

**Université d'Ottawa
Faculté des sciences sociales**

THÈSE DE MAÎTRISE EN SCIENCES ECONOMIQUES

POLLUTION, ENERGIE ET INNOVATION

VERS UNE NOUVELLE VISION DE LA CROISSANCE ECONOMIQUE

Directeur de Thèse: Dr. N.V Quyen

Présentée par: Hichem Ayadi

Décembre 1995

© Hichem Ayadi, Ottawa, Canada, 1996



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services Branch

395 Wellington Street
Ottawa, Ontario
K1A 0N4

Bibliothèque nationale
du Canada

Direction des acquisitions et
des services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa (Ontario)
K1A 0N4

Your file *Voire référence*

Our file *Notre référence*

The author has granted an irrevocable non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of his/her thesis by any means and in any form or format, making this thesis available to interested persons.

L'auteur a accordé une licence irrévocable et non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de sa thèse de quelque manière et sous quelque forme que ce soit pour mettre des exemplaires de cette thèse à la disposition des personnes intéressées.

The author retains ownership of the copyright in his/her thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without his/her permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège sa thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

ISBN 0-612-15694-X

Canada



UNIVERSITÉ D'OTTAWA
UNIVERSITY OF OTTAWA

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier le professeur Nguyen Van Zuyen pour son soutien moral et pour ses conseils directifs qui m'ont permis d'améliorer substantiellement cette recherche.

Je remercie également les membres du Jury d'avoir accepté de juger ce modeste travail.

Ma reconnaissance va également à tous les membres du département des sciences économiques d'Ottawa, qui ont tous contribué à faire de mon séjour à Ottawa un événement gratifiant intellectuellement et humainement.

Résumé

Cette recherche est une contribution modeste à la problématique environnementale et économique. On présente en effet une réflexion sur le problème de l'effet de serre d'un point de vue économique.

Le point de départ de cette étude est l'idée suivante: l'exploitation des « fossiles fuels » est la base de la croissance économique. Elle est aussi la principale cause de l'aggravation de la pollution. Une solution radicale à ce problème serait l'insertion d'une nouvelle énergie dans le processus de production qui soit non polluante et renouvelable.

On s'est servi de cette idée pour mener une étude théorique sur l'exploitation optimale de l'énergie en présence de l'accumulation du gaz carbonique. L'outil dans cette étude est la technique de contrôle optimale. Deux modèles ont été présentés.

Chacun de ces modèles se rapporte au problème suivant: Considérons une économie disposant d'un stock limité de pétrole. Cette économie produit un seul bien de consommation suivant une fonction de production agrégée qui dépend de l'input énergétique et de la concentration du gaz carbonique dans l'atmosphère. Cette économie peut se procurer une nouvelle énergie appelée énergie « backstop ». La production de cette dernière nécessite l'investissement du capital, dit capital « backstop ». Elle nécessite également un coût variable. Les principales questions posées sont les suivantes:

Comment exploiter le stock de pétrole d'une façon optimale? Serait-il épuisé en un temps fini? Comment s'opère la transition du pétrole en énergie « backstop »? Serait-elle brusque ou graduelle? Le seuil d'irréversibilité pour la concentration du gaz carbonique serait-il dépassé?

Dédicace

A ma mère Aïcha ayadi et mon père Khomaiess Ayadi en guise de reconnaissance.

A mes soeurs Monia, Awatef, Houaida et Rim.

A tous(es) mes amis(es), en particulier: Hend, Meriem, Dorsaf, Sumia, Adel, Foued, Hichem, Faical, Moez et Achraf.

Au professeur N.V.Quyen avec tout mon respect.

SOMMAIRE

Chapitre I: Introduction à la thèse

Chapitre II: Les risques majeurs

Introduction.....	7
1. La destruction de la couche d'ozone.....	8
2. L'effet de serre.....	10
3. Les pluies acides et les maladies de forêts.....	15
Conclusion.....	17

Chapitre III: Energie et pollution de l'air

Introduction.....	18
1. Les fossiles fuels, source de la pollution.....	18
2. L'énergie, base du développement économique.....	21
3. Pour un développement durable.....	23
4. Les énergies renouvelables non polluantes.....	25
Conclusion.....	27

Chapitre IV: Pollution et exploitation optimale de l'énergie

Introduction.....	30
1. Hypothèses.....	31
2. Présentation du modèle.....	34
3. La phase postérieure à l'innovation: La solution optimale.....	37
3.1 Cas 1: Le stock initial de pétrole est nul.....	38
3.2 Cas 2: Le stock initial de pétrole est strictement positif et l'accumulation initiale du CO ₂ est supérieure au seuil d'irréversibilité..	39
3.3 Cas 3: Le stock initial de pétrole est strictement positif, le stock initial du CO ₂ est inférieur au seuil d'irréversibilité et la somme de ces deux stocks est supérieure au seuil d'irréversibilité.....	50
4. Avant l'innovation: Analyse de la solution optimale.....	59
Conclusion.....	60

Chapitre V: La croissance optimale sous contrainte de la pollution de l'air

Introduction.....	62
1. Hypothèses.....	62
2. Présentation du modèle.....	65
3. La discussion de la solution optimale.....	66
3.1 Cas 1: Le stock initial de pétrole est nul.....	66
3.1.1 Le stock initial de pétrole est nul et l'accumulation du CO₂ est irréversible.....	67
3.1.2 Le stock initial de pétrole est nul et l'accumulation initiale du CO₂ est strictement inférieure au seuil d'irréversibilité.....	74
3.2 Cas 2: Le stock initial de pétrole est strictement positif.....	76
3.2.1 Le stock initial de pétrole est strictement positif et la concentration du CO₂ est irréversible.....	76
3.2.2 Le stock initial de pétrole est strictement positif, le stock initial de CO₂ est inférieur au seuil d'irréversibilité et la somme de ces deux stocks est supérieure au seuil d'irréversibilité.....	81
Conclusion.....	85

Chapitre VI: Conclusion générale

LISTE DES TABLEAUX:

Tableau I. Les prévisions de l'augmentation de la température.....	13
Tableau II. Les principaux gaz et leurs sources d'émission.....	19

LISTE DES PROPOSITIONS:

Proposition 4.1.....	42
Proposition 4.2.....	44
Proposition 4.3.....	47
Proposition 4.4.....	51
Proposition 4.5.....	54
Proposition 4.6.....	55
Proposition 5.7.....	74
Proposition 5.2.....	76
Proposition 5.3.....	78
Proposition 5.4.....	79
Proposition 5.5.....	80
Proposition 5.6.....	81
Proposition 5.7.....	85

Chapitre I

INTRODUCTION A LA THESE

Aujourd'hui, l'état de l'environnement est sans précédent. Nombreux sont ceux qui anticipent les désastres écologiques et affirment que le système capitaliste a créé des freins à son propre développement. D'autres sont plutôt optimistes et croient à la possibilité de réconcilier l'homme avec la nature. Quoi qu'il en soit, il importe d'examiner les chiffres suivants pour avoir une idée sur l'ampleur des problèmes environnementaux:

- Six records de chaleur ont marqué la décennie (1980-1990);
- La détérioration de la couche d'ozone se fait, dans certaines régions à un rythme deux fois plus rapide que celui que les scientifiques prévoient il y a quelques années;
- Une superficie de 17 millions d'hectares de forêts disparaît chaque année, soit l'équivalent de la superficie de l'Angleterre;
- Environ 140 espèces de plantes et d'animaux disparaissent quotidiennement;
- Environ 1.2 milliard de personnes manquent d'eau potable;
- La population mondiale croît de l'ordre de 92 millions de personnes chaque année, soit l'équivalent de la population de Mexico¹ (plus que 95% de ce total dans les pays en développement).

Il est évident que la réalité économique qu'on s'est construit est à l'origine de l'état actuel de notre milieu de vie. En retour, la dégradation de l'environnement sera sans doute une entrave importante au développement de l'économie mondiale. Aujourd'hui, il

¹ L. R. Brodant, H. B. Brough, A. T. Durning, C. Falvin, «L'état de la planète », pp 11-13.

n'est plus possible de dissocier état de l'environnement et état de l'économie. L'amélioration de l'un dépend de celle de l'autre.

