing Agreement*.

Les prévisions de croissance des émissions sont très contrastées selon les pays considérés : les prospectives réalisées à partir de PRIMES prévoient une réduction des émissions pour les pays de la région 1 alors que pour les deux autres régions et la France les émissions croissent à des degrés divers ; les émissions augmentent en moyenne de 5,47% en Europe.

	Emissions de CO ₂ (en Mtn)		Croissance en
	1990	2010	
Région 1	1405	1343,5	-4,38%
Région 2	654,5	731,0	11,67%
Région 3	366,7	473,8	29,22%
France	383,7	406,3	5,88%
Total Europe	2810	2954,6	5,47%

Table 2 : Emissions de CO₂ dans le Scénario de Référence

La réalisation des objectifs prévus par le *Burden Sharing Agreement* implique finalement les réductions suivantes d'émissions par rapport au scénario de référence, de façon, pour l'Europe, à respecter ses engagements du protocole Kyoto :

	2001	2005	2010	2015	2020
Région 1	-1,26%	-6,34%	-13,12%	-12,65%	-12,03%
Région 2	-1,60%	-7,95%	-17,67%	-19,24%	-22,44%
Région 3	-1,29%	-6,37%	-12,72%	-18,40%	-24,00%
France	-0,57%	-2,88%	-5,88%	-7,63%	-9,41%

Table 3 Objectifs de réduction des émissions de CO₂ dans le cadre de l'application du *Burden Sharing Agreement*

Nous voyons que tous les pays ne sont pas impliqués à la même hauteur par l'instauration d'une politique de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre :

➤ La contrainte de la France est de loin inférieure à celle des trois régions européennes en 2010, mais l'augmentation de ses émissions dans le scénario de référence tend à ramener le niveau de sa contrainte vers celui de la région 1, laquelle réduit spontanément ses émissions après 2010.

➤ Les régions 2 et 3 augmentent également leurs émissions après 2010 ; le niveau de leur contrainte en 2020 est environ deux fois supérieur à celui de la région 1 ; c'est la raison pour laquelle le *Burden Sharing Agreement* les avantage en termes d'objectifs de réduction par rapport à 1990.

Il est possible également que les états européens décident, dans un soucis d'efficacité économique, de mettre en œuvre leurs politiques de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre au niveau européen, c'est-à-dire sans application du *Burden Sharing Agreement*. Cela peut être réalisé, par exemple, par l'instauration d'une taxe ou d'un système de permis, permettant de satisfaire l'objectif de réduction de 8% des émissions de CO₂ au niveau européen à l'horizon de 2008-2010, mais sans assigner d'objectifs prédéfinis au niveau national.

Dans cette situation, si l'on met à part les distorsions pouvant exister au niveau des systèmes fiscaux nationaux, les efforts de réduction au niveau national doivent tendre à se rapprocher, en raison de l'égalisation des coûts marginaux d'émissions en Europe résultant de l'application d'un taux de taxe ou d'un prix de permis identiques pour tous les pays. Ils diffèrent toutefois, mais de façon peu importante, selon la politique envisagée, avec par exemple les objectifs suivants pour les trois régions et la France dans le cas d'une taxe européenne dont le produit ne serait pas « redistribué » (Cf. section suivante) :

	2001	2005	2010	2015	2020
Région 1	-1,17%	-6,12%	-12,91%	-14,88%	-16,95%
Région 2	-1,23%	-5,63%	-11,05%	-12,41%	-13,98%
Région 3	-1,32%	-6,82%	-14,22%	-16,08%	-18,17%
France	-1,15%	-5,56%	-11,22%	-12,69%	-14,36%

Table 4 : Objectifs de réduction des émissions de CO2 sans application du *Burden Sharing Agreement*

Une telle politique « européenne », sans application du *Burden Sharing Agreement*, permet de mieux partager la contrainte de réduction entre les pays européens, avec des objectifs de réductions compris entre -11,05% (France) et -14,22% (région 3) en 2010 et -13,98% (région 2) et -18,17% (région 3) en 2020 ; sa répartition ne prend cependant pas en compte la participation relative des différents pays aux émissions de gaz à effet de serre en Europe.

B. LES MÉCANISMES DU MODÈLE SOLICITÉS PAR LES POLITIQUES ÉTUDIÉES

Les politiques envisagées dans cette étude pour atteindre les objectifs de Kyoto sont de deux types :

- La mise en place de taxations sur le CO₂, au niveau national ou européen, avec redistribution ou non de la taxe sous la forme d'une réduction des cotisations sociales des employeurs ;
- La mise en place de permis d'émissions négociable, au niveau national ou européen.

Taxation	
TS_Exo	Taxe Nationale, R&D exogène
TE_Exo	Taxe Européenne, R&D exogène
TCS_Ex	Taxe Nationale redistribuée sous la forme d'une baisse des CSE, R&D exogène
TECS_	Taxe Européenne redistribuée sous la forme d'une baisse des CSE, R&D exogène
TS_End	Taxe Nationale, R&D endogène
TE_End	Taxe Européenne, R&D endogène
TCS_En	Taxe Nationale redistribuée sous la forme d'une baisse des CSE, R&D endogène
TECS_	Taxe Européenne redistribuée sous la forme d'une baisse des CSE, R&D endogène
TCSR	Taxe Nationale redistribuée sous la forme d'une baisse des CSE et une Subvention à la R&D, R&D endogène
TECSR	Taxe Européenne redistribuée sous la forme d'une baisse des CSE, et une Subvention à la R&D endogène
D	
Permis Négociable	
PN_Exo	Système de permis nationaux, R&D exogène
PE_Exo	Système de permis européens, R&D exogène
PN_End	Système de permis nationaux, R&D endogène
PE_End	Système de permis européens, R&D endogène

Table 5 Les politiques étudiées

L'originalité principale de l'étude réside dans la prise en compte des effets des politiques sur le comportement de R&D et donc sur l'innovation des firmes. Pour faire ressortir ces effets :

- Nous comparons systématiquement les résultats dans le cas où ce comportement est exogénéisé (la capacité d'innovation de l'économie est alors donnée par le scénario de référence) avec le cas où il est endogène ; dans ce dernier cas, nous étudions également un nouveau scénario de politique consistant à redistribuer une partie du produit de la taxation sous la forme d'une subvention à la R&D des firmes, le reste servant à réduire les cotisations sociales des employeurs ;
- Nous prolongeons l'horizon des simulations jusqu'en 2020³ (au lieu de 2010 pour ce type d'études), les effets de la R&D se produisant surtout à long terme.

Les politiques considérées dans l'étude vont, qu'il s'agisse de taxations des émissions de CO₂ ou de l'instauration de systèmes de permis d'émissions, augmenter le coût d'usage de l'énergie.

Lorsque le progrès technique est exogène dans le modèle, la réponse optimale des entreprises consiste à opérer des substitutions factorielles, de façon à réduire leurs coûts énergétiques, tandis que les ménages substituent d'autres consommations à l'énergie ; des substitutions entre catégories d'énergies sont également mises en place au bénéfice de celles au contenu en carbone le plus réduit, cela dans la limite imposée par les usages spécifiques des énergies.

Maintenant, lorsque le progrès technique est endogène dans le modèle, les entreprises vont pouvoir, en plus les substitutions factorielles précédentes, accroître leurs dépenses de R&D de façon à améliorer progressivement leur productivité (innovations de procédé) et/ou les caractéristiques technologiques de leurs produits (innovations de produit). Dans les deux éventualités, la dématérialisation de la production permet aux entreprises de mieux supporter le coût des politiques : La qualité de l'offre s'améliore et la compétitivité, notamment sur les marchés d'exportation, se renforce.

Toutefois, les délais pour que les dépenses de R&D engagées une année donnée produisent tous leurs effets positifs sont assez longs : délai d'un an pour que les dépenses de R&D donnent lieu à des innovations ; délai moyen de 10 ans pour que la firme renouvelle entièrement son offre productive et transmette ses innovations au marché à grande échelle (hypothèse de progrès technique incorporé à générations de capital). Or, il faut commencer par financer les dépenses de R&D, ce qui augmente les prix de production et dégrade la compétitivité à court terme.

