



**GREThA**

Groupe de Recherche en  
Économie Théorique et Appliquée

---

**Analyse de décomposition structurelle des émissions  
de gaz à effet de serre :  
application à la région Aquitaine**

*Jean-Christophe MARTIN*

*Stéphane BECUWE*

*GREThA, CNRS, UMR 5113  
Université de Bordeaux*

***Cahiers du GREThA***  
**n° 2011-18**

---

**GREThA UMR CNRS 5113**

Université Montesquieu Bordeaux IV

Avenue Léon Duguit - 33608 PESSAC - FRANCE

Tel : +33 (0)5.56.84.25.75 - Fax : +33 (0)5.56.84.86.47 - [www.gretha.fr](http://www.gretha.fr)

**Analyse de décomposition structurelle des émissions de gaz à effet de serre :  
application à la région Aquitaine**

**Résumé**

*Afin d'atteindre des objectifs de réduction des émissions de GES de plus en plus contraignants, les régions ont été invitées à participer, en concertation avec leur nation, à l'élaboration d'un plan climat, désormais régionalisé. L'efficacité de sa mise en place suppose des études dynamiques, lesquelles nécessitent tout un ensemble de données statistiques. Or, la plupart des pays disposent d'une comptabilité régionale pauvre. C'est notamment le cas de la France. Pour nous permettre de régionaliser le plan climat national, nous avons appliqué au cas de la région Aquitaine, située dans le sud-ouest de la France, la méthode de décomposition structurelle. La comparaison des résultats obtenus, par cette méthode avec ceux fournis par l'INSEE, atteste l'intérêt de cette dernière.*

*Au-delà, l'intérêt de l'analyse de décomposition structurelle se prolonge par la possibilité de réaliser, à partir des résultats obtenus, deux types d'études : L'une rétrospective ; l'autre prospective. L'étude rétrospective a pour but de quantifier l'évolution des émissions de gaz à effet de serre (GES) pour les 47 branches d'activité prises en compte par l'analyse entre 1999 et 2005 et de repérer les principaux facteurs responsables de l'évolution de ces émissions pour la région Aquitaine. S'agissant de l'analyse prospective, à partir de la méthode de Bootstrap, un scénario de base a été construit afin d'estimer les impacts des objectifs du plan climat de la région Aquitaine sur le niveau de ses émissions pour l'année 2013.*

**Mots-clés :** analyse de décomposition structurelle, économie régionale, émissions de gaz à effet de serre, modélisation entrées-sorties

**Structural decomposition analysis of greenhouse gas emissions:  
Application to the Aquitaine region.**

**Abstract**

*In order to reach greenhouse gas (GHG) emissions reduction target becoming more and more restrictive, regions have to be invited to implement, in consultation with their nation, a climate plan, henceforth regionalized. The effectiveness of its implementation requires dynamic studies which necessitates a range of statistical data. However, most countries have a poor regional accounting. This is particularly the case for France. To enable us to regionalize the national climate plan, we applied for the Aquitaine region, situated in southwest of France, the structural decomposition analysis. The results from this analysis compared to data from the national statistical institute (INSEE) shows the interest of this analysis.*

*The interest of structural decomposition analysis is extended by the possibility to carry out, from the obtained results, two types of studies: the first one is retrospective and the other one is prospective. The retrospective study aims to quantify between 1999 and 2005 the evolution of greenhouse gas (GHG) emissions for 47 sectors and to select the main factors responsible of the evolution of these emissions for the Aquitaine region. Regarding the prospective analysis, a baseline scenario was constructed by using the Bootstrap method in order to estimate the impacts of the regional climate plan target on its GHG emissions for the year 2013.*

**Keywords:** structural decomposition analysis, regional economy, greenhouse gas emissions, input-output modeling.

**JEL :** C14, C67, Q4, Q54, R15

**Reference to this paper:** MARTIN Jean-Christophe, BECUWE Stéphane, 2011, "Analyse de décomposition structurelle des émissions de gaz à effet de serre : Application à la région Aquitaine", Working Papers of GREThA, n°2011-18 <http://ideas.repec.org/p/grt/wpegrt/2011-18.html>.

## Introduction

La France a ratifié le protocole de Kyoto dont l'objectif est de stabiliser les émissions de GES pour 2012 comparées à celles de 1990. Ses émissions ont été de 553,9 MtCO<sub>2</sub>eq en 2002. Selon un scénario tendanciel, les émissions de GES en 2012 étaient estimées à 618,9 MtCO<sub>2</sub>eq soit en comparaison avec le niveau de 1990 une augmentation de 9,6%. Pour atteindre l'objectif du protocole, la France a mis en place en 2004 un plan climat, actualisé en 2006, dont l'objectif est d'éviter de 78,3MtCO<sub>2</sub>eq à 80,3 MtCO<sub>2</sub>eq les émissions annuelles jusqu'en 2012. L'ampleur des contraintes de réduction des émissions de GES a donc nécessité la mise en place de plans climats régionaux. L'objectif de celui de la région Aquitaine est d'éviter une émission de 2883 ktCO<sub>2</sub>eq/an pour 2012, soit une contribution d'environ 4 % à l'effort national, presque identique à celle de sa contribution au PIB national qui s'élève à 4,4%.

L'efficacité de la mise en œuvre de ce plan climat impose pour la région Aquitaine de disposer d'études économiques et environnementales dynamiques afin de repérer les principaux facteurs expliquant l'évolution de ses émissions de GES et de connaître l'impact du plan climat sur le niveau de ses émissions grâce à la construction d'un scénario de base. Mais, de telles études dynamiques restent très difficiles à mettre en œuvre au niveau régional en raison d'une comptabilité régionale pauvre. En raison de ces contraintes statistiques, la construction d'un modèle régional s'avère très coûteux voire actuellement impossible (Catin, 1992). L'objectif de ce travail vise à construire un modèle alternatif économique-environnemental dynamique régional pour répondre à la problématique de la mise en place d'un plan climat à l'échelle régionale, lequel prend en compte la pénurie de données statistiques adaptées.

L'analyse entrées-sorties est un modèle pertinent pour des études régionales car il combine la complexité des échanges interindustriels et une étude sectorielle fine (Leontief, 1986). En outre, il tient compte des contraintes statistiques régionales (West, 1995). Des travaux antérieurs menés ont permis de construire un tableau entrées-sorties (TES) en 47 branches pour la région Aquitaine pour l'année 2001 avec un inventaire d'émissions de GES associé (Martin et Point, 2011 ; Martin 2010). Mais, l'analyse entrées-sorties ne repose que sur un modèle statique. Aussi, l'analyse de décomposition structurelle permettra de dépasser cette limite en effectuant des études dynamiques qui intègrent à la fois le changement technologique à travers une modification des coefficients techniques et le changement de la structure productive (Rose et Casler, 1996). D'après Skolka (1989), l'analyse de décomposition structurelle est définie comme « une méthode de distinction de changements majeurs d'une économie par des moyens de changements statiques comparatifs dans les paramètres clés ». L'objectif de cette analyse est donc de sélectionner et de quantifier les principales forces induisant une variation des émissions. Une telle analyse est particulièrement adaptée pour aider à mettre en place une politique environnementale car elle

permet de déconnecter les évolutions des pressions environnementales de celles de la croissance économique (De Haan, 2001). L'intérêt théorique de cette analyse s'est, en outre, significativement développé depuis la fin des années (Rose et Casler, 1996 ; Dietzenbacher et Los, 1998 ; Sun, 1998).

Différentes applications empiriques de cette méthode ont été effectuées notamment sur la production (Fujimagari, 1989 ; Andreosso-O'callaghan et Yue, 2002), et sur l'emploi (Wolff, 1985, Skolka, 1989). Concernant les problématiques environnementales, des travaux ont été réalisés sur l'énergie (Gowdy et Miller, 1987 ; Rose et Chen, 1991 ; Lin et Polenske, 1995 ; Wier, 1998 ; Alcantara et Duarte, 2004) avec une extension sur les émissions de gaz à effet de serre associées aux énergies utilisées (Casler et Rose, 1998 ; Chang et Lin, 1998 ; Wier, 1998 ; Munksgaard et al., 2000 ; Chang et al., 2008). Cependant, ces travaux restent pour l'essentiel focaliser sur une échelle nationale et l'appréhension du niveau régional est quasi inexistante. L'un des objectifs de cet article est de montrer que l'analyse de décomposition structurelle est utile pour effectuer une étude rétrospective des émissions de GES à l'échelle régionale afin de sélectionner les principaux déterminants permettant d'en expliquer l'évolution.

Par ailleurs, nous montrerons que les résultats de l'analyse de décomposition structurelle peuvent aussi servir de base à des études de prospection.

Pour résumer, l'analyse de décomposition structurelle est une alternative pragmatique efficace aux estimations économétriques qui peut être utilisée malgré un nombre restreint d'observations (Rose et Casler (1996). Suivant cette position, Hoekstra et Van den Bergh (2006) ont effectué des prévisions et ont construit des scénarios jusqu'en 2030 pour la production de l'acier et du plastique en utilisant seulement les TES de 1990 et de 1997. L'utilisation de l'analyse de décomposition structurelle pour mener des études prospectives sont cependant très rares. L'autre objectif de ce travail est de montrer l'intérêt de cette méthode pour construire un scénario de base susceptible de proposer des prévisions relatives aux questions environnementales.

L'article est structuré comme suit. La première section est consacrée à la présentation de la méthode de régionalisation des résultats nationaux provenant de l'analyse de décomposition structurelle afin d'estimer l'évolution des émissions de GES pour la région Aquitaine. La deuxième section présentera les principales applications de cette méthode pour des études environnementales. Dans un premier temps, une étude rétrospective estime l'évolution des émissions par branche de la région Aquitaine entre 1999 et 2005 et repère les principaux facteurs responsables de cette évolution. Les résultats serviront, dans un second temps, à réaliser une étude prospective afin d'estimer l'impact du plan climat régional sur les émissions de GES de la région Aquitaine à partir de la construction d'un scénario de base.

# 1. Construction d'une méthode de régionalisation des résultats nationaux provenant de l'analyse de décomposition structurelle pour les émissions de GES

L'analyse de décomposition structurelle pour la France a d'abord été appliquée pour la France au cours de la période 1999-2005. Par la suite, nous présentons la méthode de régionalisation des résultats obtenus au niveau national qui serviront à estimer l'évolution de la production et des émissions de GES durant cette période pour la région Aquitaine.

## 1.1. Application de l'analyse de décomposition structurelle pour la France

L'Institut national de statistiques (INSEE) publie des TES nationaux « Branches x Produits » en 114 branches de 1999 à 2005 selon la base 2000<sup>1</sup>. Pour rendre ces TES opérationnels en vue de réaliser une analyse entrées-sorties, il a fallu d'abord les transposer en des TES symétriques (Martin (2010) et Martin et Point (2011)). Afin de comparer les valeurs de ces TES à des dates différentes, il est nécessaire de les déflater afin de ne capter que les effets volume.