La prise de conscience de l'ampleur des problèmes écologiques s'est faite tardivement et de façon hésitante. En effet, la cause principale que défendaient les précurseurs de l'écologie était la protection de la beauté sauvage de la nature. Un tel argument n'était pas suffisant pour convaincre de la nécessité d'intégrer des éléments d'ordre environnemental au sein de l'activité économique.

Durant «l'âge d'or», l'homme était incapable de voir la manière par laquelle il construisait son avenir. Fasciné par les transformations que subissait son style de vie, il se contentait de jouir de la prospérité tirée d'une nature qu'il considérait éternellement généreuse. A cette époque, le progrès était perçu sur une base quantitative. L'évaluation de la richesse se faisait au nombre d'objets fabriqués. L'importance accordée aux produits industriels prenait le pas sur la protection des sites naturels.

Vers la fin des années soixante, on assistait à la naissance d'un nouveau paradigme. Ainsi, l'aggravation des problèmes environnementaux, en l'occurrence ceux liés à la pollution, avait mené à ne plus concevoir la problématique environnementale sur une base esthétique. On a commencé en effet à dénoncer toutes sortes d'activité polluante, non seulement à cause de leur nuisance à la nature mais aussi en raison de leur effet de retour sur l'homme lui même. L'asphyxie des milieux urbains a eu pour conséquence immédiate la naissance de l'écologie politique. Toutefois, les efforts déployés durant cette période

n'ont pas été suffisants pour contrebalancer les effets cumulatifs d'une pollution qui s'accroissait depuis la révolution industrielle.

Au début des années quatre-vingts, on s'est aperçu que la pollution avait changé de dimension. Les scientifiques ont en effet démontré qu'elle s'est étendue désormais pour toucher la totalité du globe terrestre. C'est seulement à partir de ce moment là qu'on a commencé à comprendre que le problème auquel on doit faire face ne concernait plus une zone bien déterminée. Il s'agit d'une pollution qui risque de mettre en danger la vie sur la planète Terre.

En réalité, la pollution existe depuis que l'homme a découvert le feu sans pour autant constituer un sujet de débat. Elle n'est devenue un problème économique qu'à partir du moment où elle s'est amplifiée pour atteindre un niveau nocif aux activités de production, de consommation et d'échange.

Ce travail représente une contribution modeste à la problématique environnementale et économique. On présente en effet une réflexion sur la croissance économique en présence de la pollution de l'air. La question de l'utilisation de l'énergie est au coeur de cette réflexion puisqu'elle est à la fois le moteur du développement économique et la principale cause de l'aggravation de la pollution.

Le présent chapitre se présente sous forme d'introduction générale à la thèse. Dans le deuxième chapitre on se propose d'étudier les principaux effets de la pollution de l'air. Il s'agit d'analyser les menaces globales à savoir la destruction de la couche d'ozone, l'effet de serre et le problème des dépôts acides.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de l'interaction entre l'exploitation de l'énergie et la pollution de l'air. En premier lieu, on distinguera les gaz responsables de la dégradation de l'environnement. Ensuite, on mettra l'accent sur la responsabilité du secteur énergétique dans l'émission de ces gaz. Ce même secteur se révèle être le moteur de la croissance économique. Enfin, on propose l'utilisation des énergies renouvelables comme solution pour la réalisation du développement durable. En d'autres termes, la dynamique de l'innovation devrait offrir à la problématique économique et environnementale, la solution idéale.

Le quatrième et le cinquième chapitre constituent le coeur de la thèse. Dans chacun de ces chapitres, on formule un modèle théorique se rapportant à l'effet de serre.

Le problème peut être décrit comme suit:

Considérons une économie disposant d'un stock limité de pétrole. Cette économie produit un seul bien de consommation suivant une fonction de production agrégée qui dépend de l'input énergétique et du niveau de la concentration du CO_2 dans l'atmosphère. L'extraction du pétrole est supposée être nulle. Cependant, son exploitation génère le CO_2 et mène à la dégradation de l'environnement. La question de base est alors: comment exploiter le stock de pétrole d'une façon optimale?

Le modèle présenté dans le quatrième chapitre est formulé à partir d'une perspective d'équilibre partiel. En plus des fossiles fuels, l'économie dispose d'une autre technologie appelée le backstop. La technologie backstop à chaque instant peut produire une quantité illimitée d'énergie à un coût marginal croissant. Cette technologie est

découverte au début de la période d'optimisation. Cependant, pour se procurer cette énergie, il faut un certain montant fixe de capital (once-and-for-all fixed capital). La décision stratégique est alors de décider du moment propice pour investir ce capital afin d'insérer l'énergie backstop au processus de production.

Avant cet investissement, la seule source énergétique provient du secteur pétrolier. Une fois l'énergie backstop disponible, il devient alors possible d'utiliser le pétrole et/ou cette énergie pour la production du bien de consommation.

Dans ce chapitre, le modèle est formulé pour analyser l'exploitation optimale du pétrole avant l'innovation (avant l'introduction de la nouvelle technologie) et pour étudier l'utilisation optimale de l'énergie (pétrole et backstop), une fois le backstop disponible. Ce modèle aborde également la question de l'irréversibilité² pour le stock de CO₂ dans l'atmosphère. Des conditions sont présentées, indiquant s'il est optimal de ramener la concentration du CO₂ à l'état irréversible.

Dans le cinquième chapitre, on reprend les questions analysées dans le quatrième chapitre, dans une perspective de croissance optimale. Le modèle formulé, suit la tradition de Ramsey. Tout comme dans le quatrième chapitre, l'économie produit un bien de consommation suivant une fonction de production agrégée qui dépend à la fois de l'input énergétique et de l'accumulation du CO₂ dans l'atmosphère. Au début de la période d'optimisation, l'économie dispose d'un stock fixe de pétrole. Il existe également une énergie renouvelable. Cependant, la production de cette énergie demande un investissement en capital. Le plus ce capital est élevé dans le secteur de l'énergie

² Le stock de CO₂ est irréversible s'il atteint un certain niveau, dit seuil d'irréversibilité. A partir de ce seuil, la dégradation naturelle de CO₂ est nulle. Ainsi, une concentration de ce gaz atteignant ce niveau sera dans l'impossibilité de passer à un niveau inférieur.

renouvelable, le plus il est possible de tirer de l'énergie de ce secteur. La question analysée dans ce chapitre à trait au problème suivant: comment exploiter le stock de pétrole et accumuler le capital en même temps?

Si le stock initial de capital est faible, l'input énergétique provient du secteur pétrolier au début de la période. Pendant ce temps, on assiste à l'augmentation du stock de capital. L'énergie renouvelable se substitue graduellement au pétrole. Elle devra le remplacer complètement quand le stock de celui-ci est totalement épuisé en un temps fini. A partir de ce moment, la production du bien de consommation se fait uniquement en utilisant l'énergie renouvelable et l'économie converge alors vers l'équilibre stationnaire dans lequel la consommation est constante dans le temps.

Dans un dernier chapitre, on conclura le travail sur un résumé des principaux résultats théoriques auxquels on a abouti, tout en ouvrant le champ à de futures voies de recherche.

Chapitre II

LES RISQUES MAJEURS

Introduction

L'immensité de l'atmosphère porte à croire que, peu importe le degré de pollution, l'équilibre naturel de la planète ne sera jamais affecté. C'est d'ailleurs cette idée qui a été à la base des pratiques destructives de l'environnement. Elle nous a conduit à oublier une loi cruciale: la loi de l'invariance de la nature (rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme). Tout ce qui est émis serait alors quelque part, sous une forme ou une autre, en train de nuire à notre milieu de vie.

Certes, on est reconnaissant à l'industrialisation qui, en un siècle, a complètement transformé le mode de vie de l'homme. Malheureusement, cette industrialisation s'est faite au détriment de l'environnement.

Ce que l'on risque aujourd'hui, c'est notre existence. La destruction de la couche d'ozone, l'accroissement de l'effet de serre et l'apparition de pluies acides menacent de mettre fin à la vie sur la planète Terre.

