



Munich Personal RePEc Archive

## **Performance environnementale et mesure de la productivité**

Dubrocard, Anne and Prombo, Michel

STATEC - Luxembourg

20 September 2012

Online at <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/41456/>

MPRA Paper No. 41456, posted 30 Nov 2012 14:17 UTC

# Performance environnementale et mesure de la productivité<sup>1</sup>

Anne Dubrocard  
Michel Prombo

## 1. Introduction

Face à la nécessaire prise en compte des effets de la production sur l'environnement et plus généralement l'urgence à trouver les chemins d'un développement durable<sup>2</sup>, de nombreuses tentatives sont faites pour assoir des mesures de croissance de la productivité intégrant l'effet négatif des pollutions<sup>3</sup>. L'approche proposée<sup>4</sup> dans cette contribution utilise pour des besoins de calcul, les atouts du langage R ainsi que quelques programmes disponibles pour traiter de la programmation linéaire et des fonctions distance directionnelle. Ainsi, les programmes<sup>5</sup> ont été développés et adaptés pour étendre la mesure de la productivité totale des facteurs et de ses composantes - le progrès technique et l'efficacité technique - à la prise en compte des performances environnementales en minimisant les problèmes d'infaisabilité rencontrés dans les approches usuelles utilisant l'indice de Malmquist - un indice de productivité pionnier utilisé dans les approches non-paramétriques pour mesurer la croissance de la productivité. Le principal atout de ces approches est qu'elles ne nécessitent pas de données sur les prix des inputs et des outputs (désirables et non désirables), ni de forme fonctionnelle pour décrire l'ensemble de production. Toutefois, reposant sur une mesure de distance radiale, l'indice de Malmquist résulte d'un rapport de distances calculées par un programme d'optimisation qui ne considère qu'un accroissement maximal des quantités (positives) d'outputs produites (c'est-à-dire le long d'un axe radial), tout en maintenant constante la quantité des inputs. Or, dans le cadre de la prise en compte de productions non souhaitées on voudrait que la modélisation permette d'augmenter les « bonnes » productions tout en diminuant les « mauvaises » productions. Dans cet esprit, l'indice de Malmquist a été modifié par Chambers, Chung et Färe (1996) à partir des travaux de Luenberger (1992), pour mesurer la croissance de la productivité en prenant en compte la

performance environnementale et donnant ainsi naissance à l'indice de Malmquist-Luenberger s'appuyant sur une fonction distance directionnelle. Ces contributions font référence dans la littérature et sont abondamment citées dans les travaux ultérieurs qui y font appel : Chung et al. (1997), Färe et al. (2001), Weber et Domazlicky (2001), Pasurka(2006), Nakano et Managi (2008), Yörük et Zaim(2005) et Kumar (2006) par exemple.

Ce nouvel indice a fait l'objet d'extensions permettant de répondre à l'objection ancienne formulée par Tulkens et Eeckaut (1995). Ces auteurs sont, en effet, les premiers à remettre en question le déclin technologique que le cadre du modèle DEA standard rend possible. La construction d'indices séquentiels vise à empêcher ces régressions technologiques.

Les résultats et leurs sous-tendus théoriques sont présentés de façon succincte mais montrent les possibilités et la souplesse offertes par le langage R pour traiter des problèmes d'optimisation. L'accent est mis sur l'évolution de l'indice de Malmquist lorsqu'on prend en compte les outputs indésirables, et s'attache également à comparer les résultats avec et sans prise en compte des performances environnementales dans un exercice à la fois théorique et empirique concernant 15 pays européens et les Etats-Unis.

En particulier, le choix d'un indice a d'importantes conséquences sur les mesures de productivité et sur la comparaison des performances qui en résultent. Ainsi, pour le Luxembourg, la croissance annuelle moyenne de la PTF mesurée sur la période 1995-2010 est nulle si l'on n'intègre aucune mesure de la performance environnementale mais négative lorsque les émissions de gaz à effet de serre sont considérés et le Luxembourg perd 4 places dans le classement des pays. En outre, le Luxembourg connaît des pertes d'efficacité technique reflet d'une utilisation non optimale des facteurs de production lorsqu'on utilise un indice séquentiel considérant l'ensemble des possibilités de production observées au cours de la période. Dans ce dernier cas, l'innovation et le progrès technologique ne sont plus les sources uniques d'amélioration de la productivité totale des facteurs et le taux de croissance moyen de la productivité total des facteurs est positif selon ce nouvel indice séquentiel.

<sup>1</sup> Contact : Michel Prombo ([michel.prombo@statec.etat.lu](mailto:michel.prombo@statec.etat.lu)) et Anne Dubrocard ([anne.dubrocard@statec.etat.lu](mailto:anne.dubrocard@statec.etat.lu)) - STATEC - EPR2. Ceci est un extrait d'une analyse plus large conduite au niveau des branches et à paraître en Document de Travail dans la série Economie et Statistique du STATEC.

<sup>2</sup> Les réglementations environnementales « Rio de Janeiro (1992), Protocole de Kyoto(1997), Johannesburg (2002) la feuille de route de Bali(2007),...etc. ».

<sup>3</sup> tels que les principaux gaz à effet de serre - vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O) ; le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) ; le méthane (CH<sub>4</sub>) ; le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) ; l'ozone (O<sub>3</sub>) - mesurés par le GHG (Green House Gas).

<sup>4</sup> Les résultats de l'étude présentés ici sont issus d'une démarche dont l'objet initial était le déploiement et l'utilisation des techniques d'enveloppement des données et de programmation linéaire avec R (langage de programmation et environnement statistique) afin de vérifier la faisabilité d'un transfert des outils supportant les analyses conduites à la suite du projet Luxklems.

<sup>5</sup> Développés en langage R par Michel Prombo et utilisant les « packages » du logiciel R suivants :

lpSolve (Interface to Lp\_solve v. 5.5 to solve linear/integer programs)  
nonparaeff (Nonparametric Methods for Measuring Efficiency and Productivity)

## 2. Les outils méthodologiques

### Technologie de production

D'une manière générale, une technologie de production se définit comme un processus transformant un vecteur de facteurs de production (intrants ou inputs) :

$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n) \supset \mathbb{R}_+^n$ , en un vecteur de facteurs produits (extrants ou outputs) :  $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_m) \supset \mathbb{R}_+^m$  <sup>6</sup>

C'est la nature et l'état des connaissances à un moment donné, c'est-à-dire la technologie, qui détermine les limites de cet ensemble.

L'ensemble de production peut être représenté de 3 manières différentes selon l'objet de l'analyse envisagée :

1. La correspondance en inputs donne les niveaux d'inputs requis pour atteindre un niveau d'output déterminé. C'est l'approche retenue lorsque l'on recherche les possibilités de substitution entre les inputs
2. La correspondance en outputs, mesure les quantités d'outputs atteignables avec une combinaison d'inputs donnée. C'est l'optique dans laquelle se place le travail présenté ici. A quantité d'inputs donnée, on s'interroge sur les combinaisons d'outputs désirables et nocifs qu'il est possible d'obtenir étant donné la technologie disponible.
3. Enfin, le graphe (on parle souvent ici d'ensemble de production) est la présentation graphique usuelle des fonctions de production.

Ainsi, dans l'étude des possibilités de substitution entre les outputs la correspondance en outputs définit l'ensemble des outputs qui peuvent être produits pour un niveau d'input donné.

$$P(x) = \{y \in \mathbb{R}_+^m : y \text{ est produit par } x\}$$

Pour s'assurer que cet ensemble représente bien une technologie de production, un certain nombre d'axiomes doivent être vérifiés. Ils sont détaillés en annexe. La frontière des possibilités de production est définie comme l'ensemble des plans de production techniquement efficaces, c'est-à-dire tel qu'il n'est pas possible d'augmenter la quantité d'output produit sans augmenter la quantité consommée d'au moins un des inputs utilisés. Pour une unité de production donnée<sup>7</sup>, on observe des combinaisons d'inputs et d'outputs qui se situent soit sous ou sur la frontière, puisqu'elle doit appartenir à l'ensemble des productions possibles. Sous la frontière, l'unité est considérée comme inefficace puisqu'il lui serait possible d'augmenter la quantité produite pour le même niveau d'inputs engagés dans le processus. La position

relative de l'unité par rapport à la frontière efficace est un déterminant de sa productivité.

### La mesure de la productivité à travers l'indice de productivité de Malmquist

En effet, la productivité est le rapport entre la production (output) et les facteurs de production (inputs) qui y concourent. On parle de productivité partielle apparente lorsque la production est rapportée à un seul de ces inputs et de productivité totale des facteurs (PTF) lorsque l'on mesure la production obtenue rapportée à l'ensemble des facteurs de production, c'est-à-dire le travail, le capital et les consommations intermédiaires.

Mesurer la productivité d'une unité de production par rapport à une frontière de production suppose de se doter d'une mesure de distance. Par ailleurs, dans un environnement compétitif, il importe avant tout de comparer les performances en termes de productivité et leurs variations temporelles. En d'autres termes, il s'agit d'étudier non seulement le positionnement par rapport à la frontière efficace au temps  $t$ , mais également les déplacements de l'unité de production et de la frontière efficace ainsi que leur positionnement relatif. Inspirés par l'indice de quantité de Sten Malmquist (1953) s'appuyant sur des fonctions de distance de type radial et, à la suite de Caves, Christensen et Diewert (1982), Färe et al (1989) définissent l'indice de productivité de Malmquist orienté en output à la période  $t+1$  comme le produit de deux rapports : le premier rapporte la distance de l'unité de production entre  $t$  et  $t+1$  par rapport à la technologie de la période  $t$  ; dans le second rapport les distances sont mesurées par rapport à la frontière au temps  $t+1$ . L'indice de Malmquist est donné par la moyenne géométrique des deux rapports :

$$M_t^{t+1} = \left[ \frac{D_o^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^t(x^t, y^t)} \times \frac{D_o^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{1/2}$$

Färe *et al.* (1994) montrent par la suite que cet indice peut être décomposé afin de distinguer les principales sources de croissance de la productivité à savoir le changement d'efficacité technique (EFFCH) qui mesure la variation de la distance de l'unité considérée par rapport à la frontière et le changement technologique (TECH) qui se traduit par le déplacement de la frontière d'efficacité :

$$M_t^{t+1} = \frac{D_o^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^t(x^t, y^t)} \left[ \frac{D_o^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \times \frac{D_o^t(x^t, y^t)}{D_o^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{1/2}$$

$$M_t^{t+1} = EFFCH_t^{t+1} \times TECH_t^{t+1}$$

EFFCH et TECH sont calculés par la méthode de l'analyse de l'enveloppement des données (Data Envelopment Analysis : DEA, basée elle-même sur la programmation linéaire).