La construction de ces données va permettre d'appliquer la méthode de décomposition structurelle pour la France dont nous présentons brièvement les calculs liminaires. Le point de départ est le modèle de Leontief qui explique la production à la période  $t$  selon les différentes composantes de la demande finale :

$$P = B.(CFM + CFA + CFI + FBC + X - M) = B.Y \quad (1)$$

Où :

P - vecteur de production d'ordre  $n$

B – matrice inverse de Leontief d'ordre  $(n \times n)$

CFM – vecteur de la consommation finale des ménages d'ordre  $n$

CFA – vecteur de la consommation finale de l'administration d'ordre  $n$

CFI – vecteur de la consommation finale des institutions sans but lucratif au service des ménages d'ordre  $n$

FBC – vecteur de la formation brute de capital d'ordre  $n$

X – vecteur des exportations d'ordre  $n$

M – vecteur des importations d'ordre  $n$ .

Y – vecteur de la demande finale d'ordre  $n$  composée de la somme de la consommation finale, de la formation brute de capital, des exportations diminuées des importations.

$n$  représente le nombre de branches. L'analyse de décomposition structurelle vise à expliquer la variation de la production en étudiant la contribution des différentes composantes de la

<sup>1</sup> Avant 1999, les TES, exprimés selon la base 1995, ne sont pas comparables.

demande finale et en incluant le changement technique. En dynamisant l'équation (1), nous obtenons la variation de la production en fonction de ses différentes composantes :

$$\Delta P = \Delta B \cdot Y + B \cdot \Delta CFM + B \cdot \Delta CFA + B \cdot \Delta CFI + B \cdot \Delta FBC + B \cdot \Delta X - B \cdot \Delta M \quad (2)$$

Cependant, l'application de l'équation (2) pose le problème de solution non unique expliqué par Dietzenbacher et Los (1998). Dans notre cas, le produit de deux variables implique l'existence de deux décompositions polaires. Dietzenbacher et Los (1998) recommandent d'effectuer la moyenne de ces deux décompositions polaires car cette méthode présente un certain nombre d'avantages : D'une part, le résultat de cette décomposition est exact et, d'autre part, il n'existe aucune raison théorique de préférer une décomposition polaire par rapport à l'autre.

La variation de la production entre la période  $t-1$  et  $t$  provenant du changement technique ( $\Delta P_B^{FR}$ ) et des composantes  $k$  de la demande finale ( $\Delta P_k^{FR}$ ) est calculée par les équations suivantes :

$$\Delta P_B^{FR} = \frac{1}{2} (Y_{t-1} + Y_t) \Delta B \quad (3)$$

$$\Delta P_k^{FR} = \frac{1}{2} (B_{t-1} + B_t) \Delta k \quad (4)$$

Avec  $k = CFM, CFA, CFI, FBC, X, M$

La somme des variations des différentes composantes de la production permet de vérifier la variation totale de la production de chaque branche. L'application des équations (3) et (4) a permis d'expliquer la variation de la production selon ses différentes composantes pour la France. Ensuite, ces résultats nationaux ont été régionalisés.

## **1.2. Régionalisation des résultats nationaux provenant de l'analyse de décomposition structurelle**

La construction de la méthode de régionalisation des résultats nationaux provenant de l'analyse de décomposition structurelle doit au préalable répondre à une exigence de cohérence : Il faut que la somme des variations de la production des différentes régions soit égale à la variation de la production nationale. Cependant, une des limites qu'il conviendra de surmonter relève du fait que le TES national n'intègre pas explicitement le commerce interrégional. Nous nous attachons d'abord à régionaliser des résultats nationaux provenant de l'analyse de décomposition structurelle puis nous estimerons l'évolution du commerce interrégional.

### **a) Régionalisation des résultats nationaux hors commerce interrégional**

Pour estimer la variation de la production régionale provenant de la composante  $k$  de la demande finale, nous retenons trois indicateurs :

- La variation de la production nationale provenant de la composante  $k$ , calculée lors de l'analyse de décomposition structurelle effectuée à partir des TES nationaux, de chaque branche  $i$  ( $\Delta P_{i,k}^{FR}$ ).

- L'indicateur de régionalisation ( $\alpha$ ) : La variation nationale calculée ci-dessus sera ensuite régionalisée à partir de la part de la production régionale dans la production nationale provenant de la composante  $k$  de chaque branche  $i$ . Cette part ( $\alpha_i$ ) est estimée en effectuant le ratio entre les productions régionale et nationale qui sont

$$\frac{\sum_{j=1}^n B_j^{AQUI} \cdot k^{AQUI}}{\sum_{j=1}^n B_j^{FR} \cdot k^{FR}}$$

expliquées directement et indirectement par la demande finale  $k$  où l'exposant indique l'origine géographique ( $FR$  pour la nation France et  $AQUI$  pour la région Aquitaine).

- L'indicateur de dynamisation ( $\beta$ ) : La contribution régionale dans la variation de la production nationale provenant de cette composante  $k$  sera dynamisée à partir de certains indicateurs synthétiques : Le produit intérieur brut (PIB) pour le changement technique et la formation brute de capital ; le revenu disponible brut (RDB) pour la consommation finale ; les exportations et les importations de la région avec le reste du monde pour la production provenant respectivement des exportations et des importations provenant du reste du monde.

En multipliant ces trois multiplicateurs, il est donc possible de calculer la variation de la production régionale provenant de la composante  $k$  de la production de chaque branche  $i$  qui est résumée par l'équation suivante :

$$\Delta P_{i,k}^{AQUI} = \Delta P_{i,k}^{FR} \cdot \alpha_{i,k} \cdot \beta \tag{5}$$

Les TES étant statiques, ils ne peuvent pas incorporer le changement technique. Il est donc impossible de calculer la part provenant de la variation de la production régionale dans la variation de la production nationale selon la méthode utilisée ci-dessus. Comme substitut de l'indicateur de régionalisation, nous utilisons la part de l'offre régionale sur l'offre nationale. Concernant l'indicateur de dynamisation, nous avons retenu le PIB. Si le PIB augmente d'une manière relativement plus importante dans la région que dans la nation, on devrait s'attendre à une augmentation de la contribution de la région dans la variation de la production nationale provenant du changement technique.

Le tableau 1 résume les calculs de la variation de la production régionale provenant de ses différentes composantes.



**Tableau 1 : Calcul de la variation de la production régionale provenant de ses différentes composantes**

Les composantes de la production	Indicateur de régionalisation ( $\alpha_{t,k}$ )	Indicateur de dynamisation ( $\beta$ )	Estimation de la variation de la production régionale selon ses différentes composantes ( $\Delta P_{t,k}^{AQUI} = \Delta P_{t,k}^{PFR} \cdot \alpha_{t,k} \cdot \beta$ )
Changement technique (B)	$\frac{P_{t,2001}^{AQUI} + M_{t,2001}^{AQUI}}{P_{t,2001}^{PFR} + M_{t,2001}^{PFR}}$	$\frac{PIB_t^{AQUI} / PIB_{t-1}^{AQUI}}{PIB_t^{PFR} / PIB_{t-1}^{PFR}}$	$\Delta PIB_{B,t}^{AQUI} = \left( \Delta P_{B,t}^{PFR} \cdot \frac{P_{t,2001}^{AQUI} + M_{t,2001}^{AQUI}}{P_{t,2001}^{PFR} + M_{t,2001}^{PFR}} \right) \frac{PIB_t^{AQUI} / PIB_{t-1}^{AQUI}}{PIB_t^{PFR} / PIB_{t-1}^{PFR}}$
Consommation finale (CF)	$\frac{P_{CF,t,2001}^{AQUI}}{P_{CF,t,2001}^{PFR}}$	$\frac{RDB_t^{AQUI} / RDB_{t-1}^{AQUI}}{RDB_t^{PFR} / RDB_{t-1}^{PFR}}$	$\Delta PIB_{CF,t}^{AQUI} = \left( \Delta P_{CF,t}^{PFR} \cdot \frac{P_{CF,t,2001}^{AQUI}}{P_{CF,t,2001}^{PFR}} \right) \frac{RDB_t^{AQUI} / RDB_{t-1}^{AQUI}}{RDB_t^{PFR} / RDB_{t-1}^{PFR}}$
Formation brute de capital (FBC)	$\frac{P_{FBC,t,2001}^{AQUI}}{P_{FBC,t,2001}^{PFR}}$	$\frac{PIB_t^{AQUI} / PIB_{t-1}^{AQUI}}{PIB_t^{PFR} / PIB_{t-1}^{PFR}}$	$\Delta PIB_{FBC,t}^{AQUI} = \left( \Delta P_{FBC,t}^{PFR} \cdot \frac{P_{FBC,t,2001}^{AQUI}}{P_{FBC,t,2001}^{PFR}} \right) \frac{PIB_t^{AQUI} / PIB_{t-1}^{AQUI}}{PIB_t^{PFR} / PIB_{t-1}^{PFR}}$
Exportation avec les pays étrangers (X)	$\frac{P_{X,t,2001}^{AQUI}}{P_{X,t,2001}^{PFR}}$	$\frac{X_t^{AQUI} / X_{t-1}^{AQUI}}{X_t^{PFR} / X_{t-1}^{PFR}}$	$\Delta PIB_{X,t}^{AQUI} = \left( \Delta P_{X,t}^{PFR} \cdot \frac{P_{X,t,2001}^{AQUI}}{P_{X,t,2001}^{PFR}} \right) \frac{X_t^{AQUI} / X_{t-1}^{AQUI}}{X_t^{PFR} / X_{t-1}^{PFR}}$
Importation provenant des pays étrangers (M)	$\frac{P_{M,t,2001}^{AQUI}}{P_{M,t,2001}^{PFR}}$	$\frac{M_t^{AQUI} / M_{t-1}^{AQUI}}{M_t^{PFR} / M_{t-1}^{PFR}}$	$\Delta PIB_{M,t}^{AQUI} = \left( \Delta P_{M,t}^{PFR} \cdot \frac{P_{M,t,2001}^{AQUI}}{P_{M,t,2001}^{PFR}} \right) \frac{M_t^{AQUI} / M_{t-1}^{AQUI}}{M_t^{PFR} / M_{t-1}^{PFR}}$

Les indicateurs de dynamisation méritent davantage d'explication. Pour la consommation finale, nous avons retenu l'indicateur de revenu disponible brut (RDB). En effet, selon Keynes (1936), la propension marginale à consommer est positive avec une stabilité de la propension moyenne à consommer. Une augmentation du revenu disponible brut plus élevée dans la région Aquitaine relativement aux autres régions françaises devrait impliquer une augmentation de la contribution de la région de la production provenant de la consommation finale.

Pour la variation de la production émanant de la FBC, nous avons pris l'indicateur du PIB. En effet, une augmentation de la production devrait provoquer une augmentation du stock de capital afin d'accroître les capacités productives. Par exemple, si la variation du PIB a été plus importante au niveau régional qu'au niveau national, on devrait s'attendre à une augmentation plus importante de la production provenant de la FBC dans la région que dans la nation.

Concernant les exportations et les importations provenant du reste du monde, l'INSEE à travers les statistiques douanières publie le montant total des exportations et des importations de la région Aquitaine vis-à-vis des pays étrangers (reste du monde).

Si l'augmentation des exportations était plus importante au niveau régional qu'au niveau national alors la contribution de la production provenant des exportations au niveau régional serait plus importante. A contrario, si l'augmentation des importations est plus importante au



niveau régional qu'au niveau national, alors la variation de la production régionale devrait être plus faible.