Dans ce qui suit, on se propose d'étudier chacun de ces problèmes. Le recours à des notions de chimie sera d'un grand secours pour expliquer la nature de ces phénomènes et pour mieux comprendre les conséquences fâcheuses qui peuvent découler de l'activité humaine.

§ 1. La destruction de la couche d'ozone

La couche d'ozone, située en haute altitude dans le stratosphérique, joue un rôle crucial dans la protection de la vie sur notre planète. Grâce à elle, les êtres vivants sont à l'abri des rayons solaires ultraviolets (U.V.) extrêmement nocifs.

Les chimistes expliquent l'équilibre naturel de la couche d'ozone par la réaction de Chapman. Cette réaction chimique assure à la fois la production et la destruction de l'ozone. Ses principales composantes sont l'oxygène (O_2) et l'azote (N).

Les rayons solaires de courte longueur d'onde s'attaquent aux molécules d'oxygène pour les dissocier en atomes. La présence de l'azote assure la coalition de ces atomes aux molécules d'oxygène pour donner naissance à l'ozone (O_3). Gaz toxique, l'ozone est une barrière aux rayons solaires nuisibles à la vie sur Terre. L'U.V de grande longueur d'onde s'attaque à son tour aux molécules d'ozone pour les partager en molécules et atomes d'oxygène. Les atomes obtenus sont très réactionnels. Ils peuvent s'associer à des molécules d'ozone pour donner de l'oxygène moléculaire, ou participer de nouveau à la formation de l'ozone.

Si la réaction de Chapman explique la totalité de la formation de l'ozone, elle n'explique que 15 à 20 % de sa destruction³. En effet, des gaz comme le méthane (CH_4), l'oxyde nitreux (N_2O), la vapeur d'eau (H_2O) et l'hydrogène moléculaire s'oxydent à une altitude de 20 à 40 km pour donner le radical (OH) et l'oxyde d'azote (NO). L'ozone s'associe aux molécules ainsi obtenues pour former le H_2O et le NO_2 (le dioxyde d'azote).

³ S. Facheux & J. F. Noël, « Les menaces globales sur l'environnement », p. 21.

La présence de constituants chlorés dans l'atmosphère constitue une autre origine de la disparition de l'ozone, cinq fois plus puissante que la précédente⁴. Bien qu'assez rares, ces gaz représentent la principale cause de la destruction de l'ozone.

Le cycle de production et de destruction de l'ozone est bouclé. La complexité de ce phénomène n'a jamais empêché la nature de concrétiser, par elle même, un bilan équilibré pour la couche d'ozone. Les ajouts de l'homme, à partir de la révolution industrielle, ont constitué un élément perturbateur pour cet équilibre.

Les premiers à avoir mis en garde contre les dangers de l'activité humaine sur la couche d'ozone, étaient Moline et Rouland (1974)⁵. Ces deux auteurs ont affirmé que le cholofluorocarbone (CFC), émis par les industries, représente une véritable menace pour cette couche.

A partir de cette date les efforts des scientifiques se sont multipliés afin de dévoiler le mystère couvrant ce problème. En se basant sur des expéditions scientifiques et des données par satellite, ils ont constaté la diminution globale de l'ozone et l'existence d'un trou dans le ciel austral.

Les dérivés chlorés, en l'occurrence les CFCs, s'avèrent être les principaux responsables de la destruction de l'ozone. La concentration de ces gaz dans l'atmosphère est passée de 0.6 à 3.4 particule par milliard (ppm) depuis la révolution industrielle. Heureusement, des efforts considérables ont été déployés contre l'émission du CFC⁶.

Néanmoins, les constituants chlorés émis antérieurement persistent encore dans

⁴ Id., p. 21.

⁵ Id., p. 19.

⁶ Id., p. 28.

l'atmosphère. Ils vont continuer à détruire l'ozone et à représenter une véritable menace pour la planète Terre.

Les scientifiques avouent que l'incertitude persiste toujours quant à l'évolution future de la couche d'ozone. Jusqu'à présent, ils sont incapables de mesurer avec précision l'ampleur des impacts de la pollution sur son équilibre.

§ 2. L'effet de serre

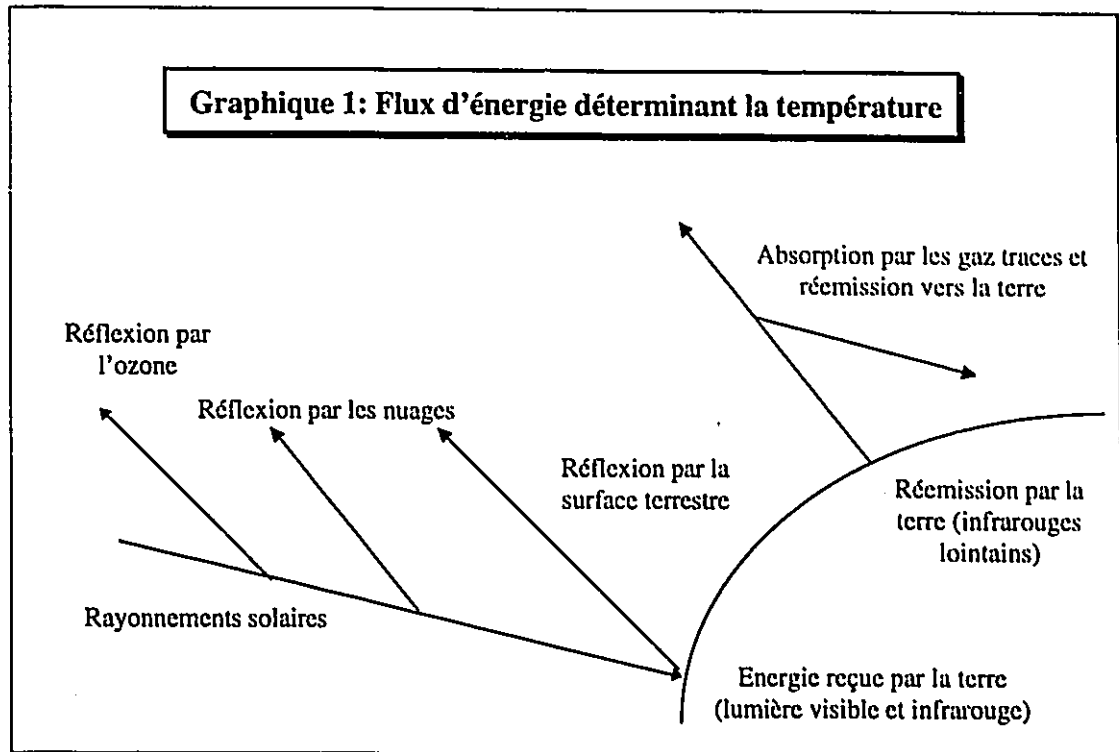
La destruction de l'ozone n'est pas la seule conséquence de la pollution humaine. Phénomène extrêmement dangereux, l'accroissement de l'effet serre menace aussi la vie sur la Terre.

En réalité, l'effet de serre existe depuis toujours. Il a garanti un climat adéquat et une température ambiante pour les être vivants. Le soleil, source primaire de l'énergie, constitue encore une fois l'origine du phénomène à étudier.

Avant de se lancer dans l'analyse des conséquences de l'accroissement de l'effet serre, on se propose d'identifier les mécanismes qui l'assurent. Dans le graphique 1, on schématise les flux d'énergie qui déterminent la température de notre planète.

La Terre reçoit en effet chaque année une immense quantité d'énergie solaire sous forme d'infrarouges proches et de lumière visible. Sa température se stabilise en conséquence à environ 15°C. En vertu de la loi du « corps noir »⁷, la Terre émet l'énergie reçue sous forme d'infrarouges lointains.

⁷ C'est une loi de physique qui stipule que tout corps porté à une température donnée reflète de l'énergie sous forme de rayonnement. (Tiré de C. Ronneau, « Energie Pollution Environnement: Les éléments du débat », P. 84).



* Source: C. Ronneau, «Energie Pollution Environnement: Les éléments du débat », p 85.

Il est clair d'après le graphique ci dessus, qu'une grande partie du rayonnement solaire est entravée par l'ozone en plus de la partie réfléchié par les nuages avant d'atteindre le globe terrestre.