<sup>6</sup> Soit formellement  $T = \{(x, y) : x \text{ peut produire } y\}$

<sup>7</sup> Les unités observées ou centre de décision (DMU – Decision Making Unit) peuvent être des firmes, des branches d'activités économiques, des pays ou tout autre entité économique.

Comme le rappellent Briec et Peypoch (2010), « la productivité, le progrès technique et plus récemment les écarts par rapport aux techniques de meilleure pratique qui sont plus connus sous le nom d'inefficacité » sont aux sources de la croissance ; ce qui doit rendre attentif par exemple « à la relation entre le changement d'efficacité et le progrès technique pour la recherche et développement et le capital humain ».

Le calcul direct de l'indice de Malmquist et la construction d'une frontière non paramétrique présentent de nombreux avantages mais aussi d'importantes limites.

Les avantages :

- contrairement aux indices traditionnels, la cohérence avec la théorie économique est assurée même sans supposer un comportement de maximisation de la part des producteurs, puisqu'il n'est pas nécessaire d'approximer les productivités marginales par des prix comme dans les indices de Divisia traditionnels (Jorgenson et Griliches 1967) ;
- les données sur les prix et les coûts d'utilisation des facteurs fixes ne sont pas nécessaires ;
- aucune estimation économétrique n'est requise, mais seulement une approximation de l'enveloppe de production, très simple à mettre en œuvre.

Ainsi, les hypothèses retenues dans ce type d'approche sont moins restrictives que dans les mesures alternatives de la PTF. Toutefois, l'utilisation de l'indice de Malmquist rencontre deux limitations importantes. D'une part, lorsque l'on souhaite tenir compte des impacts environnementaux, la mise en œuvre d'une mesure de distance radiale ne permet pas de traiter aisément les productions négatives ou outputs indésirables. D'autre part, la construction d'une frontière distincte avec les observations (DMU) disponibles chaque année peut conduire à des déplacements de la frontière correspondant à des « régressions technologiques » difficiles à justifier d'un point de vue économique. Plusieurs voies ont été explorées pour tenter de dépasser ces limites. L'indice de Malmquist transformé en indice de Malmquist-Luenberger (ML) permet de considérer comme efficace des DMU capables d'accroître la production des outputs désirables tout en réduisant celle des outputs indésirables. L'introduction d'une séquentialité dans la méthode de construction des frontières de production à travers l'indice Séquentiel de Malmquist-Luenberger (SML) permet d'interdire toute régression technique. Ces deux approches sont maintenant détaillées dans les paragraphes qui suivent.

### Les polluants dans la technologie de production

Les polluants sont considérés comme des externalités négatives, c'est-à-dire comme des productions non souhaitées jointes à celles des biens et services habituellement prises en compte dans la mesure de la productivité. Comme cela a été évoqué précédemment, la prise en compte des productions non souhaitées ou outputs indésirables, rendent inappropriées les fonctions de distance de type radial. En effet, tandis que l'accroissement de la production de produits indésirables n'est pas souhaitable ou n'est tout simplement pas possible si

une réglementation environnementale s'impose aux DMU, la distance radiale tend à maximiser les outputs.

Une façon de procéder consiste à opérer des changements de variables afin d'assimiler les polluants à une production négative. Ces transformations visent à modifier les outputs indésirables en utilisant une fonction monotone décroissante (Seiford et Zhu 2002). De la sorte, les outputs indésirables transformés peuvent être intégrés dans le modèle à côté des outputs désirables et maximisés comme eux. Ainsi, les valeurs d'origine des outputs indésirables sont bel et bien minimisées. Enfin, Zhou et al. (2008) introduisent l'axiome de disposition faible des outputs indésirables pour les modèles exposés (lesquels sont tous basés sur des mesures de distance de type radial). L'une des formes non linéaires du programme<sup>8</sup> (Pure Environment Index) reposant sur l'hypothèse des rendements d'échelle variables (VRS) est par exemple utilisée dans Peroni C. (2012).

Une autre démarche consiste à utiliser des fonctions distance directionnelle telles que développées par Chambers, Chung et Färe (1996) à partir des travaux de Luenberger (1992). Ces métriques permettent un traitement asymétrique des outputs désirables et indésirables. Formellement, pour les DMU produisant un vecteur d'outputs désirables  $y$  et un vecteur d'outputs indésirables  $b$  à partir d'un vecteur de facteurs de production  $x$ , les fonctions distance directionnelle se définissent de la manière suivante :

$$\bar{D}_o(x, y, b, g) = \max\{\delta : (x, y, b) + (\delta g_x, \delta g_y, \delta g_b) \in P(x)\}$$

où  $g = (g_x, g_y, g_b)$  est un vecteur déterminant la direction considérée. Différentes directions peuvent être envisagées ; par exemple celle proposée par Chung, Färe et Grosskopf (1997). Selon cette direction  $g = (g_y, g_b) = (y, -b)$ , les fonctions distance directionnelle  $\bar{D}_o(x, y, b, g)$  mesurent l'accroissement maximal des outputs désirables simultanément à une réduction proportionnelle de la production des outputs indésirables, étant donné une quantité fixe d'inputs. Formellement, ce type de distance directionnelle défini par :

$$\bar{D}_o(x, y, b; y, -b) = \max\{\delta : (x, y, b) + (\delta y, -\delta b) \in P(x)\}$$

La distance  $\delta$  ainsi calculée prend une valeur comprise entre 0 et 1. De plus, les fonctions distance directionnelle apparaissent comme plus générales que les fonctions distance radiale qu'elles incluent comme un cas particulier. A partir des fonctions distance directionnelle, Chung, Färe et Grosskopf (1997) développent l'indice Malmquist-Luenberger (ML) définit par :

$$ML_t^{t+1} = \left[ \left( \frac{(1 + \bar{D}_o^t(x^t, y^t, b^t, g^t))}{(1 + \bar{D}_o^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, g^{t+1}))} \right) \left( \frac{(1 + \bar{D}_o^{t+1}(x^t, y^t, b^t, g^t))}{(1 + \bar{D}_o^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, g^{t+1}))} \right) \right]^{1/2}$$

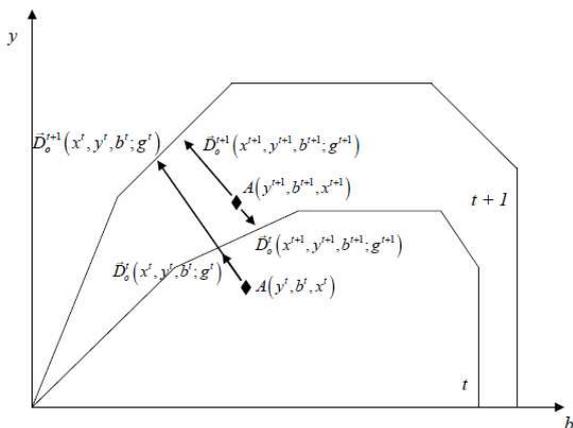
Le premier terme entre crochets mesure le « déplacement » de la DMU analysée entre  $t$  et  $t+1$  par rapport à la technologie de la période  $t$ , alors que le deuxième terme mesure le déplacement de la DMU par rapport à la technologie de la période  $t+1$ . Comme précédemment, l'indice est le résultat du calcul d'une moyenne géométrique et son interprétation est la même que pour l'indice de Malmquist. De plus, il peut, lui aussi, être décomposé afin

<sup>8</sup> L'équivalent linéaire du programme est utilisé pour les calculs

d'exprimer les principales sources de l'évolution de la productivité:

Le graphique ci-dessous (Simon Vallières-2006) illustre le calcul de l'indice de productivité totale des facteurs Malmquist-Luenberger du point de vue d'une DMU A dans son déplacement entre t et t+1, produisant un output désirable y et un output indésirable b à partir d'une quantité d'inputs qui est fixe dans le temps.

Graphique 1 : Illustration du calcul de ML



Source: Simon Vallières-2006

En dépit de sa large utilisation, l'indice de Malmquist-Luenberger présente certaines faiblesses :

- l'indice de productivité de Malmquist-Luenberger utilise une moyenne géométrique de deux indices Malmquist-Luenberger contemporains ; de ce fait, il est confronté à un problème potentiel de cas d'infaisabilité dans la résolution des problèmes de programmation linéaire dû à l'utilisation des périodes croisées de temps dans les fonctions distance directionnelle. De plus, la moyenne géométrique des deux indices ML contemporains n'est pas circulaire. Il est donc évident que la croissance de la productivité mesurée en utilisant deux indices ML adjacents doit être interprétée avec prudence.
- l'indice ML (Malmquist-Luenberger) tolère le déclin technologique ; en effet, d'un point de vue théorique, même si elle paraît moins probable, une détérioration du progrès technique ne peut pas être exclue. Une amélioration de l'indice ML consiste alors à opter pour l'approche séquentielle qui élimine la possibilité de mesurer le déclin technologique.

Ces lacunes de l'indice ML classique qui pourraient fournir des mesures biaisées de la croissance de la productivité, ont conduit à l'introduction d'une méthodologie alternative pouvant utiliser à la fois des outputs désirables et indésirables, et des inputs dans la mesure de la performance environnementale afin de s'affranchir des inconvénients de l'indice ML classique.