De la sorte, les différentes composantes de la production nationale ont été régionalisées. Il reste à résoudre le problème du commerce interrégional.

### **b) Estimation de la variation de la production provenant du commerce interrégional**

Une des difficultés majeures de la modélisation régionale est l'absence de statistiques concernant les échanges de biens et services interrégionaux. Par conséquent, ces échanges ne peuvent s'estimer qu'à partir de certaines hypothèses.

Deux étapes permettent d'évaluer les échanges interrégionaux. La première étape vise à prendre en considération les spécificités sectorielles en supposant que la variation de la production provenant des exportations et des importations de la région avec les autres régions françaises est identique à la variation de la production provenant de la demande finale de produits domestiques pour chaque branche. La deuxième étape cherche à incorporer les spécificités régionales en pondérant l'évolution de la production provenant des exportations et des importations de la région avec les autres régions françaises à partir respectivement de l'évolution du PIB des autres régions françaises et de l'évolution du PIB de la région Aquitaine. Le détail des calculs de l'évolution du commerce interrégional de la région Aquitaine se présente comme suit :

- La première étape consiste à supposer que, pour chaque année  $t$  et chaque branche  $i$ , la

variation relative de la production de la région provenant des exportations  $\left( \frac{\Delta p_{X,i,t}^{AQUILR}}{p_{X,i,t}^{AQUILR}} \right)$

et des importations  $\left( \frac{\Delta p_{M,i,t}^{AQUILR}}{p_{M,i,t}^{AQUILR}} \right)$  est égale à la variation relative de la production

nationale provenant de la demande finale  $\left( \frac{\Delta p_{Y,i,t}^{AQUILR}}{p_{Y,i,t}^{AQUILR}} \right)$ .

En effet, dans le cadre du modèle de Leontief, la demande finale est le moteur du commerce interrégional : Une augmentation de la demande finale domestique des différentes régions devrait engendrer une augmentation du commerce interrégional.

Ainsi, nous supposons dans la première étape que :

$$\frac{\Delta p_{X,i,t}^{AQUILR}}{p_{X,i,t}^{AQUILR}} = \frac{\Delta p_{M,i,t}^{AQUILR}}{p_{M,i,t}^{AQUILR}} = \frac{\Delta p_{Y,i,t}^{AQUILR}}{p_{Y,i,t}^{AQUILR}} \quad (6)$$

Cette hypothèse implique que le ratio entre les exportations et les importations provenant des échanges interrégionaux restent identiques pour chaque branche. Cette première étape permet de différencier la variation de la production provenant du commerce interrégional entre les différentes branches  $i$ . Par conséquent, l'hypothèse de variation relative identique pour chaque branche des importations et des exportations entre les différentes régions françaises sera relâchée dans la deuxième étape.

- La deuxième étape consiste à prendre en considération les spécificités régionales concernant les variations relatives des importations et des exportations de chaque

branche  $i$  et pour chaque année  $t$ . A l'échelle macro-économique, il n'est pas possible de connaître la demande finale de chaque région. Cependant, le PIB est défini, selon l'optique de la demande, comme la somme des composantes de la demande finale. Donc, l'évolution du PIB est bon indicateur alternatif de l'évolution de la demande finale (importations incluses).

Par conséquent, pour estimer la variation relative de la production provenant des exportations pour la branche  $i$  et l'année  $t$ , nous pondérons la variation relative de la production nationale issue de la demande finale domestique par la variation du PIB des autres régions françaises. La variation relative de la production provenant des exportations vers les autres régions françaises est calculée de la manière suivante :

$$\frac{\Delta P_{N,t}^{AQU,I,R}}{P_{N,t}^{AQU,I,R}} = \frac{PIB_t^R / PIB_{t-1}^R}{PIB_t^{FR} / PIB_{t-1}^{FR}} \cdot \frac{\Delta P_{Y,t}^{FR}}{P_{Y,t}^{FR}} \quad (7)$$

Le même raisonnement est utilisé pour expliquer la variation relative de la production provenant des importations des autres régions françaises. Nous pondérons la variation de la production nationale provenant de la demande finale domestique pour chaque branche  $i$  et chaque année  $t$  par la variation du PIB de la région Aquitaine relativement à la variation du PIB de la nation. La variation relative de la production provenant des importations originaires des autres régions françaises est calculée comme suit :

$$\frac{\Delta P_{N,t}^{AQU,I,R}}{P_{N,t}^{AQU,I,R}} = \frac{PIB_t^{AQUI} / PIB_{t-1}^{AQUI}}{PIB_t^{FR} / PIB_{t-1}^{FR}} \cdot \frac{\Delta P_{Y,t}^{FR}}{P_{Y,t}^{FR}} \quad (8)$$

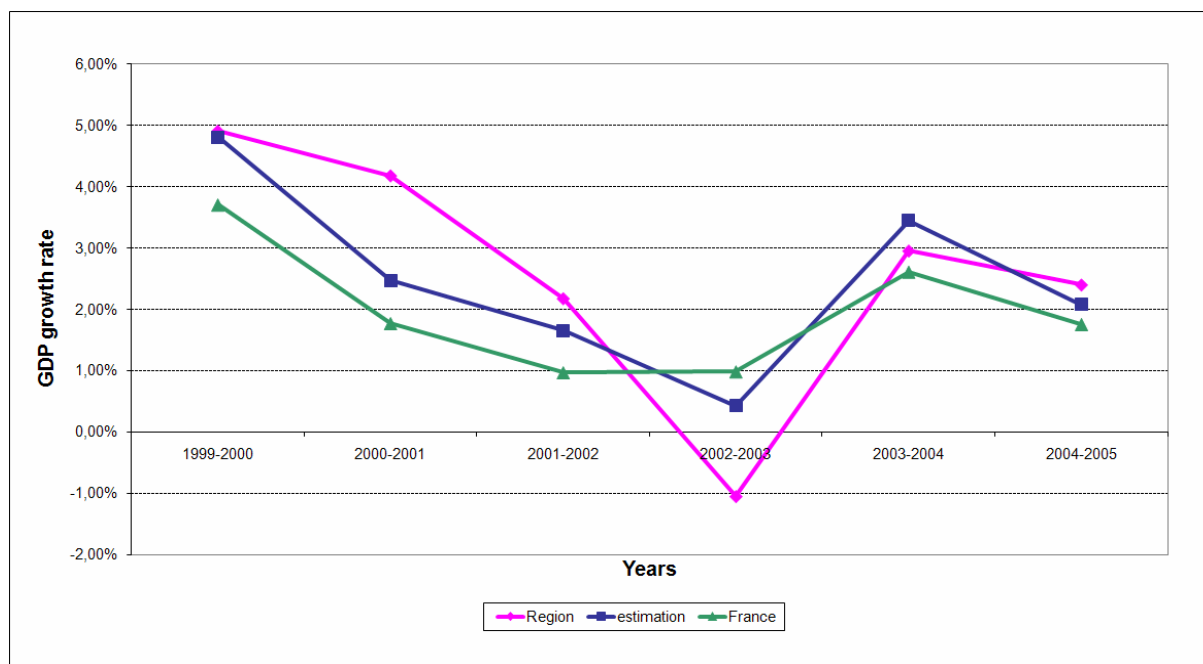
L'estimation de l'évolution de chaque composante de la production régionale entre 1999 et 2005 est donc réalisée. La variation de la production totale est mesurée en effectuant la somme de la variation de ses différentes composantes :

$$\Delta P_{t,t}^{AQU,I} = \Delta P_{B,t,t}^{AQU,I} + \Delta P_{CF,t,t}^{AQU,I} + \Delta P_{FBC,t,t}^{AQU,I} + \Delta P_{X,t,t}^{AQU,I,RdM} + \Delta P_{X,t,t}^{AQU,I,R} + \Delta P_{M,t,t}^{AQU,I,RdM} + \Delta P_{M,t,t}^{AQU,I,R} \quad (9)$$

Pour calculer la variation de la valeur ajoutée des branches, nous supposons que la valeur ajoutée par unité produite, qui est un indicateur d'efficacité énergétique, est identique à l'intérieur de la nation. Cette hypothèse est compatible avec celle de technologie identique des branches dans la construction d'un TES régional par la méthode top-down (Martin, 2010 ; Martin et Point, 2011). En négligeant les taxes et les impôts nets de subventions, la somme de la variation de la valeur ajoutée des branches indique la variation du PIB et par là même, le taux de croissance économique de la région Aquitaine.

L'institut national de statistiques (INSEE) a estimé pour les régions françaises la somme de leur valeur ajoutée, il a ainsi été possible de comparer nos estimations avec les données de l'INSEE concernant le taux de croissance économique. Le graphique 1 compare le taux de croissance économique régional que nous avons estimé avec les taux de croissance économique de la France et de la région Aquitaine fournis par l'INSEE.

**Graphique 1 : comparaisons des taux de croissance estimés pour la région Aquitaine avec les taux de croissance publiés par l'INSEE pour la région et la France**



Les résultats montrent que les taux de croissance estimés sont toujours compris entre les taux de croissance nationaux et régionaux publiés par l'INSEE avec cependant une exception pour 2003-2004. Ainsi, la régionalisation des résultats nationaux, en utilisant l'analyse de décomposition structurelle, a permis de prendre en considération quelques spécificités régionales. Mais elles ne sont pas encore suffisantes pour les expliquer entièrement. Ces erreurs peuvent provenir principalement de l'hypothèse d'identité des techniques de production des branches entre la région et la nation.

Le calcul de la variation de la production va permettre d'évaluer la variation des émissions de GES de la région Aquitaine en intégrant l'intensité énergétique et les coefficients d'émissions de GES.

### **1.3. Estimation de l'évolution des émissions de GES de la région Aquitaine**

Les émissions de GES proviennent en grande partie de la consommation des combustibles fossiles effectuée par les ménages et les entreprises et le reste par des procédés de production (Proops et al., 1993). Intéressons nous d'abord aux émissions de GES provenant de la consommation des combustibles fossiles. Dans notre analyse, il est important de distinguer l'origine de la consommation de ces combustibles entre les entreprises et les ménages.

#### **a) Les émissions de GES provenant des combustibles fossiles**

Concernant l'estimation de la variation de la consommation énergétique, il est important de trouver un indicateur de l'évolution de l'intensité énergétique des branches. Les coefficients techniques ( $a_{ij}$ ) sont un bon indicateur pour calculer l'intensité énergétique car

ils indiquent la consommation nécessaire de chaque produit énergétique  $i$  exprimée en unité monétaire pour produire une unité monétaire de la branche  $j$ . Pour le calcul de l'intensité énergétique de la branche, il suffit de traduire les données monétaires en données physiques pour la consommation des combustibles.