Le secret de l'effet serre réside en fait dans la présence de certains gaz traces (CO_2 , CH_4 , O_3 , N_2O et H_2O) dans l'atmosphère. Bien qu'ils soient transparents à la lumière du soleil, ces gaz représentent une barrière pour les rayonnements en provenance de la Terre.

Tout s'opère en raison du fait que les gaz précités sont perméables à la lumière visible et aux infrarouges proches exportés par le soleil, alors qu'ils changent complètement de comportement lorsqu'il s'agit des infrarouges lointains réfléchiés par la

Terre. L'entrave à ce reflet constitue une barrière, comparée au vitrage d'une serre, d'où le terme «effet de serre».

Cet effet provoque le réchauffement de l'atmosphère qui, en concordance avec le réchauffement de la Terre causé directement par les rayonnements solaires, détermine la température de la planète.

Les gaz traces, notamment le CO₂, jouent un rôle fondamental dans la réalisation de l'effet de serre. La question posée par le suédois Savante Arrhénius (1896), reste d'actualité: quelles sont les conséquences de la concentration croissante de ces gaz dans l'atmosphère?

En réalité, cette question fait l'objet d'une grande controverse entre ceux qui banalisent le problème en prévoyant un nouvel âge glaciaire et ceux qui mettent en garde contre les conséquences fâcheuses de l'amplification de l'effet de serre.

Pour les premiers, la pollution humaine contient suffisamment de poussière susceptible de contrebalancer l'effet du CO₂. Par conséquent, les fluctuations actuelles de la température ne peuvent guère constituer un élément inquiétant puisqu'elles existent depuis toujours.

Les seconds, quant à eux, prouvent une forte corrélation entre l'élévation de la température et la concentration du CO₂ dans l'atmosphère. L'origine de l'inquiétude est bien sûre la concentration galopante de ce gaz qui, contribue à environ 50 % du forçage de l'effet de serre (Ocken et All, 1989)⁸.

Des mesures systématiques de la concentration du CO₂ ont été établies à partir de la fin des années cinquante au volcan Hawaïen Mauna Loa et sur la côte de l'Alaska.

⁸ Tiré de «Environmental Data Report », 1989-1991, p 4.

Elles ont prouvé que la concentration de ce gaz est passée de 316 ppm en 1959, à 345 ppm en 1985 (H.W.Cottinger, 1992)⁹.

Si l'on sait que la concentration du CO₂ était relativement stable avant la révolution industrielle (sans dépasser 280 ppm), que dire des 600 ppm prévus pour le début du siècle prochain¹⁰? L'accroissement de l'effet serre serait le résultat le plus probable et des changements climatiques en découleraient nécessairement.

Dans le tableau suivant, on résume les prévisions de l'augmentation de la température.

Tableau I: Les prévisions de l'augmentation de la température

Année	Température moyenne globale	Fourchette
2020	1.8° C	1.3° C - 2.5° C
2070	3.5° C	2.4° C - 5.1° C
2100	4.5° C	3.6° C - 5° C

*Source: Le groupe travail III de l'I.P.I.C (Intergovernmental Panel on Climate Change), «Les menaces globales sur l'environnement», op.cit., p 36.

De prime abord, les prévisions présentées dans ce tableau peuvent apparaître négligeables. Mais ce n'est pas le cas pour un climatologue. En effet les variations de température durant tout l'intervalle séparant les périodes glaciaires et interglaciaires n'ont jamais dépassé les 6 à 7 °C¹¹. Toutefois, il faut traiter avec prudence les chiffres de ce tableau. Les modèles utilisés peuvent contenir des imperfections susceptibles de modifier les résultats.

On est probablement loin d'un modèle parfait, l'incertitude quant au rythme d'évolution de l'effet serre persiste toujours. Jusqu'à présent, les scientifiques sont

⁹ R. Pethig, «Conflict and Cooperation in Managing Environmental Resources », p. 136.

¹⁰ Les menaces globales sur l'environnement, op.cit., p. 33.

¹¹ Id., p. 32.

incapables de tout expliquer et de tout prévoir avec certitude. Cependant, la prudence est de rigueur, l'enjeu étant l'existence sur cette planète. Les conséquences de l'accroissement de l'effet de serre sont multiples et difficiles à délimiter.

Des chiffres semblables à ceux du tableau ci dessus auront pour conséquence immédiate une évaporation plus importante, ce qui entraînera la diminution des surfaces couvertes de neige et de glace. Ensemble, l'expansion thermique et l'effondrement de la glace provoqueront l'élévation du niveau de la mer de quelques dizaines de centimètres (certains modèles prévoient l'augmentation du niveau de la mer de plus d'un mètre d'ici l'an deux mille, contre 0.1 à 0.2 m au cours du siècle précédent¹²).

On pourra assister aussi à un bouleversement du comportement des volcans, des cyclones et des tempêtes, les catastrophes écologiques risqueront d'être plus courantes.

Un autre problème sérieux concerne le changement de la distribution pluviométrique. Un tel changement provoquera nécessairement le déplacement des zones de cultures. En effet, chaque plante possède sa propre zone d'extension qui lui permet de se développer dans les conditions les plus favorables. Ces conditions regroupent essentiellement la qualité de la terre, le niveau pluviométrique et la température adéquate. L'absence de l'un de ces facteurs entrave le développement normal de la plante. L'agriculture serait alors parmi les principales victimes de l'accroissement de l'effet serre. Elle serait probablement incapable de subvenir aux besoins de la communauté humaine de plus en plus élargie.

¹² Report of the D.O.E, Multi-Laboratory climate change committee, « Energy And Climate Change », p. 9.

Les répercussions des bouleversements climatiques sur les forêts ne sont pas à négliger. Le temps laissé à ces dernières ne serait jamais suffisant pour leur permettre de s'adapter à leur nouveau milieu de vie.

En fait, le problème de l'adaptation aux variations climatiques ne se limite pas aux cas des forêts et des plantations. L'homme et l'animal sont les premiers concernés. Même si ces derniers éprouvaient une grande capacité d'adaptation aux changements climatiques de long terme, ils ne survivront pas sans dommages considérables, dus à une variabilité climatique aussi précipitée. L'homme, l'animal et les plantations souffrent déjà de la pollution de l'air. L'accroissement de l'effet de serre aggrave encore la situation.

§ 3. Les pluies acides et les maladies de forêts

Alors que les problèmes de la couche d'ozone et de l'effet de serre concernent tout le globe terrestre, le phénomène des pluies acides ne touche que certaines régions du monde, en l'occurrence l'Europe du Nord-Est, l'Est des Etats Unis et du Canada, quelques parties de la Chine et plusieurs régions de l'Afrique Subsaharienne.

Le premier à avoir utilisé le terme pluie acide est R.A. Smithen (1872)¹³. Il a fallu attendre les années quarante pour apporter l'évidence empirique de la présence du phénomène. L'homme, à travers ses activités, se trouve encore une fois à l'origine d'un autre problème environnemental.

En effet, l'utilisation des combustibles fossiles (charbon, pétrole...) charge l'atmosphère d'oxydes d'azote (NO_x) et d'oxyde de soufre (SO_2). Le soufre s'oxyde dans l'atmosphère en anhydride sulfurique qui en présence de l'eau donne naissance à

¹³ Les menaces globales sur l'environnement, op.cit., p. 11.

l'acide sulfurique (H_2SO_4). Acide extrêmement corrosif, il entraîne l'acidification de l'atmosphère. La même réaction chimique s'opère pour l'oxyde d'azote qui donne l'acide nitrique (HNO_3)¹⁴. La présence de ces acides dans l'atmosphère entraîne l'acidification de l'eau de pluie. Les victimes seront bien sûr la végétation, le sol et les lacs...

En réalité, l'impact des pluies acides sur les lacs et les cours d'eau constituent un sujet de controverse. Des études scientifiques ont en effet démontré l'habileté de ces derniers à neutraliser les effets des dépôts acides. On est sûr par contre, que ces dépôts représentent la principale cause de dégradation des matériaux et des bâtiments.