### Le problème de la régression technologique

Tulkens et Eeckaut (1995) sont les premiers à remettre en question le déclin technologique dans le cadre du modèle DEA standard. Forstner et Isaksson (2002) mentionnent que « l'un des inconvénients du modèle DEA standard est que

cette méthode permet aux DMU d'ignorer, toutes les technologies précédentes (processus sans mémoire) ». Bien qu'une telle situation soit possible du point de vue théorique - ce peut être le cas des économies des pays en situation de guerre - elle ne reflète pas la situation plus générale. La non prise en compte du passé n'est pas plausible et donne une mesure inexacte du changement d'efficacité technique et du changement technologique (progrès technique). Pour remédier à cette situation, une approche alternative qui élimine la possibilité de mesurer un déclin technologique a été proposée. Cette solution consiste à considérer qu'à chacune des périodes analysées, toutes les technologies précédentes sont également possibles (Tulkens et Vanden Eeckaut, 1995 et Shestalova, 2003). Ainsi, la frontière de la période t « enveloppe » l'ensemble des données observées jusque-là, ce qui élimine, par définition, la possibilité d'obtenir un recul de la technologie. Cette approche est qualifiée de séquentielle par Shestalova (2003).

L'indice séquentiel de Malmquist-Luenberger ainsi élaboré s'appuie sur la définition de deux technologies de production pour le calcul de la fonction distance : une technologie de production contemporaine (relative à une période donnée) et une technologie de production séquentielle relative à l'ensemble des périodes précédentes. La technologie de production contemporaine, à la période t est définie par :  $P^t(x^t) = \{(y^t, b^t) : x^t \text{ peut produire } (y^t, b^t)\}$  avec  $t = 1 \dots T$ .

L'indice séquentiel de Malmquist-Luenberger est défini en s'appuyant sur les fonctions distance directionnelles suivantes :

$$D_o^s(x, y, b; y, -b) = \max\{\delta : (x, y, b) + (\delta y, -\delta b) \in P^s(x)\}, s = t, t + 1$$

Elles sont définies pour chaque ensemble de technologie de production séquentiel. Il est défini par une moyenne géométrique des indices de productivité de Malmquist-Luenberger sur deux périodes :

$$SML_t^{t+1} = \left[ \left( \frac{1 + \bar{D}_o^t(x^t, y^t, b^t, g^t)}{1 + \bar{D}_o^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, g^{t+1})} \right) \left( \frac{1 + \bar{D}_o^{t+1}(x^t, y^t, b^t, g^t)}{1 + \bar{D}_o^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, g^{t+1})} \right) \right]^{1/2}$$

Le premier terme entre crochets mesure le « déplacement » de la DMU analysée entre t et t+1 par rapport à la technologie de la période t alors que le deuxième terme mesure le déplacement de la DMU par rapport à la technologie de la période t+1. De nouveau, l'interprétation des résultats est la même que pour l'indice de Malmquist et la forme géométrique de l'indice SML peut être décomposée afin d'exprimer les principales sources de l'évolution de la productivité et qui peut s'exprimer simplement par :

$$SML_t^{t+1} = SMLETC_t^{t+1} \times SMLTC_t^{t+1}$$

où  $SMLETC_t^{t+1}$  le facteur d'accroissement de l'efficacité technique, compare les distances à la frontière des meilleures pratiques<sup>9</sup> et mesure la croissance de l'efficacité technique entre les périodes t et t+1,

$SMLTC_t^{t+1}$  le progrès technologique qui est une moyenne géométrique, dont chaque terme mesure la progression de la

<sup>9</sup> Pour S. Perelman (1996), la frontière est une sorte d'enveloppe, qui coïncide souvent avec l'ensemble des points identifiés comme représentatifs de la meilleure pratique dans le domaine de la production, et par rapport à laquelle, la performance de chaque entreprise pourra être comparée.

frontière. Cet indice met en évidence les mouvements de frontière de production, indépendamment de la  $DMU_0$  de référence.

S'il n'y a aucun changement dans les inputs et les outputs entre les deux périodes  $t$  et  $t+1$ , alors  $SML_t^{t+1} = 1$ .

S'il y a une augmentation (diminution) de la productivité, alors  $SML_t^{t+1} > (<)1$ . Il convient de noter que ce qui précède suppose une relation stable entre les deux types d'outputs.

De plus, si  $SMLTC_t^{t+1} > 1$ , alors il y a eu un mouvement de rattrapage ou de convergence vers la frontière dans la période  $t+1$ . Il est interprété comme une amélioration de l'efficacité technique.

Enfin, si  $SMLTC_t^{t+1} < 1$ , alors la DMU est plus loin (divergente) de la frontière en  $t+1$  par rapport à  $t$ , et par conséquent elle est devenue moins efficace.

L'indice de changement technologique dans l'indice SML est toujours supérieur à l'unité puisque  $\bar{D}_o^{t+1}(x^s, y^s, b^s) \geq \bar{D}_o^t(x^s, y^s, b^s)$ . Si le changement technique permet une plus grande production d'outputs désirables et moins de production d'outputs indésirables, alors  $SMLTC_t^{t+1} > 1$ , sinon  $SMLTC_t^{t+1} = 1$ .

### 3. Résultats

#### Description des données

Les données utilisées proviennent des tableaux statistiques construits à partir des informations fournies par EUROSTAT, EUKLEMS, l'UNFCC (Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques) et la Division des comptes nationaux du STATEC.

Pour les besoins du calcul, nous utilisons quatre séries de variables pour la période allant de 1995 à 2010, et pour un ensemble de 15 pays de l'Union Européenne<sup>10</sup> et les Etats-Unis (US).

1. GDP (PIB) : Les séries sont converties en utilisant la PPA (parité des pouvoirs d'achat), pour assurer la comparabilité des agrégats entre les pays.
2. L (Emploi) : L'emploi retenu renvoie à un concept d'emploi domestique qui comprend à la fois les travailleurs résidents et non-résidents. Il est mesuré par le nombre d'emplois fournis par Eurostat.
3. K (stock de capital) : Les estimations du stock de capital sont construites à partir des données du stock de capital de la base de données EUKLEMS<sup>11</sup> et des séries d'investissement obtenues auprès d'Eurostat sauf pour le Luxembourg pour lequel les données proviennent du STATEC.
4. GHG (Gaz à effet de serre) : Les données sur la pollution et notamment le GHG proviennent de la

base de données de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (UNFCC) mis à jour en juin 2012.

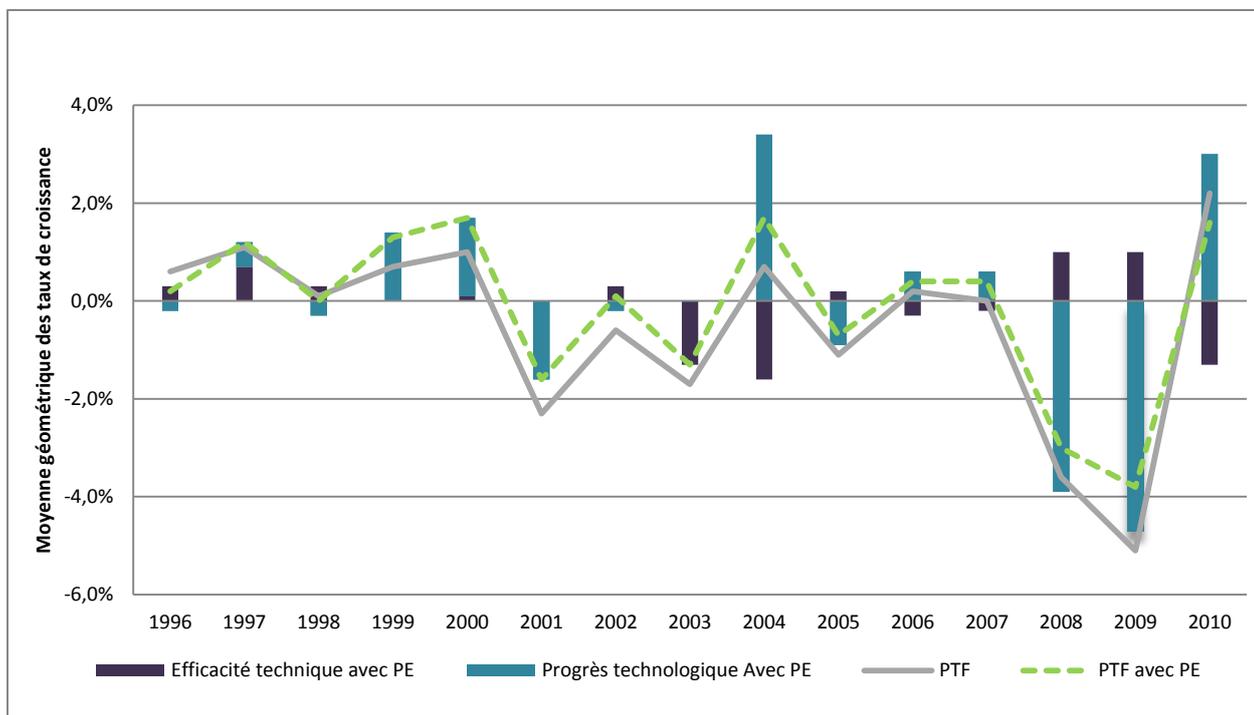
Les données sont utilisées pour calculer les indices de Malmquist-Luenberger (ML) propices à la prise en compte des outputs indésirables (ici les émissions de gaz à effet de serre - GHG) puis pour calculer les indices séquentiels (SML) qui minimisent les cas d'infaisabilité et interdisent la régression technologique.

Dans le graphique qui suit, les résultats obtenus avec l'indice ML intégrant une mesure de la performance environnementale sont comparés avec ceux plus habituels dans lesquels le PIB est la seule mesure d'output prise en compte.