Le coût des politiques entre les cas où le comportement d'innovation est exogénéisé et celui où il est endogène, va donc dépendre de l'horizon auquel l'on effectue la comparaison : il sera généralement plus faible à court terme dans le cas avec progrès technique exogène puis plus élevé après 5 à 10 ans, en raison des mécanismes qui viennent d'être décrits.

En ce qui concerne les autres mécanismes du modèle GEM-E 3 sollicités par les politiques étudiées mais qui ne dépendent pas des hypothèses sur le progrès technique, il faut souligner le rôle important tenu par le commerce extérieur.

Ainsi, l'effet dépressif des politiques a pour conséquence d'abaisser les prix de production, en raison des fortes pentes des courbes d'offre et de demande de produits (et de travail) dans le modèle, ce qui permet de ne pas dégrader excessivement la compétitivité extérieure des économies européennes ; l'allègement de la facture énergétique leur permet également de renforcer l'offre de

³ Nous avons alors imposé une stabilisation des émissions de CO₂ entre 2010 et 2020 (hypothèse dite « *Kyoto forever* »), ce qui implique que les agents ne peuvent pas retrouver après 2010 leurs structures de consommation et de production du scénario de référence.

produits d'origine européenne sur les marchés intérieurs et ainsi de ne supporter qu'un coût limité, mesuré en termes de PIB, de ces politiques ; les résultats en termes de bien-être des consommateurs sont par contre moins favorables puisque les ménages sont de gros consommateurs d'énergie, comparé aux entreprises.

Notons enfin que le coût des politiques étudiées peut varier considérablement selon les secteurs de production, en fonction de leurs intensités en énergie ; nous ne détaillons pas ici les résultats sectoriels mais le lecteur intéressé pourra se rapporter à l'annexe où les résultats par secteur de production pour les trois régions considérées dans l'étude et la France sont disponibles.

III. LE COÛT DES POLITIQUES DE L'ENVIRONNEMENT : CROISSANCE EXOGÈNE *VERSUS* CROISSANCE ENDOGÈNE

Cette section compare les coûts des politiques de réduction des émissions de CO₂ pour les trois régions européennes et la France, obtenus avec les deux versions du modèle : avec croissance exogène et avec croissance endogène.

Nous présentons, pour comparer ce coût macroéconomique des politiques, les résultats pour le PIB, la consommation finale (CF) et le bien-être (B-E) des ménages, l'emploi et le commerce extérieur⁴. Dans les cas de taxation, nous donnons également la valeur de la taxe en % du PIB et en Euros par tonne de CO₂, le % de réduction du taux de cotisations sociales des employeurs lorsque le prélèvement de la taxe est compensé par une réduction de ce taux et le taux de subvention des dépenses de R&D lorsque cette compensation transite également par une aide à la R&D des firmes. Dans les cas de permis d'émissions, nous indiquons enfin le prix des permis en Euros et le coût net des permis pour les firmes et pour les ménages.

Les écarts de résultats entre les versions du modèle avec progrès technique exogène et avec progrès technique endogène sont illustrés par la présentation de cinq indicateurs technologiques :

- Les dépenses de R&D des firmes.
- L' " indice d' innovation technologique " (I Innov) mesurant le taux moyen d'innovation technologique de l'économie
- L'indice de " diffusion technologique " (I Diff) qui évalue les gains globaux de productivité provoqués par les innovations.
- L' indice de " qualité moyenne du panier de consommation " (I Q BC) synthétisant les gains d'utilité indirecte du consommateur provoqués par les innovations.
- L'indice d' " efficacité des biens d'investissement " (I Q BI) évaluant les gains moyens d'efficacité des biens d'investissements.

Ces indicateurs technologiques permettent de préciser l'effet incitatif des politiques étudiées sur l'innovation des firmes et ses conséquences en termes de productivité, de bien-être et de dématérialisation de la croissance.

⁴ Des résultats plus complets sont fournis en annexe, en particulier pour ce qui concerne l'évolution des prix (prix à la consommation, salaire nominal, salaire réel et termes de l'échange) et les évolutions par secteur de production.

Les résultats sont donnés pour 2010 (année où les objectifs de Kyoto sont atteints) et pour 2020 de façon à mieux apprécier les effets de progrès technique endogène.

Nous présentons les résultats pour la taxation sans redistribution puis avec redistribution sous la forme de baisses du taux de cotisations sociales des employeurs et d'aides à la R&D des firmes puis nous abordons les systèmes de permis d'émissions. Les résultats distinguent le cas de l'application du *Burden Sharing Agreement* qui est comparé à la mise en œuvre des politiques directement au niveau européen.

A. LES RÉSULTATS POUR LA TAXATION DES ÉMISSIONS DE CO₂ SANS REDISTRIBUTION

Ces premiers scénarios de taxation consistent à instaurer une taxe sur les émissions de CO₂ en Europe assise sur les ménages et les entreprises. Le produit de la taxe n'est pas redistribué et il est utilisé par les états européens se désendetter.

1. LE CAS DU BURDEN SHARING AGREEMENT

Dans le cas du *Burden Sharing Agreement* (table 6), le niveau de taxation diffère beaucoup selon les groupes de pays considérés en raison des différences importantes d'objectifs de réduction des émissions de CO₂ (Cf. infra, section 2.1).

Il s'établit en 2010 entre 0,69% (France) et 3,59% (région 2) du PIB pour le modèle avec progrès technique exogène. Il progresse en 2020 entre 1,13% (France) et 5,62% (région 3) sous l'effet de l'élévation du niveau moyen des émissions de CO₂ en Europe dans le scénario de référence.

	Région 1		Région 2		Région 3		France	
	2010	2020	2010	2020	2010	2020	2010	2020
PIB	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	0%
CF	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
B-E	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
Empl	-100	-80	-99	-318	-36	-204	-4	-14
	-95	-20	-97	-225	-30	-139	-3	-2
Expo	2,25	1,18	0,77	0,30%	0,83	0,90	0,62	0,72
	2,22%	1,44%	0,77	0,77%	0,91%	1,45%	0,63%	0,97%
Impo	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
CO₂	-	-	-	-	-	-24%	-	-
T %	2,11	1,37	3,59	5,52%	2,35	5,62	0,69	1,13
	2,11%	1,30%	3,62	5,41%	2,38%	5,65%	0,70%	1,14%
Taxe	26,61	18,32	46,51	73,59	21,27	53,21	10,74	17,44
	26,61	17,38	46,86	72,30	21,50	53,59	10,78	17,54
R&D	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	3,66%	1,78%	5,64	7,02%	4,28%	8,68%	1,79%	2,12%
I	-	-	0,02	0,06%	0,02	0,05	-	-
	-	0,12%	0,05	0,45%	0,09%	0,58%	0,01%	0,12%
I Diff	0,13	0,13	0,12	0,30%	0,01	0,02	0,01	0,03
	0,19%	0,31%	0,20	0,74%	0,10%	0,48%	0,04%	0,17%
I Q	-	-	-	-	0,02	0,05	-	-
	-	0,17%	0,01	0,36%	0,09%	0,55%	0,01%	0,08%
I Q	0%	-	0%	0,02%	0%	0,03	0%	0%
	0,05%	0,20%	0,09	0,66%	0,08%	0,47%	0,04%	0,28%

Table 6 Résultats des scénarii Taxe nationale non redistribuée, R&D exogène et Taxe nationale non redistribuée, R&D endogène (en grisé).

% d'écart par rapport au scénario de référence, sauf emploi en milliers et taxe par tonne de CO₂ en euros constants 1985.

Les niveaux de taxation sont similaires pour le modèle avec progrès technique endogène (table 6), par contre le coût de la politique, mesuré en termes de PIB, diffère considérablement après 2010. L'élévation du coût de production, suite à la mise en place de la politique, conduit en effet les firmes à élever leurs dépenses de R&D entre 1,79% (France) et 5,64% (région 2) en 2010, puis entre 1,78% (région 1) et 8,68% en 2020 (région 3), soit d'un ordre de grandeur absolu proche du surcoût de production induit par la taxe.