A partir du TES national en valeur de la date  $t$  et du TES national en volume de la date  $t+1$  exprimée selon le niveau des prix de l'année  $t$  (les prix sont fixes), nous avons pu calculer l'évolution de l'intensité énergétique de chaque produit énergétique  $i$  et pour chaque branche  $j$  pour la France comme indiqué par l'équation ci-dessous :

$$\Delta \alpha_{ij,t}^{FR} = \alpha_{ij,t+1}^{FR} - \alpha_{ij,t}^{FR}, \text{ pour tout combustible } i \quad (10)$$

Du fait que nous n'avons aucune information statistique sur l'évolution de l'intensité énergétique de la région Aquitaine à ce niveau d'agrégation et que, de plus, nous avons supposé que la technologie des branches était stable entre la nation et la région, nous supposons que l'intensité énergétique évolue de la même manière entre la France et la région. Ainsi, nous supposons que la variation des coefficients techniques est identique entre la nation et la région. A partir du TES 2001, il est possible de connaître le montant des coefficients techniques des différentes branches pour les produits énergétiques

Grâce à ces informations, nous pouvons déterminer le montant des consommations du combustible fossile  $i$  de la branche  $j$  exprimé en unité monétaire. Il suffit de multiplier les coefficients techniques régionaux avec la production de la branche  $j$ , comme indiqué ci-dessous :

$$C_{ij}^{AQU} = \alpha_{ij}^{AQU} P_j^{AQU} \quad (11)$$

Il faut ensuite établir l'inverse des prix fictifs pour convertir ces données monétaires de consommations énergétiques (exprimées en Euros) en données physiques (exprimées en tonne équivalent pétrole ou tep). Ces prix inverses ont été calculés, en Aquitaine, à partir des données du TES régional de 2001. Comme nous excluons les variations de prix dans notre modèle, les prix fictifs sont supposés fixes. Les consommations énergétiques du combustible  $i$  exprimées en unité physique ont été calculées en multipliant les consommations énergétiques exprimées en unité monétaire par l'inverse des prix. Nous avons donc une estimation des consommations énergétiques exprimées en ktep de la région Aquitaine de 1999 à 2005.

Concernant les consommations énergétiques provenant des ménages, nous supposons que l'évolution régionale de la consommation finale des ménages des combustibles fossiles suit l'évolution nationale. L'INSEE indique, dans une nomenclature très désagrégée des produits, l'évolution en volume de la consommation finale des ménages. A partir du TES de 2001 et de cette hypothèse, nous estimons la demande finale domestique des combustibles fossiles exprimée en unité monétaire. Ces données monétaires ont été converties en unités physiques en multipliant par l'inverse des prix. Les résultats donnent la consommation énergétique de 1999 à 2005 des ménages aquitains pour chaque type de produits de combustible fossile  $i$ .

Pour connaître les émissions de GES provenant des combustibles fossiles de la région, il suffit de multiplier les consommations énergétiques par les coefficients d'émissions comme indiqué dans l'équation ci-dessous :

$$E_{i,t}^C = \sum_f e_f \cdot C_{i,f,t} \quad (12)$$

Où  $E_{i,t}^C$  représente les émissions provenant de la combustion des énergies fossiles de la branche  $i$  pour l'année  $t$ ,  $e_f$  le coefficient d'émissions de GES du combustible  $f$  et  $C_{i,f,t}$  la consommation du combustible fossile  $f$  de la branche  $i$  à la date  $t$ . Les coefficients d'émissions de GES sont estimés par le Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique (CITEPA), organe officiel français auprès de l'ONU chargé de l'élaboration d'inventaires d'émissions de GES. Nous indiquons tour à tour les différents coefficients d'émissions de GES utilisés. Le tableau 2 indique le coefficient d'émissions de CO<sub>2</sub>.

**Tableau 2 : coefficients d'émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) provenant des combustibles fossiles (tCO<sub>2</sub>/tep)**

combustibles solides		combustibles liquides		combustibles gazeux	
Charbon	3,990	Pétrole brut	3,066	gaz naturel	2,394
Lignite	4,200	Fioul lourd	3,276	GPL	2,688
coke de houille	4,494	Fioul domestique	3,150	gaz haut fourneau	11,256
coke de lignite	4,536	Gazole	3,150		
coke de pétrole	3,990	Kérosène	3,108		
Tourbe	4,620	Essence auto	3,066		
		Essence aviation	3,066		
		Liqueur noire	4,410		

Les émissions de méthane (CH<sub>4</sub>) issues des combustibles fossiles sont provoquées essentiellement par une combustion incomplète des énergies fossiles. Le montant des émissions dépend des conditions d'exploitation, du type d'équipement thermique, du type de combustible et des dispositifs d'épuration. Ainsi, il n'existe pas de coefficients d'émissions stables comme pour les coefficients d'émissions de CO<sub>2</sub>. Le CITEPA a estimé les coefficients nationaux d'émissions compte tenu des conditions d'exploitation et du type d'équipements de chaque branche. Nous allons retenir les coefficients nationaux d'émissions en supposant que les caractéristiques régionales sont identiques aux caractéristiques nationales.

Concernant les émissions de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), le CITEPA retient un coefficient d'émissions fixe quels que soient les combustibles. Il est de 2,5 kg/GJ, soit 0,105 kgN<sub>2</sub>O/tep. Quelques exceptions existent pour certains combustibles. Ces coefficients d'émissions peuvent être visualisés dans le Tableau 3.

**Tableau 3 : coefficients d'émissions du protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) provenant des combustibles fossiles (kgN<sub>2</sub>O/tep)**

combustibles solides		combustibles liquides		combustibles gazeux	
Lignite	0,126	Fioul lourd	0,074	gaz haut fourneau	0,735
Bois	0,168	Fioul domestique	0,063		

Nous venons d'exposer la méthodologie d'estimation des émissions de GES provenant de la consommation des combustibles fossiles, nous nous focalisons maintenant sur la méthodologie d'estimation des émissions de GES provenant des procédés de production.

### b) Les émissions de GES provenant des procédés de production

Les émissions de GES provenant des procédés de production sont directement reliées à la production grâce au vecteur  $m$  qui indique le montant des émissions suite à la production d'une unité monétaire. Les coefficients d'émissions  $m$  peuvent varier dans le temps pour deux principales raisons :

- La part du produit provoquant des émissions de GES à l'intérieur d'une branche peut se modifier (condition d'homogénéité des produits relaxée)
- L'innovation technologique peut se traduire par une réduction des émissions de GES pour un même niveau de production.

Les inventaires d'émissions de GES n'étant pas construits annuellement à l'échelle régionale, nous utilisons les données nationales en supposant que la variation des coefficients d'émissions est identique entre la nation et la région.

Nous utilisons au niveau national les données provenant de l'UNFCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) lesquelles sont publiées annuellement et ventilées par branche et par source. Seules les émissions de GES ne provenant pas des combustibles fossiles ont été retenues et un travail de correspondance des nomenclatures a été effectué afin de relier convenablement les données de la production et les émissions de GES.

Nous avons pu calculer les coefficients d'émissions de GES en divisant le montant des émissions de GES par branche pour l'année  $t$  et  $t+1$  avec respectivement la production provenant du TES en valeur pour l'année  $t$  et le TES en volume pour l'année  $t+1$ . Durant ces deux années  $t$  et  $t+1$ , nous avons calculé le taux de variation relative des coefficients d'émissions de GES entre 1999 et 2005 pour la branche  $i$  ( $\dot{m}_{i,t}^{FR}$ ). Nous supposons que l'évolution relative des coefficients d'émissions de GES est identique entre la région et la nation. Cette hypothèse permet d'estimer le montant régional des coefficients d'émissions de GES  $m$  pour la période 1999-2005, comme indiqué dans l'équation ci-dessous, du fait que nous le connaissons pour 2001 :

$$m_{i,t}^{AQUI} = m_{i,t-1}^{AQUI} (1 + \dot{m}_{i,t}^{FR}) \quad (13)$$

En effectuant le produit des coefficients d'émissions de GES par la production, nous obtenons le montant d'émissions de GES par branche issues des processus de production.

$$E_{i,t}^P = m_{i,t}^{AQUI} P_{i,t}^{AQUI} \quad (14)$$

La connaissance des émissions de GES provenant des combustibles fossiles et des procédés de production rend possible le calcul des émissions totales de GES de la région Aquitaine.

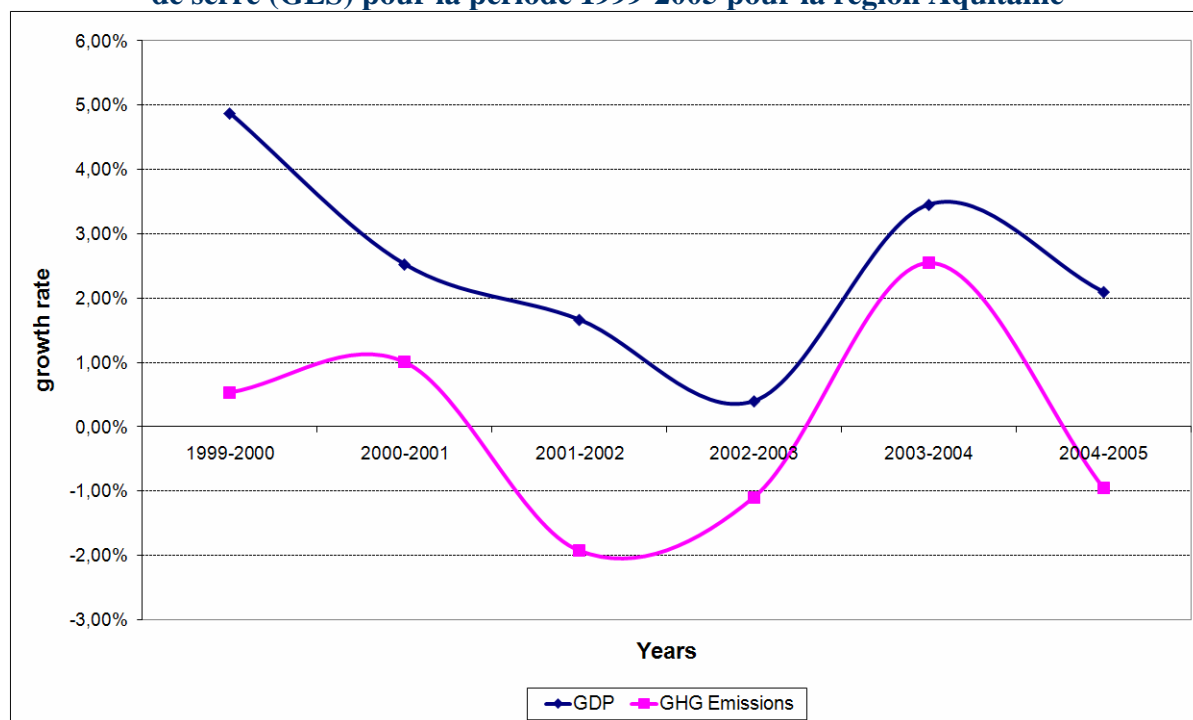
### c) Les émissions de GES totales de la région Aquitaine

Les émissions totales de GES pour chaque année  $t$  et chaque branche  $i$  ( $E_{i,t}^{AQU}$ ) sont calculées en sommant les émissions de GES provenant de la combustion des énergies fossiles ( $E_{i,t}^C$ ) et les émissions de GES issues du processus de production ( $E_{i,t}^P$ ) comme l'indique l'équation ci-après :

$$E_{i,t}^{AQU} = E_{i,t}^C + E_{i,t}^P \quad (15)$$

Ces données permettent de connaître l'évolution des émissions de GES de la région Aquitaine. Le Graphique 2 visualise le taux de croissance estimé des émissions de GES de la région Aquitaine en le comparant avec le taux de croissance estimé du PIB régional.