<sup>10</sup> AT-Autriche ; BE-Belgique ; DE -Allemagne ; DK-Danemark ; ES-Espagne ; FI-Finlande ; FR-France ; GR-Grèce ; IE-Irlande ; IT-Italie ; LU-Luxembourg ; NL-Pays-bas ; PT-Portugal ; SE-Suède ; UK-Royaume-Uni.

<sup>11</sup> Téléchargeables sur le site : [www.euklems.net](http://www.euklems.net). Pour le détail de la méthode de construction voir A. Dubrocard et ali. PPE n° 14, Mai 2010.

**Graphique 2: Prise en compte des performances environnementales (PE) dans le calcul de la PTF et de ses composantes selon l'indice ML - Ensemble des pays**



Source: Calculs des auteurs

La prise en compte des performances environnementales mesurées par les émissions de gaz à effet de serre améliore la productivité globale des facteurs. En effet, la moyenne géométrique calculée pour l'ensemble des pays est supérieure tous les ans sauf en 1996 aux résultats obtenus sans outputs indésirables. Les tendances et leurs retournements sont concomitants. L'analyse peut maintenant se focaliser sur la comparaison des différents types de mesures prenant en compte la performance environnementale. Ainsi, dans les sections qui suivent, la PTF est calculée lorsque les émissions de gaz à effet de serre sont considérées comme des outputs (indésirables). Les deux types d'indice (séquentiel et non séquentiel) et leur décomposition sont présentés d'abord par pays, puis selon leur évolution temporelle, enfin, l'éclairage est mis sur les résultats obtenus pour le Luxembourg en particulier.

### Hétérogénéité des pays

La croissance moyenne de la productivité, le changement de l'efficacité technique et le progrès technique sont calculés pour les pays considérés avec les mesures d'indices proposés dans le chapitre 2, à savoir indice de

Malmquist-Luenberger et indice de Malmquist-Luenberger séquentiel. Les mesures obtenues sont présentées dans les deux tableaux qui suivent.

Les chiffres correspondent à la moyenne géométrique des évolutions - constatées chaque année de 1995 à 2010 - de la productivité totale (respectivement ML et SML) dans les quatrièmes colonnes et de ses composantes dans les deuxièmes et troisièmes colonnes, les changements de l'efficacité technique (respectivement MLEC et SMLEC) et du progrès technique (respectivement MLTC et SMLTC) calculées pour chaque pays (DMU listées en premières colonnes). Cette décomposition exprime, pour chacun des indices calculés, l'une des principales sources de l'évolution de la productivité : le changement dans le degré d'efficacité et le progrès technologique.

Rappelons, que si la valeur de la moyenne géométrique de l'indice est supérieure (inférieure) à l'unité, cela correspond à un taux de croissance positif (néгатif) c'est-à-dire à une amélioration (détérioration) de l'efficacité technique (EC), du progrès technique (TC) ou de la productivité totale des facteurs.

**Tableau 1 : Moyenne géométrique des taux de croissance de l'indice de ML par pays**

Pays	Efficacité technique - MLEC	Progrès technique - MLTC	PTF - ML
AT	0,0%	0,5%	0,5%
BE	0,0%	0,4%	0,4%
DE	0,8%	-0,1%	0,6%
DK	0,0%	-0,3%	-0,4%
ES	-0,7%	0,8%	0,1%
FI	0,9%	0,1%	1,0%
FR	0,2%	0,3%	0,5%
GR	-0,6%	-0,5%	-1,1%
IE	0,0%	-0,1%	-0,1%
IT	-0,9%	-0,2%	-1,2%
LU	0,0%	-1,0%	-1,0%
NL	0,5%	0,2%	0,8%
PT	-1,2%	-1,0%	-2,2%
SE	0,0%	0,9%	0,9%
UK	0,1%	-1,2%	-1,0%
US	0,0%	0,0%	0,0%

Source: Calculs des auteurs

**Tableau 2 : Moyenne géométrique des taux de croissance de l'indice séquentiel de ML par pays**

Pays	Efficacité technique - SMLEC	Progrès technique - SMLTC	PTF - SML
AT	-0,4%	0,9%	0,6%
BE	-0,2%	0,6%	0,4%
DE	0,4%	0,5%	0,9%
DK	-0,4%	0,4%	0,0%
ES	-1,0%	1,2%	0,1%
FI	0,8%	0,4%	1,1%
FR	-0,2%	0,8%	0,5%
GR	-1,2%	0,3%	-0,9%
IE	0,0%	0,5%	0,5%
IT	-1,3%	0,5%	-0,8%
LU	-0,5%	1,5%	1,0%
NL	0,2%	0,5%	0,7%
PT	-1,5%	0,3%	-1,1%
SE	-0,3%	1,4%	1,2%
UK	-0,6%	0,1%	-0,5%
US	-0,2%	0,3%	0,1%

Source: Calculs des auteurs

Il a de plus été procédé à un test d'égalité des indices de la PTF et de ces composantes calculés selon la méthode de Malmquist-Luenberger ou selon la méthode séquentielle.

**Encadré 1**  
**Test d'égalité des indices**

Le test de la somme des rangs de Wilcoxon a été utilisé pour tester l'égalité des différents indices ainsi que de leurs décompositions au seuil de 0.05. Le tableau ci-après résume les résultats obtenus dans l'approche par pays.

Hypothèse nulle	Statistiques	p-value	Résultat
SML=ML	175.5	0.074	On ne rejette pas Ho (>0.05)
SMLEC=MLEC	41	0.00107	On rejette Ho (<0.05)
SMLTC=MLTC	95	0.2197	On ne rejette pas Ho(>0.05)

Source: Calculs des auteurs à partir des résultats du modèle

Le tableau suivant donne le classement des pays selon le taux de croissance annuel moyen de leur PTF. Le rang est donné pour les taux de croissance obtenus à partir du calcul de l'indice de Malmquist-Luenberger avec et sans production indésirable (respectivement ML-PE et ML (Hors GHG) puis avec l'indice séquentiel intégrant la performance environnementale (SML-PE).

**Tableau 3: Classement des pays selon chaque indice**

Pays	ML-PE	ML (horsGHG)	SML-PE
FI	1	1	2
SE	2	3	1
NL	3	6	5
DE	4	4	4
FR	5	5	7
AT	6	2	6
BE	7	7	9
ES	8	10	10
US	9	8	11
IE	10	12	8
DK	11	11	12
UK	12	14	13
LU	13	9	3
GR	14	13	15
IT	15	15	14
PT	16	16	16

Ainsi, la comparaison des rangs des deux premières colonnes montre que l'ordre change entre les 5 premiers. Toutefois, la Finlande, la Suède, l'Allemagne et la France restent dans ce groupe, tandis que l'Autriche en sort et cède sa place au Pays-Bas. En queue de classement, on retrouve également peu ou prou les même pays avec les deux indices : le Royaume-Uni, la Grèce, l'Italie et le Portugal mais tandis que l'Irlande disparaît de ce groupe, il est remplacé par le

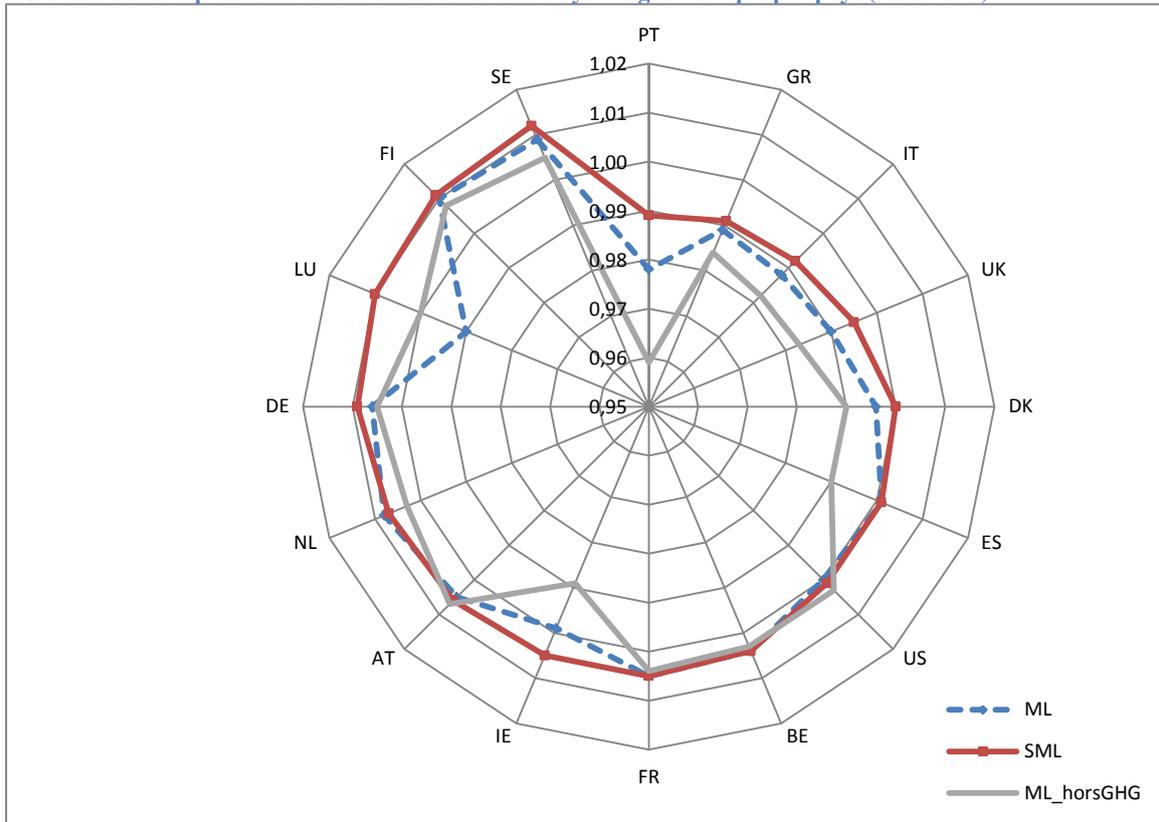
Luxembourg qui perd 4 places avec ce nouvel indice. En effet, les moyennes géométriques calculées sur l'ensemble de la période varient en particulier pour le Portugal et l'Irlande, d'une part, dont l'évolution de la PTF quoique négative est meilleure lorsque la performance environnementale est prise en compte et pour le Luxembourg, d'autre part, dont les performances se détériorent lorsque les gaz à effet de serre sont intégrés dans le calcul de l'indice.