Cette stimulation de la R&D entraîne en 2020 une élévation de l'indice d'innovation des firmes compris entre 0,12% (France et région 1) et 0,58% (région 3), reflétant la mise en place d'une stratégie de croissance qualitative visant à accroître l'efficacité des procédés de fabrication et la qualité des produits.

La « dématérialisation » de la production permet de limiter les effets dépressifs de la politique et même d'annuler totalement en 2020 la baisse d'activité en France et dans la région 1, la baisse de PIB étant également ramenée de -1,32% à -0,98% dans la région 2 et de -1,19% à -0,81% dans la région 3 grâce à ces effets de progrès technique.

Le développement de l'innovation et des gains de productivité entraînent une modération des prix européens mesurée par l'indice de diffusion technologique. Cet indice progresse en 2020 entre 0,17% (France) et 0,74% (région 2) ce qui permet, en améliorant la compétitivité extérieure, de stimuler les exportations et de soutenir la croissance du PIB européen.

Lorsque le progrès technique est exogène, l'augmentation des exportations reflète pour les régions 2 et 3 un simple effet de structure⁵, puisque les termes de l'échange s'améliorent légèrement (Cf. table 7), tandis que pour la région 1 et la France elle reflète un réel gain de compétitivité : La région 1 et la France supportent en effet un niveau de contrainte moins élevé que les régions 2 et 3 et voient leur situation compétitive s'améliorer à l'exportation.

Région 1		Région 2		Région 3		France	
2010	2020	2010	2020	2010	2020	2010	2020
-	-	0,06	0,50%	0,13	0,28	-	-
-	-	0,06	0,37%	0,08%	0,13%	-	-

Table 7 Evolution des termes de l'échange

% d'écart par rapport au scénario de référence.

Il faut remarquer que l'indice de qualité des biens de consommation augmente moins que l'indice de qualité des biens d'investissement. Les entreprises à l'origine des innovations appartiennent principalement aux branches de biens d'équipement plutôt qu'à celles de services et de biens de consommation finale. La stimulation de la R&D profite ainsi davantage aux producteurs qu'aux consommateurs. De plus, la taxation entraîne une forte baisse du salaire réel⁶ (Cf. table 8) car les consommations énergétiques, notamment pour les besoins de transport, sont un poste de consommation important des ménages. La consommation finale des ménages et leur bien-être, qui agrègent consommation et loisir, sont par conséquent davantage affectés que le PIB par la politique.

Région 1		Région 2		Région 3		France	
2010	2020	2010	2020	2010	2020	2010	2020
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-

Table 8 Evolution du taux de salaire réel

% d'écart par rapport au scénario de référence.

⁵ Les secteurs manufacturiers, les plus tournés vers l'exportation, sont en effet moins pénalisés par la taxe que les secteurs intermédiaires ; leur importance dans la valeur ajoutée européenne augmente donc, de même que leurs exportations, dont l'essentiel concerne des échanges intra-européens.

⁶ Les fortes pentes des courbes d'offre et de demande d'emploi expliquent également la baisse du salaire réel, sous l'effet de la contraction importante de l'emploi.

Les pertes de consommation finale s'échelonnent en 2020 entre $-1,12\%$ (France) et $-5,39\%$ (région 3) pour la version du modèle avec progrès technique exogène et entre $-1,06\%$ (France) et $-5,18\%$ (région 3) pour celle avec progrès technique endogène. On obtient respectivement entre $-0,03\%$ (France) et $-1,31\%$ (région 2) et entre $-0,03\%$ (France) et $-1,26\%$ (région 2) pour le bien-être des ménages.

L'emploi diminue en 2020 entre -14 mille (France) et -318 mille (région 2) pour la version du modèle avec progrès technique exogène, et entre -2 mille (France) et -225 mille (région 2) pour celle avec progrès technique endogène. La réduction de l'emploi comme celle du PIB est ainsi bien moindre pour la version du modèle avec progrès technique exogène.

Les mécanismes de progrès technique endogène permettent donc au modèle de fournir une évaluation plus exacte du coût macro-économique d'une taxation des émissions de CO₂ en Europe. Le coût de la politique, en termes de points de PIB perdus, est réduit en 2020 entre $0,12$ (France) et $0,38$ (région 3), soit environ d'un tiers pour l'ensemble de l'Europe, par la prise en compte de ces mécanismes, et le bilan pour l'emploi est similaire.

Cette évaluation à la baisse du coût de la politique tient certes à la capacité de réponse endogène des firmes à un choc de productivité négatif, par un renforcement de leurs efforts d'innovation technologique. Elle tient également à la capacité renforcée de l'économie à diffuser les innovations suite une hausse du prix de l'énergie.

On constate effectivement que l'indice de diffusion technologique augmente en 2020 entre $0,03\%$ (France) et $0,30\%$ (région 2) avec la version du modèle à progrès technique exogène : Le nombre des innovations est donné par le scénario de référence et donc exogène mais le redéploiement des activités économiques en faveur des secteurs les plus utilisateurs des innovations technologiques réduit le coût de la politique.

2. LE CAS D'UNE TAXE EUROPÉENNE

Lorsque la politique est mise en place au niveau européen, c'est-à-dire sans appliquer le *Burden Sharing Agreement*, le niveau de taxation par tonne de CO₂ atteint en 2010, pour la version du modèle avec progrès technique exogène, $25,45$ euros et en 2020 $32,62$ euros en raison de l'augmentation des émissions de CO₂ dans le scénario de référence. Il était compris en 2010 entre $10,74$ Euros (France) et $46,51$ Euros (région 2) et en 2020 entre $17,44$ Euros (France) et $73,59$ Euros (région 2) dans le cas du *Burden Sharing Agreement*.

	Région 1		Région 2		Région 3		France	
	2010	2020	2010	2020	2010	2020	2010	2020
PIB	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
CF	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
B-E	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
Empl	-96	-123	-52	-139	-44	-142	-15	-33
	-92	-65	-49	-81	-39	-71	-14	-15
Expo	2,17	2,21	0,43	0,15%	0,96	0,65	1,26	1,25
	2,16%	2,48%	0,44	0,46%	1,04%	1,20%	1,26%	1,59%
Impo	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
CO₂	-	-	-11%	-	-	-18%	-	-
T %	2,03	2,32	2,06	2,66%	2,77	3,65	1,57	2,02
	2,04%	2,27%	2,07	2,61%	2,78%	3,58%	1,57%	1,99%
Taxe	25,45	32,62	25,45	32,62	25,45	32,62	25,45	32,62
	25,58	32	25,58	32	25,58	32	25,58	32
R&D	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	3,48%	2,90%	3,39	3,29%	4,96%	4,78%	2,94%	2,88%
I	-	-	0,01	0,04%	0,02	0,04	-	-
	-	0,07%	0,04	0,27%	0,09%	0,57%	0%	0,18%
I Diff	0,13	0,24	0,07	0,15%	0,01	0,02	0,02	0,06
	0,18%	0,45%	0,12	0,40%	0,11%	0,44%	0,07%	0,28%
I Q	-	-	-	-	0,02	0,03	-	-
	-	0,13%	0,01	0,22%	0,08%	0,54%	-	0,13%
I Q	0%	-	0%	0,01%	0,01	0,02	0%	0,01
	0,05%	0,21%	0,06	0,39%	0,09%	0,43%	0,07%	0,42%

Table 9 Résultats des scénarii Taxe européenne non redistribuée, R&D exogène et Taxe européenne non redistribuée, R&D endogène (en grisé).

% d'écart par rapport au scénario de référence, sauf emploi en millier et taxe par tonne de CO₂ en Euros constants 1985.

L'égalisation des coûts marginaux de réduction des émissions de CO₂ au niveau européen permet ainsi de réduire le prélèvement de la taxe, mesuré en % du PIB européen, et donc son coût en PIB (Cf. table 10).

Les pertes de PIB s'établissent en 2010 à -0,25% et à -0,47% en 2020 pour l'ensemble de l'Europe, contre respectivement -0,29% et -0,67% pour le *Burden Sharing*.

