



HAL
open science

Quantification et modélisation du Capital Naturel Critique pour la mise en oeuvre d'une politique du développement durable en France Préparé par

Jean-Marc Douguet, Schembri Patrick

► To cite this version:

Jean-Marc Douguet, Schembri Patrick. Quantification et modélisation du Capital Naturel Critique pour la mise en oeuvre d'une politique du développement durable en France Préparé par. Université Versailles Saint Quentin en Yvelines. 2000. hal-03997551

HAL Id: hal-03997551

<https://hal.science/hal-03997551>

Submitted on 20 Feb 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



RAPPORT DU C3ED

Quantification et modélisation du Capital Naturel Critique pour la mise en œuvre d'une politique du développement durable en France

Préparé par
Jean-Marc Douguet & Patrick Schembri (C3ED),

Sous la direction scientifique de
Martin O'Connor (C3ED)

Avril 2000

Etude pour

Le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (1997-1999)

Rapport de Recherche : Contrat No 97085

*Centre d'Economie et d'Ethique pour l'Environnement et le Développement (C3ED)
Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines
47 bd Vauban, 78047 GUYANCOURT Cedex France
Tel : 01 39 25 53 75 Fax : 01 39 25 53 00
Email : Secretariat@c3ed.uvsq.fr*



Titre : Quantification et modélisation du Capital Naturel Critique pour la mise en œuvre d'une politique du développement durable en France

Rapport Final

pour

le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement
(1997-1999)

Contrat n°: 97085

Direction scientifique :

Martin O'Connor
C3ED
Université de Versailles-Saint-Quentin en Yvelines
47, boulevard Vauban, 78047 Guyancourt cedex, France
Tel : +33.(0)1.39.25.53.75 Fax : +33.(0)1.39.25.53.00
Email : Secretariat@c3ed.uvsq.fr

Mots clés :

Capital naturel critique, soutenabilité forte, agro-système, gestion de l'eau, développement durable, modélisation

Avant - propos

Cette recherche réalisée pour le ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, s'inscrit également dans le cadre d'un projet de recherche financé par l'Union Européenne, lequel s'intitule "Making sustainability operational : Critical Natural Capital and the implication of a strong sustainability criterion", [Rendre la soutenabilité opérationnelle : le capital naturel critique et l'incidence d'un critère de soutenabilité forte]. Ce projet de recherche est coordonné par P. Ekins (EPU, Keele University, UK) en collaboration avec FEEM (responsable scientifique D. Pettenella, Agripolis, Italie), SU (responsable scientifique C. Folke, Stockholms University, Suède), WAU (responsable scientifique R. de Groot, Wageningen Agricultural University, Pays-Bas), WUP (responsable scientifique R. Loske, Wuppertal Institute, Allemagne) et le C3ED (responsable scientifique M. O'Connor, Université Versailles - Saint Quentin en Yvelines, France). Enfin, cette recherche est menée en parallèle avec celle intitulée "Validation socio-économique des indicateurs agro-écologiques" réalisée dans le cadre du Programme Interdisciplinaire de Recherche "Environnement, Vie et Société" (1997 - 1999) du CNRS sous la direction scientifique de Martin O'Connor (C3ED) et Philippe Girardin (INRA).

Par ailleurs, nous tenons à souligner que la réalisation de ce travail a suscité bon nombre d'échanges entre le C3ED, l'IFEN, le ministère de l'agriculture et l'AGRESTE. Nos remerciements vont au ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, lequel nous a permis de conduire cette recherche à son terme. Ils s'adressent également à Laurent Porcheret, géographe à SUD AMERIQUES (Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines), pour son aide quant à l'usage du Système d'Information Géographique pour le traitement des résultats des simulations réalisées.

Introduction générale

Les dimensions économiques, sociales et environnementales du concept de soutenabilité sont bien connues. L'intérêt actuel pour la soutenabilité environnementale vient de la perception même de ce que le capital naturel est souvent dégradé à un point tel que d'importantes fonctions de l'environnement ne sont plus, ou ne seront plus conservées, engendrant ainsi des effets notables aux plans écologique, économique et sociale. Dans ces conditions, il est nécessaire de proposer des techniques d'aide à la décision appropriées pour la gestion du capital naturel critique. Fondamentalement inscrit dans cette perspective, le programme de recherche intitulé "*Quantification et modélisation du capital naturel critique pour la mise en œuvre d'une politique de développement durable*" vise, dans un premier temps, la définition et la mesure du capital naturel critique. Il consiste, dans un second temps, à proposer une étude de cas portant sur les formes d'agriculture et la qualité des eaux en Bretagne.

La quantification du capital naturel critique s'inscrit :

- (1) dans la présentation des principales propriétés du *modèle structurel de simulation M3ED* et de la méthodologie qui en est le support, laquelle vise à proposer une forme spécifique de valorisation des dommages environnementaux (sections 1 et 2).
- (2) *Cette méthode de valorisation environnementale*, laquelle repose sur l'analyse dite coût-efficacité, vise à définir les agrégats économiques "écologiquement ajustés" au plan national, puis régional. Elle consiste, par ailleurs, à proposer dans un cadre à la fois macro-économique et dynamique une mesure de la performance environnementale de telle ou telle politique d'environnement et du coût économique qui lui est associé (section 3).
- (3) En nous appuyant sur deux cas pratiques, consommations énergétiques et norme de Kyoto d'une part, agricultures et qualité des eaux en Bretagne d'autre part, nous soulignons dans quelle mesure cette méthode permet de *gérer les pressions sur l'environnement naturel et la consommation nationale dans la perspective d'un développement durable en France* (sections 3, 4, 5 et 6).

Nous tenons également à souligner que les outils analytiques sollicités constituent le support d'une modélisation de la gestion du capital naturel critique régional, laquelle doit articuler les échelles spatiales et temporelles du développement durable dans une région spécifique, la Bretagne. Ce travail impose l'élaboration d'une base de données ayant trait, pour une unité spatiale donnée, aux catégories "critiques" de fonctions de l'environnement et aux émissions de polluants dans les sols et les ressources en eau. A cet égard, en collaboration avec l'IFEN, tout un travail a été réalisé pour collecter un ensemble de données portant sur les facteurs de production agricole, sur les modes d'exploitation et d'occupation des sols, sur les usages de la ressource eau et sur la localisation des activités. Ces données sont alors intégrées dans le modèle M3ED, dont la structure modulaire est désormais adaptée à l'échelle régionale évoquée. Cette forme de modélisation suscite une démarche de prospective, laquelle est essentielle dans le cadre de l'élaboration de scénarios définissant les contours d'un développement soutenable de la Bretagne. Dans le cadre d'un exercice de valorisation de l'azote, diverses formes d'agriculture sont alors évaluées.

Nous ajoutons que cette recherche a fait l'objet :

D'un symposium sur l'évaluation environnementale et le capital naturel : dimensions institutionnelles, régionales et sectorielles. Ce symposium, organisé par le C3ED, s'est déroulé du samedi 4 au mardi 7 octobre 1997 à l'Abbaye des Vaux de Cernay, dans la vallée de Chevreuse. Il fut financé par le ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, la DGXII de l'Union Européenne, le programme "Environnement, vie et société" du CNRS et l'Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines. Il regroupa pas moins de cinquante chercheurs de 13 pays (auxquels s'étaient joints deux américains) appartenant à diverses disciplines (économie, agronomie, philosophie, anthropologie, statistique). Trois thèmes furent abordés :

- Les fonctions des écosystèmes, leur gestion par les acteurs et institutions ;
- Le PNB "vert" et l'adaptation des comptabilités et des indicateurs ;
- Les concepts et méthodes d'évaluation environnementale et leur contexte.

De publications :

- O'Connor M., Ryan G. [1999], "Macroeconomic cost-effectiveness and the use of multi-sectoral dynamic modelling as an environmental valuation tool", *International Journal of Sustainable Development*, 2(2/3)
- O'Connor M., [1997], "Environmental Valuation: From the Point of View of Sustainability", in Dragun A. K. et Jakobsson K. M. (eds) *Sustainability and Global Environment Policy, New Perspectives*, Edward Elgar, Cheltenham, pp. 149-179
- Schembri P. [1999], *Adaptation costs for sustainable development and ecological transitions : A presentation of the structural model M3ED with reference to French energy - economy - carbon dioxide emissions prospects*, *International Journal of Environment and Pollution*, Vol. 11, n°4
- Schembri P [1999], *Environmentally adjusted domestic product and Emission control policies*, *International Journal of Sustainable Development*, vol. 2, n°2/3.

De communications et travaux :

- Schembri P. [1998], "Les conditions limites de faisabilité du développement durable : une présentation du modèle structurel de simulation M3ED", aux Journées de l'Association Française de Science Economique (AFSE), Toulouse, 11 et 12 mai.
- Schembri P. [1998], "Adaptation costs for sustainable development and ecological transitions", colloque international organisé par l'IVEM, Université de Groningen (Pays Bas), 16 et 17 septembre.
- Schembri P. [1998], "Le projet européen GREENSTAMP : vers la mise en place d'une comptabilité verte", à la Journée du CITEPA, Paris, 17 novembre.
- Schembri P. [1999], *Sustainability and technological progress : what kind of valuation method for opportunity costs and environmental performance*, colloque international de l'Association Européenne des Economistes de l'Energie (AEE), Paris, 30 septembre et 1er octobre.
- Douguet J.M et P. Schembri [1999], *Formes d'agriculture durable et contrôle de la qualité des eaux : une approche structurelle d'évaluation des politiques d'environnement*", aux Journées du PIREE, Strasbourg, 1 et 2 décembre.

- Douguet J.M [2000], Systèmes agraires et soutenabilité : un enjeu pour la préservation d'une eau de qualité en Bretagne, un problème d'évaluation, Thèse de doctorat en sciences économiques, Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines.

PARTIE I

CAPITAL NATUREL CRITIQUE :

DEFINITION ET MESURE

SOMMAIRE DE LA PARTIE 1

PARTIE I	7
SOMMAIRE DE LA PARTIE 1	8
INTRODUCTION	9
SECTION 1 : LA GESTION DES FONCTIONS ENVIRONNEMENTALES DU CAPITAL NATUREL DANS L'OPTIQUE DE LA SOUTENABILITE FORTE	10
1.1 CAPITAL NATUREL CRITIQUE ET SOUTENABILITE FORTE	10
1.1.1 <i>L'optique de la soutenabilité forte</i>	10
1.1.2 <i>De la notion de Capital Naturel à celle de Capital Naturel Critique</i>	11
1.2 LA STRUCTURE THEORIQUE D'IDENTIFICATION DU CAPITAL NATUREL CRITIQUE	13
1.2.1 <i>Les fonctions environnementales et le capital naturel</i>	13
1.2.2 <i>L'aspect critique du capital naturel : une structure d'analyse</i>	14
SECTION 2 LA MESURE DU CAPITAL NATUREL CRITIQUE PAR LE MODELE STRUCTUREL DE SIMULATION M3ED	18
2.1 LES PROPRIETES DU MODELE M3ED.....	18
2.1.1 <i>Le contenu analytique du modèle</i>	18
2.1.2 <i>La technologie de production et les flux d'échange intersectoriel</i>	22
2.1.3 <i>Population et modes de vie</i>	27
2.2. LES CONDITIONS LIMITES DE FAISABILITE DE DEVELOPPEMENT SOUTENABLE	29
2.2.1 <i>La soutenabilité écologique par la mesure des intensités énergétiques</i>	29
2.2.2 <i>La condition de viabilité économique par le bouclage macro-économique du modèle</i>	32
SECTION 3 : VERS UNE METHODE D'EVALUATION DES POLITIQUES PUBLIQUES D'ENVIRONNEMENT	37
3.1 LE CRITERE DE CLASSIFICATION DES SCENARIOS : L'INDICE COUT-EFFICACITE	39
3.2 ANALYSE DE FAISABILITE ET POLITIQUES D'ENVIRONNEMENT : L'EXEMPLE DU CARBONE.....	46
TRANSPORTS	48
3.3 PRESENTATION DES SIMULATIONS ET DISCUSSION DES RESULTATS	56

Introduction

Ce dernier quart de siècle est marqué par une prise de conscience de la dimension écologique des activités économiques de production et de consommation. A partir des années quatre-vingt, avec l'arrivée au premier plan des problèmes globaux d'environnement, tels que le risque climatique et la déchirure de la couche d'ozone stratosphérique, nous nous trouvons dans un schéma de décision sous controverses impliquant scientifiques, puissance publique, médias et agents individuels. L'incertitude scientifique pèse fortement sur la nature, les causes et les incidences de ces problèmes (Hourcade, [1991] ; Faucheux et Froger, [1995]). La connaissance en la matière permet de soulever les risques encourus sans parvenir toutefois à proposer des solutions définitives. Si bien que les agents ne prennent conscience des nuisances qu'au travers des médiations de toutes sortes. Enfin, ces problèmes nécessitent que l'on considère les intérêts tiers, tels ceux de pays étrangers et des générations futures, en plus des intérêts présents et directement impliqués.

Dans ce mouvement, l'exigence de préservation écologique semble se détourner de l'idée vieillissante d'une pure incompatibilité entre la croissance économique et la capacité d'assimilation du milieu naturel pour ne retenir que l'essentiel: le contenu du sentier de croissance économique et la mesure des instruments de régulation des comportements. De fait, la problématique du développement durable implique d'une part l'analyse des conséquences pour l'environnement de certaines stratégies de croissance, (durabilité écologique et limites externes). D'autre part, l'évaluation des conséquences économiques des politiques d'environnement, (viabilité économique et limites internes). Plus généralement, le développement durable pose le problème de la définition des modalités d'orientation du changement technologique de sorte que l'on aboutisse dans un avenir plus ou moins proche à un mode de développement plus respectueux des régulations naturelles.

Si l'on tient compte de ces exigences, deux questions fondamentales doivent être évoquées. La première porte sur le contenu du sentier de croissance écologiquement durable. La seconde a trait aux conditions économiquement viables de sa mise en œuvre. Les deux questions prises ensemble éclairent les mécanismes qui président au choix de technologie, et par suite, des sentiers de croissance économique.

L'analyse proposée dans cette partie s'inscrit justement dans la nécessité de mesurer les modifications structurelles et les incidences écologiques des politiques de contrôle de la qualité de l'environnement naturel. Elle s'inscrit en cela dans la définition et la mesure des conditions qui président au bon respect des contingences environnementales. Dans un premier temps, nous définissons le cadre analytique dans lequel les modalités de gestion du capital naturel sont évoquées par référence à la soutenabilité forte. Dans un second temps, la représentation formelle utilisée pour la mesure du capital naturel repose sur la dynamique des systèmes, laquelle demeure un outil de modélisation particulièrement bien adapté à l'analyse des interrelations entre l'activité économique, la pression écologique et le changement technologique. Sa propriété essentielle réside dans une spécification claire des boucles rétroactives, des relations structurelles et des évolutions temporelles qui animent le passage d'un sentier de développement à un autre. Dans un troisième temps, nous développons une méthode spécifique d'évaluation des modalités de gestion du capital naturel critique.

Section 1 : La gestion des fonctions environnementales du capital naturel dans l'optique de la soutenabilité forte

Les écrits sur les dégradations de l'environnement ont mené à la suggestion que le maintien du capital naturel est une condition nécessaire mais pas suffisante pour un développement soutenable de la société. Le capital naturel est alors abordé dans sa globalité sans en expliciter les composantes qui le rendent si important. C'est la démarche que nous proposons de réaliser. Elle requiert une analyse en termes de prévention de la perte des fonctions environnementales importantes et du maintien de la stabilité des écosystèmes à travers la notion de capital naturel critique (1.1). Nous établirons dans un second point une structure théorique d'identification du capital naturel critique (1.2).

1.1 Capital Naturel critique et soutenabilité forte

Il s'agit de faire un rappel sur la théorie du capital naturel et de la soutenabilité forte. Deux aspects seront abordés : l'optique de la soutenabilité forte et de la notion de capital naturel critique.

1.1.1 L'optique de la soutenabilité forte

Pour les tenants de la perspective forte du capital naturel, les préoccupations qui interviennent dans la recherche des règles assurant la soutenabilité, sont les suivantes (voir Faucheux & O'Connor [1999], Faucheux & O'Connor (eds) [1998]) :

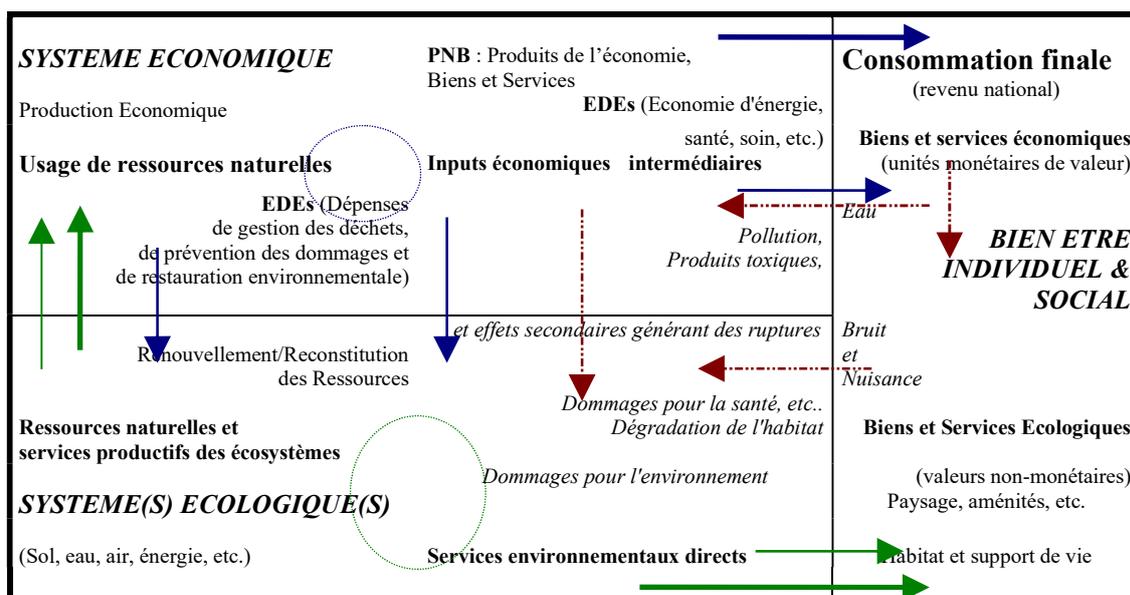
- Pour une activité économique durable à long terme, l'élasticité de substitution entre le capital productible (économique) et le capital naturel est proche de zéro car les fonctions de production sont à facteurs complémentaires. Le capital manufacturé n'est pas indépendant du capital naturel puisque sa production nécessite le plus souvent l'intervention du capital naturel, non seulement comme intrant, mais également comme support structurel. En outre le capital naturel remplit des fonctions de "survivabilité" ne pouvant pas être assurées par le capital manufacturé (par ex : couche d'ozone).
- Le changement technique peut avoir des impacts négatifs ou mineurs à l'égard du capital naturel. D'une part, les lois de la thermodynamique limitent le recyclage pour la matière et encore davantage pour l'énergie. D'autre part, les nouvelles technologies ne sont pas nécessairement moins polluantes ou bénéfiques par rapport au capital naturel dans son ensemble.