Ces éléments sont confirmés par la lecture des radars présentés ci-après. Ainsi, lorsque l'on compare les indices ML et SML, qui tous deux tiennent compte des performances environnementales, 7 pays ont connu un recul dans l'évolution de la PTF mesurée par la moyenne géométrique des évolutions annuelles de l'indice ML et, il n'y en a plus que 4 (la Grèce, l'Italie, le Royaume-Uni et le Portugal qui tous figurent dans la première liste) lorsque l'indice séquentiel est utilisé. Seuls l'Allemagne, la Finlande,

l'Irlande et les Pays-Bas ne connaissent pas de régression de leur efficacité technique moyenne. Le Luxembourg et la Suède connaissent la plus forte croissance du progrès technique dès lors que les reculs technologiques ne sont plus autorisés dans le modèle. Et, dans le classement selon l'indice séquentiel, le Luxembourg surgit au troisième rang.

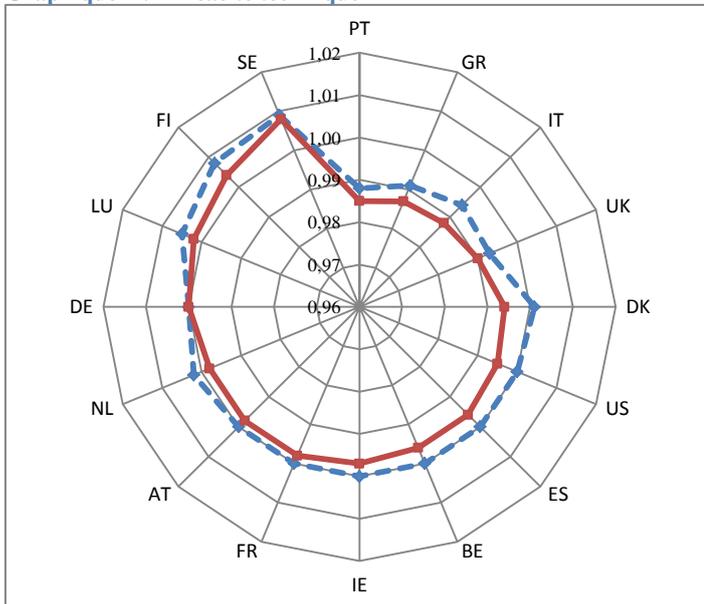
Par ailleurs, puisque le progrès technique est toujours positif ou nul, la croissance moyenne obtenue pour cette composante avec l'indice séquentiel est toujours supérieure ou égale à la mesure non séquentielle. Qui plus est, les gains d'efficacité technique sont le plus souvent inférieurs avec la mesure séquentielle sauf pour l'Allemagne et la Suède pour lesquels les gains d'efficacité technique moyens sont quasi-identiques avec les deux mesures. Finalement, la mise en œuvre de l'indice séquentiel donne des mesures de la PTF toujours supérieures en moyenne aux autres indices.

**Graphique 3 : Croissance de la productivité totale des facteurs – Moyenne géométrique par pays (1996-2010)**

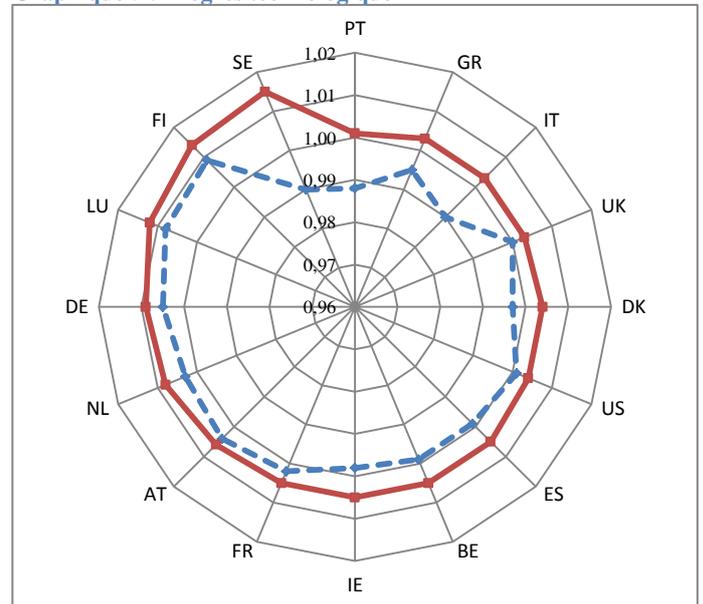


Source: Calculs des auteurs

**Graphique 4 : Efficacité technique**



**Graphique 5 : Progrès technologique**



Source: Calculs des auteurs

**Evolution annuelle pour l'ensemble des pays**

Les évolutions des indices de productivité SML et ML font apparaître des tendances similaires au cours de la période étudiée. Ainsi, la moyenne géométrique des taux de croissance de la PTF pour l'ensemble des pays connaît une forte diminution pour les deux indices entre 2000 et 2001 puis entre 2004 et 2005, enfin une baisse drastique entre 2007

et 2008 qui se poursuit jusqu'en 2009. La remontée est également spectaculaire pour les deux indices entre 2009 et 2010.

En revanche, l'évolution de la décomposition des indices est très différente, alors que l'indice ML tend à attribuer une partie de ces baisses à des régressions technologiques en

2001 puis en 2008 et 2009, l'indice séquentiel l'impute plus largement à des pertes de gains d'efficacité.

**Tableau 1 : Moyenne géométrique des taux de croissance de l'indice de Malmquist-Luenberger**

Année	Efficacité technique - MLEC	Progrès technique - MLTC	PTF - ML
1996	0,3%	-0,2%	0,2%
1997	0,7%	0,5%	1,2%
1998	0,3%	-0,3%	0,0%
1999	0,0%	1,4%	1,3%
2000	0,1%	1,6%	1,7%
2001	0,0%	-1,6%	-1,6%
2002	0,3%	-0,2%	0,1%
2003	-1,3%	0,0%	-1,3%
2004	-1,6%	3,4%	1,7%
2005	0,2%	-0,9%	-0,7%
2006	-0,3%	0,6%	0,4%
2007	-0,2%	0,6%	0,4%
2008	1,0%	-3,9%	-3,0%
2009	1,0%	-4,7%	-3,8%
2010	-1,3%	3,0%	1,6%

Source: Calculs des auteurs

**Tableau 2: Moyenne géométrique des taux de croissance de l'indice séquentiel de Malmquist-Luenberger**

Années	Efficacité technique - SMLEC	Progrès technique - SMLTC	PTF - SML
1996	-0,1%	0,7%	0,6%
1997	0,3%	1,1%	1,4%
1998	-0,3%	0,7%	0,4%
1999	0,1%	1,5%	1,5%
2000	0,6%	1,3%	1,8%
2001	-1,5%	0,0%	-1,5%
2002	0,2%	0,0%	0,2%
2003	-1,2%	0,0%	-1,2%
2004	-0,1%	2,1%	2,1%
2005	-0,3%	0,1%	-0,2%
2006	0,0%	0,9%	1,0%
2007	-0,2%	1,2%	0,9%
2008	-2,3%	0,0%	-2,3%
2009	-2,8%	0,0%	-2,8%
2010	1,7%	0,1%	1,8%

Source: Calculs des auteurs

## Encadré 2 Test d'égalité des indices

On observe que la méthodologie SML tout en excluant le déclin technologique présente un profil similaire à ML, pour ce qui est de la productivité totale, avec une très forte corrélation (0,990). Les détériorations observables se rapportent aux mêmes années (2001, 2003, 2005, 2008, 2009) L'égalité entre les différents paramètres n'a pu être rejetée, comme le montre le tableau ci-dessous

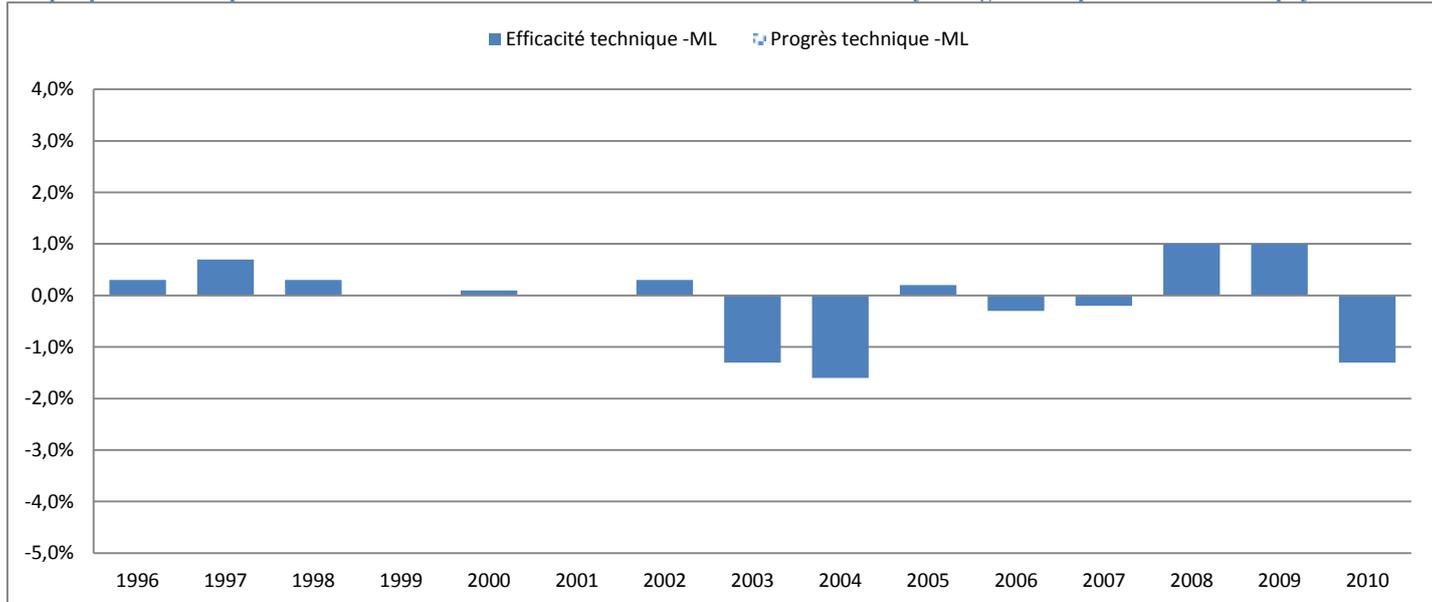
Tableau années

Hypothèse nulle	Statistiques	p-value	Résultat
SML=ML	140	0.2615	On ne rejette pas Ho(>0.05)
SMLEC=MLEC	80	0.1894	On ne rejette pas Ho(>0.05)
SMLTC=MLTC	93.5	0.4425	On ne rejette pas Ho(>0.05)