	Burden Sharing		Taxe	
	201	2020	2010	2020
Croissance	-	-0,67%	-	-
Croissance	-	-0,40%	-	-

Table 10 Comparaison du coût de la taxe en termes de PIB pour l'Europe entre l'application du BSA et la mise en place d'une taxe européenne

Le constat est similaire pour la version du modèle avec progrès technique endogène : Le coût en PIB est réduit en 2020 de -0,40% (BS) à -0,23% lorsque la taxation est mise en place au niveau européen.

Les résultats de la taxe européenne confirment en outre le résultat déjà obtenu pour le *Burden Sharing* : La réduction du coût de la politique lorsque son évaluation prend en compte les effets endogènes de progrès technique, avec un coût en PIB réduit en 2020 de -0,47 % à -0,23%.

Les résultats pour l'emploi et la consommation finale des ménages soulignent dans le même sens la réduction de coût lorsque d'une part la taxe est européenne et lorsque d'autre part son évaluation prend en compte les impacts positifs des innovations technologiques.

L'emploi diminue en 2020 de 437 mille (TE) contre 616 mille (BSA) dans le cas de croissance exogène et de 387 mille (TE) contre 233 (BSA) mille dans celui de croissance endogène.

	Burden Sharing		Taxe	
	201	2020	2010	2020
Croissance	-	-616	-207	-437
Croissance	-225	-387	-193	-233

Table 11 Comparaison du coût de la taxe en termes d'emploi pour l'Europe entre l'application du BSA et la mise en place d'une taxe européenne

La perte de consommation finale s'établit en 2020 respectivement à -2,68% (TE) (croissance exogène) contre -2,91% (BSA) et à -2,48% (TE) contre -2,70% (BSA) (croissance endogène).

	Burden Sharing		Taxe	
	201	2020	2010	2020
Croissance	-	-2,91%	-	-
Croissance	-	-2,70%	-	-

Table 12 Comparaison du coût de la taxe en termes de consommation finale pour l'Europe entre l'application du BSA et la mise en place d'une taxe européenne

Le bien-être des ménages est par contre peu modifié par le type de taxe et la version du modèle utilisée (croissance exogène *versus* croissance endogène) puisque la diminution de la consommation finale compense l'accroissement du loisir dans l'utilité de ménages.

	Burden Sharing		Taxe	
	201	2020	2010	2020
Croissance	-	-0,60%	-	-
Croissance	-	-0,57%	-	-

Table 13 Comparaison du coût de la taxe en termes de bien-être pour l'Europe entre l'application du BSA et la mise en place d'une taxe européenne

Les résultats pour la taxe européenne confirment donc ceux obtenus pour le *Burden Sharing* : l'évaluation du coût est réduite d'environ un tiers, selon l'indicateur utilisé, lorsqu'elle prend en compte les effets de croissance endogène.

Elle est réduite encore d'un tiers lorsque la taxe est européenne et non pas nationale.

Au niveau des pays, ils soulignent qu'une part importante de la réduction de coût impliquée par la taxe européenne se produit au détriment des pays de la région 1 et de la France, qui doivent faire dans cette situation un effort supplémentaire de réduction de leurs émissions de CO₂ : Par exemple, alors qu'en 2020 le coût en PIB pour le *Burden Sharing* est nul pour la région 1 et la France, il est de -0,13% pour la taxe européenne.

B. LES RÉSULTATS POUR LA TAXATION DES ÉMISSIONS DE CO₂ AVEC REDISTRIBUTION

Les scénarios présentés ici consistent, comme dans la section précédente, à appliquer une taxe sur les émissions de CO₂ des firmes et des ménages européens, mais avec redistribution intégrale de son produit aux firmes.

Deux cas de figure ont été envisagés :

- Une redistribution sous la forme d'une diminution du taux de cotisations sociales des employeurs.

Ce mode de redistribution visant à obtenir un double dividende emploi-environnement a été le plus étudié dans la littérature.

La redistribution concerne ici la totalité du produit de la taxe, c'est-à-dire également la part prélevée sur les ménages. Le coût net de la politique est donc globalement négatif pour les firmes. Il reste cependant positif pour les secteurs intensifs en énergie, également faiblement intensifs en emploi.

Les ménages bénéficient pour leur part de substitutions de facteurs favorables à l'emploi puisque le coût des énergies augmente relativement à celui du travail. Cela relance, avec l'emploi, la consommation finale, ce qui soutient l'activité macro-économique.

- Une redistribution partielle sous la forme d'une subvention à la R&D, avec un taux maximum de 30%, le solde venant abaisser le taux de cotisations sociales des employeurs.

Avec ce mode de redistribution, en plus du double dividende emploi-environnement précédent, il est envisageable d'obtenir également un surcroît de croissance alimenté par l'accroissement des efforts de R&D en réponse à la subvention. Le taux de subvention à la R&D est plafonné à 30% dans un souci de réalisme, étant difficilement envisageable d'inciter trop fortement les firmes à accroître ce type de dépenses dont les montants dépendent certes de critères de coûts, mais surtout d'opportunités technologiques et de stratégies de marché sur lesquelles la subvention a des effets limités.

1. TAXE NATIONALE RECYCLÉE PAR UNE BAISSÉ DES COTISATIONS SOCIALES PATRONALES

Dans le cas du *burden sharing* (table 14), les différences entre pays vont encore dépendre principalement de l'importance de la réduction des émissions de CO₂ des différents groupes de pays, inchangée par rapport au cas sans redistribution présenté plus haut.

	Région 1		Région 2		Région 3		France	
	2010	2020	2010	2020	2010	2020	2010	2020
PIB	-	-	0,06	-	-	-	0,03	0,01
	-	-	0,04	0,02%	-	-	0,02	0,03
CF	0,05	-	-	-	0,27	0,75	-	-
	0,03%	0,02%	-	0,07%	0,27	0,83	-	0,03
B-E	-	-	-	-	-	-	0%	0%
	-	0%	-	-0,33%	-	-	0%	0%
Empl	229	147	684	1382	288	944	32	59
	229	156	689	1391	291	962	33	63
Expo	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-1,14%	-	-	-	-
Impo	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-2,50%	-	-	-	-
CO₂	-	-	-	-	-	-24%	-	-
Tx	5,03	3,18	9,26	16,69	7,27	21,19	1,24	2,13
	5,05%	3,09%	9,34	16,51	7,35	21,33	1,24	2,17
T %	2,25	1,45	3,89	6,14%	2,47	6,08	0,71	1,17
	2,27%	1,39%	3,93	6,06%	2,50	6,11	0,71	1,18
Taxe	29,37	19,75	51,89	85,64	23,02	61,06	11,09	18,32
	29,56	19,03	52,44	84,60	23,28	61,40	11,16	18,48
R&D	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	1,32%	0,35%	1,31	1,68%	0,77	1,44	0,56	0,57
I	-	-	0,03	0,09%	0,02	0,05	0%	0%
	-	-	0,04	0,16%	0,03	0,13	0,01	0,03
I Diff	0,16	0,15	0,18	0,48%	0,05	0,19	0,02	0,07
	0,18%	0,21%	0,21	0,60%	0,07	0,27	0,03	0,11
I Q	-	-	-	-	0,02	0,07	-	-
	-	0,01%	-	0,03%	0,03	0,11	0%	0%
I Q	0%	0%	0%	-	0%	0%	0%	0%
	0%	0,01%	0,01	0,07%	0%	-	0,01	0,06

Table 14 Résultats des scénarii Taxe nationale recyclée sur les CS, R&D exogène et Taxe nationale recyclée sur les CS, R&D endogène (en grisé).

% d'écart par rapport au scénario de référence, sauf emploi en millier et taxe par tonne de CO₂ en Euros constants 1985.

Les résultats confirment, lorsque le progrès technique est exogène, l'obtention recherchée du double dividende emploi-environnement. L'emploi augmente en 2020 entre 59 mille (France) et 1,382 millions (région 2). Nous voyons que les créations d'emplois sont plus importantes dans les régions 2 et 3 (avec 944 mille) qui supportent la contrainte la plus forte sur leurs émissions de CO₂, et

dans lesquelles, par conséquent, la réduction du taux de cotisations sociales employeurs est plus importante.