Le développement durable est alors défini comme l'activité économique permanente maintenant les actifs de capital naturel de la région ou de la nation dans laquelle elle s'insère. Il s'agit d'une optique en termes de production jointe de biens et services économiques concomitante à la reproduction et au renouvellement de services et supports "naturels". En effet, si l'on se réfère au schéma du graphique 1, on voit que la

gestion de la ressource économique doit remplir les deux fonctions complémentaires suivantes (Brouwer, O'Connor et Radermacher [1999]) :

- Offrir la base d'un bien être écologique en assurant le maintien des fonctions et des aménités environnementales (partie inférieure du diagramme).
- Assurer la base d'un bien-être économique sur la production de biens et services (partie supérieure du diagramme).

Figure 1 : La (re)production jointe des biens et des services économiques et écologiques



Source : Fauchaux & O'Connor [1999]

Les biens et services, qu'ils soient écologiques ou économiques, contribuent au bien-être humain. Pour des besoins analytiques, ils peuvent être considérés comme complémentaires, mais dans une relation asymétrique. Le capital naturel est perçu en termes de systèmes dynamiques dont les propriétés d'interdépendance sont en perpétuelle évolution. Dans son interprétation systémique, le capital naturel constitue le support direct, tant pour le bien-être humain que pour toute activité économique durable.

1.1.2 De la notion de Capital Naturel à celle de Capital Naturel Critique

Une fois ces précisions autour de la notion de capital naturel apportées, il convient de traduire sa gestion en termes d'orientation de politiques environnementales. Deux perspectives peuvent être distinguées : l'une plutôt substantive que nous appelons approche conservationniste, et l'autre plutôt procédurale que nous nommons l'approche "économie écologique institutionnelle".

La règle de soutenabilité la plus simple qui résulte de l'affirmation du caractère irréductible du capital naturel peut être qualifiée de conservationniste. Elle consiste en l'énoncé que :

$$\frac{dK_n(t)}{dt} \geq 0$$

Il s'agit de conserver la nature "intacte", ce qui traduit en quelque sorte l'idée que le développement économique devrait respecter des "contraintes écologiques" au cours du temps. Dans cette optique, l'échelle de l'activité économique peut être évaluée par rapport aux "capacités naturelles" des écosystèmes et des processus environnementaux à régénérer des ressources énergétiques, matérielles et vivantes, d'une part ; et à assimiler les flux de déchets de ces derniers issus de l'économie, d'autre part.

On voit pourtant ses limites pour la définition des politiques opérationnelles pour un développement durable. Faute d'une hypothèse forte concernant le progrès technique, la règle de soutenabilité "conservationniste" impliquerait des taux de croissance économique et démographique nuls, voire négatifs. Si ces taux étaient positifs, on assisterait tôt ou tard à un accroissement de la consommation d'énergie et de matières minérales responsables à la fois de l'épuisement des ressources et des problèmes d'environnement, c'est-à-dire responsables de la détérioration et/ou de la diminution du capital naturel.

La seconde perspective, elle aussi développée au sein de l'économie écologique prône le respect des contraintes écologiques et le maintien des capacités des systèmes naturels mais insiste sur une dimension irréductiblement sociale et l'analyse. L'analyse de système du capital naturel y est plus nuancée.

Premièrement, le capital naturel est interprété comme une matrice à plusieurs dimensions avec un fonctionnement complexe et dynamique qu'il s'agit d'analyser à des échelles différentes et dans ses composantes vivantes et physico-chimiques hétérogènes. D'autre part, le courant "économie écologique institutionnelle" ne rejette pas totalement l'hypothèse d'une substituabilité entre certains éléments du capital naturel et le capital technique ni non plus l'hypothèse des rôles potentiellement, bénéfiques du changement technique vis-à-vis des pressions sur le capital naturel.

Ainsi, qu'il s'agisse des travaux de Costanza et Daly [1992] ou du modèle de Barbier et Markandya [1990], les objectifs de soutenabilité s'expriment à travers les trois grandes catégories de contraintes écologiques suivantes s'imposant au développement économique :

- L'utilisation des ressources naturelles renouvelables ne doit pas excéder leur taux de renouvellement ;
- Les ressources épuisables doivent être extraites à un taux permettant leur remplacement par des ressources renouvelables ;
- Les émissions de déchets doivent être inférieures à la capacité d'assimilation du milieu.

Nous entrevoyons ainsi, derrière la règle du respect de la capacité d'assimilation du milieu et du taux de renouvellement des ressources renouvelables, l'émergence du concept de "*capital naturel critique*" (CNC). Ce dernier peut être désormais défini comme l'ensemble des ressources environnementales qui, à une échelle géographique donnée, remplit d'importantes fonctions environnementales et pour lesquelles aucun substitut en termes de capital manufacturé ou humain ou même naturel n'existe (Noël & O'Connor [1998]).

Dans cette optique d'intégration de l'économie et de l'écologie, une politique de développement durable implique que le capital naturel critique soit soumis à des

"normes minimales de sauvegarde" (concept développé par, notamment, Ciriacy-Wantrup [1952] ; voir aussi Bishop [1978]). Ces dernières déterminent les seuils d'utilisation du capital naturel critique pour assurer sa permanence. Cette perspective peut conduire à la règle de soutenabilité suivante :

$$\hat{K}_n^c \geq \Omega ,$$

où \hat{K}_n^c désigne une catégorie du capital naturel critique et Ω est le seuil à ne pas franchir.

Deuxièmement, et pour permettre des applications empiriques à portée politique, trois questions par rapport aux normes minimales de sauvegarde devraient être résolues :

- La question de la définition et de la mesure des catégories du capital naturel critique (sur quelle échelle géographique ? Quelles unités d'évaluation ? Quelles perspectives d'agrégation ? etc...);
- L'adéquation (ou non) d'une détermination scientifique (ou d'autre) des normes s'imposant aux composants du capital naturel critique ;
- L'arbitrage entre normes dans le cas de l'impossibilité de respect simultané de tous les seuils critiques.

C'est pourquoi, nous introduisons l'appellation "institutionnelle" pour mettre l'emphase sur la dimension socio-politique des arbitrages face aux défis de la durabilité (ou non) d'un développement. Au cours de ce rapport, nous allons fournir des éléments de réponse à ces questions et chercherons à mettre en pratique le concept de capital naturel critique.

1.2 La structure théorique d'identification du capital naturel critique

Afin de prendre en compte ces difficultés d'identification du capital naturel critique, nous nous sommes appuyés sur la notion de fonction environnementale du capital naturel. Cette démarche s'appuie sur deux points principaux : l'identification des fonctions environnementales du capital naturel et la caractérisation de l'aspect critique des fonctions environnementales du capital naturel.

1.2.1 Les fonctions environnementales et le capital naturel

Selon Hueting [1980] et d'autres travaux développés dans son sillage au sein de l'économie écologique (de Groot [1992]), il est préférable de raisonner non pas seulement en termes d'évolution du capital naturel mais en termes de *fonctions environnementales*. En effet, le concept de fonctions environnementales, allié à celui de la soutenabilité fournit d'une part, une structuration des informations concernant les données environnementales des composants et des processus du capital naturel qui peuvent être classés comme "critique" et d'autre part, une meilleure compréhension de l'importance de ces mêmes composants et processus pour les humains. Il s'avère alors utile de distinguer deux dimensions fondamentales (Faucheux & O'Connor [1999], Ekins & Simon [1999]) :

- ◆ Le *fonctionnement interne* des systèmes propres au capital naturel, terme qui affirme le dynamisme et la structuration propres aux écosystèmes et aux processus physiques en tant que support et composants de la biosphère ; et
- ◆ Les *fonctions fournies* par le capital naturel pour (ou, plus exactement, évaluées du point de vue de) l'activité économique et le bien-être humain.

Dans la première grande catégorie de fonctionnement interne, nous recensons les "fonctions de régulation" (de Groot [1992]) qui assurent la stabilité et la permanence de la biosphère en tant qu'habitat pour l'ensemble des êtres vivants. Dans la deuxième grande catégorie, nous évoquons les divers "rôles" joués par l'environnement biophysique pour l'homme : source d'énergie des matières premières, lieu ou site des activités productives, de transport, de consommation et de récréation, objet d'appréciation scientifique et esthétique, lieu de décharge des déchets, etc.

Cette distinction des fonctions environnementales peut être réalisée au sein des quatre catégories de capital naturel généralement retenues : eau, air/atmosphère, le sol et la terre, les habitats. Pour chaque catégorie de capital naturel, quatre types de fonctions environnementales sont distinguées : les fonctions '*source*' (par exemple, le taux de recharge des aquifères), les fonctions '*puits de carbone et d'énergie*' (dispersion et dilution des émissions atmosphériques pour l'air), les fonctions '*support de vie*' (maintien de la diversité biologique et génétique pour les habitats) et les fonctions '*santé et bien-être humains*' (fourniture d'un espace de culture). Cette classification offre ainsi un ensemble d'informations relatives au rôle joué par le capital naturel tant au niveau des écosystèmes qu'à celui des activités humaines.

La spécification des catégories de fonctions environnementales à protéger et de la façon de définir les règles, les stratégies et les politiques de sauvegarde est une étape importante. La question qui se pose alors porte sur la manière de juger du caractère critique des fonctions environnementales du capital naturel.

1.2.2 L'aspect critique du capital naturel : une structure d'analyse

Dans le cadre de notre recherche, l'aspect *critique* du capital naturel est lié non pas à l'existence de seuils ou de normes pour les composants du capital naturel (capacité de charge, résilience, seuils critiques...), mais bien au rôle des fonctions environnementales dans le processus de soutenabilité. On peut ajouter que l'aspect *critique* du capital naturel est sollicité pour souligner la perte ou le risque de perte de certaines fonctions environnementales, la contingence socio-économique qui résulte de cette perte. Cette dernière remarque implique que la définition du caractère critique des fonctions environnementales du capital naturel est dynamique puisqu'elle peut évoluer au cours du temps suivant les attentes de la population locale.

Pour ce faire, nous reprenons la structure analytique pour l'identification du capital naturel critique développée par Ekins & Simon [1999]. Elle se présente sous la forme suivante :

Tableau 1 : Structure d'identification du Capital Naturel Critique

Niveau 1	Caractéristiques du capital naturel			
	Les composantes et les processus des écosystèmes qui permettent au capital naturel de fournir les fonctions environnementales			
Niveau 2	Quatre types de fonctions environnementales			
	<i>L'environnement comme fournisseur de matières premières</i>	<i>La capacité de l'environnement à réduire les pollutions</i>	<i>L'environnement comme support de vie</i>	<i>La contribution de l'environnement à la santé et au bien-être humains</i>
	Indicateurs de stocks de ressources : stocks de poissons	Indicateurs de la qualité de l'environnement : qualité de l'air	Indicateurs d'état des habitats et des espèces	Indicateurs des effets sur la santé liés à l'environnement, les bénéfices esthétiques et récréationnels
	Lien entre les comptes nationaux et les fonctions environnementales : l'idée est de montrer que les activités économiques affectent les fonctions environnementales			
	Indicateurs de pression : consommation d'eau par l'agriculture	Indicateurs de pression : émissions de CO ₂ par les transports	Indicateurs de pression sur l'habitat et les espèces	Indicateurs de pression : problèmes de santé liés à la pollution
Niveau 3	soutenabilité : seuils de sauvegarde... relatifs aux indicateurs de pression et d'état			
	Normes de soutenabilité	Normes de soutenabilité	Normes de soutenabilité	Normes de soutenabilité
	Comparaison entre les indicateurs de pression et d'état : identification de "l'écart de durabilité" nécessité pour les politiques environnementales			
Niveau 4	Analyse socio-économique (analyses multicritères) comme support à la décision			

Cette structure d'analyse se compose en différents niveaux. Le premier niveau consiste en la classification des caractéristiques de chaque type de capital naturel. Ce sont les caractéristiques du capital naturel qui fournissent les fonctions environnementales (adapté de la classification réalisée par de Groot [1992]). Présentés dans le niveau 2, les fonctions environnementales sont divisées en quatre catégories : les fonctions 'source', les fonctions 'puits', les fonctions 'support de vie' (pour les écosystèmes) et les fonctions de 'santé et de bien-être humains'. Nous sommes conscients cependant que cette classification omet de montrer les liens d'appartenance des fonctions environnementales à plusieurs de ces catégories. Cela dit, ce niveau d'analyse permet de distinguer deux effets directs des activités humaines sur l'environnement :

- le problème de l'épuisement des ressources naturelles,
- le problème des rejets polluants dans le milieu naturel.

Ainsi, l'épuisement des ressources réduit-il le stock de capital naturel, tout en fragilisant la capacité de l'environnement de réduire les pollutions. Les incidences concernent les fonctions de support de vie des écosystèmes, la santé et le bien-être humain.

Le niveau 3 introduit le concept de soutenabilité, défini comme le maintien des fonctions environnementales importantes. Les normes de soutenabilité sont comparées aux indicateurs de pression et d'état de la situation considérée, amenant à l'identification d'un écart de soutenabilité exprimé en termes physiques (Ekins & Simon [1999], p.6). En d'autres termes, il s'agit de la distance physique entre la situation observée et une situation qui traduirait une forme de soutenabilité environnementale. La réduction de cet écart peut être considérée comme un objectif de politique publique.

Le quatrième niveau est relatif aux processus et aux outils de prise de décision (analyse multicritères). Ce cadre d'identification permet non seulement de mettre en pratique la notion de capital naturel critique mais aussi d'orienter les politiques environnementales nécessaires à son maintien. C'est en cela qu'il convient désormais de procéder à la quantification non pas du capital naturel critique même, mais des coûts d'opportunité économiques associés au respect de telle ou telle norme (ou seuil) de soutenabilité. Cette quantification prend forme dans une modélisation appliquée spécifique, le modèle M3ED.

Section 2 La mesure du capital naturel critique par le modèle structurel de simulation M3ED¹

Le modèle M3ED appartient à la catégorie des modèles structurels de simulation économie/environnement. Incorporant le concept de soutenabilité au "sens fort", il vise avant tout à mesurer le potentiel de croissance d'une économie sous des contraintes d'utilisation des capitaux technique et naturel, tout en recherchant les effets contre-intuitifs initiés par l'application de diverses politiques. On doit souligner, de ce point de vue, que la construction proposée n'est pas un modèle de comportement, mais un modèle de conditions limites devant indiquer les impacts physiques futurs de tel ou tel scénario. Souhaitant éclairer l'apport que constitue ce modèle à l'économie de l'environnement, nous nous proposons, dans un premier temps, de présenter ses propriétés. Dans un second temps, nous soulignons les modalités de traitement de l'exigence de soutenabilité et des conditions économiques de faisabilité, lesquelles s'inscrivent dans la mesure du capital naturel critique. Enfin, à titre d'illustration, nous appliquons une analyse coût-efficacité en regard de certaines options stratégiques adoptées pour répondre aux exigences de Kyoto quant aux émissions de carbone.

2.1 Les propriétés du modèle M3ED

Le modèle M3ED est un modèle de simulation de l'économie française, mettant en exergue les relations entre le secteur énergétique, les autres secteurs d'activité et la demande finale. Il repose sur une représentation de type entrée-sortie. Il comprend des émissions de polluants ainsi que certaines activités de contrôle des pollutions. Il distingue également la capacité productive désirée et la capacité productive effective. Une caractéristique essentielle du modèle réside dans la définition des secteurs d'activité. Une partition est proposée entre les activités qui interagissent directement avec l'environnement naturel : l'agriculture, le secteur énergétique, les activités de traitement des pollutions, et les autres activités : l'industrie, les services, les transports, les ménages.

2.1.1 Le contenu analytique du modèle

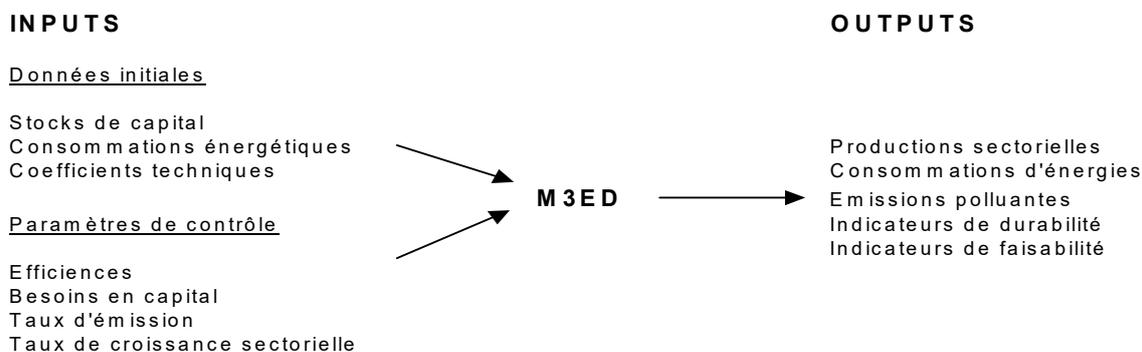
Après avoir posé les données initiales et les paramètres de contrôle, le modèle calcule neuf algorithmes, lesquels constituent les principaux outputs. Tout d'abord, les données en capital : le stock de capital évalué en francs constants, le stock de capital évalué en énergie fossile contenue, le stock additionnel de capital ajusté. Ensuite, viennent les données relatives à la production, laquelle est mesurée en francs constants et en énergies fossiles contenues. A celles-là, s'ajoutent les flux d'échange intersectoriels : les coefficients techniques et les taux de croissance sectorielle requis².