Source: Calculs des auteurs

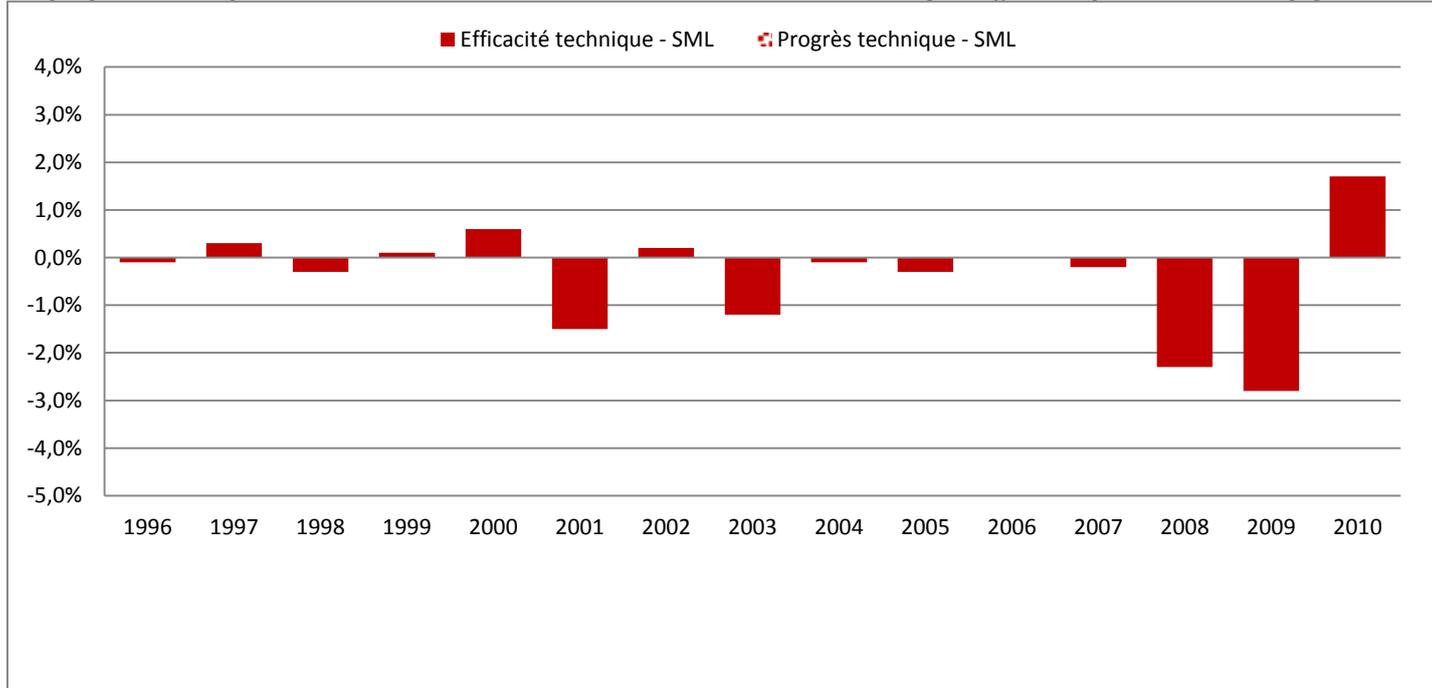
Remarque : la p-value peut varier si on change d'échantillon, et d'une manière générale, on ne peut pas dire que notre échantillon soit exhaustif pour un tel test.

**Graphique 6 : Décomposition de la PTF selon l'indice ML - croissance annuelle de la moyenne géométrique - Ensemble des pays**



Source: Calculs des auteurs

**Graphique 7 : Décomposition de la PTF selon l'indice SML - croissance annuelle de la moyenne géométrique - Ensemble des pays**



Source: Calculs des auteurs

### Analyse des résultats obtenus pour le Luxembourg

Pour le Luxembourg, la mesure de la PTF et de ses composantes par l'indice ML (Malmquist-Luenberger), et SML (Séquentiel Malmquist-Luenberger) sont présentés dans les tableaux ci-après.

Pour le Luxembourg, l'indice ML détecte 9 cas de détérioration (1998, 1999, 2001, 2003, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009) ; ce qui constitue un nombre de cas beaucoup

plus élevé que lorsqu'on considère la moyenne géométrique des taux de croissance des pays indiquant que les moyennes présentées jusqu'ici recouvrent une grande hétérogénéité dans l'évolution des situations de chaque pays. En revanche, l'indice de productivité totale SML pour le Luxembourg s'éloigne moins de la moyenne avec 5 cas de détériorations (2001, 2003, 2005, 2008 et 2009) comme pour l'ensemble des pays sur la période de 1995 à 2010.

**Table 3 : L'indice de Malmquist-Luenberger pour le Luxembourg**

Année	Efficacité technique - MLEC	Progrès technique - MLTC	PTF - ML
1996	0,0%	0,3%	0,3%
1997	0,0%	2,4%	2,4%
1998	0,0%	-0,5%	-0,5%
1999	0,0%	5,9%	5,9%
2000	0,0%	4,0%	4,0%
2001	0,0%	-5,9%	-5,9%
2002	0,0%	3,1%	3,1%
2003	0,0%	-1,8%	-1,8%
2004	0,0%	8,5%	8,5%
2005	0,0%	-4,6%	-4,6%
2006	0,0%	-4,4%	-4,4%
2007	0,0%	-3,9%	-3,9%
2008	0,0%	-8,5%	-8,5%
2009	0,0%	-8,6%	-8,6%
2010	0,0%	1,5%	1,5%

Source: Calculs des auteurs

**Table 4: L'indice séquentiel de ML pour le Luxembourg**

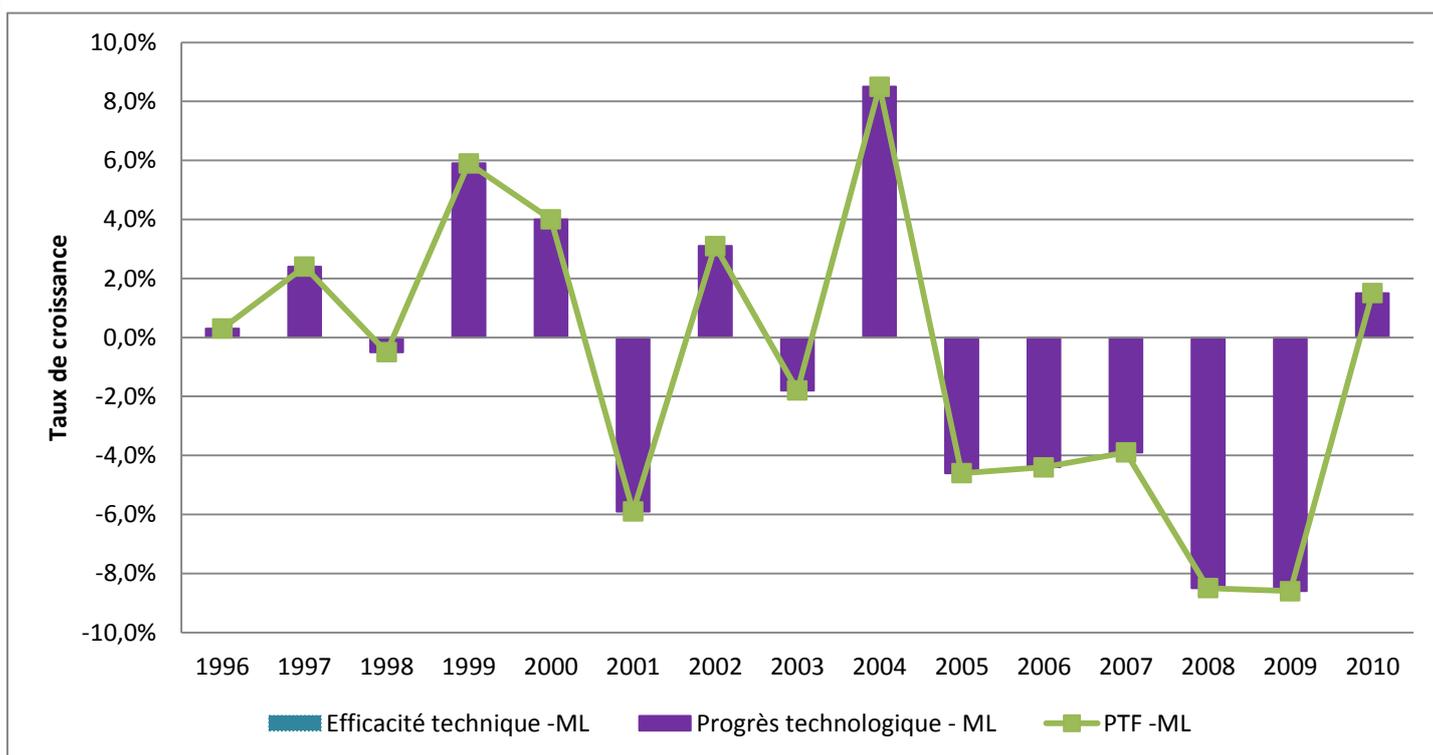
Année	Efficacité technique - SMLEC	Progrès technique - SMLTC	PTF - SML
1996	0,0%	0,3%	0,3%
1997	0,0%	2,6%	2,6%
1998	0,0%	3,7%	3,7%
1999	0,0%	4,6%	4,6%
2000	0,0%	3,2%	3,2%
2001	-3,0%	0,0%	-3,0%
2002	0,0%	0,0%	0,0%
2003	-1,6%	0,0%	-1,6%
2004	4,7%	7,7%	12,8%
2005	-1,7%	0,0%	-1,7%
2006	1,7%	0,1%	1,9%
2007	0,0%	0,1%	0,1%
2008	-2,5%	0,0%	-2,5%
2009	-4,3%	0,0%	-4,3%
2010	0,1%	0,0%	0,1%