C'est également dans ces deux régions, où l'emploi augmente le plus, que les gains de consommation finale sont les plus importants par rapport au cas sans redistribution : En 2020, elle diminue dans la région 2 de -0,01% contre -4,70% précédemment et augmente dans la région 3 de 0,75% au lieu de baisser de -5,39%.

Les résultats pour le bien-être des ménages sont similaires, évoluant en 2020 entre 0% (France) et -0,35% (région 2) contre -0,03% (France) et -1,31% (région 2) dans le cas sans redistribution.

En ce qui concerne le PIB, la redistribution ne permet pas d'annuler totalement le coût de la politique sauf dans le cas de la France qui parvient à gagner 0,01% de PIB en 2020 contre -0,12% lorsque la taxe n'est pas redistribuée. Les pertes de PIB pour la région 2 sont en 2020 de -0,08% contre -1,32% (dans le cas sans redistribution), de -0,17% contre -0,22% pour la région 1 et de -0,45% contre -1,19% pour la région 3.

La raison essentielle pour laquelle cette redistribution n'annule pas totalement les pertes de PIB est que les créations d'emplois créent des tensions inflationnistes importantes, venant dégrader la compétitivité extérieure des économies européennes. Par exemple, dans la région 3 où la baisse du PIB est la plus forte, le taux de salaire réel diminue de -3,19% en 2010 et de -8,07% en 2020 lorsque la taxe n'est pas redistribuée alors qu'il augmente respectivement de 1,86% et de 5,17% avec la redistribution.

	Sans		Avec	
	201	2020	20	2020
Croissance	-	-8,07%	1,8	5,17%

Table 15 Evolution du taux de salaire réel dans la région 3

L'augmentation des termes de l'échange des pays européens provoque une diminution des exportations comprise en 2020 entre -0,74% (France) et -2,10% (région 3) avec la redistribution alors qu'elles augmentent entre 0,30% (région 2) et 1,18% (région 1) sans redistribution.

Lorsque l'évaluation prend en compte les effets endogènes de progrès technique, on constate que ce mode de redistribution incite peu les entreprises à développer leurs efforts de R&D. Les dépenses de R&D n'augmentent en 2020 qu'entre 0,35% (région 1) et 1,68% (région 2), contre entre 1,78% (région 1) et 8,68% région (3) lorsque la taxe n'est pas redistribuée.

La politique a un effet relativement neutre sur le coût de production des firmes dont la réponse en termes d'innovations est par conséquent très faible, avec une ampleur variable selon les secteurs de production considérés : Par exemple, les secteurs intensifs en énergie, qui sont également faiblement intensifs en travail, ont une réponse plus forte que la plupart des autres secteurs puisqu'ils supportent un coût positif de la politique.

Les résultats sont par conséquent relativement comparables à ceux obtenus dans le cas de croissance exogène. Le coût est néanmoins légèrement plus réduit, que ce soit en terme de PIB, d'emploi, de consommation finale ou de bien-être.

Nous obtenons en 2020 un gain net de PIB de 0,03% pour la France et de 0,02% pour la région 2, les régions 1 et 3 supportant toujours un coût de respectivement -0,10% et -0,36% contre -0,17% et -0,45% dans le cas de progrès technique exogène.

Le coût en termes de consommation finale reste négatif pour toutes les régions et pour la France mais il subsiste un coût en bien-être de -0,5% pour la région 3 et de -0,33% pour la région 2, lié à la réduction du temps de loisir.

L'étude de ce scénario de taxation avec redistribution sous la forme d'une baisse des cotisations sociales employeurs permet ainsi de retrouver les résultats habituels de ce type de politique : Important double dividende emploi-environnement mais avec une relance de la consommation finale des ménages, induite par les créations d'emplois, ne permettant pas d'annuler totalement l'effet dépressif de la politique pour l'Europe, dont le PIB et le bien-être diminuent.

Le PIB européen diminue en 2020 de -0,17% dans le de cas croissance exogène et de -0,09% dans celui de croissance endogène, et nous obtenons des baisses respectives de -0,53% et de -0,10% pour le bien-être des ménages.

Lorsque la taxe est européenne (Cf. table 16), les résultats sont similaires et confirment la réduction du coût de la politique lorsqu'elle est mise en place au niveau européen plutôt que sur une base nationale.

	Région 1		Région 2		Région 3		France	
	2010	2020	2010	2020	2010	2020	2010	2020
PIB	-	-	0,06	0,02	-	-	0,04	-
	-	-	0,05	0,08	-	-	0,02	0,03
CF	0,05	0,01	-	0,03	0,30	0,56	0,05	0,09
	0,03	0,07	-	0,08	0,30	0,64	0,03	0,13
B-E	-	-	-	-	-	-	-	0%
	-	-	-	-	-	0%	-	0%
Empl	217	255	386	649	339	612	84	119
	218	264	388	657	342	621	84	122
Expo	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
Impo	-	-	-	-	-	-	-	-
	-1%	-	-	-	-	-	-	-
CO₂	-	-	-	-	-	-	-	-
Tx	4,78	5,56	5,06	7,27	8,67	12,8	3,02	4,09
	4,81	5,50	5,10	7,21	8,75	12,7	3,03	4,07
T %	2,14	2,48	2,20	2,88	2,92	3,89	1,66	2,17
	2,16	2,45	2,22	2,84	2,95	3,85	1,68	2,15
Taxe	27,7	31,1	27,7	36,1	27,7	36,1	27,7	36,1
	28,0	31,3	28,0	31,3	28,0	31,3	28,0	31,3
R&D	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	1,18	0,58	0,78	0,73	0,97	0,66	0,86	0,75
I	-	-	0,02	0,05	0,02	0,04	0%	0%
	-	-	0,02	0,09	0,03	0,12	0%	0,05
I Diff	0,16	0,29	0,11	0,23	0,06	0,13	0,05	0,12
	0,17	0,35	0,12	0,29	0,08	0,20	0,07	0,18
I Q	-	-	-	-	0,02	0,04	-	-
	-	-	0%	0,01	0,03	0,08	-	0%
I Q	0%	0%	0%	-	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0,01	0,04	0%	-	0,01	0,08

Table 16 Résultats des scénarii Taxe européenne recyclée sur les CS, R&D exogène et Taxe européenne recyclée sur les CS, R&D endogène (en grisé).

% d'écart par rapport au scénario de référence, sauf emploi en millier et taxe par tonne de CO₂ en Euros constants 1985.

Pour le PIB par exemple, les écarts s'établissent en 2020 entre -0,26% (région 1) et 0,02% (région 2) pour la version du modèle avec progrès technique exogène et entre -0,20% (région 1) et 0,08% (région 1) pour celle avec progrès technique endogène, à comparer avec les évolutions dans le cas du *Burden Sharing Agreement*, comprises respectivement entre -0,45% (région 3) et 0,01% (France) et entre -0,36% (région 3) et 0,03% (France).

Soulignons pour la France qu'à la différence du cas de taxation sans recyclage (Cf. section 3.1) dans lequel le coût de la politique est plus élevé lorsque la politique est mise en place au niveau européen plutôt qu'au niveau national, c'est l'inverse lorsque la taxe est recyclée sous la forme d'un abaissement du taux de cotisations sociales des employeurs.

L'emploi augmente en 2020 d'environ 120 mille dans le cas d'une taxe européenne contre seulement 60 mille dans celui d'une taxe nationale et la consommation finale, relativement stable dans le cas d'une taxe nationale, augmente de l'ordre de 0,1% dans le cas de taxation européenne.

Ce résultat tient au fait que les baisses de cotisations sociales sont plus importantes dans le cas de taxation européenne en raison de l'effort plus important de la France pour réduire ses émissions de CO₂, avec -13,97% de réductions en 2020 contre seulement -9,41% dans le cas d'une taxe nationale. Les secteurs de biens de consommation, fortement intensifs en travail et qui bénéficient par conséquent le plus des abaissements de charges sociales, sont ainsi davantage favorisés dans le cas de taxation européenne.