¹ Un extrait de cette section fut présentée lors des journées de l'AFSE sur "Economie de l'environnement et des ressources naturelles" (Toulouse, les 11 et 12 mai 1998).

² Nous ajoutons que les coefficients techniques n'évoluent pas, de manière mécanique, en réponse à une modification endogène ou exogène des prix, comme cela est souvent le cas dans

C'est par ce biais que l'on greffe une 'teneur dynamique' au tableau entrée- sortie. Le modèle fournira alors la réallocation sectorielle du produit global. Enfin, le taux de croissance de l'économie et le niveau induit de productivité sont calculés (Ryan, [1996]).

Figure 2. Structure informationnelle du modèle de simulation M3ED



La structure informationnelle demeure indissociable de la technique de modélisation employée. Le modèle M3ED repose sur une technique de modélisation dite structurelle, laquelle prend appui sur la dynamique des systèmes. De manière générale, en modélisation, le concept de structure invite à expliquer l'allure d'une tendance déduite d'un ensemble donné de conditions. C'est cet ensemble, s'il demeure invariant au cours du temps, qui révèle la structure du modèle et les conséquences de toute mutation. Si bien que ce concept peut intervenir dans toute construction formelle dont l'objet est de lier des causes supposées à des effets induits. La procédure de validation de la structure consiste alors à estimer la configuration paramétrique qui la caractérise. Si la procédure se révèle satisfaisante, des prédictions sont alors réalisées sur les principales variables dépendantes du modèle. Présentée de la sorte, la structure ne semble pas affectée par le mouvement de ces variables. De sorte que les dotations initiales, les relations techniques et autres fonctions de préférences sont maintenues inchangées durant l'analyse.

Dans ce cadre, la structure prend substance d'après les relations entre des variables observables. Les modèles qui reposent sur cette définition appartiennent à deux méthodologies différentes. D'une part, la méthodologie de type top-down, dans laquelle nous recensons les modèles macro-énergétiques et les modèles d'équilibre général calculable. Les premiers visent à mesurer les impacts de court-moyen termes de la croissance économique et des politiques d'environnement sur les consommations énergétiques. Les seconds sont utilisés pour évaluer l'importance du secteur énergétique dans le système économique. Ils interprètent les implications écologiques à long terme des interactions sectorielles en termes d'efficacité économique et d'incidences redistributives. D'autre part, la méthodologie de type bottom-up, dans laquelle nous relevons les modèles statiques de substitution de technologies et les

les modèles d'équilibre général calculable. Dans le présent modèle, les coefficients techniques témoignent d'une certaine 'rigidité' structurelle. Ils ne sauraient répondre aux seuls effets prix et revenu, ni se 'soumettre' à la contrainte des marchés parfaits.

modèles d'usages des énergies. Les premiers consistent à définir la chaîne de production des énergies sur laquelle on applique un panel de technologies alternatives efficaces (en termes énergétiques). Les seconds sont destinés à localiser les changements de consommation d'énergies consécutifs à des améliorations technologiques dans le secteur énergétique.

La modélisation structurelle propose une conception quelque peu différente du concept de structure. Ce dernier renvoie fondamentalement aux relations mutuelles qui associent les éléments d'un ensemble donné, tel l'économie, et à leur évolution dans le temps. Pareilles relations sont indissociables de la structure ; elles interviennent pour préciser le statut de chacune des variables dépendantes au regard de l'enchaînement causal qui les associe. Dans ce cadre, la procédure de validation porte davantage sur la configuration relationnelle, (beaucoup moins sur la configuration paramétrique), du modèle³. Toute approche structurelle se doit alors de définir les variables à considérer, ainsi que leurs liens mutuels. Procédant de la sorte, la structure prend forme d'après les relations entre des variables auxquelles on assigne désormais un comportement, une activité ou une fonction. Dans le modèle proposé, cette approche conduit à une représentation à la fois modulaire et matricielle de l'économie.

Par une clarification précise du statut des activités considérées et des flux d'échange entre elles, nous soulignons ainsi le lien entre le rythme d'activité d'un secteur et ses besoins directs et indirects (à travers ses consommations intermédiaires) en ressources énergétiques. Il est clair que l'évolution des coefficients techniques devient ici déterminante, puisqu'elle trace en quelque sorte le contenu énergétique du sentier de croissance économique. Si le secteur moteur de l'économie est peu intensif en énergies comparativement aux autres, si le secteur consomme des biens intermédiaires à faible contenu en ressources, le sentier de croissance économique sera relativement moins intensif en énergies. Dans cette perspective, les incidences sur la consommation globale d'énergies sont généralement davantage prononcées en raison des besoins induits. Au bilan, la structure évoque le 'contenu' en ressources primaires et en carbone du sentier d'évolution de l'économie considérée.

La modélisation structurelle induit également une spécification particulière de l'enchaînement temporel des effets et des causes. Elle excède notamment la dichotomie traditionnelle entre le cycle de court-moyen terme consécutif aux problèmes de coordinations et la croissance de long terme libérée de toute forme d'interférence marchande⁴. Lorsque l'on évoque les fondements biophysiques de l'activité économique, l'articulation des temporalités ne saurait être écartée. Elle intervient dans le traitement explicite des non-linéarités endogènes, par référence aux travaux pionniers de Schumpeter au plan théorique et de Goodwin au plan de la formalisation⁵. La propriété première de ces non-linéarités, généralement déduite du

³C'est en cela que la procédure communément sollicitée pour valider ce type de modèle n'est autre que le filtre de Kalman.

⁴Il est intéressant de noter que les 'nouvelles théories' de la croissance endogène qui ont émergé dans le courant des années quatre-vingt procèdent aussi, dans une certaine mesure, à la fusion logique entre la tendance longue et le cycle. A titre d'exemple, il convient de citer les contributions de Aghion et Howitt [1998], Azariadis et Drazen [1990], d'Autume et Michel [1993].

⁵Le modèle précurseur du cycle limite proposé par Goodwin voici de cela trente ans, connaît

choix des conditions initiales, n'est autre que l'ouverture du cadre analytique à la multiplicité des solutions envisageables et à la bifurcation non anticipée d'une solution à l'autre. L'approche structurelle ouvre ainsi la voie à une forme de dynamique tournée vers le futur qui révèle en cela un caractère hautement 'complexe' (Day, [1994] ; Michel et Wigniolle, [1993]). De fait, parallèlement au problème du contenu du sentier d'évolution, la structure évoque désormais celui de sa mise en œuvre, ainsi que la nécessité logique d'analyser le passage d'un sentier à un autre. Cette démarche est importante lorsque l'on souhaite isoler les conséquences éventuelles de mutations opérées dans l'environnement des agents économiques et dans l'orientation de la politique économique. Dans cette perspective, le temps apparaît comme une condition nécessaire, mais non suffisante, de l'évolution. D'autres éléments relatifs à la nature du système de production, des comportements de consommation et du cadre institutionnel interviennent, lesquels déterminent le caractère plus ou moins durable de la croissance économique.

La question de la dynamique invite à poser la question du fondement théorique des décisions individuelles. Une théorie particulière de la cohérence intertemporelle des choix est alors nécessaire pour légitimer le passage aux conduites macroscopiques des systèmes dotés de rétroaction positive ou négative. La *rétroaction* traduit le fait que le comportement individuel dépend de certaines forces qui ne sont pas incorporées dans la vision que le sujet perçoit de son propre entourage. Ces forces influencent l'individu à travers des règles de conduite qui lui permettront de prendre des décisions dans l'avenir. Ces mêmes forces modifient les objectifs qui sont élaborés par référence aux agissements passés. Elles limitent, par la même occasion, les possibilités de changement du comportement courant.

Cette représentation originale de la prise de décision en incertitude témoigne de la nécessité de définir la rationalité économique non pas sous l'angle de l'omniscience, mais au contraire, sous l'angle de la faillibilité⁶. Il est significatif de noter ici que l'incertitude ne porte pas seulement sur l'obtention future d'un état prédéterminé, mais également sur l'ensemble des états réalisables⁷. Il vient alors que le comportement des agents économiques repose sur la myopie séquentielle, laquelle consiste à décomposer des problèmes de décision complexes en une chaîne de séquences locales qui sont modifiées, sur la base des règles de conduite et des changements survenus dans l'environnement même du décideur, par un mécanisme de rétroaction (Day et Cigno, [1978]). De surcroît, la présence des non-linéarités autorise une désobéissance éventuelle quant à la réalisation des plans des agents au cours du temps (Strotz, [1955]). En d'autres termes, la prise de décision suppose que l'incertitude déplace la

aujourd'hui un engouement renouvelé. Nous pensons notamment aux constructions de Silverberg et Lehnert [1994], Schembri [1997].

⁶Nous rejoignons ainsi les travaux de Simon qui préfère assimiler l'acte du choix à un ensemble de procédures et objectifs à satisfaire, (la rationalité dite procédurale), plutôt qu'au caractère optimal d'un enchaînement particulier d'actions, (la rationalité dite substantielle).

⁷Cette conception élargie de l'incertitude revêt une importance considérable lorsque l'on aborde les problèmes d'environnement (Faucheux et Froger, [1995] ; Froger et Zyla, [1998]). Elle a donné lieu à l'élaboration de modèles de prise de décision qui reposent sur le principe 'Simonien' de la satisfaction. Nous pensons notamment à l'analyse multicritère et à la théorie des ensembles flous appliquées au développement durable (Faucheux, Froger et Munda, [1994]).

date présente⁸. Si l'on considère que les plans économiques peuvent être révisés afin d'intégrer l'évolution de la connaissance, nous devons admettre que les conditions initiales et autres paramètres de contrôle varient au cours du temps. De période en période, des plans économiques sont alors élaborés sur la base d'informations nouvelles, et ceux qui portaient jusqu'alors sur le futur sont écartés en faveur d'une conception renouvelée du choix. En fait, la modélisation structurelle décrit un processus de prise de décision qui évolue au cours du temps, la séquence temporelle se substituant ainsi à la simple distance temporelle. Elle se traduit par l'élaboration de modèles multipériodiques récursifs, sur le très long terme, les plans prévus pour la période t , pouvant être modifiés, par voies de scénarios alternatifs qui témoignent d'un afflux d'informations nouvelles, à la période $t+1$ (Day, [1994]).

Au bilan, les modèles d'aide à la décision, à l'image du modèle M3ED, qui reposent sur la myopie séquentielle, nient par leur construction l'existence même d'un système complet de "marchés". En revanche, ils suggèrent un mode adaptatif de prise de décision et, par suite, de formation des anticipations. En effet, le poids de l'Histoire conditionne la décision présente, qui n'est autre que la substance des contingences à venir. La prise de décision en incertitude s'opère donc principalement sur un mode récursif⁹.

2.1.2 La technologie de production et les flux d'échange intersectoriel

Par secteur d'activité, les conditions initiales concernent le stock de capital, la demande en ressources et les flux d'échanges intersectoriels. Ces flux sont évalués d'après un tableau entrée-sortie¹⁰. Ils désignent la structure de l'économie. Les conditions initiales concernent aussi les paramètres de contrôle : les efficacités énergétiques, les besoins en capital, les flux de polluants et les taux de croissance sectorielle. Il est important de souligner que la configuration paramétrique du modèle autorise des divergences significatives entre les secteurs d'activité. Ces divergences portent sur les intensités factorielles et énergétiques.

Le modèle prend appui sur une approche modulaire. Cette approche fournit un cadre théorique pour analyser la relation entre la structure économique et les diverses formes d'engagement économique. La structure économique est définie en termes de secteurs qui s'échangent leur produit et sustentent la demande finale. Dans le modèle, la structure économique recense six grands secteurs d'activité : l'industrie (IND), les services (SER), le transport (TRA), l'agriculture (AGR), l'électricité (E) et les énergies thermiques (T). Les engagements économiques, pour leur part, évoquent les activités de production et de consommation, la formation du capital, les échanges extérieurs et

⁸Pareille approche dénature en cela les modèles de décision par le taux d'actualisation, lequel exprime cette propension naturelle, inexplicée, pour le présent.

⁹ Pour une synthèse des travaux portant sur les modèles de programmation récursive, voir Day et Cigno [1978]. Au plan général, Gaffard [1994] souligne que ce type d'approche met l'accent sur les complémentarités intertemporelles ; les complémentarités qui scellent la relation entre des événements qui se produisent à des périodes différentes. L'auteur ajoute que la nature irréversible de la décision s'exprime par la fossilisation des erreurs passées dans le comportement des agents économiques ainsi que dans les principales variables de l'activité économique.

¹⁰On suppose que le flux de biens (i) destiné au secteur (j) progresse au taux de croissance de ce secteur.

les actions de l'Etat. Ces engagements sont spécifiés, pour une part, de manière exogène en regard des taux de croissance qui leur sont appliqués, pour l'autre, de manière endogène en regard des contraintes structurelles qui leur sont imposées. Par référence au tableau entrée-sortie, les flux d'échanges intersectoriels sont évalués en unité monétaire (francs constants 1980) et en énergie contenue (GJ). Le compte central repose sur les données relatives à l'année 1985 et les contraintes structurelles demeurent inscrites dans la relation technique sectorielle :

$$Q_i(t) = \min \left\{ \frac{Q_{ji}(t)}{a_{ji}(t)} ; \frac{Z_i(t)}{a_{zi}(t)} ; \frac{K_i(t)}{v_i(t)} ; \frac{L_i(t)}{b_i(t)} ; \frac{M_i(t)}{m_i(t)} \right\} \text{ avec } i, j \in \text{ind, ser, agr, tra}$$

et $Z \in E, T$.

$$L_i(t) = \frac{Q_i(t)}{q_i(t)} \text{ avec } q_i(t) = \frac{1}{b_i(t)}, \text{ supposant que } G_i(t) = 0 \text{ et } \dot{q}(t) = \frac{dq(t)}{dt} ;$$

$$\dot{M}_i(t) = M_i(t) \cdot g_i(t) ;$$

$$\dot{X}_i(t) = X_i(t) \cdot g_x(t) ;$$

$Q_i(t)$ désigne le produit brut du secteur (i) ; $Q_{ji}(t)$ exprime la quantité du bien (j) consommé par le secteur (i) ; $K_i(t)$ le stock de capital utilisé dans le secteur (i) ; $Z_i(t)$ la consommation directe d'énergie finale par le secteur (i) ; $L_i(t)$ le nombre de travailleurs employés dans ce même secteur ; $M_i(t)$ la consommation de biens importés par le secteur ; $a_{ji}(t)$, $a_{zi}(t)$, $b_i(t)$, $m_i(t)$ les coefficients techniques et $g_x(t)$, g_F les taux de croissance des demandes finales respectivement domestique et extérieure.

Pour chaque secteur d'activité, la technologie de production est représentée par une relation technique à facteurs complémentaires de type Leontief. Nous convenons en cela que la structure productive est identique pour tous les secteurs. De surcroît, pareille forme implique l'absence d'élasticité de substitution ou encore la rigidité des coefficients techniques¹¹. De fait, le produit global de l'économie est principalement contraint par la disponibilité en capital. Pareille contrainte nous permettra, néanmoins, de souligner le coût de viabilité d'un sentier de croissance écologiquement durable.

¹¹Nous rejoignons en cela l'impression et les résultats de Walfridsson [1987] selon lesquels le capital et l'énergie sont des compléments plutôt que des substituts dans bon nombre de secteurs. De même, les élasticités de substitution sectorielles estimées entre le capital et le travail sont bien inférieures à un.

Tableau 2. Flux d'échanges intersectoriels

	IND	TRA	E	T	SER	AGR	Demande domestique finale
IND	0.2167	0.0045	0.0071	0.0018	0.0791	0.0218	0.5045
TRA	0.2233	0.0546	0.015	0.005	0.3276		0.2567
E	0.3641	0.0361	0.1297	0.0324	0.1367	0.0092	0.2603
T	0.2748	0.0681	0.1576	0.0394	0.0791	0.0247	0.3563
SER	0.1215	0.0126	0.0109	0.002	0.1082	0.0095	0.7010
AGR	0.5277		0.0003		0.0363	0.1233	0.1455

Coefficients techniques de l'année 1985, tableau entrées - sorties en francs constants 1980 (INSEE, [1990])

Tous les inputs d'un secteur sont divisés par le montant total de l'output de ce même secteur de manière à définir le vecteur colonne des coefficients techniques¹². Ces derniers représentent la technologie en vigueur. Pareille observation est une caractéristique particulière de l'analyse input-output, soulignant en cela que toute production sectorielle est ramenée à une combinaison de consommations intermédiaires révélatrice d'un ensemble technologique donné. Procédant de la sorte, l'analyse input-output permet de rendre intelligible la production sectorielle d'après ses liens avec d'autres aspects de l'activité humaine, telles ses incidences sur l'environnement naturel.

Pour chaque type d'activité, les flux d'importation et d'exportation sont pris en compte. La grandeur initiale de ces flux est déduite du tableau entrée-sortie¹³. Par défaut, nous supposons que le rythme de croissance des importations suive le taux de croissance du secteur approvisionné. En outre, le taux de croissance des exportations intervient comme un paramètre de contrôle. La mesure énergétique de ces flux externes est également supposée correspondre aux intensités énergétiques de l'économie nationale.

La consommation d'énergie primaire recense les usages par secteur d'activité et par source d'énergie. Elle distingue par ailleurs la contribution des énergies renouvelables et de la branche électricité dans la consommation globale de l'économie.