L'incertitude concerne aussi les dommages qu'apportent les pluies acides aux forêts. Ainsi, la maladie des forêts allemandes au début des années quatre-vingts a mobilisé la communauté scientifique. Au cours de cette période, les dépôts acides étaient au premier rang des incriminés. Des études ultérieures ont fait porter le fardeau à l'ozone troposphérique et ont démontré que les pluies acides jouent un rôle aggravant mais non déterminant de l'état des forêts.

Le rôle secondaire attribué aux dépôts acides ne prouve en aucun cas l'innocence de l'oxyde d'azote et des hydrocarbures. On sait en effet que leur réaction au rayonnement solaire aboutit à la formation de l'ozone.

Il faut noter que même ce dernier scénario incriminant l'ozone dans la mort des forêts, reste un sujet de débat pour les spécialistes. L'incertitude et le mystère recouvrent toujours le problème des forêts. Quoi qu'il en soit, l'activité humaine, engendrant la pollution de l'air, s'avère à l'origine de ces problèmes.

¹⁴ « Environmental data report », 1989-1990, p 39.

§ 4. Conclusion

Il serait totalement erroné de croire que l'on puisse délimiter toutes les conséquences de la pollution de l'air en quelques pages. Certains effets sont toujours à l'état d'hypothèse, d'autres sont relativement invisibles. Dans les pages précédentes, on s'est limité à évoquer les principaux impacts des activités polluantes. On a aussi annoncé quelques conséquences qui mériteraient plus de développement.

On croit cependant que les sujets entamés sont largement suffisants pour mettre en garde contre les effets de la pollution de l'air. On sait en effet que les catastrophes majeures ne surviennent que ponctuellement. Si on continue à nuire à l'environnement comme on le fait aujourd'hui, on risque non seulement nos économies et notre confort, mais aussi notre existence sur cette planète. La destruction de la couche d'ozone, l'accroissement de l'effet serre, le phénomène des pluies acides se présentent comme des menaces globales et radicales.

Notre milieu de vie est menacé, on le sait aujourd'hui. Ce que l'on sait moins par contre, c'est l'avenir de la vie sur la Terre: les variations climatiques sont difficilement prévisibles, nos scientifiques sont toujours incapables d'identifier les frontières du problème de l'ozone. Toutefois, il faut croire à l'opinion courante qui dit : «plus la science progresse, moins il y a d'incertitude».

Plus de certitude permettrait à la fois d'identifier les activités humaines sources de problèmes environnementaux et de délimiter les dangers que l'on court. Les modes d'action seront alors plus adaptées et plus efficaces.

Chapitre III

ENERGIE ET POLLUTION DE L'AIR

Introduction

Certes, l'éclaircissement des conséquences de la pollution est très utile. Elle permet de prendre conscience de l'ampleur des risques environnementaux. Cependant, il importe plus de rechercher à identifier les causes qu'à expliquer les effets, les seconds étant les résultats des premiers.

§ 1. Les fossiles fuels source de la pollution

Dans ce qui a précédé, on a remarqué que les principaux gaz polluants sont: le dioxyde de carbone (CO_2), l'oxyde de carbone (CO), le méthane (CH_4), les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO_2), l'oxyde nitreux (NO), l'ozone (O_3), la vapeur d'eau (H_2O) et les CFCs.

Les sources de ces gaz sont multiples. Cependant, on peut les classer selon qu'elles soient d'origine naturelle ou bien causées par l'activité humaine. La première origine ne constitue pas un élément inquiétant, car on sait qu'elle existe depuis toujours sans pour autant causer une véritable crise environnementale. La seconde, au contraire, perturbe l'équilibre environnemental naturel et risque de provoquer des conséquences fâcheuses sur notre milieu de vie.

Essayons alors d'identifier les activités humaines responsables de l'émission des gaz incriminés. Le tableau II représente les différents gaz ainsi que les activités qui causent leurs émissions. Il ressort de ce tableau que l'utilisation des fossiles fuels (gaz

naturel, huiles et charbon) ne peut s'accomplir sans effet sur l'environnement. Cette énergie provoque l'émission de la quasi-totalité des gaz précités.

Le gaz naturel est le moins polluant des hydrocarbonés. L'huile dans ses différentes formes provoque davantage de dommages sur l'environnement. Biologiquement, c'est une substance complexe qui émet une variété de matières (le CO₂, le CO, le CH₄, le NO_x, le SO₂ et le N₂O) lors de son extraction, combustion et transport. Le charbon est la forme la plus polluante des fossiles fuels. Son utilisation émet une quantité plus grande des mêmes polluants produits par les hydrocarbonés liquides.

Tableau II: Les principaux gaz et leurs sources d'émission

Gaz	Les activités responsables de leur émission
Dioxyde de carbone (CO ₂)	Combustion des fossiles fuels et déforestation
Oxyde de carbone (CO)	Combustion des fossiles fuels, incendies des biomasses et agriculture
Méthane (CH ₄)	Incendies des biomasses, riz non décortiqué, fuites des gaz et mines, combustion des fossiles fuels.
Oxydes d'azote (NO _x)	Combustion des fossiles fuels et incendie des biomasses
Dioxyde de soufre (SO ₂)	Combustion des fossiles fuels
Oxyde nitreux (N ₂ O)	Culture et fertilisation des sols, combustion et déforestation
Ozone (O ₃)	Il n'est pas directement émis mais causé par l'émission d'autres gaz
Vapeur d'eau(H ₂ O)	L'émission atmosphérique est négligeable par rapport à l'évaporation naturelle
CFC	Les industries chimiques

* Source: Report of the D.O.E, op.cit., p 14-15.

L'émission du CO₂ est sans doute l'impact le plus dangereux de l'activité de l'homme sur son environnement. En brûlant des fossiles fuels on re-injecte dans

l'atmosphère du CO₂ emmagasiné par les plantes depuis des millions d'années. C'est ainsi qu'environ 70 % de l'émission de ce gaz par l'activité humaine trouve son origine dans l'utilisation des fossiles fuels (Houghton et woodwell, 1989)¹⁵.

L'oxyde de carbone (CO) est le produit de la combustion incomplète des fossiles fuels. Ce dernier ne contribue pas directement à l'effet de serre. Son action se concrétise à travers sa participation dans des réactions chimiques menant à la formation de l'ozone et du dioxyde de carbone. L'émission du CO est fonction des conditions de la combustion des fuels, une combustion inefficace conduisant généralement à une émission plus importante.

La concentration du méthane (CH₄) a plus que doublé depuis la révolution industrielle¹⁶. Le CH₄ est émis dans l'atmosphère par la combustion des fuels, par les fuites des gaz naturels et par l'extraction, la transmission et la distribution des huiles et du charbon. Il contribue à la fois à la destruction de la couche d'ozone et au forçage de l'effet de serre. Son interaction avec l'ozone troposphérique et la vapeur d'eau stratosphérique renforcent ses effets. Tout comme le cas du CO, l'émission du méthane croît en fonction de l'efficacité de la combustion.

Les fossiles fuels sont de même à l'origine d'autres gaz nocifs à l'environnement. Il s'agit des oxydes d'azote (NO_x) et du dioxyde de soufre (SO₂). Ces gaz contribuent aux différents problèmes environnementaux étudiés précédemment. En effet, l'utilisation de l'énergie dans le secteur industriel est la principale origine du dioxyde de soufre. Elle

¹⁵ Tiré du «Report of the D.O.E », op.cit., p.16.

¹⁶ United Nation Environment Prgramme, 1989, « Towards A Fossil Free Energy Futur », p. 31.

détient 85% de la totalité de l'émission de ce gaz¹⁷. L'émission des No_x (NO et NO₂) est aussi fonction des conditions de la combustion. Cependant, on note que dans ce cas, l'émission croît à mesure que la température de combustion augmente (généralement une température élevée mène à une combustion plus complète).

En ce qui concerne le N₂O, l'agriculture est la principale source de son émission (62% du total de son émission). Les fossiles fuels contribuent seulement à 12% de son émission¹⁸.

Les fossiles fuels n'ont par contre aucun rôle déterminant dans l'émission des CFCs. Ces derniers trouvent leurs origines essentiellement dans l'industrie chimique, la réfrigération et le chauffage.