Pour résumer enfin les résultats pour l'Europe, la taxation recyclée par une baisse des cotisations sociales employeurs à un coût (ou un bénéfice) en termes de PIB, d'emploi, de consommation finale et de bien-être relativement similaire lorsque la taxe est européenne à celui que l'on obtient lorsque l'on applique le *Burden Sharing Agreement* (Cf. table 17).

	PIB	Emploi	Cons.	Bien-
Burden Sharing	-0,09%	2571	0,14%	0,01%
Taxe européenne	-0,07%	1664	0,16%	0,04%

Table 17 Comparaison du coût de la taxation recyclée par une baisse des CS employeurs en 2020 pour l'Europe (dans le cas de croissance endogène)

Les effets de progrès technique sont par contre réduits, à la différence du cas sans recyclage de la section précédente, impliquant des résultats similaires pour les deux versions du modèle (avec ou sans progrès technique endogène).

2. TAXE NATIONALE RECYCLÉE PAR UNE BAISSSE DES COTISATIONS SOCIALES PATRONALES ET UNE SUBVENTION À LA R&D

L'ensemble des résultats précédents a montré :

- la réduction importante, de l'ordre d'un tiers, de l'évaluation du coût d'une politique de réduction des émissions de CO₂ en Europe, lorsque l'évaluation prend en compte, en plus des substitutions factorielles habituelles, la possibilité qu'ont les firmes de « dématérialiser » leur production en générant du progrès technique ;
- la possibilité de réduire le coût de la politique lorsque le produit de la taxation est redistribué aux firmes sous la forme d'une réduction du taux de cotisations sociales des employeurs.

Dans ce dernier cas toutefois, nous voyons que l'important double dividende emploi-environnement qui est obtenu, avec 1,664 millions d'emplois créés dans la meilleure des situations étudiées (taxe européenne), reste accompagné d'une baisse d'activité macroéconomique, avec une réduction du PIB européen de -0,07% en 2020.

Or, nous avons vu également que lorsque la taxe est redistribuée aux entreprises, leur incitation à développer de nouveaux produits et procédés de production se réduit de façon très importante par rapport au cas sans recyclage, puisque la redistribution opérée compense en totalité le coût de la fiscalité environnementale supporté par les firmes.

La philosophie générale du scénario de politique étudié dans cette section consiste ainsi à mettre en place un recyclage du produit de la taxation permettant d'obtenir le double dividende emploi-environnement recherché habituellement, tout en conservant les effets positifs de progrès technique endogène qui sont obtenus lorsque la taxe n'est pas recyclée, en raison de la très forte incitation des firmes à innover lorsqu'elles se trouvent dans cette dernière situation.

	Région 1		Région 2		Région 3		France	
	2010	2020	2010	2020	2010	2020	2010	2020
PIB	-	-	0,06	-	-	-	0,03	0,01
	-	1,42%	0,32	1,86%	0,42%	1,87%	0,25%	1,91%
CF	0,05	-	-	-	0,27	0,75	-	-
	-	0,94%	0,02	1,29%	0,56%	2,48%	0,07%	1,40%
B-E	-	-	-	-	-	-	0%	0%
	-	0,05%	-	-	0,05%	0,21%	0%	0,03%
Empl	229	147	684	1382	288	944	32	59
	238	583	731	1881	340	1371	49	264
Expo	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	1,88%	-	1,56%	-	0,99%	0,07%	2,58%
Impo	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
CO₂	-	-	-	-	-	-24%	-	-
Tx	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%
Tx	5,03	3,18	9,26	16,69	7,27	21,19	1,24	2,13
	3,85%	2,26%	8,90	16,36	7,12%	22,06	0,89%	2,67%
T %	2,25	1,45	3,89	6,14%	2,47	6,08	0,71	1,17
	2,15%	1,17%	3,86	5,76%	2,51%	6,18%	0,69%	1,16%
Taxe	29,37	19,75	51,89	85,64	23,02	61,06	11,09	18,32
	28,05	16,06	51,70	81,24	23,46	63,05	10,96	18,52
R&D	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	31,85	24,28	31,81	24,85	30,97	23,25	31,04	23,94
I	-	-	0,03	0,09%	0,02	0,05	0%	0%
	0,28%	1,86%	0,48	2,38%	0,71%	3,41%	0,40%	2,02%
I Diff	0,16	0,15	0,18	0,48%	0,05	0,19	0,02	0,07
	0,56%	1,74%	0,70	2,87%	0,70%	2,80%	0,49%	2,27%
I Q	-	-	-	-	0,02	0,07	-	-
	0,27%	1,58%	0,41	1,99%	0,66%	2,96%	0,33%	1,66%
I Q	0%	0%	0%	-	0%	0%	0%	0%
	0,61%	2,49%	0,75	4,46%	0,73%	3,01%	0,86%	4,95%

Table 18 Résultats des scénarios Taxe nationale recyclée sur les CS, R&D exogène et Taxe nationale recyclée sur les CS et la R&D (en grisé).

% d'écart par rapport au scénario de référence, sauf emploi en millier et taxe par tonne de CO₂ en Euros constants 1985.

Dans ce scénario, une petite partie du produit de la taxation subventionne à hauteur de 30% les dépenses de R&D des firmes, pour obtenir les effets positifs souhaités sur le PIB et le bien-être des

ménages d'un renforcement des dépenses de R&D des firmes, le reste étant recyclé, comme précédemment, par une réduction du taux de cotisations sociales des employeurs.

Les résultats, tout d'abord dans le cadre de l'application du *Burden Sharing Agreement* (Cf. table 18) soulignent ainsi, lorsqu'on les compare à ceux du scénario de recyclage uniquement sous la forme d'une réduction des cotisations sociales employeurs avec progrès technique exogène (Cf. table 14), l'ampleur des bénéfices qu'il serait possible de retirer d'une stimulation significative des dépenses de R&D en présence de contraintes environnementales.

	Région 1		Région 2		Région 3		France	
	2010	2020	2010	2020	2010	2020	2010	2020
PIB	-	-	0,06	0,02%	-	-	0,04	-
	-	1,32%	0,33	1,90%	0,40%	2,19%	0,25%	1,92%
CF	0,05	0,01	-	0,03%	0,30	0,56	0,05	0,09
	-	0,98%	0,08	1,29%	0,58%	2,27%	0,12%	1,50%
B-E	-	-	-	-	-	-	-	0%
	-	0,04%	-	0,08%	0,05%	0,27%	0%	0,03%
Empl	217	255	386	649	339	612	84	119
	232	696	429	1161	380	988	98	316
Expo	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	1,52%	-	2,08%	-	2,01%	-	2,26%
Impo	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
CO₂	-	-	-11%	-	-	-18%	-	-
Tx	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%
	4,78	5,56	5,06	7,27%	8,67	12,89	3,02	4,09
	3,72%	4,75%	4,68	7,35%	8,23%	12,37	2,61%	4,33%
T %	2,14	2,48	2,20	2,88%	2,92	3,89	1,66	2,17
	2,09%	2,26%	2,16	2,65%	2,87%	3,61%	1,63%	2,00%
Taxe	27,77	31,14	27,77	36,14	27,77	36,14	27,77	36,14
	27,21	33,58	27,21	33,58	27,21	33,58	27,21	33,58
R&D	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	31,68	24,58	31,13	23,74	31,19	22,18	31,41	24,11
I	-	-	0,02	0,05%	0,02	0,04	0%	0%
	0,34%	2,92%	0,47	2,30%	0,71%	3,41%	0,40%	2,04%
I Diff	0,16	0,29	0,11	0,23%	0,06	0,13	0,05	0,12
	0,28%	0,03%	0,61	2,52%	0,71%	2,71%	0,53%	2,34%
I Q	-	-	-	-	0,02	0,04	-	-
	0,27%	1,52%	0,41	1,98%	0,66%	2,93%	0,33%	1,66%
I Q	0%	0%	0%	-	0%	0%	0%	0%
	0,61%	2,49%	0,75	4,40%	0,73%	3,01%	0,87%	4,97%

Table 19 Résultats des scénarios Taxe européenne recyclée sur les CS, R&D exogène et Taxe européenne recyclée sur les CS et la R&D (en grisé).