Toute production sectorielle est mesurée d'après le montant d'énergie qu'il a fallu mobiliser pour la réaliser. Il vient alors que tous les intrants à la production sectorielle doivent être considérés. Parmi ces intrants, nous notons que les consommations énergétiques directes sont pondérées par un facteur d'efficience

¹² Nous admettons que la production sectorielle est supposée homogène. En d'autres termes, un secteur d'activité ne saurait produire qu'un seul bien caractéristique. Cette hypothèse permet toutefois d'introduire une fusion analytique entre le secteur et le résultat de son activité.

¹³ Pour chaque secteur d'activité, la part du produit destinée à la demande extérieure n'est autre que la différence entre celle allouée à l'économie domestique, laquelle est décrite dans le tableau, et la part restante. La demande extérieure n'apparaît pas dans le tableau dans la mesure où sa composition et son évolution interviennent comme des paramètres de contrôle dans les simulations qui seront opérées.

énergétique, lequel mesure la quantité (indirecte) d'énergie qu'il a fallu consommer pour rendre disponible l'énergie. Pareil facteur mesure en fait l'efficacité technique du secteur énergétique ; il diffère selon que l'on considère les énergies thermiques ou l'électricité.

Tout comme les autres secteurs d'activité, le secteur énergétique est évalué en volume (intensité énergétique constante) et en intensité énergétique courante. L'investissement dans ce secteur est commandé par l'évolution de la demande globale en ressources énergétiques. A cet égard, on suppose que les consommations énergétiques directes du secteur énergie dépendent étroitement de l'usage cumulé de ladite ressource. En d'autres termes, si le rythme de l'activité économique s'accélère, les besoins énergétiques et les coûts d'accès aux diverses formes d'énergie s'alourdissent.

Une attention toute particulière est adressée à la production d'électricité. Le module correspondant comprend la production thermique (T), la production par des sources renouvelables (REN) et la production nucléaire (NUC). La consommation d'énergies thermiques nécessaire à la production d'électricité s'écrit :

$$T_E(t) = E_T(t).a_{TE}(0) ,$$

$E_T(t)$ désigne la production d'électricité d'origine thermique et $a_{TE}(0)$ la quantité d'énergie thermique requise pour produire une unité d'électricité pour l'année initiale. De ce fait, la production d'électricité d'origine thermique prend la forme suivante :

$$E_T(t) = \bar{E}(t).\lambda_1 ,$$

$\lambda > 0$, est un facteur de charge et $E_T^*(t)$ la capacité thermique exprimée en megawatts. Celle-ci progresse au cours du temps selon l'expression :

$$\dot{\bar{E}}_T(t) = \left(\frac{E^{cons}(t)}{\Lambda(t)} + S \right) - \bar{E}(t) ;$$

$$\bar{E}(t) = \bar{E}_T(t) + \bar{E}_{ren}(t) + \bar{E}_{nuc}(t) ;$$

$$E^{cons}(t) = \sum_i E(t).a_{Ei}(t) + E(t).c_E(t) ;$$

$$\Lambda(t) = \frac{\bar{E}_T(t)}{\bar{E}(t)} \lambda_1 + \frac{\bar{E}_{ren}(t)}{\bar{E}(t)} \lambda_2 + \frac{\bar{E}_{nuc}(t)}{\bar{E}(t)} \lambda_3 ,$$

$\bar{E}(t)$ représente la capacité productive totale exprimée en MW ; $E^{cons}(t)$ la consommation d'électricité dans tous les secteurs d'activité ; $E(t)c_E(t)$ n'est autre que la consommation des ménages en électricité ; Λ le facteur de charge global et S le facteur de sûreté en MW. Nous supposons que les capacités productives d'origine nucléaire et renouvelable demeurent constantes au cours du temps. Pareilles variables son en fait traitées comme des paramètres de contrôle sollicitées pour l'élaboration de scénarios alternatifs. Au bilan, utilisant la même méthode de calcul pour les autres sources de la production

d'électricité, nous pouvons simuler la production totale d'électricité :

$$E(t) = E_T(t) + E_{nuc}(t) + E_{ren}(t).$$

De surcroît, la France est demeurée jusqu'alors un producteur net d'électricité. Si bien que la part déduite de la consommation domestique est exportée :

$$X_E(t) = E(t) - E^{cons}(t).$$

Tableau 3. Caractéristiques structurelles de la branche électricité

	Electricité nucléaire	Electri cité thermi que	Electri cité renouv elable
Facteur de charge (λ)	0.579	0.178	0.332
Capacité (MW 1985)	42000	32300	21800
Intensité capitalistique ¹⁴ (GJ/MW 1985)	10.57	3.383	5.953

(EUROSTAT, [1991])

Les consommations d'énergies de la branche électricité concerne à la fois l'évolution des parcs de production et celle de l'exploitation des parcs, laquelle tient compte de la demande finale d'électricité et du facteur de charge associé, ainsi que du contenu énergétique des divers équipements disponibles (Ryan, [1996]). La branche thermique du secteur énergétique dépend pour sa part des conditions externes à l'économie nationale puisque les ressources primaires correspondantes sont principalement importées. Dans cette branche, les besoins en capital ont trait aux activités de raffinage. La demande totale d'énergies thermiques intervient comme suit dans le modèle :

$$TH^{cons}(t) = \sum_i TH(t). \tau_{th}. a_{th}(t) + TH(t). c_{th}(t) \text{ avec } TH \in T, REN ;$$

$$TH^{cons}(t) = M_{th}(t).$$

$TH^{cons}(t)$ exprime la consommation d'énergie thermique dans les différents secteurs d'activité ; $TH(t).c_{th}(t)$ la consommation des ménages ; $M_{th}(t)$ le montant de ressources thermiques importées ; τ_{th} la fraction de la demande qui concerne le gaz, le pétrole, le charbon ou des sources renouvelables.

¹⁴ Pour chaque branche, l'intensité capitalistique mesure ici le stock de capital rapporté à la capacité productive.

2.1.3 Population et modes de vie

Le module, 'population' se décompose en trois groupes d'âge : en dessous de 35 ans ; 35-60 ans ; au-dessus de 60 ans. Ces groupes d'âge figurent des styles de vie et des caractéristiques fortement contrastés. Les données nécessaires à la construction de ce module sont les taux de natalité et de mortalité¹⁵. Le modèle décrit l'évolution en fonction du temps du nombre de personnes de chaque groupe d'âge :

$$\dot{N}_y(t) = N_y(t)(n_y - d_y) + N_{ma}(t).n_{ma} - s_y(t) , \text{ avec } y \in < 35 \text{ ans,}$$

$$s_y(t) = a_y.N_y(t) \text{ et } 0 < a_y < 1,$$

$$\dot{N}_{ma}(t) = s_y(t) - s_{ma}(t) - N_{ma}(t).d_{ma} , \text{ avec } ma \in 35-60 \text{ ans,}$$

$$\dot{N}_o(t) = s_{ma}(t) - N_o(t).d_o, \text{ avec } o \in > 60 \text{ ans ,}$$

$$N(t) = N_y(t) + N_{ma}(t) + N_o(t) ,$$

$$L(t) = (1 - u)\alpha N(t)$$

n_y exprime le taux de natalité de la jeune génération et d_y le taux de mortalité de cette même génération ; u désigne le taux de chômage ; α la part de la population totale qui est considérée active ; a_y la proportion de la jeune génération qui devient adulte. Des changements d'hypothèses concernant la dynamique de la population peuvent être opérés pour voir dans quelle mesure des tendances démographiques différentes affecteraient la demande de biens, et, à partir de là, au travers des méthodes de production et les comportements de consommation, les émissions de l'économie tout entière.

Partant du module population, des hypothèses sur la structure des ménages sont proposées. Les types de ménages retenus sont les suivants : mono-individu, couples, familles, familles monoparentales (Fauchaux et O'Connor, [1996]). Les catégories de ménages se déclinent d'après l'âge du chef de famille, selon les trois classes d'âge utilisées dans le module population. Cela donne dix catégories de ménages. Ces dix catégories permettent d'améliorer l'intelligibilité des changements de style de vie au cours du temps. Elles sont également sollicitées en tant que paramètre de contrôle. Les caractéristiques de consommation sont bien connues et on peut penser qu'elles sont significativement différentes selon les types de ménages retenus ici. Le modèle produit alors le nombre de ménages de chaque type. Par ailleurs, le modèle calcule le niveau de vie matériel par tête :

$$W(t) = \left[\sum_j \sum_i a_{ji}(t)Q_i(t) + \sum_i Q_i(t)c_i(t) + \sum_i x_i(t)Q_i(t) + \sum_i \delta_i K_i(t) \right] N(t)^{-1} ,$$

¹⁵ Le module a fait l'objet d'une extension incorporant les taux d'immigration et d'émigration (Fauchaux et O'Connor, [1996]).

$c_i(t)$ exprime la part du produit global qui est allouée à la consommation des ménages. $N(t)$ désigne la population totale à l'instant t ; $x_j(t)$ représente les exportations du secteur (j). Lorsque cette mesure est calculée en intensités énergétiques, elle consiste à préciser le contenu en ressources énergétiques et en carbone des biens destinés à la consommation finale. C'est en cela que le modèle souligne le rôle des comportements de consommation dans la détermination d'un sentier de croissance écologiquement durable.

2.2. Les conditions limites de faisabilité de développement soutenable

Par le truchement de l'analyse énergétique, le modèle propose une représentation précise des besoins (directs et indirects) en énergies de la production économique¹⁶. La décomposition des flux économiques qu'elle suscite, renvoie ici à l'interdépendance entre la ressource énergie et les autres facteurs de production, ainsi qu'aux échanges intersectoriels. Sollicitant de la sorte l'analyse énergétique, nous proposons de mesurer une part du contenu écologique d'un sentier de croissance économique. Par ailleurs, le bouclage macro-économique du modèle nous permet de localiser les contraintes d'interdépendances sectorielle et temporelle, lesquelles témoignent des conditions de viabilité économiques associées à la mise en œuvre d'une technologie nouvelle, d'une activité de dépollution ou de mesures redistributives visant à privilégier les activités moins intensives en capital naturel.

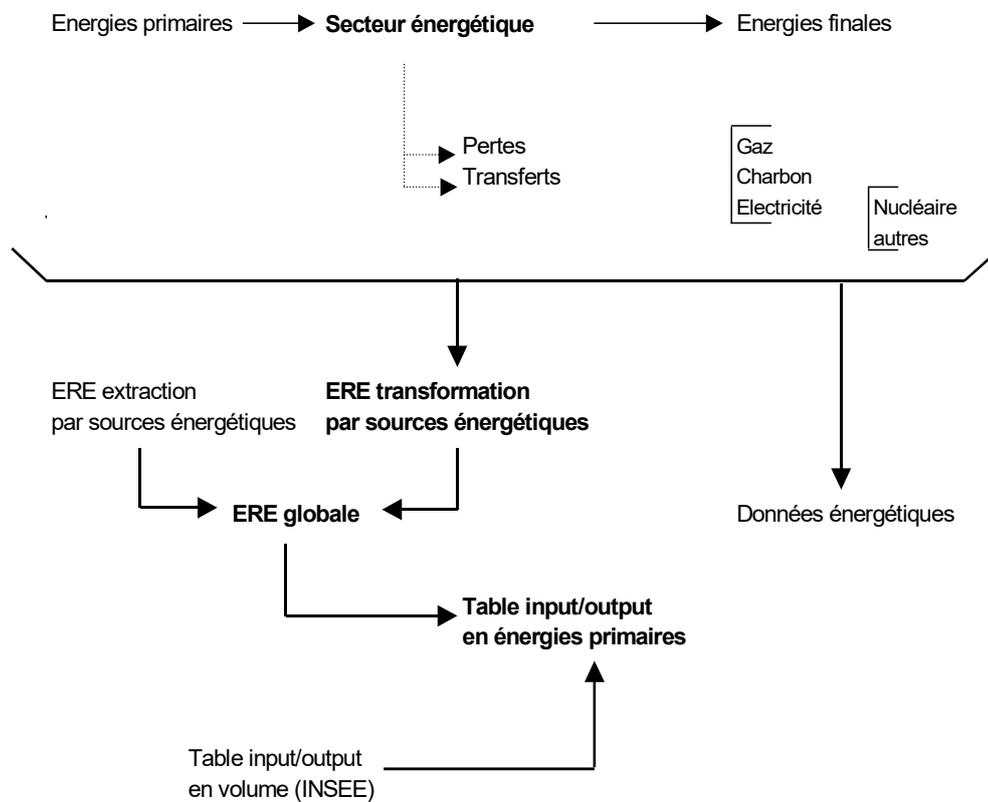
2.2.1 La soutenabilité écologique par la mesure des intensités énergétiques

Estimant les consommations directe et indirecte en énergies, la notion même de besoin excède celle traditionnelle de facteur de production et incite à considérer la consommation en énergies du secteur énergétique. En effet, par une représentation concrète de la composition des biens économiques, les conséquences sectorielles induites par un changement de cette composition peuvent être évoquées. Cette représentation nécessite toutefois que l'on distingue la ressource selon les usages qu'on en fait. Ainsi, et par référence à la dissociation traditionnelle entre la consommation intermédiaire et la consommation finale, est-il nécessaire de dissocier la ressource en transformation dans le processus de production et la ressource allouée à l'usage final. Par ailleurs, les ressources qui sont le résultat d'un mécanisme de production – les ressources dites secondaires – doivent être distinguées des ressources primaires, lesquelles sont extraites du milieu naturel. Là encore, cette distinction est analogue à celle en vigueur dans toute analyse input-output entre les inputs primaires et les inputs secondaires.

Enfin, si nous considérons désormais la nature des interactions entre les secteurs d'activité, nous observons que celles-ci sont fondamentalement 'unirelationnelles' dans la mesure où elles ne contiennent que la dimension énergétique des échanges intersectoriels. Cela dit, pareille nature revêt également un caractère 'bi-dimensionnel' puisque ces échanges participent de la combinaison entre des comportements meso-économiques et des phénomènes macro-économiques (Méral, Schembri et Zyla, [1994]). Au bilan, l'analyse énergétique permet de poser la question essentielle du potentiel de croissance dans un contexte où l'offre en ressources énergétiques est limitée, soit pour des raisons purement technologiques, soit pour des raisons écologiques (figure 3) :

¹⁶ Il s'agit d'une mesure - déduite du modèle - de ce que l'on appelle "énergie incorporée". Cela dit, le modèle M3ED demeure une construction structurelle dont l'essentiel repose sur des hypothèses quant à la structure du système étudié, en aucun cas sur le choix du numéraire.

Figure 3 : Calcul des intensités énergétiques dans le modèle M3ED



Pour mener à bien pareille analyse, nous utilisons le tableau entrée-sortie de l'économie française évalué monétairement. Pour permettre le passage à la mesure énergétique, nous devons tout d'abord calculer l'intensité cumulée en énergies primaires, laquelle décrit le besoin total en énergies primaires d'une unité monétaire de produit destiné à la consommation finale. En d'autres termes, un secteur d'activité, pour produire, doit consommer à la fois de l'énergie et des biens provenant des autres secteurs ou importés. Chaque secteur d'activité est caractérisé par des intensités énergétiques différentes, lesquelles mesurent les besoins direct et indirect en énergies pour produire une unité d'output. Si nous multiplions une ligne du tableau entrée-sortie par l'intensité énergétique cumulée du secteur d'activité qui en est l'origine, nous obtenons les flux énergétiques associés aux échanges intersectoriels. Par conséquent, l'objet principal de cette analyse énergétique consiste à évaluer les besoins totaux en ressources énergétiques primaires de l'activité économique de production. Dans le modèle, les consommations directe et indirecte en énergies résulte de la matrice inverse multipliée par le vecteur des intensités énergétiques primaires :

$$Z_i^P(t) = \beta(t)\mu_z(t)a_{zi}(t) \quad \text{avec} \quad \mu_z(t) = \phi_z(t).e_z \quad \text{et} \quad \beta(t) = \frac{K_i(t)}{K_i(0)} ;$$

$Z_i^P(t)$ désigne la quantité d'énergie primaire de type z consommée par le secteur d'activité i . Nous notons que μ désigne, pour chacune des sources énergétiques, les besoins directs et indirects en ressources primaires. Pour sa part, ϕ_z exprime les besoins

cumulés en énergies primaires nécessaires pour produire une unité d'énergie finale. Dans le modèle, ce ratio est pondéré par un paramètre d'efficacité, e_z . De cette relation, nous déduisons l'intensité sectorielle directe en énergie primaire :

$$dir_i(t) = Z_i^P(t) Q_i^{-1}(t),$$

Il vient alors que l'intensité cumulée apparaît comme suit :

$$cum_i(t) = dir_i(t)[I - A]^{-1}.$$

Si l'on multiplie chaque ligne du tableau entrée-sortie par l'intensité énergétique cumulée du secteur d'activité, on obtient les énergies incorporées dans les flux d'échange intersectoriels. La matrice inverse qui permet ainsi de définir l'intensité cumulée pour chacun des secteurs, constitue une propriété toute particulière de l'analyse input-output. En effet, elle révèle les incidences implicites de telle ou telle activité, ou encore le contenu énergétique des inputs qui entrent dans la production des biens intermédiaires destinés au produit final. Pareille mesure précise en cela les soubassements physiques de la production et une part des implications écologiques de la consommation. En suivant de la sorte le chemin tracé par le processus de production, nous pouvons évaluer l'usage des ressources naturelles et son incidence sur l'environnement. De surcroît, la possibilité qui nous est offerte de localiser les liens spécifiques de la chaîne de production, autorise une évaluation des politiques visant à réduire cet usage. Les consommations directe et indirecte d'énergie du secteur d'activité (i) sont constitutives de l'identité suivante :

$$Q_i^e(t) = \delta_i K_i^e(t) + \mu_E(t) E_i(t) + \mu_T(t) T_i(t) + \sum_{j \neq i} a_{ji}(t) Q_j(t) cum_j(t);$$

$$K_i^e(t) = K_i(t) cum_i(t).$$

La relation technique, quant à elle, mesure les besoins totaux en énergies pour produire l'output sectoriel. Considérant la chaîne de production dans sa totalité, incluant le consommateur final, nous sommes en mesure d'examiner les liens entre les profils de consommation et les conséquences écologiques qui leur sont associées. L'analyse input-output ne permet pas la seule mesure de l'usage des ressources naturelles dans la production. Elle décrit également le produit final issu de ces ressources, et ses impacts, d'après les conditions de sa fabrication et de sa consommation, sur l'environnement :

$$P_h(t) = \sum_i Q_i(t) \Theta_i(t) \Omega_i(t) \text{ avec } h \in \text{CO}_2,$$

$$\Theta(t) = \frac{Z^P(t)}{Q(t)} \text{ et } \Omega(t) = \frac{P_h(t)}{Z^P(t)}.$$

h désigne les flux polluants, p_h , exprime le taux d'émission par unité produite et type d'énergie fossile consommée. Cette formule mathématique propose une relation concrète entre les émissions et l'intensité énergétique du produit, Θ , et la structure du bilan énergétique, Ω . Nous soulignons en cela l'idée selon laquelle les émissions possèdent une dimension technologique. Dans le modèle, les émissions ne sont pas

évoquées sous la forme d'un facteur de production, mais sont strictement proportionnelles au produit brut sectoriel¹⁷. Nous observons aisément que l'analyse par les intensités énergétiques, nécessitant un tableau entrée-sortie exprimé en unités monétaires, peut être associée à des données économiques relatives à la production et à la consommation, mais également à la valeur ajoutée et à l'emploi (Ryan, [1996]). Cette analyse est aussi fort utile pour décrire des technologies alternatives et examiner les conséquences de leur introduction. Cela étant, conformément au cadre théorique de type entrée-sortie, l'analyse énergétique doit se plier à la contrainte de cohérence en regard des flux entrant et sortant d'énergies et en regard de la structure input-output d'ensemble. Nous verrons dans la section qui suit de quelle manière la cohérence est assurée au plan dynamique.