**Graphique 2 : comparaison des taux de croissance du PIB et des émissions de gaz à effet de serre (GES) pour la période 1999-2005 pour la région Aquitaine**



Au cours de la période 1999-2005, le taux de croissance annuel moyen des émissions de GES a été nul, mais celui-ci masque des disparités relativement importantes durant ces années. En effet, les émissions de GES se sont relativement accrues entre 2003 et 2004, le taux de croissance est supérieur à 2%, tandis qu'elles se sont contractées durant les périodes 2001-2003 et 2004-2005. En outre, l'évolution du taux de croissance des émissions de GES suit globalement l'évolution du PIB excepté pour 1999-2000 et 2002-2003. Notons que le taux de croissance des émissions de GES est toujours inférieur au taux de croissance de la production ce qui signifie, d'un point de vue macro-économique, que la production implique une émission moindre de GES grâce à l'amélioration de l'intensité énergétique et des procédés de production.



Après avoir exposé la méthode de régionalisation des résultats nationaux provenant de l'analyse de décomposition structurelle, nous mettons en lumière à travers quelques utilisations l'intérêt de cette méthode.

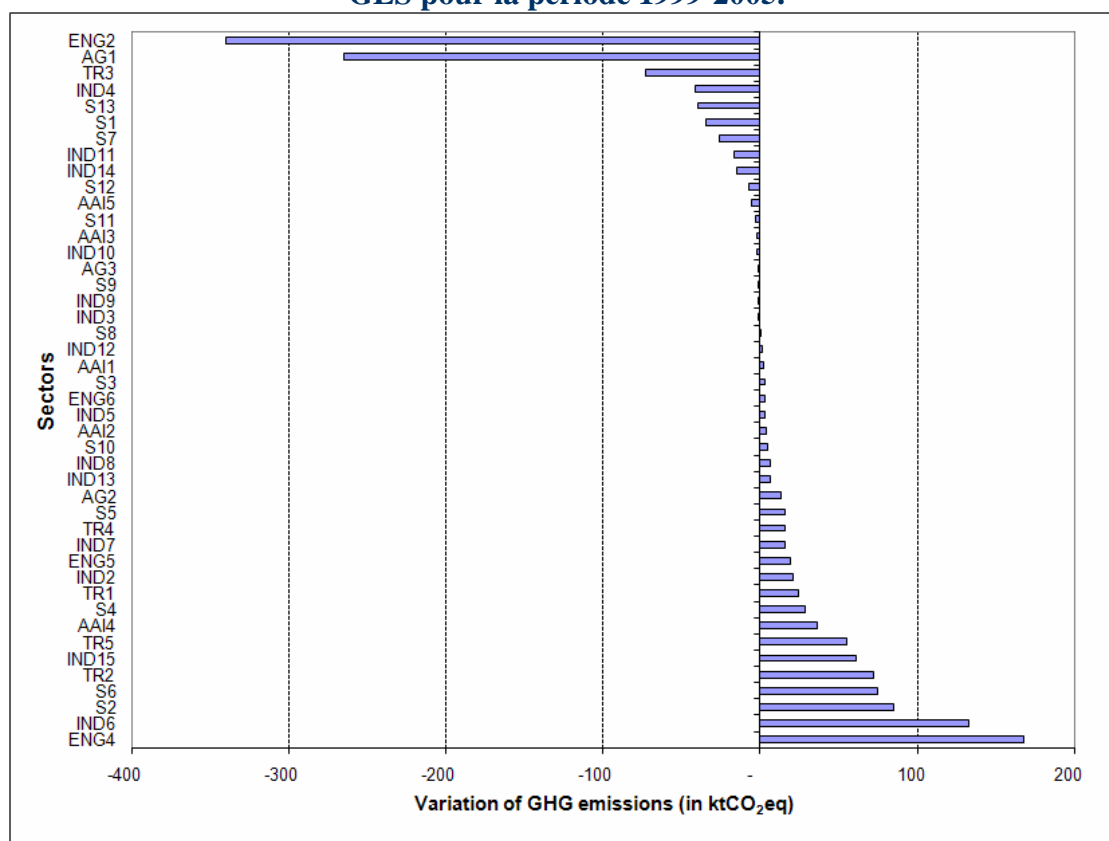
## 2. Applications de l'analyse de décomposition structurelle : Etudes rétrospective et prospective

L'application de l'analyse de décomposition structurelle permet des études à la fois rétrospectives et prospectives. Elle permet de repérer les principaux facteurs expliquant l'évolution des émissions de GES de la région Aquitaine pour la période 1999-2005. Ces résultats serviront ensuite à la construction d'un scénario de base jusqu'en 2013 pour étudier l'impact du plan climat sur le niveau des émissions de GES de la région.

### 2.1. Explication de la variation des émissions de GES de la région Aquitaine selon ses différentes contributions.

Les résultats de l'analyse de décomposition, figurant dans le graphique 3, indiquent pour la région Aquitaine la variation absolue des émissions totales de GES pour 47 branches pour la période 1999-2005. La nomenclature utilisée dans cette étude est visualisable à l'annexe.

**Graphique 3 : Contribution des différentes branches aux réductions des émissions de GES pour la période 1999-2005.**



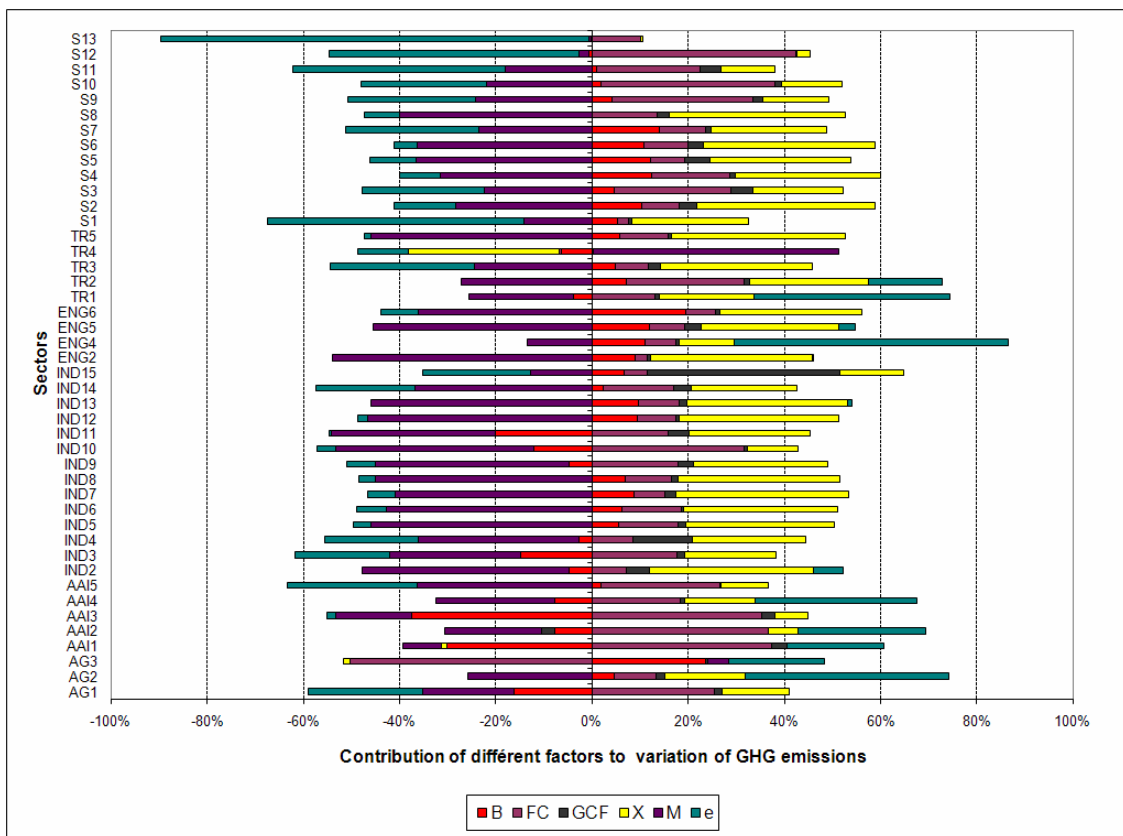
Ce graphique a l'intérêt de sélectionner les branches contribuant à une diminution ou à une augmentation des émissions de GES de la région. Sur les 47 branches, 18 branches ont réduit les émissions de GES tandis que 26 les ont augmentées. Les branches contribuant à la diminution des émissions de GES sont essentiellement les combustibles liquides

(-341 ktCO<sub>2</sub>eq) et l'agriculture (-265 ktCO<sub>2</sub>eq). A contrario, les branches contribuant à l'augmentation des émissions de GES sont la production d'électricité et de chaleur (+168 ktCO<sub>2</sub>eq) et la chimie (+133 ktCO<sub>2</sub>eq). Au total, les émissions de GES auraient diminué de 2 ktCO<sub>2</sub>eq.

L'analyse de décomposition structurelle a surtout l'avantage de quantifier les différents facteurs pouvant expliquer l'évolution des émissions de GES de chaque branche. Ces facteurs sont le changement technique ( $\Delta B$ ), la consommation finale ( $\Delta CF$ ), la formation brute de capital ( $\Delta FBC$ ), les exportations ( $\Delta X$ ), les importations ( $\Delta M$ ) et les coefficients d'émissions de GES ( $\Delta e$ ).

Le graphique 4 indique pour chaque branche la contribution en pourcentage de ces différents facteurs.

**Graphique 4 : Contribution des différents facteurs aux variations des émissions de GES de la région Aquitaine pendant la période 1990-2005 pour les 47 branches**



A l'échelle macroéconomique, ce sont essentiellement les exportations, la consommation finale et, dans une moindre mesure, le changement technologique et la FBC qui ont tiré vers le haut les émissions de GES avec une augmentation pour ces différents facteurs respectivement de 5560 ktCO<sub>2</sub>eq, 2008 ktCO<sub>2</sub>eq, 943 ktCO<sub>2</sub>eq et 367 ktCO<sub>2</sub>eq pour la période 1999-2005. Cependant, ces augmentations des émissions de GES ont été contrebalancées par les importations et une réduction des coefficients d'émissions car ces deux facteurs auraient permis une baisse respectivement égale à 7325 ktCO<sub>2</sub>eq et 1554 ktCO<sub>2</sub>eq. Au total, en sommant ces différents facteurs, la diminution des émissions de GES pour la période 1999-2005 est de 2 ktCO<sub>2</sub>eq. Notons que les différences entre ces

évolutions contraires présentent une grande amplitude pour aboutir au final à une compensation quasi-parfaite.