La consommation des fossiles fuels et la pollution de l'air ont évolué de pair à mesure que les pays s'industrialisaient. Toutefois, il faut noter que cette consommation n'est pas la seule cause de la crise environnementale, d'autres facteurs tels que la déforestation et l'agriculture ont leur part dans l'émission des gaz polluants.

§ 2. L'énergie, base du développement économique

L'énergie se définit comme le «mouvement» ou «la possibilité de créer du mouvement». C'est aussi «la possibilité de transformer la matière, de créer des substances nouvelles, inconnues dans la nature, des substances plus performantes, plus résistantes»¹⁹.

¹⁷ «An Agend Of Science For Environment And Development Into The 21st Centry », p. 107.

¹⁸ Id., p. 106.

¹⁹ Energie Pollution Environnement: Les éléments du débat, op.cit., p. 11.

Le confort dont on jouit aujourd'hui est inhérent à l'énergie, notamment aux fossiles fuels. Ces derniers constituent la principale source énergétique (ils représentaient 77% de l'offre énergétique mondiale et 87% de l'énergie industrielle en 1990)²⁰. Ils sont la base de la vie moderne et du développement économique. Tout processus de production, de consommation et d'échange est inhérent aux fossiles fuels. Ils sont présents quand il s'agit de l'industrie et du transport. Cuisiner, se chauffer et éclairer exigent aussi l'utilisation de l'énergie. Même produire d'autres formes d'énergies telle que l'électricité se fait grâce aux fossiles fuels (63% de la génération de l'électricité se fait en utilisant des fossiles fuels (E.I.A., 1991))²¹.

Le coût monétaire tolérable des fossiles fuels avait entraîné une croissance rapide de leur consommation. L'utilisation mondiale de l'énergie était équivalente à 13 billions de tonnes de charbon en 1990 (soit quatre fois plus qu'en 1950 et vingt fois plus qu'en 1850²²).

L'industrialisation des pays développés s'est faite grâce à une consommation effrénée de l'énergie. Les pays de l'O.C.D.E. et le bloc soviétique comptent moins de 25% de la population mondiale et contribuent à plus de 85% de l'activité économique mondiale. Ces pays consomment plus de 75% de l'énergie industrielle.²³

Un pays comme le Bangladesh utilise moins de 100 kg équivalent pétrole par personne et par an (140 watts), contre 9000 kg équivalent pétrole par personne et par an

²⁰ An Agend Of Science For Environment And Development Into The 21st Centry, op.cit., p. 103.

²¹Id., p. 104.

²²Id., p. 103.

²³Id., p. 104.

pour le Canada (12700 watts)²⁴. D'une façon générale les pays en développement consomment dix à cent fois moins d'énergie par habitant que les pays développés. Là où l'énergie est rare les gens souffrent de la rareté de ses services, de l'inflation, du chômage et d'un output limité. On note d'ailleurs une bonne corrélation entre le PNB d'un pays et sa consommation d'énergie.

En réalité, l'intensité énergétique (le rapport consommation d'énergie/PNB) dans les pays industrialisés a diminué grâce aux progrès scientifiques et à l'amélioration de l'efficacité énergétique. Pour s'industrialiser les pays en développement peuvent éviter une consommation excessive de l'énergie en l'utilisant efficacement. Toutefois, en raison de la faiblesse de l'industrie et de la rareté des capitaux, il serait très difficile pour ces pays d'atteindre rapidement l'efficacité énergétique²⁵.

La croissance économique avait toujours été dépendante de l'input énergétique. La continuation de la croissance économique dans les pays développés, l'industrialisation des pays en développement et la croissance démographique accélérée rendront l'économie mondiale encore plus dépendante de l'énergie.

§ 3. Pour un développement durable

Les fossiles fuels sont à la fois l'élément indispensable à la prospérité matérielle et la principale source de la violence de l'homme envers la nature. D'une part, ils sont le moteur du dynamisme économique (les crises pétrolières des années soixante-dix étaient la preuve de l'extrême sensibilité de l'économie mondiale par rapport à cette énergie).

²⁴Id., p. 105.

²⁵ Id., p. 111, tiré de A. K. N. Reddy & J Goldberg, par Scientific American, Inc. 1990.

D'autre part, ils représentent la principale source de la pollution. Les découvertes des menaces environnementales globales durant les années quatre-vingts, notamment la destruction de la couche d'ozone, confirment que cette pollution risque de nous emmener très loin dans l'altération de l'environnement.

L'ampleur des menaces qui pèsent sur l'environnement porterait à croire qu'il va falloir sacrifier la croissance économique afin de sauver la planète. La réalité est tout autre, elle est telle qu'on ne peut réaliser la croissance économique que dans un cadre environnemental sain. La sauvegarde de l'environnement, à son tour, ne peut être assurée que grâce au développement économique.

Il n'est donc plus question de revenir à l'époque où l'exploitation offrait à la minorité le bien-être et le confort et réduisait la majorité à l'état de « machines ». Mais il est aussi intolérable de penser le développement économique indépendamment de l'environnement.

Le monde économique et le monde environnemental sont intimement liés et interdépendants. Ils forment un même système. Dans ce système, l'économie et la biosphère doivent «coévoluer» pour assurer à l'homme le maximum de bien-être.

L'objectif noble de développement durable et les exigences de l'équité intergénérationnelle sont tels qu'il n'est plus possible de bâtir des économies au détriment du milieu de vie.

La complémentarité entre l'économie et l'environnement doit être le point de départ de tout mode d'action et de toute stratégie visant le développement durable. Une

telle complémentarité, fait aujourd'hui l'unanimité de la majorité des chercheurs. Quels sont alors les moyens qui assurent le développement durable?

§ 4. Les énergies renouvelables non polluantes

L'homme a toujours prouvé qu'il était le seul être vivant capable de vivre au-dessus de ses moyens, de dominer ses conditions d'existence et de transformer les dons de la nature pour les adapter à ses besoins illimités. Grâce aux découvertes scientifiques il a toujours été en mesure de surmonter les entraves qui s'imposaient aux systèmes dans lesquels il agit.

Pour J. Schumpeter, les dynamiques «d'invention» et «d'innovation» constituent les forces qui permettent de développer les économies et de répondre à des besoins nouveaux. Il définit la première comme étant la découverte des principes qui enrichissent la connaissance. Elle peut se limiter au domaine de la science sans pour autant passer à l'application. La seconde, au contraire, est intrinsèquement économique. Elle consiste en l'adoption des nouvelles techniques de production et de gestion plus appropriées²⁶.

La pollution présente à la fois une véritable menace environnementale et un obstacle majeur au développement économique. L'utilisation des fossiles fuels s'avère être la principale source de cette pollution. Par conséquent, il est tout à fait légitime de miser sur la découverte d'une nouvelle énergie propre et renouvelable, une énergie qui serait capable de répondre aux besoins énergétiques effrénés de l'économie moderne sans nuire à l'environnement.

²⁶ Présenté par N. M. Hung & N.V. Quyen, « Dynamic Timing Decisions Under Uncertainty: Essays on Invention, Innovation and Exploration in Resources Economics », p 47.

Les fossiles fuels ont deux défauts majeurs. Il s'agit de leur caractère polluant et de leur disponibilité limitée. Ces deux défauts représentent les forces motrices qui appellent à leur remplacement.

Bâtir des économies sur des énergies renouvelables non polluantes représente le seul moyen de démentir le pessimisme de Ricardo et de Malthus, selon lequel les ressources naturelles limitées finiraient par imposer des freins à la croissance économique. Cela représente aussi le meilleur moyen pour résoudre le problème de la pollution.

L'énergie solaire se présente comme l'une des options énergétiques les plus prometteuses. Notre planète importe chaque année une quantité d'énergie solaire dix fois plus grande que l'énergie stockée sous forme de fossiles fuels et d'uranium²⁷. Maîtriser une telle abondance constitue alors une solution incontournable. L'énergie solaire n'est pas la seule option envisageable. Le vent est aussi un candidat pour la substitution des fossiles fuels.

L'idée de donner des fuels renouvelables à la croissance économique n'est pas nouvelle. Elle reçoit aujourd'hui plus d'appréciation de la part des chercheurs et des politiciens: les projections de la Banque Mondiale estiment que l'énergie renouvelable devrait se substituer aux fossiles fuels durant le siècle prochain. Le symposium « Alternative fuels and the environment » tenu en 1993 par la « Division of the Environmental Chemistry » mettait l'accent sur l'importance des énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire et le vent.