2.2.2 La condition de viabilité économique par le bouclage macro-économique du modèle

Conformément à Gaffard [1994], la viabilité évoque ici la capacité pour l'économie d'ingérer les déséquilibres consécutifs au changement technologique et à des mesures de politique économique. Cette notion met l'accent sur les contraintes qui s'exercent sur la sphère productive lors du passage d'un sentier de croissance à un autre. Ces contraintes sont rattachées à la complémentarité intertemporelle de la production, laquelle souligne la présence du temps dans l'acte productif et dans l'acte innovateur (Schembri, [1997]). L'exigence de soutenabilité écologique, issue des politiques d'environnement et autres protocoles internationaux, nécessite la mise en œuvre préalable de nouveaux procédés de fabrication, de nouveaux biens capitaux, de nouvelles compétences avant de pouvoir faire l'objet d'un usage rémunérateur. Les ressources et le temps consacrés au processus d'innovation sont alors détournés des activités courantes de production. Il s'ensuit des distorsions de la capacité productive dont l'amplitude peut excéder les marges de manœuvre de l'économie. Cette idée qui fait trace dans la pensée économique (Richardson, [1960] ; Hicks, [1973] ; Faber, [1979]), intervient dans le modèle M3ED à travers les contraintes du bouclage macro-économique.

Au plan statique, le modèle M3ED demeure 'ouvert' quant aux décisions majeures qu'il faut prendre en matière d'investissement, de consommation des ménages. Cela signifie que les décisions d'investissement et de consommation sont spécifiées à l'extérieur du cadre input-output. De fait, même si les besoins d'investissement sont pleinement pris en compte en tant qu'éléments de la demande finale, il n'existe pas de contraintes quant à la composition et au montant de l'investissement, quant à la capacité de production à venir. Lorsque l'on adopte une perspective dynamique, les données changent fondamentalement. Ce sont les décisions d'investissement qui assurent le bouclage du modèle (Duchin et Lange, [1994]). Considérant les besoins sectoriels en capital pour gonfler la capacité productive, les flux d'investissement sont déterminés en sollicitant des coefficients analogues à ceux de la matrice des consommations intermédiaires. A ceci près que les coefficients de capital expriment la quantité de bien (i) qu'il faut mobiliser pour accroître la capacité de production du secteur (j). La spécification dynamique du modèle qui en assure le bouclage, se résume ainsi :

¹⁷Renonçant à traiter les émissions polluantes comme des facteurs de production, nous évitons toute intrusion dans le débat sur la valeur empirique des élasticités de substitution entre elles et les autres facteurs de production (Bergman, [1991]).

$$Q(t) = A(t)Q(t) + V(t)\dot{Q}(t) + F(t) + X(t).$$

Dans cette relation agrégée, $A(t)$ désigne la matrice des coefficients techniques et $V(t)$ n'est autre que la matrice des coefficients de capital. L'expression $V(t)(dQ(t)/dt)$ représente le vecteur des incréments de capital que l'on doit fabriquer et mobiliser à l'instant t pour produire le surcroît de produit $dQ(t)$ durant la période dt .

Si nous prenons en compte une approximation linéaire des conditions d'optimalité d'un équilibre de long terme, l'investissement brut peut apparaître selon le modèle traditionnel de l'accélérateur : $I(t) = \phi(\varepsilon).(K^*(t) - K(t) + \delta K(t))$, où $K^*(t)$ désigne le stock de capital désiré ; $\phi(\varepsilon)$ est une fonction de distribution d'un délai (et ε l'opérateur de délai). Supposant désormais une expression simple de la règle d'investissement : $I(t) = \tilde{I}$, tout producteur devra accumuler du capital d'après l'équation suivante :

$$\dot{K}(t) - \Phi(\varepsilon).\delta K(t) = \tilde{I}, \text{ ou } \dot{K}(t) - \Phi(\varepsilon).\delta K(t) = \Phi(\varepsilon)(K^*(t) - K(t) + \delta K(t)),$$

Au plan sectoriel, l'investissement net s'écrit :

$$\frac{\dot{K}_i(t)}{\Phi(\varepsilon_i)} = \begin{cases} K_i^*(t) - K_i(t) & \text{if } K_i > K_i^0 \\ 0 & \text{if } K_i \leq K_i^0 \end{cases}$$

Nous observons que l'accumulation du capital est strictement proportionnelle à l'écart entre le stock de capital désiré et le stock de capital effectif. Cela signifie que les coûts d'adaptation dépendent uniquement de la variation du capital au cours du temps. De surcroît, puisque l'opérateur de délai demeure fini, ces coûts soulignent que le secteur d'activité doit combler l'écart entre ce qui est souhaité et ce qui est réalisé à hauteur de cet opérateur. Définissons à présent le capital désiré :

$$K_i^*(t) = \Gamma_i(t)K_i(t) ;$$

$$\Gamma_i(t) = \sum_j a_{ji}(t)(1 + g_{ji}^*(t)) + f_i(t)(1 + g_F) + x_i(t)(1 + g_x(t)), \text{ supposant que}$$

$$g_{ji}^*(t) = g_i(t) ;$$

$$\dot{a}_{ji}(t) = \left(\frac{(1 + g_i(t))}{\Gamma_i(t)} - 1 \right) a_{ji}(t);$$

$$\frac{\dot{K}_i^A(t)}{\Phi(\varepsilon_i)} = I_i(t) \sum_D d_D - \delta_i K_i^A(t) \quad \text{avec } D \in E, T, L;$$

g^* désigne le taux de croissance sectoriel désiré ; a_{ji} définit la quantité de bien (j) nécessaire à la production d'une unité de bien (i) . Pour sa part, f exprime ici le flux de produit sectoriel alloué à la demande finale domestique. Nous ajoutons que $k_i^A(t)$ désigne la quantité additionnelle de capital que le secteur i doit mobiliser afin d'améliorer l'efficacité de ses usages en facteurs de production : E, T, L . Nous précisons

que la proportion d varie selon le facteur considéré. A cet égard, l'analyse énergétique nous permet de mesurer le surcroît d'énergies et d'émissions polluantes consécutifs au gonflement de la capacité de production :

$$\frac{\dot{K}_i^e(t)}{\Phi(\varepsilon_i)} = I_i(t) \cdot \left[\frac{K^e(t)}{K(t)} \right] - \delta_i K_i^e(t) ;$$

$$\frac{\dot{K}_i^{Ae}(t)}{\Phi(\varepsilon_i)} = I_i(t) \cdot \sum_D d_D \cdot \left[\frac{K^e(t)}{K(t)} \right] - \delta_i K_i^{Ae}(t) ,$$

$K(t)$ représente le stock de capital disponible pour l'investissement ou la consommation :

$$K(t) = M_K(t) + \sum_i a_{indi}(t) Q_i(t) + \sum_i \delta_i K_i(t) ;$$

$\sum_i a_{indi}(t) Q_i(t)$ n'est autre que la part du produit industrielle consommée par les autres secteurs d'activité et $M_K(t)$ le capital importé. Pour l'économie dans son ensemble, le produit intérieur brut apparaît comme suit :

$$PIB(t) = \sum_i Q_i(t) - \sum_i \sum_j a_{ij}(t) \cdot Q_j(t)$$

$$PIB(t) = \underbrace{\sum_i c_i(t) \cdot Q_i(t) + \sum_i \delta_i K_i(t)}_{\text{demande finale domestique}} + \underbrace{\sum_i v_i(t) \cdot \dot{Q}_i(t)}_{\text{besoins additionnels en capital}} + \underbrace{S(t)}_{\text{demande extérieure nette}}$$

Il reste à présent à souligner la signification économique des variables ajustées. La croissance dans le modèle est évoquée de manière exogène, comme une variable de contrôle. Celle-ci permet de déduire le niveau de productivité. Les déterminants critiques du sentier de croissance sont les rythmes de progression de la demande finale et des exportations pour chaque secteur d'activité. Si l'on modifie certains de ces déterminants, un mécanisme d'ajustement devra alors s'opérer entre les besoins en biens capitaux et le flux net de biens capitaux effectivement produits. En cas de déséquilibre, l'ajustement sera assuré via une modification du solde de la balance commerciale. Par ailleurs, le changement technologique et les processus qui visent à améliorer l'efficacité du secteur énergétique nécessitent de mobiliser une part plus ou moins importante du stock de capital disponible.

C'est en cela que, dans le modèle M3ED, les mesures sectorielles d'efficacité technique évoquent principalement la part de l'investissement que le secteur d'activité 'consent' allouer à pareils processus. Toute politique de contrôle des émissions polluantes, agissant d'une manière ou d'une autre sur la dimension technologique de l'ensemble de production, modifiera les données du partage entre 'ce qui est requis' et 'ce qui est disponible'. Le modèle M3ED a dès lors pour objet d'évaluer les conditions économiques de viabilité de cette politique, en plus des incidences sur l'environnement naturel.

La viabilité repose sur la distinction entre le secteur d'activité qui produit le

stock de capital technique et ceux qui l'utilisent pour réaliser leur production. Cette forme implicite de hiérarchisation des activités demeure indissociable du principe traditionnel d'accélération selon lequel le premier secteur, seul pourvoyeur du capital dans l'économie, est également un consommateur de ce dernier (Schembri et Zyla, [1993]). Si la demande de biens de consommation augmente, le secteur en charge de produire cette catégorie de biens devra alors gonfler sa capacité productive et, par la même, sa consommation de capital. Pour répondre à cette demande induite, le premier secteur, à son tour, devra accroître son potentiel de production. De sorte que la demande globale de capital progresse encore davantage. C'est à travers cet effet d'entraînement que l'on décèle le principe d'accélération (Sterman, [1984]). La force de ce principe réside dans l'intensité en capital du premier secteur. On peut ainsi mesurer le surcroît de capital technique qu'il faut produire en réponse à une élévation du niveau de l'investissement dans les autres secteurs. On peut également localiser les sentiers transitoires d'ajustement entre des tendances longues lorsque la force même du principe d'accélération s'est temporairement affermie. Dans le modèle, le principe d'accélération intervient dans l'évolution de la part de l'output industriel adressée à l'investissement :

$$K_{ind}(t) = K_{ind}(0)e^{g_{ind}(t).t} ;$$

$$K_{ind}^*(t) = \Gamma_{ind} K_{ind}(t) ;$$

$$\Gamma_{ind} = (1 + g_F) ;$$

$$\dot{g}_{ind}(t) = \gamma_1 s_1(t) - \gamma_1 (1 - s_1(t)) , \text{ avec } \gamma_1 > 0 \text{ et}$$

$$s_1(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } M_K(t) > 0, \text{ pour } M_K(t) = \sum_i I_i(t) \left[1 + \sum_D d_D \right] - \sum_i \delta_i K_i(t) \\ 0 & \text{si } M_K(t) \leq 0 \end{cases}$$

Considérant les conditions d'équilibre de la balance commerciale :

$S(t) = X(t) - M(t)$, la contrainte de viabilité économique devient :

$$\dot{g}_X(t) = \gamma_2 s_2(t) - \gamma_2 (1 - s_2(t)) , \text{ avec } \gamma_2 > 0 \text{ et}$$

$$s_2(t) = \begin{cases} -1 & \text{si } S(t) > 0, \text{ pour } S(t) = X(t) - \left[\sum_i M_i(t) + M_C(t) + M_K(t) \right] \\ 1 & \text{si } S(t) < 0 \end{cases}$$

$M(t)$ représente ici le montant total des importations. Contrairement aux autres secteurs d'activité, le taux de croissance désiré du secteur industriel n'est autre que le taux de croissance de la demande finale. Il vient alors que ce secteur revêt un statut

particulier dans l'économie, lequel procède du partage entre le besoin révélé et le potentiel sollicité. C'est aussi à travers l'évolution du solde de la balance commerciale que le mécanisme d'ajustement s'opère. Si l'économie n'est pas en mesure de subvenir seule aux besoins en capital, elle importera la quantité requise.

Nous convenons ici que le principe d'accélération possède les propriétés particulières d'un catalyseur¹⁸. A mesure que les besoins en bien capital augmentent, l'engagement d'investissement tend à croître, accélérant par la même occasion le montant des besoins induits. Le phénomène d'autocatalyse entre dans le cadre de l'étude des mécanismes réactionnels, c'est-à-dire de la recherche des phases successives par lesquelles des politiques sectorielles localiseraient les phénomènes d'apprentissage sur une stratégie ou une option technologique particulière (Schembri, [1997]). Ces phases comportent chacune des éléments de complémentarité entre les secteurs d'activité qui excèdent le seul cadre du marché¹⁹. Elles éclairent le rôle essentiel des rétroactions dans le choix des règles de conduite.

¹⁸Le catalyseur est un terme emprunté à la chimie qui désigne, dans le langage courant, une entité provoquant par son action ou ses propriétés une importante transformation, dont elle n'est pas le moteur.

¹⁹Les éléments de complémentarité peuvent être de nature diverse : l'apprentissage par l'usage et les rendements dynamiques d'échelle (Rosenberg, [1994]; Romer, [1990]) ; les externalités positives de réseau d'utilisateurs (David, [1985]) ; l'exigence de compatibilité des technologies (Frankel, [1955]).

Section 3 : Vers une méthode d'évaluation des politiques publiques d'environnement

Le point de départ de notre analyse repose sur l'idée que toute approche économique du développement durable demeure indissociable des politiques adoptées pour y accéder. Cette approche appelle à la fois une multiplicité des solutions possibles et la durée. Elle implique également la nécessité de recourir à des critères d'évaluation des politiques mises en place et des sentiers poursuivis par référence à une double exigence de performance environnementale et de faisabilité économique. A cet égard, la période récente témoigne d'un intérêt renouvelé à l'encontre de la comptabilité nationale et d'un agrégat économique somme toute traditionnel, le produit intérieur brut, lequel est censé mesurer la richesse nationale d'un pays. La littérature recensée en ce domaine révèle un principe générique : l'évaluation des pertes de croissance consécutives aux contingences environnementales. Elle vise à calculer la valeur approchée d'un agrégat économique 'écologiquement ajusté ou corrigé'. L'ajustement fait ici référence à la prise en compte des externalités environnementales, ainsi qu'aux politiques dont l'objet est de contraindre les activités économiques au respect d'impératifs écologiques²⁰. Il est clair que pareille mesure est à la fois hautement abstraite et nécessairement macro-économique. Or, comme le soulignent Weitzman ([1997] ; [1998]) et Rotillon & Bontems [1998], c'est justement pareilles abstraction et généralité qui nourrissent le pouvoir analytique de cette mesure. En effet, la méthode sollicitée vise uniquement à proposer une quantification approximative de l'écart entre l'économie réelle soumise à des contraintes environnementales et une économie qui en serait totalement débarrassée²¹. Ce travail de quantification vise à définir une valeur économique de l'unité polluante, telle le carbone ou l'azote, laquelle correspond en fait au coût des actions de contrôle de la qualité de l'environnement naturel.

En première analyse et dans le prolongement de ce qui vient d'être dit, il serait possible de considérer que l'idée même de développement durable suscite une double évaluation : celle des conséquences pour l'environnement naturel de certaines stratégies de croissance - nous évoquons alors la durabilité écologique ou les limites dites externes de la croissance ; celle des conséquences économiques des politiques d'environnement - nous évoquons, en ce cas, la faisabilité économique ou les limites dites internes de la croissance. A cet égard, les travaux portant sur la détermination des agrégats économiques écologiquement ajustés, traduisent deux courants de pensée. L'un fondé sur l'économie du bien-être, privilégie la seconde évaluation en évoquant la durabilité d'après le seul maintien du flux de consommation à un niveau constant au cours du temps. L'autre, appartenant au courant de l'économie écologique, tente plutôt de considérer les deux évaluations en privilégiant une analyse dite multi-critère, laquelle doit à la fois prendre en compte la performance environnementale et le coût économique d'une politique d'environnement.