Source: Calculs des auteurs

L'approche séquentielle est particulièrement intéressante dans le cas du Luxembourg. En effet, lorsque les régressions technologiques sont autorisées, le Luxembourg est toujours sur la frontière efficace et les variations de la PTF sont entièrement imputées à des déplacements de la frontière efficace et interprétées comme des déclinis technologiques. Si l'on admet qu'un niveau de production atteint par le passé fait partie de l'ensemble des productions atteignables dans les périodes ultérieures, alors une détérioration observée pour le Luxembourg peut aussi être imputable à une baisse d'efficacité technique. Les graphiques présentés ci-après illustrent clairement le propos.

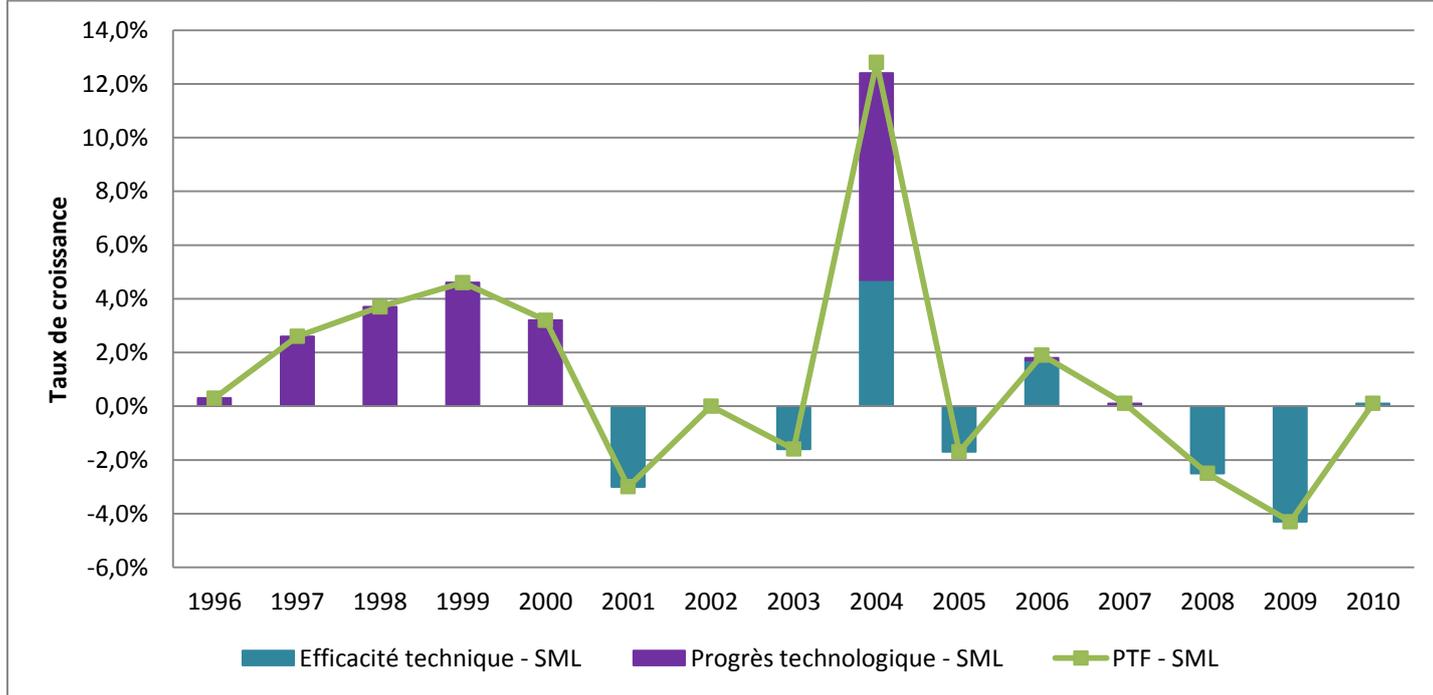
Dans l'approche séquentielle, le Luxembourg connaît une période de croissance de la PTF entièrement imputable au progrès technique ininterrompue de 1996 à 1998. Puis, l'évolution de la PTF se détériore en 2001 en l'absence de progrès technique et avec une forte diminution de l'efficacité technique, le même phénomène prévaut en 2003, en 2005 puis en 2008 et 2009. Ces résultats semblent plus conformes à l'hypothèse d'une perte d'efficacité technique liée au retard dans l'adaptation des facteurs à la suite d'une baisse de la production.

Graphique 8 : Performance environnementale du Luxembourg - La PTF et ses composantes avec l'indice ML



Source: Calculs des auteurs

Graphique 9 : Performance environnementale du Luxembourg - La PTF et ses composantes avec l'indice ML séquentiel



Source: Calculs des auteurs

#### 4. Conclusion

Les préoccupations liées au changement climatique dont la coopération mondiale se fait l'écho à travers les

réglementations environnementales « Rio de Janeiro (1992), Protocole de Kyoto(1997), Johannesburg (2002) la feuille de route de Bali(2007),...etc. », imposent de mieux maîtriser les externalités négatives liées à la production. Cela suppose

également la prise en compte de productions non souhaitées jointes aux outputs désirables dans la mesure de la croissance de la productivité. Dans le contexte des modèles DEA et des indices construits sur des fonctions distance et destinées à mesurer la productivité totale des facteurs, cela conduit à des résultats biaisés ou des problèmes d'infaisabilité lorsque les outputs indésirables ne sont pas correctement intégrés. Färe *et al.* (1989), Chung *et al.* (1997) et Ball *et al.* (2004) ont adapté des mesures d'efficacité et de productivité à l'introduction des externalités négatives dans la technologie des DMU analysées.

Dans cet article, différentes fonctions distance ont été utilisées. La plus ancienne est la fonction distance radiale (Shephard – 1970). Mais celle-ci impose que les rapports entre les différents facteurs de production et produits soient maintenus constants. Or, la préoccupation dans le cadre de la prise en compte des externalités négatives est d'arbitrer sur les priorités à donner aux différents facteurs. Au contraire, la fonction distance directionnelle, proposée par Chambers, Chung et Färe (1996), permet de privilégier un ou plusieurs des facteurs de production par rapport aux autres et de travailler simultanément en input et en output. Ces apports méthodologiques ont été utilisés pour mesurer l'évolution de la productivité totale des facteurs dans 15 pays européens et aux Etats-Unis, entre 1995 et 2010. Les résultats obtenus montrent que la prise en compte des performances environnementales mesurées à travers les émissions de gaz à effet de serre améliore la productivité globale des facteurs<sup>12</sup>. En effet, la moyenne géométrique calculée pour l'ensemble des pays est supérieure tous les ans sauf en 1996 aux résultats obtenus sans tenir compte des performances environnementales. Du coup, le classement des pays selon la PTF calculée par l'indice de Malmquist-Luenberger n'est pas très différent de celui obtenu sans production indésirable bien que des variations soient perceptibles pour quelques pays.

En revanche, l'élimination des situations de déclin technologique par la mise en œuvre de l'indice séquentiel de Malmquist-Luenberger conduit à des croissances de la productivité totale des facteurs toujours supérieures en moyenne aux autres indices. L'analyse des tendances temporelles des indices de productivité SML et ML pour l'ensemble des pays fait apparaître des profils d'évolution similaires au cours de la période étudiée (1995-2010). Toutefois, cette tendance globale de la PTF recouvre des évolutions très contrastées de ses composantes. Tandis que l'indice ML tend à attribuer une partie de ces baisses à des régressions technologiques en 2001 puis en 2008 et 2009, l'indice séquentiel l'impute plus largement à des pertes de gains d'efficacité. De même, une analyse plus fine de l'évolution des indices par pays permettrait d'apprécier les disparités masquées par les résultats globaux. Toutefois, seul le Luxembourg a été présenté en détail.

Avant de conclure sur ces résultats plusieurs hypothèses et variantes devraient encore être testées : notamment

l'intégration d'un plus grand nombre de facteurs de production tels que les consommations intermédiaires ou plus particulièrement la consommation d'énergie dans le processus de production ainsi que la prise en compte de rendements d'échelle variables plutôt que constants. Cette dernière hypothèse, la plus fréquemment retenue dans le cadre de ce type d'analyses peut paraître quelque peu restrictive. En effet, Griefell-Tatjé et Lovell (1995) montrent qu'un indice Malmquist peut entraîner un biais dans la mesure de la croissance de la productivité si des rendements à l'échelle variables caractérisent en réalité la technologie des DMU analysées. Une contribution future devrait en outre viser à déployer ces mesures dans le cadre d'une comparaison internationale des performances au niveau des secteurs d'activités.