Nous pouvons repérer les principaux facteurs expliquant les variations les plus fortes des émissions de GES des branches. L'augmentation soutenue des émissions de GES dans la production d'électricité et de chaleur s'expliquerait par une dégradation des coefficients d'émissions de GES (66% de l'augmentation des émissions de GES) provenant de l'utilisation plus importante de combustibles gazeux à production identique même si nous constatons une légère amélioration de l'intensité énergétique des combustibles liquides. A contrario, la réduction des émissions de GES dans les combustibles liquides n'est expliquée que par une croissance des importations. En effet, la production de pétrole a diminué en Aquitaine durant cette période car elle n'était que de 442 ktep pour l'année 2005 contre 621 ktep de pétrole en 1999. Cette réduction de la production du pétrole a été entièrement compensée par une augmentation des importations.

Cette analyse de décomposition structurelle permet, en outre, de percevoir des spécificités sectorielles qui ne suivent pas la tendance globale. Concernant le changement technique, il expliquerait plutôt une baisse des émissions de GES dans l'agriculture (-237 ktCO<sub>2</sub>eq) et des industries agro-alimentaires (-21 ktCO<sub>2</sub>eq), mais également dans l'industrie du bois et du papier (-37 ktCO<sub>2</sub>eq), de la production de métaux non ferreux (-0,02 ktCO<sub>2</sub>eq) et de l'industrie du cuir et habillement (-2 ktCO<sub>2</sub>eq). Concernant la consommation finale, l'exception notable concerne l'aquaculture (-16 ktCO<sub>2</sub>eq). En effet, cette branche est la seule qui présente une réduction de sa consommation finale. S'agissant du commerce extérieur, les exportations et les importations de la branche transport maritime contribueraient respectivement à une diminution (-189 ktCO<sub>2</sub>eq) et une augmentation des émissions de GES (+308 ktCO<sub>2</sub>eq).

Ces résultats rétrospectifs sont utilisés pour constituer un scénario de base pour la région Aquitaine jusqu'en 2013.

## **2.2. Construction d'un scénario de base pour la région Aquitaine**

Nous utilisons la méthode d'extrapolation pour constituer le scénario de base pour la période 2005-2013 en supposant que les tendances économiques et environnementales passées vont se reproduire à l'identique dans le futur. Ainsi ce scénario suppose qu'aucune nouvelle politique environnementale ne va être mise en œuvre et qu'aucun choc économique ne va se produire durant cette période. Bien que ce scénario semble irréaliste, il permet de connaître l'évolution naturelle des émissions de GES, et d'estimer les efforts nécessaires pour atteindre un objectif de réduction des émissions comparées à une date  $t$  et les impacts économiques et environnementaux d'un choc économique.

Hoekstra et Van Den Bergh (2006) préconisent l'utilisation des outils économétriques pour la construction du scénario de base à partir de l'analyse de décomposition structurelle. Mais l'utilisation de ces outils nécessite un grand nombre de TES en volume et en valeur durant une large période. De plus, les TES désagrégés sont difficilement comparables dans le temps du fait des changements de base, et les instituts statistiques, chargés de les construire, n'effectuent pas forcément les conversions entre les anciennes et les nouvelles bases.

Dans notre cas, nous avons besoin d'un TES en 114 branches pour conserver la compatibilité avec la nomenclature permettant de relier les données économiques aux données environnementales. L'INSEE n'estime pas de TES antérieurs à 1999 à un tel niveau de détails

en raison du changement de base. Ainsi, 6 observations seulement ne semblent pas suffisantes pour effectuer une estimation économétrique. Hoekstra et Van Den Bergh (2006), disposant seulement de deux TES, ont supposé une variation linéaire de la production de 1990 à 2030 ! Cette méthode n'est pas convenable car elle n'incorpore pas les incertitudes provenant de cette hypothèse forte.

La méthode de construction du scénario de base par le Bootstrap semble la méthode la plus pertinente pour répondre à notre problématique compte tenu des informations disponibles car elle intègre les incertitudes de prévision. Elle a été utilisée pour des études de prévisions en tenant compte de l'écart-type provenant de l'incertitude (Peters et Freeman, 1985 ; Prescott et Stenges, 1987 ; Veall, 1987). Nous présentons ci-après les principaux mécanismes.

Le Bootstrap<sup>2</sup> consiste à effectuer des ré-échantillonnages aléatoires avec remise provenant des observations. Cette méthode est bien adaptée dans le cas de petits échantillons. Son objectif est d'augmenter le nombre d'observations afin de retirer des lois statistiques. Cependant, la méthode du Bootstrap ne peut régler tous les problèmes et les résultats restent, malgré tout, dépendants de la qualité des données. Nous construisons une matrice de Bootstrap qui a la structure suivante :

$$\begin{pmatrix} x \\ x_1^* \\ x_2^* \\ \vdots \\ x_B^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21}^* & x_{22}^* & \dots & x_{2n}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{B1}^* & x_{B2}^* & \dots & x_{Bn}^* \end{pmatrix} \quad (16)$$

Chaque ligne  $i$  correspond à un échantillon bootstrapé  $x_i^*$ , excepté la première ligne qui correspond à l'échantillon observé  $x$ . Nous avons ainsi  $B+1$  lignes où  $B$  représente le nombre de ré-échantillonnages effectués. Il est important que  $B$  soit un nombre grand car plus  $B$  est élevé, plus les résultats convergent et se stabilisent. Dans notre cas, nous avons fixé  $B = 50\ 000$ . Chaque échantillon bootstrapé  $x_i^*$  est un ré-échantillonnage aléatoire avec remise provenant de  $x$ . Le nombre de colonnes correspond au nombre d'observations de l'échantillon. Dans notre cas,  $n=6$ . Pour chaque échantillon  $i$ , nous allons effectuer sa moyenne correspondant à la croissance annuelle moyenne du PIB entre 2005 et 2013.

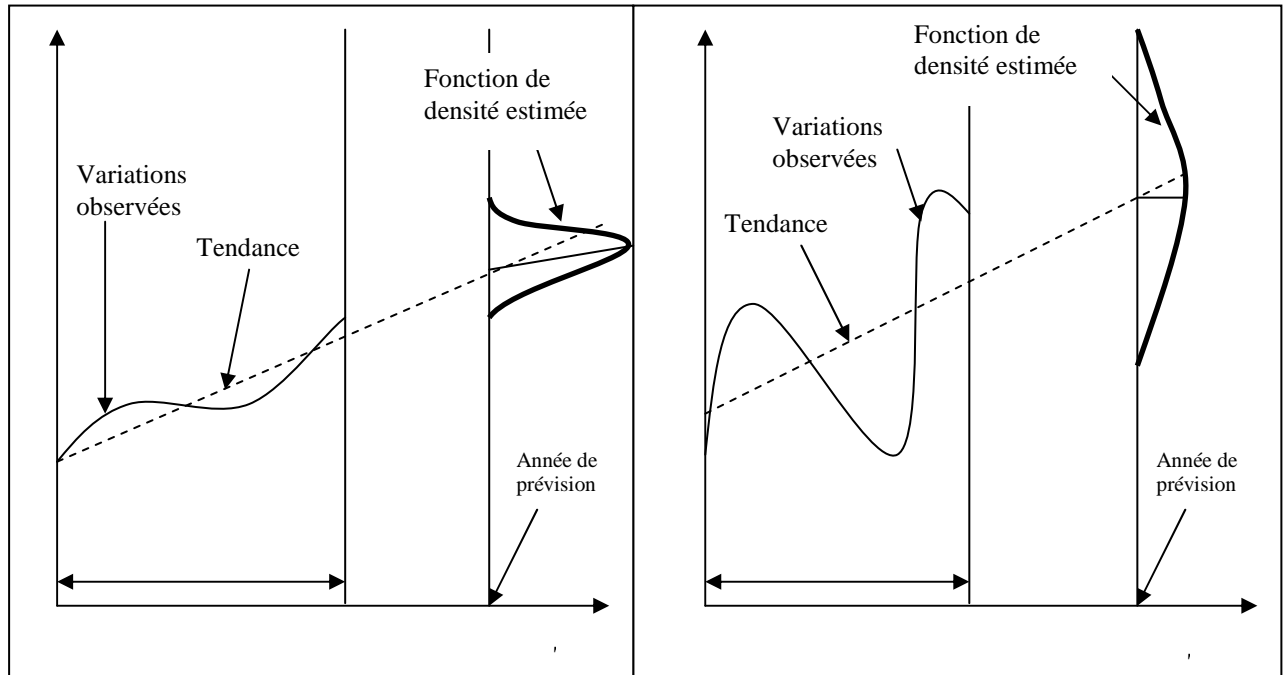
$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{ik} \quad (17)$$

Nous obtenons ainsi  $B$  variations annuelles moyennes possibles du PIB compte tenu des observations. A partir des échantillons bootstrapés, nous pouvons représenter graphiquement en abscisse les différents montants possibles du PIB pour 2013 compte tenu des taux de croissance annuelle moyens et en ordonnée leur fréquence. Nous obtenons ainsi une fonction de densité du PIB pour 2013.

Le graphique 5 indique la manière dont une variable  $X$  (qui peut être le PIB ou les émissions) est estimée à la date  $T_m$ , en connaissant ses variations entre les années  $T_0$  et  $T_n$ . L'application du Bootstrap conduit à supposer que cette tendance est une droite affine du fait qu'on estime la variation absolue entre 1999-2005, et que cette variation est supposée identique entre l'année 2005 et 2013.

<sup>2</sup> Pour une description détaillée du Bootstrap, se référer à l'ouvrage d'Efron et Tibshirani (1993).

**Graphique 5 : Estimation de la fonction de densité par la méthode du Bootstrap où l'écart-type des variations est faible et fort**



Le graphique de gauche représente le cas où l'écart-type des variations de la variable  $X$  est assez faible, à savoir que l'écart entre la tendance et les valeurs observées est petit. Les variations de la variable  $X$  sont ainsi relativement proches entre l'année  $t$  et  $t+1$ . Dans ce cas, la densité de la variable  $X$  pour l'année  $T_m$  est fortement concentrée autour de la valeur présentant la plus forte probabilité de survenir. Ainsi, l'intervalle de confiance pour un taux d'erreur  $\alpha$  est faible. A contrario, le graphique de droite représente le cas où l'écart-type des variations de la variable  $X$  est assez élevé, à savoir que l'écart entre la tendance et les valeurs observées est important. Aussi, les variations de la variable  $X$  sont relativement très différentes entre l'année  $t$  et  $t+1$ . Dans ce cas, la densité de la variable  $X$  pour l'année  $T_m$  est peu concentrée autour de sa valeur. De ce fait, l'intervalle de confiance pour un taux d'erreur  $\alpha$  est élevé. Les risques d'erreur liés à la prévision de la valeur  $X$  pour  $T_m$  doivent être importants. Ainsi, plus l'écart-type de la variation de  $X$  est élevé, plus la courbe de densité sera aplaniée, et plus l'intervalle de confiance sera important, ce qui conduira à de grandes incertitudes concernant la valeur de  $X$  à l'année  $T_m$ .