La divergence entre les approches citées réside essentiellement dans la manière dont les décisions visant à mettre en place un mode de développement durable sont évaluées. La première approche citée s'inscrit dans une logique de demande, ayant pour

²⁰ Ces politiques peuvent opérer par voie réglementaire ou tarifaire.

²¹ A ce propos, nous soulignons que le modèle M3ED permet de tester des scénarios ayant trait à des "économies écologiquement ajustées".

ambition première de quantifier les bénéfices pour les agents économiques d'une décision publique rapportés aux coûts qu'elle engendre. La seconde, à l'inverse, adopte une logique d'offre, cherchant à approximer la performance environnementale d'une décision publique rapportée à la charge économique qu'elle procure. Dans le premier cas, les données sont évaluées monétairement par l'usage du seul signal prix en tant que support de la décision. L'objectif visé n'est autre que la mesure des effets du contrôle sur le bien-être collectif. Dans le second cas, l'évaluation monétaire, sans être toujours exclue du cadre analytique, ne saurait constituer le seul fondement au message transmis. Des considérations techniques, à travers l'évolution des flux produits et consommés, et environnementales, à travers l'évolution de certains indices de pression écologique, sont également prises en compte. L'objectif visé n'est alors que de minimiser le coût économique des mesures de contrôle répondant à une norme de performance environnementale préalablement définie.

La première approche fait référence à l'analyse dite coût - avantage, laquelle propose, pour toute mesure de contrôle de la qualité de l'environnement, la maximisation de l'avantage social, exprimé en valeur présente, auquel on déduit le coût des dommages naturels évités par l'application du contrôle ou, par défaut, le coût de la seule mise en œuvre du contrôle. Les limites rencontrées par l'analyse coût - avantage sont liées à l'évaluation même des agrégats qui entrent en jeu. Elles sont également associées aux termes de l'approximation du bien-être derrière lesquels le mode d'actualisation des valeurs futures prend une importance considérable. Nous convenons que ces deux catégories de limite révèlent un seul et même dénominateur : l'incertitude. L'analyse coût - avantage ne saurait résister à l'épreuve de l'incertitude pour deux raisons. Tout d'abord, lorsque nous sommes confrontés à des problèmes écologiques dont la nature, l'ampleur et les impacts présents et à venir sur l'homme sont des plus incertains, il devient dès lors extrêmement difficile de les valoriser, si tant est qu'ils demeurent valorisables. A cet égard, la valorisation des dommages environnementaux peut s'avérer si délicate qu'on lui substituera celle nettement plus aisée des mesures de protection de l'environnement, acceptant de fait le prix d'une sous-estimation importante du péril écologique considéré.

La seconde raison évoquée porte sur le choix du taux d'actualisation, lequel conditionne grandement les résultats obtenus par l'analyse coût - avantage. Il serait vain de retracer dans le cadre de ce rapport les hypothèses, polémiques et autres discordes ayant trait à la préférence pour le présent²². Cela étant, faut-il rappeler que le niveau d'un taux d'actualisation suppose implicitement une certaine forme de comportement individuel et collectif à l'égard de l'avenir, posant en cela la question assez peu discutée de la représentativité intra-générationnelle et inter-générationnelle. Faut-il également rappeler que Ramsey [1928], l'initiateur de la croissance optimale, ne pouvait accorder qu'une valeur nulle à pareil taux tant la charge qu'engendrait ce dernier sur les générations futures lui paraissait intenable. Faut-il ajouter enfin et dans le prolongement de certains auteurs tels que Page [1994], que l'irréversibilité devrait plutôt conduire le taux d'actualisation vers une valeur négative, témoignant en cela du coût d'opportunité de ne pas jouir demain de l'usage de certaines ressources. Sans aller plus avant dans notre revue critique de l'actualisation, nous convenons qu'en situation d'incertitude forte quant à la valorisation économique d'une unité polluante,

22 Nous partageons en cela les propos du GIEC ([1996], p. 79) au sujet du changement climatique, selon lesquels " la meilleure manière de choisir un taux d'actualisation demeure et restera sans doute une question insoluble ".

L'actualisation contribue à élever encore davantage l'élément d'aléa, réduisant ainsi la portée même des résultats proposés.

La seconde approche, l'analyse dite coût - efficacité, s'inscrit justement dans cette voie, proposant la minimisation du coût marginal de dépollution par référence à une norme de performance environnementale, laquelle résulte étroitement de l'application du principe de précaution. Mettant de côté la question des dommages environnementaux, cette approche évite par la même occasion le piège de leur valorisation. Insérant le principe de précaution dans le mode d'évaluation des mesures de contrôle de la qualité environnementale, cette approche situe l'incertitude au cœur de ses préoccupations. Enfin, attirant l'attention sur les potentiels technico - économiques de faisabilité de ces mesures de contrôle, cette approche n'implique aucune hypothèse restrictive quant au bien - être collectif. Cela dit, tout comme l'analyse coût - avantage, l'analyse coût - efficacité révèle quelques faiblesses notables. Tout d'abord, par une valorisation partielle des termes de l'évaluation, l'analyse coût - efficacité perd en généralité ; cette dernière est tributaire de l'indice de pression écologique considéré ; cette dernière se situe fondamentalement dans un cadre d'équilibre partiel. De surcroît, l'analyse coût - efficacité n'apporte aucun éclairage quant à la répartition de la charge d'adaptation, quant à ses modalités de mise en œuvre. Enfin, l'insertion du principe de précaution dans l'analyse coût - efficacité implique quelques revers. Au delà de l'absence d'un consensus parmi la communauté scientifique sur le niveau de performance environnementale qui respecterait ledit principe de précaution²³. Nous retenons surtout que ce principe implique nécessairement une incertitude dont la comparabilité, pour des niveaux différents de performance environnementale, peut être discutable (Godard, [1998]). Ce dernier point doit inciter l'utilisateur de l'analyse coût - efficacité à la prudence lorsqu'il élabore des scénarios prospectifs impliquant diverses normes de performance environnementale, ou une norme de référence, laquelle pouvant évoluer au cours du temps.

Cette brève présentation critique des deux principaux modes d'évaluation des mesures de contrôle de la qualité de l'environnement, tendrait à considérer que l'analyse coût - avantage interviendrait directement dans la détermination des normes de performance environnementale, tandis que l'analyse coût - efficacité interviendrait plutôt dans l'évaluation économique du coût d'ajustement à pareille norme par l'attribution d'une valeur à l'unité polluante. Même si nous partageons pour une part cette opinion, nous considérons toutefois que l'analyse coût - efficacité, évoquant le mécanisme de normalisation du choix des modes d'adaptation à une norme environnementale, propose de fait une quantification du coût d'application des procédures incitatives qui sont à l'origine de ce mécanisme. Si bien qu'on ne saurait concevoir qu'une telle information n'intervienne pas en retour dans l'élaboration même de la norme de performance. C'est pour cette raison que nous avons adopté cette approche dont les propriétés particulières sont présentées dans la section qui suit.

3.1 Le critère de classification des scénarios : l'indice coût-efficacité

La modélisation sollicitée propose une mesure dynamique de la performance environnementale et des coûts d'adaptation associés à la mise en œuvre de politiques

23 Ce problème est notable au plan du changement climatique (Criqui, [1999]).

visant à contrôler la qualité des eaux. Il vient alors que l'étude du coût économique d'adaptation consiste à prendre pour référence un agrégat économique, puis à confronter sa progression tendancielle et celle consécutive à un 'ajustement écologique'. A cet égard, nous tenons à rappeler que l'évaluation revêt ici un contenu fondamentalement dynamique, lequel se résume à la comparaison des tendances simulées, en aucun cas à la comparaison des grandeurs produites à un instant donné. Dans cet ordre d'idées, l'étude de la performance environnementale conduit à observer les évolutions tendancielle et 'écologiquement ajustée' de certains indices de pression écologique.

Si l'on écrit $Q^{ref}(t)$ l'agrégat économique tendanciel, lequel ne serait pas soumis à la contrainte du contrôle environnemental, et $Q^i(t)$ l'agrégat économique 'écologiquement ajusté'. Une mesure du coût économique d'adaptation consisterait alors à déduire de l'agrégat tendanciel la part 'détruite' par le respect de l'exigence écologique :

$$C_i(t) = Q^{ref}(t) - Q^i(t).$$

Nous sollicitons la même approche pour définir la performance environnementale. Le choix de l'indice de pression écologique dépendra du problème traité ; dans le cadre de ce rapport nous évoquerons successivement le carbone et le problème du changement climatique, le bilan azoté et le problème de la qualité de l'eau. Il vient alors que le calcul de la performance environnementale prend forme dans la comparaison entre les émissions issues du scénario tendanciel et celles déduites du scénario alternatif i :

$$P_i(t) = E^{ref}(t) - E^i(t)$$

Dans le cadre de cette approche, la valeur économique attribuée à l'unité polluante, laquelle n'est autre que le coût marginal de l'ajustement, s'écrit :

$$V_p^i(t) = \frac{\Delta C_i(t)}{\Delta P_i(t)}$$

Par rapport à la norme de performance environnementale, il existe deux manières différentes de lire l'analyse coût - efficacité. Celle généralement adoptée consiste à déterminer en fonction d'une performance environnementale donnée, celle correspondante au respect de la norme, la valeur de l'unité polluante associée aux formes alternatives d'adaptation testées. Cette lecture suppose que chacune de ces formes réponde effectivement à l'exigence écologique. Cette lecture évoque alors l'analyse coût - efficacité par les potentiels de faisabilité. La valeur de l'unité polluante qui leur est associée s'écrit :

$$V_{\bar{p}}^i(t) = \frac{\Delta C_i(t)}{\Delta \bar{P}(t)}$$

Les courbes de coûts marginaux sont alors tracés en fonction de la réduction des émissions obtenues comparativement aux émissions tendanciennes (GREENSTAMP, [1996] ; Criqui & Kouvaritakis, [1997]). Même si cette lecture nous éclaire quant à la charge d'adaptation qu'il faut endurer pour respecter l'objectif de dépollution, elle ne permet pas de souligner si l'économie peut effectivement endurer pareille charge.

La seconde lecture consiste plutôt à émettre des hypothèses recevables quant à l'évolution future des activités concernées par le problème écologique traité. Ces hypothèses concernent aussi bien l'évolution des technologies que celle relative à la

taille des marchés. Cette lecture vise ensuite à confronter les tendances obtenues en matière d'émissions à celle associée à la norme de performance. Nous évoquons en cela l'analyse coût - efficacité par le différentiel de soutenabilité. La valeur de l'unité polluante et le différentiel correspondant s'écrivent :

$$V_p^i(t) = \frac{\Delta C_i(t)}{\Delta P_i(t)} \quad \Delta \bar{S}(t) = \frac{\bar{C}(t) - C_i(t)}{\bar{P}(t) - P_i(t)} = \frac{Q^i(t) - \bar{Q}(t)}{E^i(t) - \bar{E}(t)}$$

Dans ce cadre, nous notons que le coût marginal est totalement endogène à l'analyse. Cette lecture vise à mettre en lumière les effets induits qui seraient nécessaires, après l'épuisement des leviers d'adaptation potentiellement réalisables, pour répondre à l'objectif de dépollution (Ekins & Simon, [1999] ; Schembri, [1999]). Il est important de noter que l'analyse en termes de coût marginal ne nous éclaire pas totalement quant à la distinction entre le coût total de réduction des émissions et le coût marginal de réduction. En effet, deux mesures d'adaptation peuvent conduire à un coût marginal identique pour des coûts totaux de réduction bien différents, lesquels témoignent d'une divergence notable des niveaux de performance environnementale. C'est en cela que nous proposons de déterminer un indice coût-efficacité, lequel estime la pente de la courbe de coût marginal. Pour ce faire, nous calculons la part d'amélioration de la qualité environnementale :

$$\Pi_i(t) = \frac{P_i(t)}{E^{ref}(t)}$$

Nous faisons de même pour la perte de croissance économique issue de la contrainte écologique prend forme dans l'expression du coût d'opportunité rapporté à l'agrégat tendanciel²⁴ :

$$X_i(t) = \frac{C_i(t)}{Q^{ref}(t)}$$

Pareille mesure constitue une rationalisation du coût économique total de la transition vers des activités 'écologiquement ajustées'. Nous proposons en cela une interprétation dynamique de la perte de croissance, puisque le modèle utilisé trace l'évolution de la charge économique sur tout l'horizon temporel considéré, en plus de celle présente à l'instant où l'exigence écologique se fait jour. Il nous reste désormais à définir l'indice coût-efficacité, lequel désigne le critère de classification de chacune des formes d'ajustement proposées. Il est clair que cette définition soulève des questions théoriques fondamentales, lesquelles s'inscrivent notamment dans l'exercice même de modélisation des activités qui subissent la charge d'adaptation. Cela étant, par souci de clarté, nous proposons de conceptualiser toute stratégie d'ajustement comme suit :

Proposition 1 : *une stratégie i désigne la mesure d'ajustement à une exigence de soutenabilité qui accroît la probabilité d'améliorer la performance environnementale, par une baisse des émissions polluantes, à un coût économique total donné, en termes de perte additionnelle de croissance qui serait nécessaire pour rendre pareille probabilité réalisable.*

²⁴ C'est en des termes similaires que Weitzman [1997] propose une approche économique de la soutenabilité. Selon l'auteur, tout agrégat 'écologiquement ajusté' devrait évaluer en valeur le niveau constant annuel de consommation future, lequel correspond au sentier de croissance soutenable.

Procédant de la sorte, notre critère de classification revêt un caractère multidimensionnel, insérant sous une même expression le coût et la performance pour chacun des scénarios considérés:

$$R_i(t) = \frac{X_i(t)}{\Pi_i(t)}.$$

Le critère de classification des formes d'ajustement mesure précisément le pourcentage de perte de croissance par pourcentage d'accroissement de la performance environnementale. Cette forme d'élasticité n'est autre que l'expression du coût économique marginal initié par le mode d'ajustement adopté aux plans sectoriel ou macroéconomique. Lorsque $R_i(t) > 1$, la perte de croissance économique excède la performance environnementale. A l'inverse, lorsque $R_i(t) < 1$, la perte de croissance économique progresse à mesure que la performance environnementale croît, mais non d'une grandeur aussi grande que celle de la performance. Enfin, l'éventualité d'une stricte proportionnalité entre la perte de croissance et la performance environnementale correspond à $R_i(t) = 1$.

En tant que critère de classification, $R(t)$ constitue une mesure de la faisabilité économique d'objectifs environnementaux. A cet égard, nous ne saurions discuter le fait que pareil critère révèle une dimension hautement heuristique, évoquant le caractère nécessairement multidimensionnel de l'évaluation des politiques d'environnement. Nous convenons également que ce critère souligne l'importance des changements structurels auxquels l'économie devra se soumettre si elle suit tel ou tel mode d'ajustement. On ne doute pas enfin que l'opinion des agents économiques concernés par la charge d'adaptation, leur volonté d'adhérer à tel ou tel mode devient un facteur fondamental, lequel peut être aussi à l'origine d'une certaine inertie dans les comportements de production et de consommation. Si bien que l'évaluation de type coût - efficacité inscrite ici dans un cadre dynamique se doit de considérer l'évolution du critère de classification au cours du temps :

proposition 2 : *la mise en œuvre de toute stratégie i implique une charge d'adaptation, laquelle est mesurée en termes de perte additionnelle de croissance nette du surcroît de performance réalisé.*

A la lumière de cet indicateur, nous notons que ce mode d'évaluation permet de mettre en lumière l'importance des délais d'adaptation pour la comparaison des critères économique et écologique d'évaluation des scénarios proposés. Ce résultat bien connu des économistes souligne la difficulté de gérer le décalage temporel entre le sacrifice consécutif à une mesure de contrôle des pollutions qui a trait au court terme, et les effets bénéfiques sur l'environnement qui n'apparaissent qu'à long terme. Inscrit dans cet ordre d'idée, le second critère de classification est calculé en différence, déduisant du rythme de progression de la perte de croissance, celui rattaché à la performance environnementale pour chacune des stratégies testées :

$$G_i(t) = \frac{\Delta R_i(t)}{R_i(t)} = \frac{\Delta X_i(t)}{X_i(t)} - \frac{\Delta \Pi_i(t)}{\Pi_i(t)}$$