²⁷ S. Deraime, « économie et environnement », p 132.

Proposer l'utilisation d'énergies renouvelables non polluantes comme solution aux problèmes économiques et environnementaux n'exclut en aucun cas l'importance des mesures antipollution prises jusqu'à présent: la limitation de la croissance démographique, l'amélioration de l'efficacité énergétique, l'utilisation des énergies disponibles moins polluantes (gaz naturel, électricité, énergie nucléaire) et la recherche de l'optimum de Pareto à travers les mécanismes du marché ou par des mesures interventionnistes restent, sans doute, d'une importance vitale dans la problématique de la pollution. Ils sont même indispensables pour limiter les risques environnementaux.

§ 5. Conclusion

Les pratiques destructives de l'environnement, notamment par la pollution de l'air, n'ont rien d'une nouveauté. Ce qui est nouveau, par contre, c'est l'échelle des dégâts que provoque l'activité économique moderne. Ces dégâts prennent aujourd'hui une dimension mondiale.

Les effets cumulatifs de la pollution de l'air pendant des décennies se manifestent sous forme de menaces globales. La destruction de l'ozone, l'accroissement de l'effet de serre et le problème des dépôts acides sont aujourd'hui au premier rang. Ils menacent d'empêcher notre planète d'entretenir la vie.

Les sources de la pollution sont, à vrai dire, multiples. Toutefois, on a pu remarquer que les émissions polluantes sont principalement le produit de l'utilisation des combustibles fossiles dans l'industrie, le transport et la production de l'électricité.

L'utilisation des fossiles fuels est aussi un impératif de la prospérité économique. Aucun pays n'est capable de se passer de leurs services et d'assurer la croissance économique en même temps.

Certes, la croissance économique constitue la condition nécessaire du développement. Cependant une telle croissance ne suffit pas. En effet, si elle continue à se baser sur des stratégies non respectueuses de l'environnement, ses conséquences risquent d'entraver la réalisation du développement durable.

La réconciliation de la croissance économique avec la qualité de l'environnement s'impose. En réalité, un tel objectif n'est pas facile à réaliser. La fragilité de l'économie mondiale moderne et sa dépendance excessive des ressources naturelles, en l'occurrence des fossiles fuels, rendent cette tâche encore plus difficile.

De nombreux signes laissent à penser que l'économie de l'énergie connaîtra une restructuration radicale. La tendance est à l'allègement de la dépendance vis à vis des fossiles fuels et au renforcement des investissements visant le développement des énergies renouvelables non polluantes. On devrait donc assister à une transition des économies reposant sur les combustibles fossiles à des économies fondées sur des énergies renouvelables. Une telle transition s'avérerait être une révolution aussi bien écologique que socio-économique.

Il s'agit de miser sur les efforts des scientifiques dans le défi environnemental. Leur rôle est crucial dans la résolution de la problématique de la pollution de l'air. En effet, le dévoilement du mystère recouvrant les effets de la dite pollution ainsi que la

découverte d'une nouvelle technologie énergétique ne peuvent provenir que du domaine scientifique. Il va falloir lancer un programme de Recherche et de Développement afin de découvrir un substitut énergétique parfait. Ce substitut devra être capable d'alimenter la croissance économique tout en allégeant le fardeau environnemental.

Chapitre IV

POLLUTION ET EXPLOITATION OPTIMALE DE L'ENERGIE

Introduction

Le problème de la pollution se présente aujourd'hui comme une menace globale à l'environnement. Son amplification risque de mettre en cause la vie sur la Terre.

Dans les chapitres qui suivent, on se propose de mener une étude théorique de ce problème. L'outil de base dans cette étude est une technique de pointe de contrôle optimal proposée par N.M.Hung et N.V.Quyen (1994). Le choix de cette technique est dû en fait à la possibilité de tirer des résultats qui émanent directement des fonctions d'utilité et de production.

Il s'agit de maximiser la somme actualisée des flux d'utilité sous les contraintes qui s'imposent au système. Les principaux résultats seront déduits en se servant du principe de maximum et des équations adjointes.

Dans le modèle que l'on propose on se base sur les idées suivantes:

- La production agrégée s'achève grâce à l'input énergétique.
- L'utilisation du pétrole conduit à l'accumulation du dioxyde de carbone, laquelle accumulation nuit à la production agrégée.
- A un certain moment, il va falloir instaurer un programme de recherche et développement (R&D) pour se procurer une nouvelle énergie qui soit à la fois non polluante et renouvelable.

En fait, ces idées découlent de l'étude menée durant le chapitre précédent. On a pu remarquer en effet que l'utilisation des fossiles fuels est à la fois la base de la croissance économique et la cause de la pollution. Une solution radicale à cette problématique serait alors l'adoption d'une nouvelle technique de production se basant sur une énergie capable d'alimenter la croissance économique sans nuire à l'environnement.

§ 1. Hypothèses

Construire un modèle de contrôle optimal complet se rapportant au problème de la pollution relève plutôt de l'idéal. Des hypothèses simplificatrices s'imposent en conséquence.

Hypothèse -1-:

Soit $U(c)$ la fonction d'utilité. Elle ne dépend que de la consommation (c). On suppose que: $U(0) = 0$, $U'(c) > 0$, $U''(c) < 0$, $U'(0) = +\infty$ et $U'(\infty) = 0$.

Hypothèse -2-:

Soit $f(q, y)$ la fonction de production agrégée. Elle dépend de l'input énergétique (q) et de la concentration du CO_2 dans l'atmosphère (y). On suppose que: $f(0, y) = 0$, $D_1 f(q, y) > 0$, $D_1 f(0, y) = +\infty$, $D_1 f(\infty, y) = 0$, $D_{11} f(q, y) < 0$, $D_2 f(q, y) \leq 0$ et $D_{12} f(q, y) < 0$. Par D_i , on désigne la dérivée première de la $i^{ième}$ variable.

Hypothèse -3-:

Par input énergétique on désigne la somme de la quantité du pétrole (q_{1t}) et de l'énergie backstop (q_{2t}). On suppose que $q_{1t} \geq 0$, $q_{2t} \geq 0$; pour tout $t \geq 0$.

Hypothèse -4-:

On suppose que le coût de l'exploitation du pétrole est nul.

Hypothèse -5-:

On suppose que l'énergie solaire est obtenue en investissant suffisamment de capital, dit capital «backstop». Ce capital peut être interprété comme le coût fixe nécessaire à la production de l'énergie en question. On suppose également, qu'en plus du coût fixe, la production de cette énergie nécessite un coût variable.

Hypothèse -6-:

Soit $h(q_2)$ la fonction de coût variable de l'énergie tirée à partir du « backstop ».

On suppose que: $h(0) = 0$; $h'(q_2) > 0$; $h''(q_2) > 0$.