% d'écart par rapport au scénario de référence, sauf emploi en millier et taxe par tonne de CO₂ en Euros constants 1985.

Pour le taux de subvention considéré de 30%, nous voyons que les dépenses de R&D augmentent d'environ 30% en 2010 et de 25% en 2020. Les effets sur le PIB de cet accroissement de 25%-30% des efforts de R&D des firmes est tout à fait considérable, avec des gains tout d'abord limités en 2010 comparé à la situation décrite par la version du modèle à progrès technique exogène, mais devenant en 2020 très importants, en raison de l'accélération du remplacement des anciens produits et procédés par les nouveaux, avec des gains s'échelonnant entre 1,42% (région 1) et 1,91% (France) et un gain moyen de 1,70% pour l'Europe.

Ce surcroît de croissance, accès sur le développement de la compétitivité technologique des économies européennes, permet également de stimuler les exportations dans une mesure comparable au surcroît de croissance du PIB.

Les évolutions pour l'emploi sont également très avantageuses puisqu'il augmente en 2020 entre 264 mille (France) et 1,881 millions (région 2) soit au total de 3,121 millions en Europe, contre seulement 1,634 millions lorsque le progrès technique est exogène et que la taxation est intégralement recyclée sous la forme d'un abaissement du taux de cotisations sociales des employeurs.

On retrouve pour la consommation finale des ménages le résultat déjà avancé d'une stimulation moins importante que pour le PIB, du fait que le développement de l'innovation technologique favorise davantage les secteurs de biens d'équipement que ceux de services et de biens de consommation finale destinés aux ménages. Ce résultat est illustré notamment par les évolutions respectives des indices de qualité pour les biens d'investissement et pour les biens de consommation finale.

Pour cette raison à nouveau, mais également du fait que l'accroissement de l'emploi se traduit par une diminution du loisir, l'indice d'utilité des ménages connaît une progression limitée, comprise entre -0,11% (région 2) et 0,21% (région 3) soit 0,15% pour l'ensemble de l'Europe.

On retiendra toutefois que ce scénario, dans lequel l'innovation technologique des firmes est fortement stimulée, est le seul à indiquer la possibilité d'une amélioration du bien-être des ménages et du PIB pour l'ensemble de l'Europe en présence d'une contrainte environnementale, conduisant à un triple dividende de type bien-être/environnement/croissance.

Ce résultat de triple dividende s'obtient également dans le second cas étudié consistant à mettre en place la politique au niveau européen.

Dans cette situation (Cf. table 19), les gains de bien-être s'établissent cette fois en 2020 entre 0,03% (France) et 0,27% (région 3), soit à 0,08% pour l'ensemble de l'Europe, avec 1,32% d'augmentation pour la consommation des ménages européens et 3,161 millions de créations d'emploi en Europe, le PIB européen augmentant pour sa part de 1,70%.

Les résultats de ce dernier scénario de taxation permettent ainsi de mettre en avant, de façon tout à fait illustrative, les bénéfices que l'Europe pourrait retirer à long terme de politiques de taxation environnementale fiscalement neutres, lorsque ces politiques permettent également d'inciter les firmes à réaliser des efforts importants de dématérialisation de leur production. En effet, si les substitutions factorielles sont à court terme le moyen essentiel dont disposent les firmes pour s'adapter face à une augmentation importante de la fiscalité environnementale, le développement technologique permet à plus long terme aux firmes de repousser durablement leur contrainte environnementale : Une fois que les dépenses de R&D engagées pour développer l'efficacité productive sont amorties, la diffusion du progrès technique à travers le tissu productif permet alors aux économies européennes de bénéficier d'une externalité technologique positive faisant contrepoids au resserrement de la contrainte environnementale.

A long terme, la frontière environnementale est repoussée par le déplacement de la frontière technologique, indiquant la possibilité de sentiers de croissance soutenables pour les économies européennes, atteignables à coûts nuls, voire négatifs. Ce dernier scénario souligne ainsi finalement que les distorsions fiscales existant en Europe pénaliseraient, outre la création d'emploi, le développement technologique, comme tend encore à le prouver la faiblesse des efforts de R&D des firmes européennes par rapport, notamment, aux firmes américaines.

C. LE CAS DES PERMIS D'ÉMISSIONS NÉGOCIABLES

La mise en place de permis d'émissions négociables constitue une alternative aux politiques de taxation pour atteindre les objectifs de Kyoto. Dans le cas de *Grandfathering* étudié ici, les permis d'émissions sont distribués gratuitement aux firmes et aux ménages.

Cela permet aux firmes de satisfaire leurs objectifs de réduction de leurs émissions de CO₂ à faible coût.

Pour les ménages, la mise en œuvre des permis est réalisée de façon équivalente au cas de taxation sans recyclage : La contrepartie monétaire des permis des ménages est reversée à l'Etat qui l'utilise pour se désendetter. Les ménages, comme l'ensemble des autres consommateurs, bénéficient néanmoins des dotations de permis aux entreprises, dont la contrepartie monétaire, en situation de concurrence pure et parfaite, est par hypothèse reversée intégralement aux consommateurs sous la forme de baisses de prix.

Les deux scénarios de permis d'émissions qui sont présentés ici, qui diffèrent selon qu'il s'agit de permis nationaux ou au contraire de permis européens avec la possibilité d'échange de droits entre pays, sont donc équivalents à des scénarios de taxation avec recyclage du produit de la taxe prélevé sur les entreprises sous la forme d'une subvention à la production.

Nous voyons ainsi, avant même d'en venir aux résultats, que les permis d'émissions vont produire peu d'incitations pour les firmes, qui dans leur ensemble ne supportent pas de coût direct de la politique, à augmenter leurs efforts d'innovations.

Dans le cas tout d'abord de permis d'émissions nationaux, nous voyons par exemple (Cf. table 20) que les dépenses de R&D des firmes augmentent en 2010 entre 0,50% (France) et 2,08% (région 1) et en 2020 entre 0,63% (France) et 4,08% (région 3), contre respectivement entre 1,79% (France) et 5,64% (région 2) et entre 2,12% (France) et entre 8,68% (région 3) dans le premier scénario de taxation étudié, sans recyclage.

	Région 1		Région 2		Région 3		France	
	2010	2020	2010	2020	2010	2020	2010	2020
PIB	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
CF	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
B-E	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
Empl	-92	-65	-109	-264	-56	-223	-8	-14
	-89	-33	-107	-218	-54	-193	-7	-11
Expo	0,97	0,60	-	-	-	-	-	-
	0,98%	0,76%	-	-	-	-	-	-
Impo	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
CO₂	-	-	-	-	-	-24%	-	-
Prix/	36,13	23,72	71,53	124,88	28,61	87,13	13,29	22,37
	36,40	22,78	72,50	123,52	29,00	88,11	13,39	22,59
C	-	-	-	-17,42	-6,40	3,49	-4,68	-7,76
	-	-	-	-24,65	-6,47	2,04	-4,71	-7,98
C	135,6	110,7	20,44	17,42	6,40	-3,49	4,68	7,76
	138,2	110,4	20,50	24,65	6,47	-2,04	4,71	7,98
R&D	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	2,08%	0,88%	1,69	3,00%	1,44%	4,08%	0,50%	0,63%
I	-	-	0%	-	0,01	0,04	-	-
	-	0,02%	0,02	0,15%	0,04%	0,26%	0%	0,03%
I Diff	0,16	0,15	0,10	0,25%	-	-	0%	0,01
	0,20%	0,25%	0,13	0,42%	-	-	0,01%	0,05%
I Q	-	-	-	-	0,01	0,04	-	-
	-	0,07%	-	0,10%	0,04%	0,24%	0%	0,01%
I Q	0%	-	0%	0%	0%	0,01	0%	0%
	0,02%	0,08%	0,01	0,12%	0,02%	0,12%	0,01%	0,05%

Table 20 Résultats des scénarios Permis nationaux, R&D exogène et Permis nationaux, R&D endogène (en grisé).