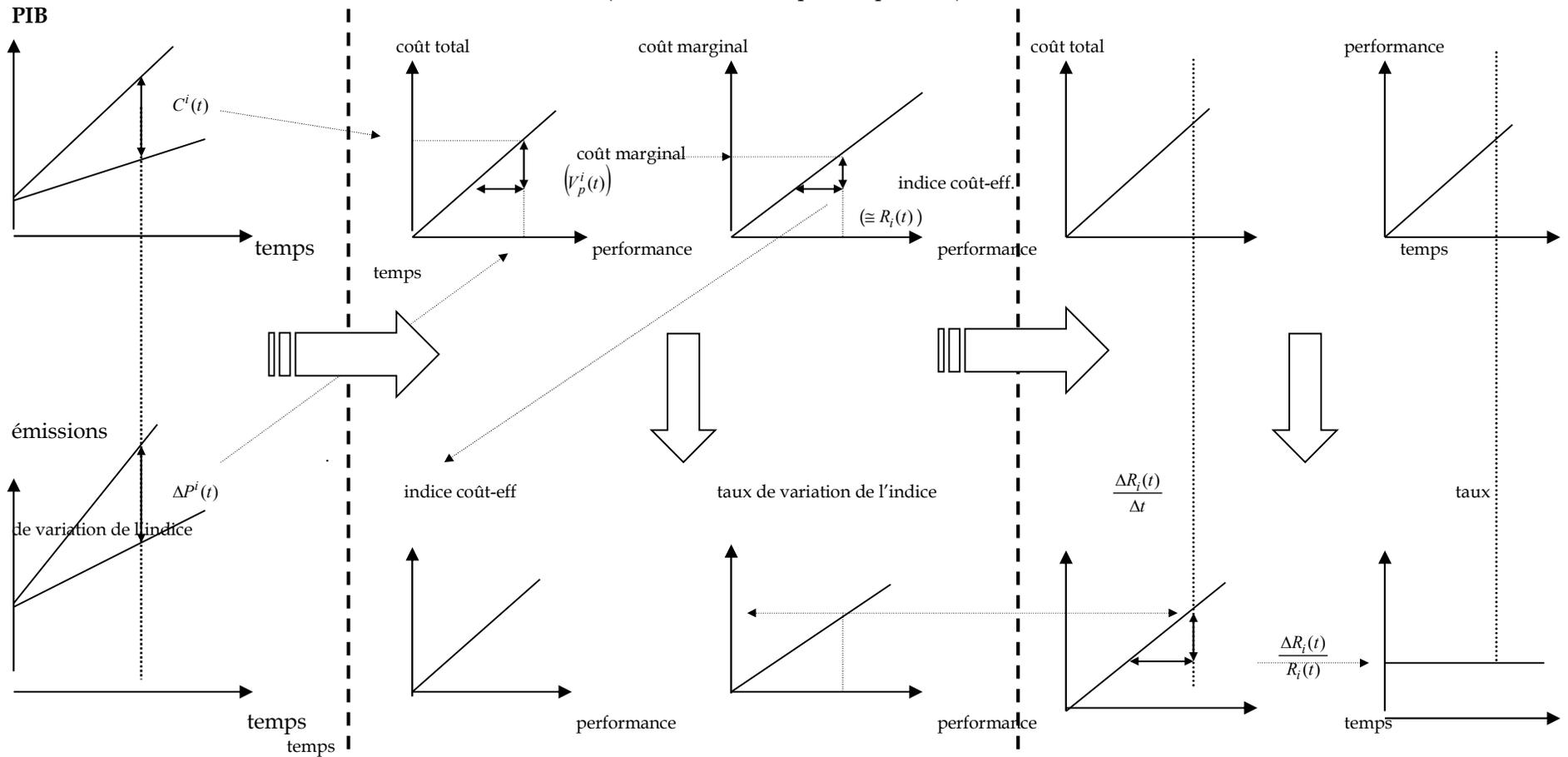
Ce critère fondamentalement dynamique permet de mettre en lumière l'importance des délais de mise en application des modes d'ajustement choisis, de même que le coût économique qui leur est associé. Lorsque $G_i(t) > 0$, la valeur de l'unité polluante, laquelle témoigne de la charge d'adaptation de l'économie ou du secteur d'activité au

scénario proposé, croît au cours du temps. Dans ce cas, le ralentissement observé du taux de croissance annuel moyen du coût marginal peut des effets d'apprentissage dans l'application d'une forme alternative d'ajustement. Lorsque $G_i(t) < 0$, la valeur de l'unité polluante baisse au cours du temps. Enfin, lorsque $G_i(t) = 0$, la valeur de l'unité polluante demeure constante au cours du temps.

SIMULATION DES SCENARIOS D'ADAPTATION

CONSTRUCTION DES COURBES DE COUT DE REDUCTION

EVALUATION DES CHARGES (évaluation en dynamique)



3.2 Analyse de faisabilité et politiques d'environnement : l'exemple du carbone²⁵

Le cadre théorique de l'analyse input-output fournit une vision cohérente de la structure économique et incite en cela à souligner les comportements de consommation et la composition des éléments qui entrent dans la production. Comme nous venons de le montrer, ces deux extensions ouvrent la voie à la mesure des incidences sociales et physiques des activités de production et de consommation, de leurs interactions. A cet égard, nul ne saurait discuter que toute politique d'environnement se doit d'agir sur les conduites de consommation et sur les méthodes de production pour être performante au regard d'une exigence de durabilité écologique. Les politiques dont l'objet est de modifier la distribution des revenus, affecteront en retour la consommation des ménages et, par voie de conséquence, la sphère productive.

La méthode de validation interne que nous avons adoptée sollicite une expression réduite du bilan énergétique, lequel recense les flux d'entrée et de sortie en énergies. La condition d'équilibre impose que la demande globale en énergie égale exactement la somme des énergies incorporées dans le produit dépréciées du taux de variation de celles incorporées dans le stock de capital²⁶. Nous convenons toutefois que même si cette procédure de validation permet d'évoquer la cohérence (dynamique) du bilan énergétique, elle n'assure en rien la cohérence des tendances au regard de celles observées. De surcroît, elle ne prend pas en compte le contenu en énergies du capital.

La procédure de validation que nous appliquons dans la présente recherche revêt deux objectifs. Elle vise d'une part à quantifier les propriétés limites du modèle ou encore la sensibilité de son comportement dynamique au regard de certaines variables critiques. Elle consiste, d'autre part, à confronter le modèle aux données historiques.

Par référence à notre problématique, l'analyse de faisabilité consiste à étudier l'influence d'une politique de contrôle des émissions sur la croissance économique, les consommations d'énergies et les émissions de carbone. Cette analyse s'inscrit dans l'idée que toute politique visant à mettre en place un mode de développement écologiquement soutenable doit porter à la fois sur les comportements de consommation, sur l'investissement et sur les choix de technologies. Les paramètres de contrôle soumis à l'analyse sont : le taux de croissance de la demande finale ; les besoins additionnels en capital par unité d'output dans le secteur énergétique et dans les autres secteurs ; les gains d'efficacité énergétique.

Pour la France, à l'horizon 2010, l'engagement de Kyoto devrait se traduire par une stabilisation de ses émissions de gaz à effet de serre à hauteur de celles observées en

²⁵ Cette analyse n'est autre que le prolongement d'un travail de prospective énergétique pour la France réalisé par le C3ED dans le cadre du rapport d'activité "Scénario de développement soutenable à l'aide du modèle de simulation M3ED-France" adressé au ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, 1996.

²⁶ Nous devons souligner que la somme des énergies "incorporées" dans le produit recense les biens destinés à la consommation finale, ainsi que l'énergie contenue dans les exportations. Par ailleurs, la variation des énergies "incorporées" dans le stock de capital peut se déduire de la différence les flux d'investissement et de dépréciation, lesquels sont mesurés en termes énergétiques.

1990. Cette norme de performance environnementale qui pèse notamment sur les consommations énergétiques et sur le système énergétique national, peut faire l'objet d'une évaluation structurelle afin d'apprécier le potentiel de flexibilité requis pour répondre à cette exigence.

A cet égard, nous tenons à souligner que les scénarios prospectifs proposés ne constituent pas des projections tendanciennes, encore moins des prévisions, mais plutôt des représentations contrastées de futurs probables. Nous ajoutons que ces scénarios révèlent aussi une dimension quelque peu normative, laquelle témoigne d'une volonté sociale de réaliser certains objectifs. Ces derniers évoquent des éléments de performance mesurables comme "le niveau de vie" ou "le respect des normes environnementales", ainsi que des propositions telles qu'une compétence scientifique suffisante pour limiter les risques associés à l'ingénierie génétique et à la puissance nucléaire, ou le progrès technologique. Dans cet ordre d'idée, les représentations du futur intègrent des éléments politique, économique et socio - culturelle qui assurent la cohérence d'ensemble de chacun des scénarios proposés.

En réponse à l'engagement de Kyoto, quelles sont les perspectives technico - économiques et énergétiques de la France ?

Pour répondre à cette question, nous confrontons un scénario de référence, lequel découle, au plan macroéconomique, des travaux récents du groupe de prospective de l'énergie du Commissariat Général du Plan, au plan sectoriel, des travaux du C3ED, à quatre scénarios prospectifs visant à décrire les contextes économique et énergétique de la France aux horizons 2010 et 2020.

Le scénario de référence postule que l'économie française progresse à un rythme annuel moyen de 2,3% à l'horizon 2020. Ce même scénario propose une croissance démographique à un rythme annuel moyen de 0,3% sur la période 2000 - 2020. Au plan de la modélisation sectorielle, nous rappelons que le taux de croissance de la demande finale n'est autre qu'un paramètre de contrôle, lequel change selon le scénario adopté, si bien que les transactions inter - sectorielles sont endogènes au modèle. Le tableau ci - dessous évoque le taux de croissance annuel moyen par secteur d'activité sur les périodes 1990 - 2000 et 2000 - 2010.

Tableau 4 : Le taux de croissance annuel moyen des secteurs d'activité

	Industrie	Services	Transports	Agriculture
1990 - 2000	1,16%	2,39%	2,34%	1,45%
2000 - 2010	1,14%	2,38%	2,44%	1,31%

La demande énergétique issue du secteur résidentiel est également fixée de manière exogène. Les taux de croissance annuels moyens de la consommation d'électricité et de combustibles thermiques (y compris le transport de ces derniers) pour le scénario de référence sont donnés dans le Tableau ci-dessous²⁷.

Tableau 5 : Taux de croissance annuel moyen des demandes en électricité et en combustibles thermiques pour le secteur résidentiel

	Electricité	Combustibles thermiques
1990 - 2000	0,07%	0,66%
2000 - 2010	0,10%	0,35%

Quant à l'efficacité énergétique dans le secteur énergétique, des hypothèses sont faites sur le taux annuel moyen d'amélioration des rendements²⁸.

Tableau 6 : Taux annuel moyen de variation de l'efficacité énergétique

Industrie des combustibles fossiles	- 2,1%
Industrie de la production d'électricité	- 0,9%
Combustibles fossiles (autres industries)	- 2,1%
Électricité (autres industries)	-1%

Pour les autres secteurs d'activité, le scénario de référence suppose que l'intensité énergétique diminue, sans que cela ne résulte d'un progrès particulier en matière d'efficacité énergétique, à un rythme annuel moyen de 1,3% sur la période considérée. On suppose enfin que la production d'électricité est faite dans les mêmes conditions

²⁷ La consommation énergétique des autres secteurs d'activité est calculée d'après le taux de croissance annuel moyen de leur produit.

²⁸ Dans le tableau, le signe négatif indique une amélioration de l'efficacité énergétique.

que celle de la génération présente. En d'autres termes, elle provient pour 76% du nucléaire, pour 13 % de sources renouvelables et seulement pour 13% du thermique.

Les deux premiers scénarios alternatifs visent à prolonger les processus en cours de globalisation économique et écologique, dans lesquels le marché mondial (dominé par les mouvements de capitaux transnationaux) et les technologies de l'information jouent un rôle fondamental. En partant de cette tendance générale, deux variantes sont alors proposées.

- *Le scénario gris* suppose un futur dans lequel le processus de globalisation économique conduirait à un renforcement des inégalités sociales et économiques. Ce monde serait alors marqué par des tensions croissantes dans et entre les nations, notamment autour de l'axe riches/pauvres, avec un accroissement des fondamentalismes culturels, religieux et politiques. Au plan énergétique, la France ne rencontrerait aucun problème majeur quant à l'approvisionnement, quant aux incidences sur l'environnement. Cette éventualité suppose un désengagement progressif de l'Etat en matière de politique énergétique, accordant une confiance plus grande aux seuls mécanismes de régulation marchands. Dans cette perspective, l'attention accordée aux problèmes écologiques et de durabilité serait bien réduite, conduisant au prolongement non maîtrisé de l'épuisement des ressources naturelles et de la dégradation environnementale.
- *Le scénario tendanciel rose* appréhende un futur dans lequel les inégalités économique et sociale tendraient à s'étioler quelque peu en raison d'une certaine résurgence de l'emprise étatique sur certains marchés. A cet égard, l'Etat français intervient activement aux plans économique et industriel pour consolider la compétitivité des entreprises nationales actives dans le domaine de l'énergie. Dans ce cadre, les politiques de protection environnementale, lesquelles doivent toutefois demeurer en accord avec les règles de concurrence imposées par l'Union Européenne et l'Organisation Mondiale du Commerce, nécessitent des engagements financiers substantiels même si elles ne cherchent pas vraiment à changer la tendance cumulative de l'expansion mondiale de la production marchande industrielle, destructrice du point de vue écologique.

Les deux autres scénarios reposent sur l'élaboration d'un projet de société intégrant de manière explicite la préservation de l'environnement. Pareil projet qui ne saurait toutefois se faire jour sans des accords européens préalables quant aux mesures réglementaires ou fiscales, quant au niveau d'engagement des entreprises, lesquels seraient nécessaires à sa mise en œuvre. Là également deux variantes sont envisagées ; la première procède de l'amélioration du rendement énergétique ; la seconde relève de la maîtrise des consommations énergétiques.

- *Le scénario technologique* repose sur l'hypothèse selon laquelle le progrès scientifique et technique allège les contraintes environnementales pesant sur la croissance économique. Pareil scénario permettrait une croissance ininterrompue de la consommation de marchandises. La rupture technologique est mondiale. On suppose qu'une part importante du bénéfice en revient aux sociétés européennes dont la

France²⁹. Ceci pourrait être considéré comme une vision très "rose" du scénario tendanciel.

- *Le scénario vert* (ou encore consommation raisonnée) suppose, quant à lui, une rupture avec la dynamique tendancielle de la société de marché et avec la norme politique de croissance économique. L'idéal d'accroissement de la consommation finale est modéré ou abandonné en faveur de la qualité environnementale et patrimoniale, ainsi que de la solidarité sociale. Dans ce cadre, l'intervention publique vise plutôt la maîtrise des consommations d'énergie, s'inscrivant nécessairement dans un contexte européen favorable à la préservation de l'environnement. Pareil scénario paraît en cohérence avec certaines inflexions récentes préconisant l'usage accru de ressources renouvelables, le choix de technologies et de produits impliquant moins de pollution ou de matériaux moins toxiques, une réduction des risques industriels, des investissements en matière de gestion de la qualité de l'eau et de conservation de la nature³⁰. Nous convenons que ce dernier scénario peut s'inscrire dans un contexte mondial "gris" ou "rose".

Le Tableau suivant résume les principales hypothèses retenues pour chaque scénario proposé. Par secteur d'activité, nous proposons un taux de croissance annuel moyen. Quant au secteur résidentiel, pour chacun des scénarios, un taux de croissance annuel moyen de la demande d'énergie est supposé.

²⁹ A cet égard, le scénario d'EDF intitulé "Renaissance verte" (Vicens & Hereberg, [1995]) relève de cette conception. Dans ce scénario, le développement d'une "énergie propre", bon marché et abondante (l'énergie nucléaire) serait à la base d'une croissance économique durable et d'une qualité environnementale accrue, "avec en toile de fond une Union Européenne triomphante et une société française plus ouverte aux solidarités et à la notion d'intérêt collectif...".

³⁰ De bons exemples de scénario développés à partir de telles perspectives sont ceux des études Towards Sustainable Europe (FOE & Wuppertal Institute, [1995]) et Sustainable Economic Structures (Dellink et al., 1996, pour l'économie néerlandaise).

Tableau 7 : Hypothèses retenues pour la France³¹

	ROSE		GRIS		VERT		TECHNOLOGIQUE	
	1990-2000	2000-2010	1990-2000	2000-2010	1990-2000	2000-2010	1990-2000	2000-2010
Industrie	1,16%	1,14%	0,82%	0,43%	0,82%	0,64%	1,16%	2,03%
Services	2,39%	2,38%	1,82%	1,25%	1,82%	1,18%	2,39%	4,14%
Transports	2,34%	2,44 %	1,63%	1,00%	1,59%	0,70%	2,34%	4,69%
Agriculture	1,45%	1,31%	1,08%	0,64%	1,05%	0,89%	1,45%	2,43%
Électricité	0,07%	0,66%	1,07%	0,99%	-0,71 %	-0,37%	-0,59%	0,06%
Comb.ther m	0,10%	0,35%	0,90%	0,70%	-0,56%	-1,03%	-0,39%	-0,23%
Eff. Th. Ind	-1,20%	-1,20%	-1,20%	-1,20%	-1,80%	-1,80%	-2,20%	-2,20%
Eff. El. Ind	-0,50%	-0,50%	-0,50%	-0,50%	-1,50%	-1,50%	-2,00%	-2,00%
Eff. Th. Oth	-1,60%	-1,60%	-0,80%	-0,80%	-1,80%	-1,80%	-2,20%	-2,20%
Eff. El. Oth	-0,70%	-0,70%	-0,30%	-0,30%	-1,20%	-1,20%	-1,50%	-1,50%

La méthode d'évaluation proposée repose sur une analyse en termes de potentiel de faisabilité. Noter bien, à cet égard, que l'exemple d'application retenue vise plutôt à décrire la méthode, bien moins la recherche de résultats. C'est en cela que les scénarios proposés, ainsi que les simulations sont fortement contrastées, révélant des coûts d'opportunité économique très élevés. On suppose également que la trajectoire temporelle d'adaptation à la norme de Kyoto reste la même pour les quatre scénarios, laquelle traduit un ajustement assez appuyé des agrégats économiques considérés. Cela dit, pareille méthode met en lumière quelques idées désormais reconnues par la communauté scientifique.

Les résultats dénotent une forte sensibilité des agrégats simulés à une hausse du taux de croissance de la demande finale. Cette observation est importante lorsque l'on évoque l'évaluation des politiques d'environnement. Si l'on suppose la neutralité d'une taxe sur l'énergie, toute mesure de taxation qui contribue à augmenter la cherté des biens à fort contenu en énergies et à réduire celle des biens à faible contenu en énergies, n'aura pas d'effets significatifs sur les comportements de consommation. L'ampleur de ces effets est généralement mesurée en termes d'élasticités et de redistribution des

³¹ Eff.Th. Ind est la variation de l'efficacité moyenne pour les combustibles thermiques utilisés dans l'industrie. Eff. El. Ind est la variation de l'efficacité moyenne pour l'électricité dans l'industrie. Eff Th. Oth est la variation de l'efficacité moyenne pour les combustibles thermiques dans les autres secteurs. Eff. El. Oth est la variation de l'efficacité moyenne pour l'électricité dans les autres secteurs. Les variations de l'efficacité dans le secteur domestique sont supposées comprises dans la demande exogène.

ressources. Et le revenu additionnel issu de la taxe compense le coût additionnel associé à son application. A l'inverse, si la politique fiscale contribue à accroître le différentiel de prix entre les biens à fort contenu en énergies et les biens à faible contenu en énergies, des incidences notables sur la demande finale seront observées. Celles-ci interviennent à travers une modification du taux de croissance des secteurs et des ajustements en importation et exportation. Or ces taux de croissance interviennent comme des paramètres de contrôle dans le modèle M3ED. Il est alors possible de quantifier les flux physiques associés au changement de ces paramètres consécutif à une politique de taxation, de simuler le rythme et le niveau des émissions et de tester la cohérence dynamique du scénario adopté. Cette cohérence dynamique met en exergue le sentier de transition rattaché aux contraintes d'ajustement des besoins en capital et des technologies.