---

<sup>12</sup> En effet, cela est corroboré par exemple par la baisse du contenu en carbone du PIB généralement constatée au cours des 15 dernières années

## 5. Bibliographie

- Ball, E., R. Färe, S. Grosskopf and R. Nehring (2001), "Productivity of the U.S. Agricultural Sector: The Case of Undesirable Outputs", in C.R. Hulten, E.R. Dean and M.J. Harper (eds.), *New Developments in Productivity Analysis*, University of Chicago Press, 541-586.
- Ball, V. E., C. Hallahan, and R. Nehring (2004), "Convergence of Productivity: An Analysis of the Catch-up Hypothesis within a Panel of States", *American Journal of Agricultural Economics* 86: 1315-1321.
- Bricc W., N. Peypoch (2010), "Microéconomie de la production: La mesure de l'efficacité et de la productivité", ed, De Boeck.
- Caves, Douglas W., Laurits R. Christensen, and W. Erwin Diewert (1982), "The Economic Theory of Index Numbers and the Measurement of Input, Output and Productivity", *Econometrica*, Vol. 50, No.6, 1393-1414.
- Chambers, R.G., Y. Chung, R. Färe (1996), "Benefit and Distance Functions", *Journal of Economic Theory*, 70(2), 407-419.
- Chung, Y. H., Fare, R. and Grosskopf, S. (1997), "Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach", *Journal of Environmental Management*, Vol. 51, Issue 3, pp. 229-240.
- Dubrocard A., I.Ferrera-Gomez, C. Peroni (2010), "Productivité et compétitivité au Luxembourg: une comparaison par pays et par branches", PPE n°14, Ed. Ministère de l'Economie et du Commerce extérieur, Direction générale de la compétitivité, de la recherche et de l'innovation, Luxembourg
- Färe, R., Grosskopf, S., (2004), "Modeling undesirable factors in efficiency evaluation: comment". *European Journal of Operational Research* 157, 242-245.
- Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C. A. K. and Yaisawarng, S. (1993), "Derivation of Shadow Prices for Undesirable Outputs: A Distance Function Approach", *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 75, Issue 2, pp. 374-380.
- Färe, R., Grosskopf, S. and Lovell, C. A. K. (1994), "Production Frontiers", Cambridge University Press, London.
- Färe, R., Primont, D., (1995), "Multi-output Production and Duality: Theory and Applications". Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Färe, R., Grosskopf, S., Tyteca, D., (1996), "An activity analysis model of the environmental performance of firms — application to fossil-fuel- fired electric utilities". *Ecological Economics* 18, 161-175.
- Fare, R., Grosskopf, S., Lovell, C. A. K. and Pasurka, C. (1989), "Multilateral Productivity Comparisons when some Outputs are Undesirable: A Non-Parametric Approach", *Review of Economics and Statistics*, Vol. 71, Issue 1, pp. 90-98.
- Färe, R., Grosskopf, S., Hernandez-Sancho, F., (2004), "Environmental performance: an index number approach". *Resource and Energy Economics* 26, 343-352.
- Forstner, H. and A. Isaksson (2002), "Productivity, Technology, and Efficiency: an Analysis of the World Technology Frontier When Memory is Infinite", SIN Working Paper No.7, Vienna: UNIDO.
- Griefell-Tatjé E. et Lovell C.A.K. (1995), "A note on the Malmquist productivity index". *Economic Letters* 47 169-175
- Jorgenson Dale W., and Zwi Griliches (1967), "The Explanation of Productivity Change", *Review of Economic Studies* 34, 349-83.
- Kumar, S.,(2006), "Environmentally sensitive productivity growth: A global analysis using malmquist-luenberger index". *Ecol Econ* 56(2):280-293
- Luenberger, D.G., (1992b), "Benefit Functions and Duality", *Journal of Mathematical Economics*, 21, 461-481.
- Luenberger, D.G., (1995), "Microeconomic Theory", McGraw-Hill, International Edition.
- Luenberger, D.G., (1996), "Welfare From a Benefit Viewpoint", *Economic Theory*, 7, 445-462.
- Malmquist, S. (1953), "Index Numbers and Indifference Surfaces," *Trabajos de Estadística* 4, 209-42.
- Nakano, M., Managi, S. (2008), "Regulatory reforms and productivity: An empirical analysis of the Japanese electricity industry", *Energy Policy*, vol.39, 201-209.
- Pasurka, Carl Jr., (2006), "Decomposing electric power plant emissions within a joint production framework", *Energy Economics*, Elsevier, vol. 28(1), pages 26-43, January.
- Peroni C. (2012). "Environmental efficiency indices: towards a new approach to green-growth accounting", *Institute National de la Statistique et des Etudes Economiques, Luxembourg (STATEC)*.
- Seiford, L.M., Zhu, J., 2002. "Modeling undesirable factors in efficiency evaluation". *European Journal of Operational Research* 142, 16-20.
- Shephard, R. (1953), "Cost and Production Functions", Princeton University Press, Princeton, New Jersey
- Shephard, R.W., (1974), "Indirect production functions". *Mathematical Systems in Economics*, 10. Anton Hain, Meisenheim am Glad.
- Shestalova, V. (2003), "Sequential Malmquist Indices of Productivity Growth: An Application to OECD Industrial Activities", *Journal of Productivity Analysis*, Volume 19, pp. 211-226.
- Tulkens, H. et P.V. Eeckaut (1995), "Non-Parametric Efficiency, Progress and Regress Measure for Panel Data: Methodological Aspects", *European Journal of Operational Research*, Volume 80, pp. 474-499.
- Vallières Simon (2006), "L'évolution de la productivité dans l'industrie Québécoise de la fabrication du papier journal à partir de mesure sensible à la performance environnementale".
- Weber, W.L. et B. Domazlicky (2001), "Productivity Growth and Pollution in State Manufacturing", *The Review of Economics and Statistics*, Volume 83:1, pp. 195-199.

Yörük, B.K. and O. Zaim (2005a) “Productivity growth in OECD countries: A comparison with Malmquist indices” *Journal of Comparative Economics* 33, 401-420.

Yörük, B.K. and O. Zaim (2005b), “International regulations and environmental performance”, Boston College, manuscript.

Zhou, P., Ang, B., and Poh, K. (2008), “Measuring environmental performance under different environmental technologies”. *Energy Economics*, 30:1-14.

Zofio, J. L. and Prieto, A. M. (2001), “Environmental efficiency and regulatory standards: the case of CO2 emissions from OECD industries”, *Resource and Energy Economics*, Vol. 23, pp. 63-83.

## 6. Annexe

### L'indice séquentiel de Malmquist-Luenberger

Quatre fonctions distance sont nécessaires pour mesurer la variation de la PTF pour une DMU<sub>k</sub> (à évaluer) entre les périodes t et t+1, Il faut donc résoudre quatre problèmes différents de programmation linéaire. Deux problèmes utilisent la même période de temps pour les observations et une technologie de production séquentielle ; alors que les deux autres utilise des référence de temps croisées pour les observations et une technologie de production séquentielle :

$$\bar{D}_0^t(x^t, y^t, b^t, g^t), \bar{D}_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, g^{t+1}), \bar{D}_0^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, g^{t+1}), \bar{D}_0^{t+1}(x^t, y^t, b^t, g^t)$$

La première fonction distance directionnelle séquentielle pour la DMU<sub>k</sub> :  $\bar{D}_0^t(x^t, y^t, b^t, g^t)$  peut être calculée en résolvant le problème de programmation linéaire suivant :

$$\begin{aligned} \bar{D}_0^t(x^t, y^t, b^t, g^t) &= \max \beta \\ \text{Sc.} \\ \sum_{\tau=1}^t \sum_{k=1}^K z_k^\tau y_{km}^\tau &\geq (1 + \beta) y_m^t, \quad m = 1, \dots, M \\ \sum_{\tau=1}^t \sum_{k=1}^K z_k^\tau b_{kj}^\tau &= (1 - \beta) b_j^t, \quad j = 1, \dots, J \\ \sum_{\tau=1}^t \sum_{k=1}^K z_k^\tau x_{kn}^\tau &\leq x_n^t, \quad n = 1, \dots, N \\ z_k^\tau &\geq 0, \quad k = 1, \dots, K \end{aligned}$$

La résolution de la deuxième fonction distance directionnelle séquentielle pour la DMU<sub>k</sub>  $\bar{D}_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, g^{t+1})$  est identique à la précédente, à la seule exception que l'exposant t du second membre des différentes contraintes est remplacé par t+1.

Les deux fonctions distance directionnelle utilisées dans la construction de l'indice SML requièrent des périodes de temps croisées. La première, c'est-à-dire  $\bar{D}_0^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, g^{t+1})$  est calculée pour la DMU<sub>k</sub>, en résolvant le problème de programmation linéaire suivant :

$$\begin{aligned} \bar{D}_0^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, g^{t+1}) &= \max \beta \\ \text{Sc.} \\ \sum_{\tau=1}^t \sum_{k=1}^K z_k^\tau y_{km}^\tau &\geq (1 + \beta) y_m^{t+1}, \quad m = 1, \dots, M \\ \sum_{\tau=1}^t \sum_{k=1}^K z_k^\tau b_{kj}^\tau &= (1 - \beta) b_j^{t+1}, \quad j = 1, \dots, J \\ \sum_{\tau=1}^t \sum_{k=1}^K z_k^\tau x_{kn}^\tau &\leq x_n^{t+1}, \quad n = 1, \dots, N \\ z_k^\tau &\geq 0, \quad k = 1, \dots, K \end{aligned}$$

Dans le programme ci-dessus, la technologie de référence qui est évaluée par  $(x_k^{t+1}, y_k^{t+1}, b_k^{t+1}, g_k^{t+1})$  est construite avec toutes les observations de la période 1 à la période t. Le dernier problème de programmation linéaire à résoudre  $\bar{D}_0^{t+1}(x^t, y^t, b^t, g^t)$  est identique au problème ci-dessus en

remplaçant l'exposant du second membre des contraintes t+1 par t.

Les solutions optimales des quatre problèmes de programmation linéaire sont utilisées pour calculer l'indice séquentiel de Malmquist-Luenberger.