Le résultat donne une fonction de densité non lisse, c'est à dire non continue, car nous avons des données discrètes. Afin que la fonction de densité soit continue, il faudrait que  $B$  tende vers l'infini. Les outils statistiques n'ont pas suffisamment de capacité pour effectuer ces calculs. Pour surmonter ce problème, il est usuel, à partir de l'échantillon bootstrapé, d'effectuer une estimation non paramétrique par la méthode de noyau afin de lisser la fonction de densité en utilisant la relation suivante :

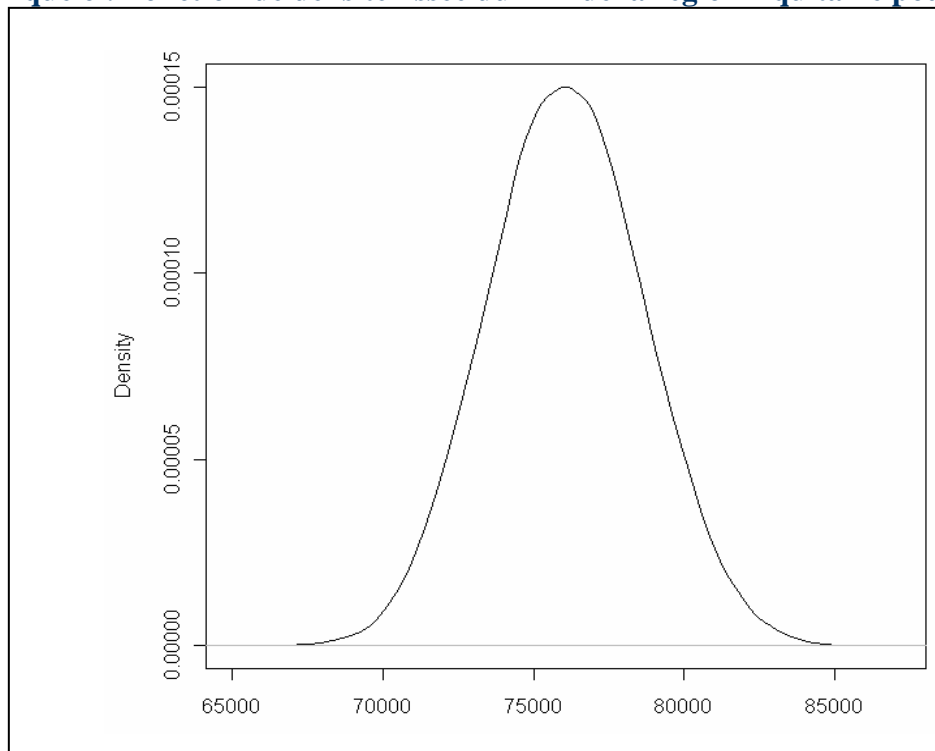
$$f_n(x) = \frac{1}{n \cdot h} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right) \quad (18)$$

Où  $X_i$  sont des échantillons bootstrapés,  $K$  la fonction de noyau continue ( $K(t) \geq 0$  et  $\int K(t). dt = 1$ ) et  $h$  le paramètre de lissage (appelé également fenêtre) ( $h > 0$ ).

L'objectif d'une estimation non paramétrique par la méthode de noyau est de trouver le paramètre de lissage  $h$  optimal. Un nombre  $h$  trop faible ne permet pas de lisser correctement la fonction de densité mais un  $h$  trop élevé aplanit la fonction de densité, diminue donc la précision et augmente l'intervalle de confiance. Le choix de  $h$  optimal s'effectue par tâtonnement. Le lissage de la fonction de densité par l'estimation non paramétrique par la méthode de noyau a été effectué également avec le logiciel R.

Le graphique 6 représente la fonction de densité lissée du PIB de la région Aquitaine pour l'année 2013.

**Graphique 6 : Fonction de densité lissée du PIB de la région Aquitaine pour 2013**



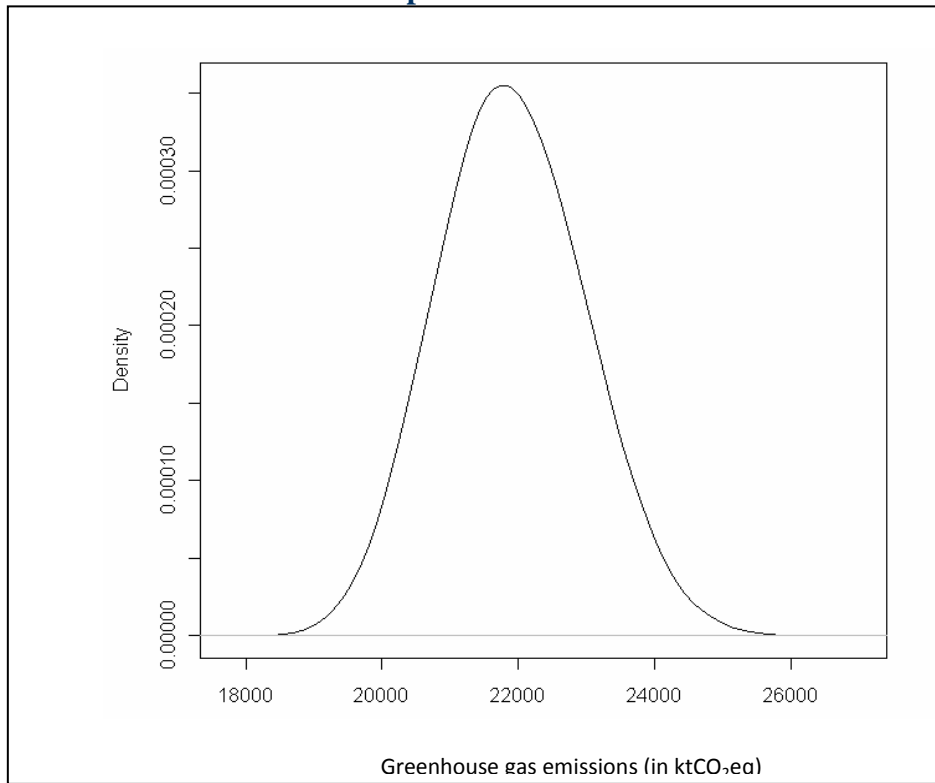
En prenant un risque d'erreur de 5%, le PIB de la région Aquitaine se situerait pour 2013 entre 71 155 M€ et 81 046 M€, soit une augmentation annuelle moyenne comprise entre 1,3% et 2,9%. Le PIB ayant la probabilité la plus élevée de se réaliser pour 2013 serait de 76 074 M€ soit une croissance annuelle moyenne de 2,1%.

Le graphique 7 représente la fonction de densité lissée des émissions de GES pour l'année 2013.

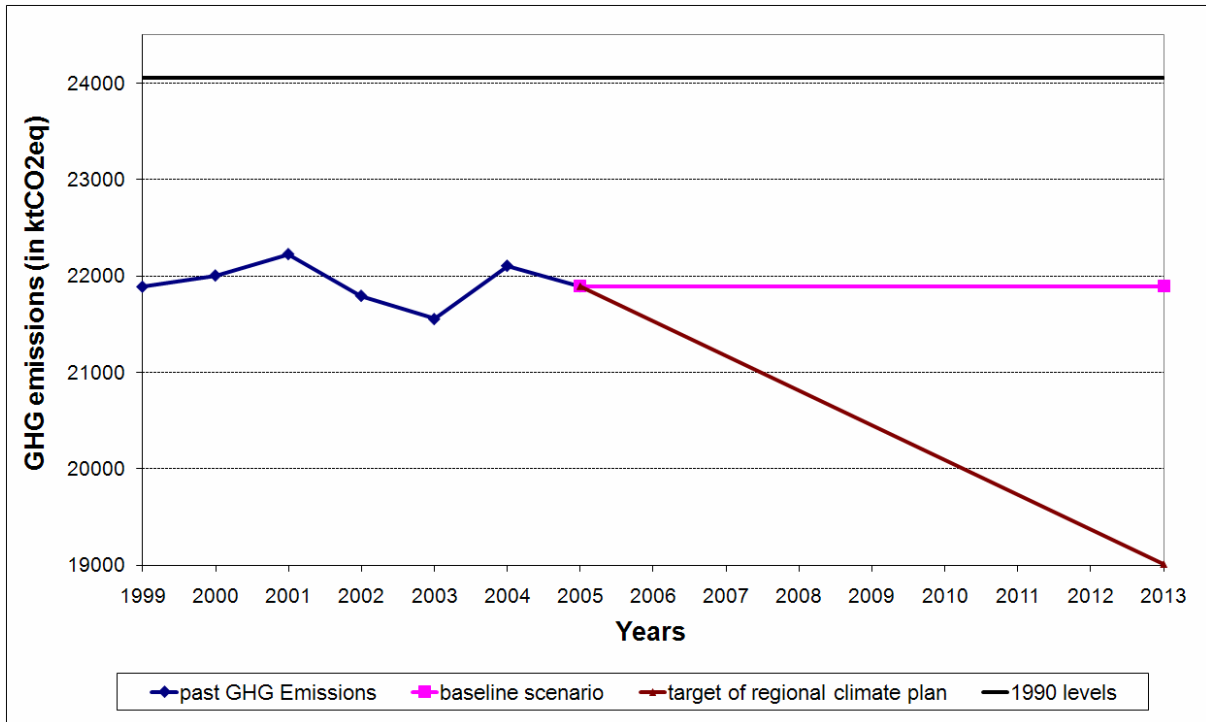
En prenant un risque d'erreur de 5%, les émissions de GES de la région Aquitaine se situeraient entre 19 912 ktCO<sub>2</sub>eq et 24 077 ktCO<sub>2</sub>eq soit une croissance annuelle moyenne comprise entre -1,2% et 1,2%. Le montant des émissions de GES ayant la probabilité la plus élevée pour 2013 serait de 21 896 ktCO<sub>2</sub>eq soit une croissance annuelle moyenne nulle. Les améliorations concernant l'intensité énergétique permettent de stabiliser les émissions de GES malgré une croissance économique modérée.

La construction de ce scénario de base a permis d'estimer les objectifs du plan climat de la région Aquitaine relatifs à ses émissions pour 2013 (cf. graphique 8).

**Graphique 7 : Fonction de densité lissée des émissions de GES de la région Aquitaine pour 2013**



**Graphique 8 : Trajectoire des émissions de GES de la région Aquitaine selon différents scénarios**





L'inventaire des émissions de GES du CITEPA indique une émission, pour 1990, de 23 440 ktCO<sub>2</sub>eq. Le scénario de base estime une émission pour 2013 de 21 896 ktCO<sub>2</sub>eq soit une réduction de 7% des émissions de GES comparées à celles de 1990. Si la région atteint l'objectif de son plan climat, les émissions de GES seraient en 2013 de 19 013 ktCO<sub>2</sub>eq, soit une réduction de 13% comparée aux émissions de GES du scénario de base et de 2005, et une diminution de 19% en référence au niveau des émissions de GES de 1990. En prenant un risque d'erreur de 5%, la région devrait diminuer ses émissions entre 12% et 29% pour 2013 par rapport au niveau de 1990.