Le changement technique est à l'origine d'une amélioration de l'efficacité énergétique d'un secteur d'activité. Il contribue de la sorte à réduire les besoins en ressources énergétiques pour produire une unité d'output. Cela étant, deux cas peuvent être évoqués. Le premier consiste à supposer que le changement technologique ne nécessite aucune quantité additionnelle de capital pour être mis en œuvre. Si bien que l'amélioration de l'efficacité énergétique s'opère par le seul remplacement de l'ancien stock de capital par le nouveau. Le second conjecture, à l'inverse, la production d'une quantité additionnelle de biens capitaux pour améliorer l'efficacité énergétique. Dans ce dernier cas, on se doit d'évaluer les coûts induits par le changement technologique, ou encore le gain net d'une efficacité énergétique accrue. Or nous savons que tout effort important en faveur d'une réduction sectorielle des émissions de carbone ne pourra être obtenu que par un effort d'efficacité énergétique et par la mise en œuvre de technologies à faibles contenus en énergies et niveaux d'émission. Dans les deux cas cités, les coûts réels de cet effort seront associés au mécanisme de remplacement des technologies. Des actions visant à améliorer l'efficacité énergétique et la 'décarbonisation' des procédés de production, ont une influence notable sur les émissions et sur l'indicateur de pression énergétique. Elles induisent toutefois un léger ralentissement de la croissance économique en raison du coût de mise en œuvre des technologies nouvelles.

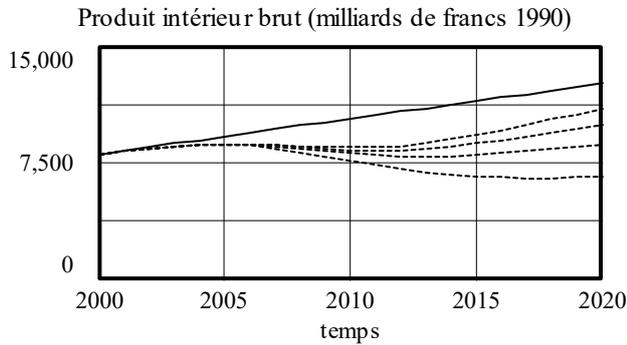
Si nous combinons à présent des mesures sur la croissance économique à travers le taux de croissance de la demande finale et sur le choix des technologies à travers les efficacités énergétiques, nous rejoignons quelque peu des propos communément partagés aujourd'hui, il semble que toute maîtrise des émissions nécessite un ralentissement de la croissance économique et une forte accélération des gains d'efficacité énergétique. Si la solution réside véritablement dans pareille combinaison, il convient de mesurer le coût du passage à une efficacité énergétique accrue, un développement des énergies non fossiles et une pénétration plus forte des fossiles à faible contenu en carbone. L'analyse de sensibilité que nous venons d'opérer souligne justement que ce passage s'opère au détriment de la croissance économique. A cet égard, la France dont la politique énergétique repose sur la filière nucléaire, risque de subir un coût d'adaptation d'autant plus important, témoignant en cela du syndrome norvégien (Méral, Schembri et Zyla, 1994).

Un effort conséquent doit alors être alloué aux techniques d'estimation et de projection des paramètres de contrôle qui témoignent d'options technologiques alternatives ou de conduites de consommation modifiées. Ces estimations et autres

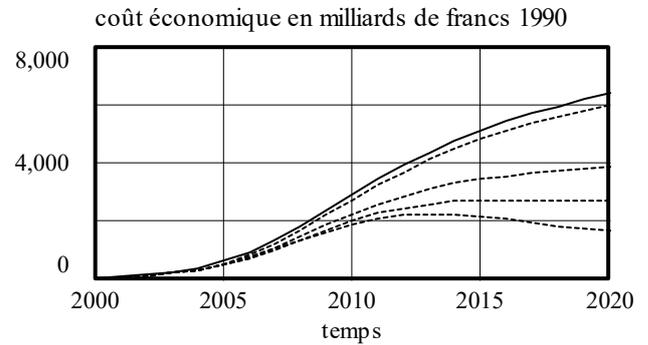
projections demeurent indispensables pour construire des scénarios quant au choix de technologies et à l'orientation du changement technologique (Benhaïm et Schembri, 1995). C'est bien ce que l'on déduit des simulations réalisées à l'horizon 2020 pour l'économie française, dont les résultats sont référencés dans le tableau suivant.

	scénario gris			scénario rose			scénario vert			scénario technologique		
	2005	2010	2020	2005	2010	2020	2005	2010	2020	2005	2010	2020
PIB Mds de francs 1990	7938	7613	7956	8688	8092	8708	8703	8326	9882	8706	8463	10919
coût d'opportunité Mds de francs 1990	533	2711	5995	509	2232	3870	494	1999	2696	491	1861	1660
Par rapport au scénario rose	750	479	752				- 15	- 234	- 1124	- 18	- 371	- 2211
en %	5.7	26	47	5.5	21	30	5.3	19	21	5.3	18	13
par rapport au scénario rose	8.6	5.9	8.6				- 0.17	- 2.9	- 13	- 0.2	- 4.6	- 25
marginal francs 1990/t	5203	35119	58340	4847	23334	23895	4469	18854	11580	4442	16706	4456
par rapport au scénario rose	16071	1687	1514				- 6	- 398	- 3394	- 8	- 1011	- 13058
moyen cumulé Mds de francs 1990	301	1993	5127	299	1913	4594	295	1789	3764	294	1724	3135
perte de croissance par rapport au référentiel non ajusté	0.005	0.016	0.023	0.0048	0.013	0.014	0.004	0.012	0.0096	0.004	0.0107	0.0062
indice coût-efficacité par rapport au scénario rose	0.41	1.14	1.45	0.4	0.92	0.92	0.38	0.83	0.64	0.38	0.79	0.4
	0.9	0.31	0.3				- 0.017	- 0.15	- 0.45	- 0.02	- 0.24	- 0.88

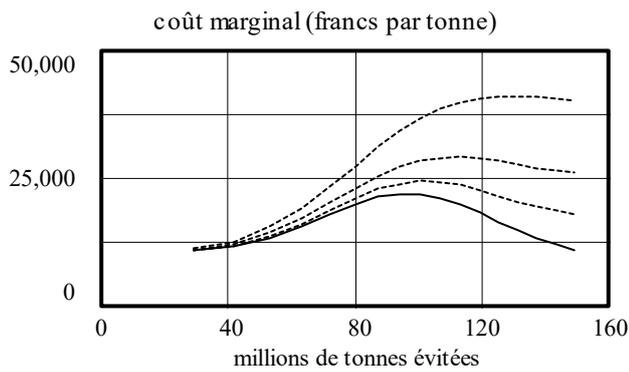
3.3 Présentation des simulations et discussion des résultats



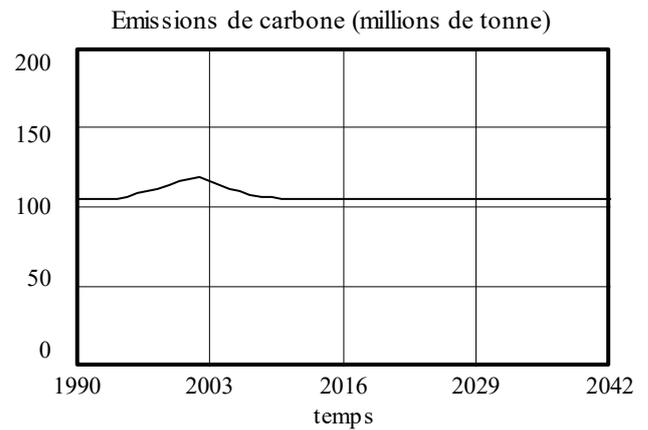
réfrentiel —————
 scénario rosé - - - - -
 scénario gris
 scénario vert - . - . -
 scénario technologique - - - - -



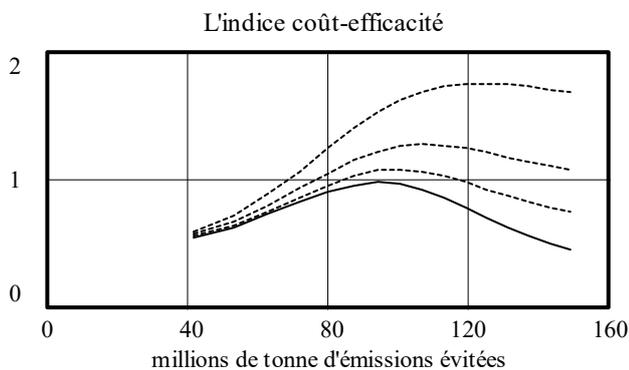
réfrentiel ajusté —————
 rosé - - - - -
 gris
 vert - . - . -
 technologique - - - - -



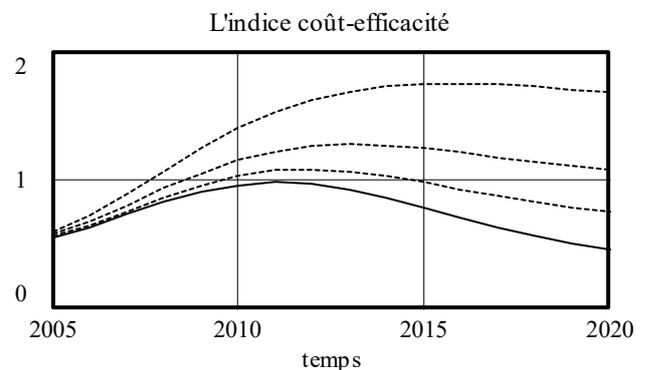
scénario technologique —————
 scénario gris - - - - -
 scénario vert
 scénario rose - . - . -



norme Kyoto —————



scénario technologique —————
 scénario vert - - - - -
 scénario rose
 scénario gris - . - . -



scénario technologique —————
 scénario vert - - - - -
 scénario rose
 scénario gris - . - . -

Dans le scénario *gris*, la croissance économique est bien plus lente. Ceci découle de

l'hypothèse d'une faible amélioration du rendement énergétique qui ne compense pas la progression assez soutenue des consommations énergétiques, notamment dans le secteur des transports. Tout comme les résultats obtenus par le groupe de prospective de l'énergie du Commissariat Général du plan, notre évaluation du coût économique de l'ajustement à la norme de Kyoto révèle l'importance des efforts qui doivent être faits autant au plan de l'offre d'énergie qu'au plan de la demande, pour obtenir une stabilisation des émissions de dioxyde de carbone. Le marché seul, et son propre mode de régulation, peut-il assurer la réalisation de pareils efforts ?

Le scénario *vert* implique nécessairement une réduction plus ou moins significative du produit par tête. Comme cela a déjà été souligné, la société accepte de " sacrifier " des points de croissance économique pour mieux profiter de la qualité du milieu naturel, du patrimoine naturel, de l'habitat des villes comme de la campagne. A cet égard, nous notons qu'une réduction de la demande de biens accompagnée d'une certaine amélioration du rendement énergétique, que l'abandon du charbon et la stimulation des énergies renouvelables, impliquent une valeur du carbone bien moindre que celle observée dans les deux scénarios précédents. Pareil résultat s'explique aisément par le rôle fondamental de l'effet volume, par une forte maîtrise des consommations d'énergie, dans la stabilisation des émissions de gaz à effet de serre, notamment dans le secteur des transports.

Le scénario technologique propose la plus faible valeur du carbone, révélant en cela une charge d'adaptation bien moindre que pour les autres scénarios envisagés, ainsi qu'un rattrapage vers le régime de croissance de référence. C'est pour cette dernière raison que le coût marginal pour la période 2010 - 2020 est inférieur à celui calculé pour la période 2000 - 2010. Cela étant, il est clair que ce résultat dépend étroitement de l'hypothèse très optimiste selon laquelle le taux de croissance annuel moyen de l'efficacité énergétique, pour tous les secteurs d'activité, se situerait à hauteur de 1,5%. On peut évidemment contester le fait de supposer qu'une telle amélioration puisse se poursuivre au cours des 30 prochaines années. Cela dit, nous soulignons que l'objectif visé par notre analyse n'est pas de prévoir l'évolution attendue du progrès technique dans le domaine de l'énergie, mais de proposer un scénario dont la mesure quantitative excède celle des autres sur la période considérée. On cherche surtout à souligner les potentiels de faisabilité, aussi faibles soient-ils, d'un régime de croissance " écologiquement ajusté ", l'ampleur de la charge qu'ils suscitent, en aucun cas le régime de croissance effectivement réalisable.

A ce propos, la charge d'adaptation observée pour le scénario technologique se justifie, au plan macroéconomique, par l'effet combiné d'une meilleure efficacité énergétique et d'une production accrue, lequel effet se traduit généralement par un accroissement significatif de la demande d'électricité. De sorte qu'une stratégie technologique optimiste comme celle-ci engendre un effet volume significatif par un surcroît de croissance induisant une réduction bien moins significative des émissions de CO₂. Pour répondre à la demande d'électricité, l'économie doit suivre un régime de croissance soutenue, lequel accroît, par le célèbre principe d'accélération, la demande énergétique. Ce scénario illustre combien il est difficile de maintenir la croissance économique et de réduire les émissions. Dans le cas du scénario technologique, la demande énergétique accrue est quelque peu compensée par un surcroît notable de l'efficacité énergétique. Dans le cas du scénario vert, au contraire, la performance environnementale est garantie par une demande énergétique plus faible. Le niveau de

vie matériel associé à ce scénario est alors bien entendu bien moindre.

Au total, il ressort que les deux scénarios tendanciels ne sont ni l'un ni l'autre des scénarios assurant la durabilité de la France, que ce soit sur les plans économiques, sociaux et écologiques. Le scénario vert représente une possibilité de mise en valeur des richesses du milieu naturel. Cela étant, les français doivent nécessairement accepter, dans le cadre de ce scénario, des restrictions importantes quant à leur mode de vie. Ils doivent notamment être prêts à engager des ressources économiques pour valoriser l'environnement naturel plutôt que de bénéficier d'une croissance matérielle maximale. Le scénario technologique exprime, quant à lui, la vision d'une productivité forte au sens d'une baisse de dépendance par rapport au capital naturel. En d'autres termes, il implique une croissance de la productivité du capital naturel. La capacité de réduire les émissions ou les pressions environnementales, par rapport à l'unité de produit économique, s'élève. Il s'agit alors d'une vision de l'environnement "artificialisé" et d'une insertion sociale toujours plus dépendante de l'innovation technologique. Contrairement au scénario précédent, peu de place est accordée à la participation des "citoyens" dans la mise en œuvre des éléments moteurs de ce scénario. La légitimité sociale, c'est-à-dire la soutenabilité sociale, en est alors moins assurée.

D'après les résultats de l'évaluation des potentiels de faisabilité technico - économique, la France ne saurait connaître une stabilisation durable de ces émissions de gaz à effet de serre en adoptant seulement une stratégie de mise en œuvre de solutions purement techniques d'amélioration des rendements énergétiques. Parallèlement au domaine technique, des mesures de maîtrise des consommations énergétiques demeurent tout aussi significatives, lesquelles impliquent nécessairement une réorientation majeure des politiques d'aménagement du territoire et des transports. Pareilles mesures doivent également se traduire par une modification des comportements de consommation.

Il ressort de ces simulations que l'originalité de l'approche par le *potentiel de faisabilité* d'un sentier de croissance, réside dans une description précise des mécanismes qui président à la *mise en œuvre* d'une stratégie de développement écologiquement durable. Puisque toute politique d'environnement induit une forme d'engagement, on doit distinguer les conditions nécessaires à la réalisation de l'engagement et celles relatives à son absorption par le système socio-économique. Or ce dernier point est essentiel dans la mesure où l'absorption constitue elle-même une condition nécessaire à la mise en œuvre des investissements futurs. Ces nouveaux investissements modifient en permanence les conditions d'équilibre, et au sein d'une économie qui progresse les industries ne peuvent jamais être en position d'équilibre. Ces déséquilibres seront présents lors des phases d'expansion et de contraction de la tendance. Même si pareilles phases n'entraînent pas toujours les mêmes conséquences.

Inscrit fondamentalement dans cette perspective, le modèle M3ED n'a pas pour objet de mesurer les effets prix et revenu consécutifs à des politiques de contrôle des émissions. Il peut néanmoins fournir des informations intéressantes sur les données dites structurelles de l'économie : ces politiques de contrôle ont-elles une influence notable et durable sur la capacité productive de tel ou tel secteur d'activité ou de l'ensemble ? De plus, le modèle propose une évaluation du contenu en énergies et carbone des biens sectoriels destinés à la demande finale. Enfin, il détermine les ajustements nécessaires en capital, en flux d'importation et d'exportation, pour mettre

en place des configurations technologiques nouvelles ou un secteur de dépollution.

Au bilan, même si l'évaluation des coûts macro-économiques ou d'un double dividende paraît indispensable, celle-ci devrait toujours s'accompagner d'une analyse rigoureuse des changements de structure, lesquels affectent notamment le secteur énergétique. Cette analyse doit conduire à recenser les ressources et autres potentiels de développement des énergies renouvelables. Le cadre analytique structurel sur lequel le modèle M3ED prend appui, permet d'étudier les incidences socio-économiques et écologiques de changements de technologie ou de style de vie, et les implications de pareils changements. Il convient de souligner ici que ce cadre définit les scénarios comme de véritables concepts de solution. Il ne s'agit donc pas de produire des résultats en accord avec des préceptes théoriques forts, mais de fournir un outil d'aide à la décision face aux problèmes du moment ou à venir.