% d'écart par rapport au scénario de référence, sauf emploi en millier, prix des permis par tonne de CO₂ en Euros constants 1985 et coût net des permis pour les firmes et les ménages en millions Euros constants 1985.

Le résultat le plus original, sur lequel nous insisterons ici, est ainsi que la mise en place d'un système de permis, qu'il soit national ou européen, ne va pas forcément représenter un coût macroéconomique inférieur à une politique de taxation sans recyclage, scénario auquel les permis d'émissions sont le plus souvent comparés.

C'est bien le cas lorsque le progrès technique est exogène, avec pour le PIB, la consommation finale et le bien-être un coût plus faible pour le système de permis que pour la taxation, la comparaison pour l'emploi délivrant pour sa part des résultats plus contrastés (Cf. tables 20 et 6 et tables 21 et 9 dans les cas de permis et de taxation européens).

	Région 1		Région 2		Région 3		France	
	2010	2020	2010	2020	2010	2020	2010	2020
PIB	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
CF	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
B-E	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
Empl	-89	-108	-53	-94	-66	-123	-18	-27
	-86	-76	-52	-71	-64	-91	-18	-19
Expo	0,93	1,24	-	-	-	-	-	-
	0,94%	1,41%	-	-	-	-	-	0,06%
Impo	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
CO₂	-	-	-	-	-	-24%	-	-
Prix/	34,71	45,98	34,71	45,98	34,71	45,98	34,71	45,98
	35,08	45,40	35,08	45,40	35,08	45,40	35,08	45,40
C	-	-	90,26	110,26	128,7	176,7	-0,64	-
	-	-	92,23	109,01	131,6	176,2	0,30	-11,97
C	89,87	123,2	25,81	35,99	14,34	20,30	10,48	12,69
	91,29	129,0	26,13	37,24	14,62	18,53	10,61	13,43
R&D	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	1,95%	1,70%	0,89	1,10%	1,86%	2,00%	0,97%	1,03%
I	-	-	0%	0%	0,02	0,03	-	-
	-	-	0,01	0,08%	0,05%	0,24%	0%	0,05%
I Diff	0,16	0,30	0,05	0,11%	-	-	0,01	0,03
	0,19%	0,42%	0,07	0,19%	-	-	0,03%	0,09%
I Q	-	-	-	-	0,01	0,02	-	-
	-	0,02%	0%	0,06%	0,04%	0,22%	-	0,01%
I Q	0%	-	0%	0%	0%	0,01	0%	0%
	0,02%	0,09%	0,01	0,06%	0,02%	0,11%	0,01%	0,09%

Table 21 Résultats des scénarios Permis européens, R&D exogène et Permis européens, R&D endogène (en grisé).

% d'écart par rapport au scénario de référence, sauf emploi en millier, prix des permis par tonne de CO₂ en Euros constants 1985 et coût net des permis pour les firmes et les ménages en millions Euros constants 1985.

En 2020, la table 22 montre ainsi, pour le modèle avec progrès technique exogène, que les permis et la taxe impliquent des coûts respectifs pour l'Europe de -0,54% contre -0,67% pour le PIB, de -1,39% contre -2,91% pour la consommation finale, de -0,30% contre -0,72% pour le bien-être et de -565 mille contre -615 mille pour l'emploi.

	PIB	Emploi	Cons.	Bien-
Taxe nationale non	-0,67%	-615	-2,91%	-0,60%
Permis nationaux	-0,54%	-565	-1,39%	-0,25%

Table 22 Comparaison du coût d'une taxe nationale non recyclée et d'un système de permis nationaux pour l'Europe en 2020 (dans le cas de croissance exogène)

Maintenant, lorsque la comparaison du coût des politiques s'appuie sur le modèle avec progrès technique endogène, les effets de progrès technique induits, plus nombreux dans le cas de la taxation, impliquent des coûts en emploi davantage réduits pour l'Europe à l'horizon de 2020, comme illustré par la table 23. Les coûts en terme de PIB des deux politiques sont par contre équivalents tandis que les permis restent préférables à la taxation en ce qui concerne la consommation finale et le bien-être.

	PIB	Emploi	Cons.	Bien-
Taxe nationale non	-0,40%	-387	-2,70%	-0,57%
Permis nationaux	-0,41%	-456	-1,29%	-0,23%

Table 23 Comparaison du coût d'une taxe nationale non recyclée et d'un système de permis nationaux pour l'Europe en 2020, (dans le cas de croissance endogène)

Les résultats de la comparaison de coûts sont évidemment similaires dans le cas d'une taxe et de permis européens, comme l'illustrent la table 24 pour le modèle avec progrès technique exogène et la table 25 pour celui avec progrès technique endogène.

	PIB	Emploi	Cons.	Bien-
Taxe européenne non	-0,47%	-437	-2,68%	-0,40%
Permis européens	-0,34%	-352	-1,38%	-0,17%

Table 24 Comparaison du coût d'une taxe européenne non recyclée et d'un système de permis européen pour l'Europe en 2020 (dans le cas de croissance exogène)

	PIB	Emploi	Cons.	Bien-
Taxe européenne non	-0,23%	-233	-2,48%	-0,38%
Permis européens	-0,22%	-256	-1,29%	-0,16%

Table 25 Comparaison du coût d'une taxe européenne non recyclée et d'un système de permis européen pour l'Europe en 2020 (dans le cas de croissance endogène)

Ces résultats de l'évaluation de l'efficacité relative de la taxation et des systèmes de permis permettent ainsi, lorsque le modèle prend en compte les comportements d'innovation endogène des firmes, de relativiser, tout au moins à un horizon de long terme dans lequel ces politiques prennent leur sens, l'ordre de supériorité des politiques généralement admis.

Ils viennent encore renforcer l'idée, qui a reçu trop peu d'échos dans la littérature appliquée sur les politiques environnementales, que l'évaluation du coût des politiques ne peut pas être correctement établie sans représentation satisfaisante de la façon dont l'introduction d'une contrainte environnementale interfère avec la capacité endogène des systèmes économiques à desserrer cette contrainte, c'est-à-dire à découvrir de nouvelles façons de produire et de consommer.

IV. CONCLUSION

Le nouveau module de croissance endogène du modèle GEM-E3 développé pour la réalisation de cette étude a permis de mettre en évidence une réduction des coûts des politiques de limitation des émissions gaz à effet de serre pour la France et l'Europe. Le résultat général est que plus le coût d'abattement est important pour les entreprises, plus l'évaluation du coût de la politique est réduite par rapport à la version du modèle avec progrès technique exogène : La réduction de coût, mesurée en termes de PIB, de bien-être, d'emploi ou de consommation finale atteint jusqu'à 50% dans le cas de la taxation sans recyclage.

De plus, cette étude a permis de faire ressortir l'importance d'un accompagnement des politiques environnementales par des politiques de R&D, indiquant que le défi environnemental sera principalement un défi technologique.

Tous ces résultats doivent néanmoins être nuancés, car il peut exister des effets d'éviction de la R&D environnementale sur la R&D privée, effet dont nous n'avons pas tenu compte ici.

V. RÉFÉRENCES

Fougeyrollas A. , Le Mouél P. et Zagamé P. [2001], « *Endogenous Growth in a General Equilibrium Approach* », article présenté au 7ème congrès de la “Society of Computational Economics”, Yale University, 28-30 juin 2001.

Jones C. I. [1999], « *Growth with or without Scale Effects ?* », American Economic Review Papers and Proceedings, vol. 89, n° 2.

Kapros C. et alii [2000], « *The Economic Effects of EU-Wide Industry Level Emission Trading to Reduce Greenhouse Gases : Results from PRIMES Energy Systems Model* », Report for the European Commission, DG XII, may.

Solow R. [1957], “*Technical Change and the Aggregate Production Function*”, Review of Economics and Statistics”, vol. 39, pp. 312-320.

Verspagen B. [1997], “*Measuring Intersectoral Technology Spillovers: Estimates from the European and US Patent Office Databases*”, Economic System Research, n° 9, pp. 47-65.