## **Conclusion**

Dans cet article, nous avons développé une méthode de régionalisation de l'analyse de décomposition structurelle. L'application de cette méthode a montré que les résultats macro-économiques étaient convenables malgré les hypothèses fortes spécifiques à cette méthode. Les différentes applications de l'analyse de décomposition structurelle effectuées ont montré l'intérêt de cette analyse pour répondre à des problématiques environnementales. Deux types d'études dynamiques ont été effectués : Une étude rétrospective et une étude prospective. L'étude rétrospective a permis de sélectionner les principaux facteurs expliquant l'évolution des émissions de GES entre 1999 et 2005 à la fois au niveau global mais également avec une décomposition en 47 branches. A l'échelle macro-économique, les exportations, la consommation finale et, dans une moindre mesure, le changement technologique et la FBC ont entraîné une augmentation des émissions. Mais ces augmentations ont été largement contrebalancées par les réductions des émissions de GES provenant des importations et d'une amélioration des coefficients d'émissions. Ces résultats ont ensuite servi à la construction d'un scénario de base en supposant que les conditions économiques passées allaient se reproduire dans le futur. Ce scénario de base a permis de tracer la trajectoire des émissions de GES de la région jusqu'en 2013. L'objectif du plan climat de la région est d'éviter 2883 ktCO<sub>2</sub>eq ce qui devrait provoquer une réduction de 19% de ses émissions pour 2013 comparées au niveau de 1990. En supposant un risque de 5%, la région devrait diminuer ses émissions entre 12% et 29% pour 2013 comparativement à leur niveau de 1990.

Ce travail ouvre la voie à des études régionales appliquées à l'environnement. Il met en évidence la richesse des applications de l'analyse de décomposition structurelle. Cette méthode de régionalisation des résultats nationaux provenant de l'analyse de décomposition structurelle peut encore être améliorée, principalement dans la détermination plus précise de l'évolution du commerce interrégional.

## References

- Alcantara V., Duarte R. (2004) Comparison of energy intensities in European Union countries: Results of a structural decomposition analysis, *Energy policy*, **32**:177-189
- Andreosso-O'Callaghan B., Yue G. (2002) Sources of output change in China: 1987–1997 : application of a structural decomposition analysis, *Applied Economics*, **34**: 2227–2237.
- Catin M. (1992) La modélisation régionale in: P.H DERYCKE Espace et dynamiques territoriales, Edition Economica.
- Chang Y.F., Lin S.J. (1998) Structural decomposition of industrial CO<sub>2</sub> emissions in Taiwan: an input–output approach, *Energy Policy*, **26**:5–12.
- Chang Y.F., Lewis C., Lin S.J. (2008) Comprehensive evaluation of industrial CO<sub>2</sub> emissions (1989–2004) in Taiwan by input–output structural decomposition, *Energy Policy*, **36**:2471-2480
- Casler S.D., Rose A. (1998) Carbon Dioxide Emissions in the U.S. Economy: A structural decomposition analysis, *Environmental and Resource Economics*, **11**:349–363.
- De Haan M. (2001) A Structural Decomposition Analysis of Pollution in the Netherlands, *Economic Systems Research*, **13**: 181-196
- Dieztenbacher E., Los B. (1998) Structural decomposition technique: sense and sensitivity, *Economic Systems Research*, **10**:307-324
- Efron B., Tibshirani R.J. (1993) An introduction to the bootstrap, Chapman & Hall
- Fujimagari, D. (1989) the sources of change in Canadian industry output, *Economic Systems Research*, **1**:187-201
- Gowdy J. M., Miller J. L. (1987), Technological and Demand Change in Energy Use: An Input-Output Analysis, *Environment and Planning*, **A19**: 1387–1398.
- Han X. (1995) Structural change and labor requirement of the Japanese economy, *Economic Systems Research*, **7**: 47-65
- Hoeksra R., Van Der Bergh J.J.C.J.M. (2006) The Impact of Structural Change on Physical Flows in the Economy: Forecasting and Backcasting Using Structural Decomposition Analysis, *Land Economics*, **82**:582-601
- Keynes (1936) *The General Theory of Employment, Interest and Money*, Palgrave Macmillan
- Leontief W. (1986) *Input-Output Economics*, 2<sup>nd</sup> edition, Oxford University Press
- Lin X., Polenske K. (1995) Input–output anatomy of China’s energy-demand change, 1981–1987. *Economic Systems Resources*, **7**:67–84
- Martin J.C., Point P. (2011) Construction of linkage indicators of greenhouse gas emissions for Aquitaine region, *Les cahiers du Gretha (working papers of Gretha)*, N°5
- Martin J.C. (2010) Impacts économiques d’une politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour la région Aquitaine, Thèse Université Montesquieu Bordeaux IV.
- Munksgaard J., Pedersen K.A., Wien M. (2000) Impact of household consumption on CO<sub>2</sub> emissions, *Energy Economics*, **22**:423-440
- Peters S.C., Freedman D.A. (1985) using the bootstrap to evaluate forecasting equations, *Journal of Forecasting*, **4**:251-262

- Prescott D.M., Stenges T. (1987) Bootstrapping confidence intervals: An application to forecasting the supply of pork, *American Journal of Agricultural Economics*, **69**:266-273
- Proops J.L.R., Faber M. et Wagenhals G. (1993) Reducing CO2 Emissions: A comparative Input-Output Study for Germany and the UK, Springer-Verlag, Heidelberg.
- Rose A., Casler S. (1996) Input-Output structural decomposition analysis: a critical appraisal, *Economic Systems Research*, **8**: 33-62
- Rose A., Chen C. Y. (1991), Sources of Change in Energy Use in the U.S. Economy 1972–1982: A Structural Decomposition Analysis, *Resources and Energy*, **13**:1–21.
- Skolka J. (1989) Input-output structural decomposition analysis for Austria, *Journal of Policy Modeling*, **11**:45-66
- Sun J.W. (1998) Changes in energy consumption and energy intensities: A complete decomposition model, *Energy economics*, **20**:85-100
- Veall M.R. (1987) Bootstrapping the probability distribution of peak electricity demand, *International Economic Review*, **28**:203-212
- West G.R. (1995) Comparison of input-output, input-output econometric and computable general equilibrium impact, *Economic Systems Research*, **7**:209-228
- Wier M. (1998) Sources of Changes in Emissions from Energy: A Structural Decomposition Analysis, *Economic Systems Research*, **10**:99- 112
- Wolff E.N. (1985) Industrial composition, interindustry effects, and the US productivity slowdown, *Review of Economics and Statistics*, **67**:268-277

**ANNEXE : Nomenclature**

<b>code</b>	<b>Sectors</b>
AG1	Agriculture
AG2	Forestry
AG3	Fishing
AAI1	Production, processing and preserving of meat and meat products
AAI2	Manufacture of dairy products
AAI3	Manufacture of beverages
AAI4	Manufacture of grain mill products, starches and starch products, prepared animal feeds
AAI5	Manufacture of other food and tobacco products
IND1	Mining of metal ores and uranium
IND2	First processing of iron and steel
IND3	Manufacture of basic precious and non-ferrous metals
IND4	Other mining and quarrying, materials for construction
IND5	Manufacture of glass and glass products
IND6	Chemistry
IND7	Smelting and metal works, building of ships and boats, manufacture of equipment, aircraft and spacecraft
IND8	Manufacture of electric and electronic equipment
IND9	Manufacture of vehicles
IND10	Manufacture of clothing articles, leather products and textiles
IND11	Manufacture of pulp, paper and paper products
IND12	Manufacture of rubber
IND13	Manufacture of plastic products
IND14	Other industries
IND15	Construction
ENG1	Mining of coal and lignite; extraction of peat
ENG2	Extraction of crude petroleum and natural gas and manufacture of refined petroleum products
ENG3	Manufacture of coke oven products and processing of nuclear fuel
ENG4	Electricity, steam and hot water supply
ENG5	Gas supply
ENG6	Collection, purification and distribution of water
TR1	Transport via railways
TR2	Other passenger land transport
TR3	Freight transport by road or via pipelines
TR4	Water transport
TR5	Air transport
S1	Activities of transport agencies
S2	Trade
S3	Financial and Real estate activities
S4	Post and telecommunications
S5	Consultancy and assistance activities
S6	Renting and other business activities
S7	Sewage and refuse disposal, sanitation and similar activities
S8	Research and development
S9	Hotels and restaurants
S10	Recreational, cultural and sporting activities, personal and domestic services
S11	Education
S12	Health, social work
S13	Administration

---

***Cahiers du GREThA***  
***Working papers of GREThA***

---

**GREThA UMR CNRS 5113**

Université Montesquieu Bordeaux IV  
Avenue Léon Duguit  
33608 PESSAC - FRANCE  
Tel : +33 (0)5.56.84.25.75  
Fax : +33 (0)5.56.84.86.47

<http://gretha.u-bordeaux4.fr/>

---

**Cahiers du GREThA (derniers numéros)**

- 2011-03 : MARTIN Jean-Christophe, POINT Patrick, *Economic impacts of development of road transport for Aquitaine region for the period 2007-2013 subject to a climate plan*
- 2011-04 : BERR Eric, *Pouvoir et domination dans les politiques de développement*
- 2011-05 : MARTIN Jean-Christophe, POINT Patrick, *Construction of linkage indicators of greenhouse gas emissions for Aquitaine region*
- 2011-06 : TALBOT Damien, *Institutions, organisations et espace : les formes de la proximité*
- 2011-07 : DACHARY-BERNARD Jeanne, GASCHET Frédéric, LYSER Sandrine, POUYANNE Guillaume, VIROL Stéphane, *L'impact de la littoralisation sur les valeurs foncières et immobilières: une lecture différenciée des marchés agricoles et résidentiels*
- 2011-08 : BAZEN Stephen, MOYES Patrick, *Elitism and Stochastic Dominance*
- 2011-09 : CLEMENT Matthieu, *Remittances and household expenditure patterns in Tajikistan: A propensity score matching analysis*
- 2011-10 : RAHMOUNI Mohieddine, YILDIZOGLU Murat, *Motivations et déterminants de l'innovation technologique : Un survol des théories modernes*
- 2011-11 : YILDIZOGLU Murat, SENEGAS Marc-Alexandre, SALLE Isabelle, ZUMPE Martin, *Learning the optimal buffer-stock consumption rule of Carroll*
- 2011-12 : UGAGLIA Adeline, DEL'HOMME Bernard, FILIPPI Maryline, *Overcoming grape growers' pesticide lock-in*
- 2011-13 : BOURDEAU-LEPAGE Lise, GASCHET Frédéric, LACOUR Claude, PUISSANT Sylvette, *La métropolisation 15 ans après*
- 2011-14 : BROUILLAT Eric, OLTRA Vanessa, *Dynamic efficiency of Extended Producer Responsibility (EPR) instruments in a simulation model of industrial dynamics*
- 2011-15 : GABILLON Emmanuelle, *A Theory of Regret and Information*
- 2011-16 : BLANCHETON Bertrand, MARCHI Jean-Jacques, *Le tourisme ferroviaire en France, une mise en perspective historique de 1870 à nos jours*
- 2011-17 : BELIN Jean, HORBACH Jens, OLTRA Vanessa, *Determinants and Specificities of Eco-innovations –An Econometric Analysis for the French and German Industry based on the Community Innovation Survey*
- 2011-18 : MARTIN Jean-Christophe, BECUWE Stéphane, *Analyse de décomposition structurelle des émissions de gaz à effet de serre : application à la région Aquitaine*

---

La coordination scientifique des Cahiers du GREThA est assurée par Sylvie FERRARI et Vincent FRIGANT. La mise en page est assurée par Anne-Laure MERLETTE.