Hypothèse -7-:

On suppose que la disponibilité du pétrole au début de la période d'optimisation (x_0) est finie, connue avec certitude et que le stock de pétrole à chaque instant est donné par l'équation suivante:

$$\frac{dx}{dt} = -q_t, \quad x_0 \text{ donnée.}$$

Hypothèse -8-:

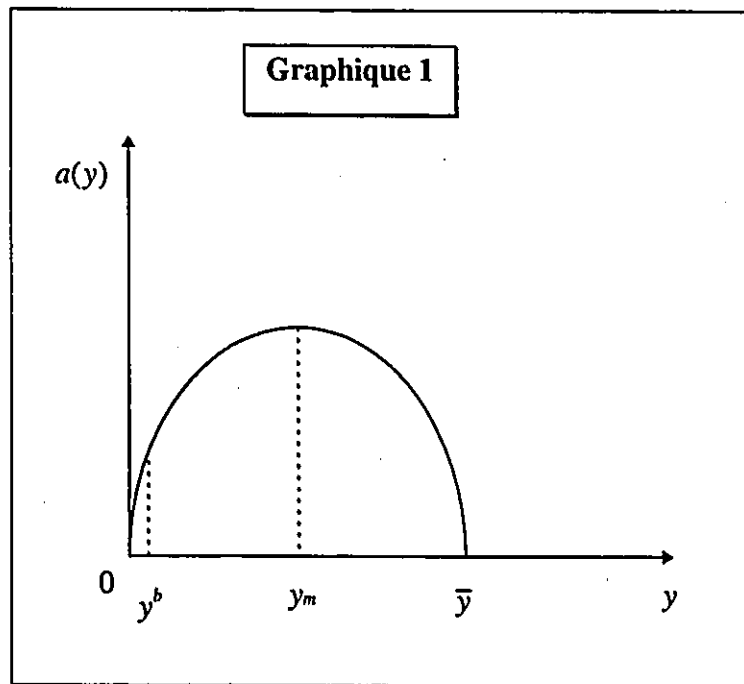
On suppose que la concentration initiale du CO_2 est connue avec certitude. On suppose également que l'utilisation d'une unité de pétrole conduit à l'émission d'une unité de gaz carbonique et qu'une proportion de ce gaz quitte l'atmosphère naturellement. Soit $\alpha(y)$ la fonction qui mesure cette dégradation naturelle. La concentration du CO_2 à

chaque instant est alors donnée par l'équation différentielle suivante:

$$\frac{dy}{dt} = q_t - a(y); \quad y_0 \text{ donnée.}$$

Hypothèse -9-:

Dans le graphique ci-dessous, on représente la fonction $a(y)$. Par \bar{y} et y^b , on désigne respectivement le seuil d'irréversibilité et le niveau de concentration de CO_2 au-dessous duquel ce gaz n'a aucun effet sur la production ($D_2f(q, y) = 0$ pour tout $y \leq y^b$). On suppose que $a(0) = 0$, $a(y) = 0$ pour tout $y \geq \bar{y}$ et $a(y) > 0$ pour $0 < y < \bar{y}$. On suppose également que pour des niveaux d'accumulation de CO_2 assez faibles, la dégradation naturelle de ce dernier est strictement croissante. Elle atteint son maximum à y_m , puis elle décroît pour s'annuler à partir de \bar{y} .



Hypothèse -10-:

On suppose que le taux d'escompte est le taux d'intérêt réel.

§ 2. Présentation du modèle

Il s'agit de choisir la quantité de pétrole et la quantité de l'énergie backstop à utiliser durant toute la période d'optimisation afin de maximiser l'expression suivante:

$$\psi(x_0, y_0, 0) = \text{Max}_{q_{1t}, q_{2t}, \tau} \int_0^{\infty} e^{-\delta t} [U(f(q_{1t} + q_{2t}, y_t)) - h(q_{2t})] dt - e^{-\delta \tau} K \quad (1)$$

Sous les contraintes suivantes:

$$\frac{dx}{dt} = -q_{1t}, \quad x_0 \text{ donnée}$$

$$\frac{dy}{dt} = q_{1t} - a(y_t), \quad y_0 \text{ donnée}$$

$$q_{1t} \geq 0 \text{ pour tout } t \geq 0$$

$$q_{2t} = 0 \text{ pour } 0 \leq t < \tau, \quad q_{2t} \geq 0 \text{ pour } t \geq \tau$$

$$x_t \geq 0 \text{ pour tout } t \geq 0$$

Par ψ on désigne le maximum de bien-être que l'on désire atteindre. C'est le maximum de la somme actualisée des flux de surplus d'utilité, réalisés en utilisant le pétrole et/ou l'énergie backstop, étant donné que l'on commence au temps zéro avec un stock de pétrole x_0 et une concentration de CO_2 égale à y_0 . Par K , on désigne le coût fixe que nécessite la production de l'énergie backstop. τ correspond au temps exact où ce coût est engagé. Avant le temps τ , l'output énergétique provient uniquement du secteur pétrolier.

Une fois l'énergie backstop devient disponible (après τ), la production de l'énergie peut provenir de deux secteurs, le secteur pétrolier et le secteur backstop.

Les contraintes qui s'imposent au système sont à la fois d'ordre économique et environnemental. Il s'agit en effet de gérer l'utilisation d'un stock limité de pétrole étant donné l'effet de l'accumulation du CO_2 qui en découle et de choisir la quantité de l'énergie backstop à utiliser à chaque instant étant donné son coût de production.

A partir du modèle présenté ci-dessus, on se propose d'étudier plusieurs problèmes. Il s'agit de répondre aux questions suivantes: Comment évolue l'input énergétique (q_1 et q_2)? Quel est le temps optimal de l'innovation? Comment s'opère la transition du pétrole à l'énergie backstop? Serait-elle brusque ou graduelle? Le stock du pétrole serait-il épuisé en un temps fini? Le seuil d'irréversibilité serait-il dépassé?

Tel qu'il se présente, le modèle (1) est assez complexe. Il y a lieu de le formuler comme suit:

$$\text{Max}_{x_\tau, y_\tau, \tau} [V(x_0, y_0, x_\tau, y_\tau, \tau) - K e^{-\delta\tau} + J(x_\tau, y_\tau, \tau)] \quad (2)$$

Avec :

$$V(x_0, y_0, x_\tau, y_\tau, \tau) = \text{Max}_{q_{1t}} \int_0^\tau e^{-\delta t} U(f(q_{1t}, y_t)) dt \quad (3)$$

Sous les contraintes suivantes:

$$\frac{dx}{dt} = -q_{1t}, \quad x_0 \text{ et } x_\tau \text{ données}$$

$$\frac{dy}{dt} = q_{1t} - a(y_t), \quad y_0 \text{ et } y_\tau \text{ données}$$

$$q_{1t} \geq 0 \text{ pour } 0 \leq t \leq \tau$$

$$0 \leq x_\tau \leq x_0$$

Dans l'équation (2), V est le bien-être social optimal avant l'innovation, lequel bien-être est obtenu en exploitant de façon optimale le pétrole étant donné l'accumulation du gaz carbonique qui en découle.

$K e^{-\delta\tau}$ est la valeur escomptée du coût fixe engagé afin de mettre en place l'énergie backstop à partir du temps τ . On note qu'avant le temps τ , l'énergie backstop n'est pas encore disponible. Le seul input énergétique est le pétrole. A partir du temps τ , la date de l'innovation, il sera possible d'exploiter le pétrole et la nouvelle énergie pour la production du bien de consommation.

J est le maximum de bien-être après l'innovation. Il est obtenu en exploitant simultanément le restant du stock de pétrole et l'énergie backstop à partir du temps τ . L'impact de l'accumulation du CO_2 est toujours pris en compte.

$$J(x_\tau, y_\tau, \tau) = \text{Max}_{q_{1t}, q_{2t}} \int_{\tau}^{\infty} e^{-\delta t} [U(f(q_{1t} + q_{2t}, y_t)) - h(q_{2t})] dt \quad (4)$$

Sous les contraintes suivantes:

$$\frac{dx}{dt} = -q_{1t}, \quad x_\tau \text{ donnée}$$

$$\frac{dy}{dt} = q_{1t} - a(y_t), \quad y_\tau \text{ donnée}$$

$$x_t, q_{1t} \geq 0, q_{2t} \geq 0, \forall t \geq \tau$$

Il est à noter que les équations (1) et (2) sont équivalentes et conduisent nécessairement aux mêmes résultats. L'avantage de (2) réside dans la possibilité de déterminer respectivement le temps optimal de l'insertion de la nouvelle technologie (τ), l'utilisation cumulative optimale du pétrole avant l'innovation ($x_0 - x_\tau$), ainsi que la

concentration optimale du CO₂ au moment de l'innovation (y_τ). En effet, dans le cas d'une solution qui est intérieure τ , x_τ et y_τ vérifient les conditions de premier ordre suivantes:

$$D_3V(x_0, y_0, x_\tau, y_\tau, \tau) = -D_1J(x_\tau, y_\tau, \tau) \quad (5)$$

$$D_4V(x_0, y_0, x_\tau, y_\tau, \tau) = -D_2J(x_\tau, y_\tau, \tau) \quad (6)$$

$$D_5V(x_0, y_0, x_\tau, y_\tau, \tau) = -D_3J(x_\tau, y_\tau, \tau) - \delta K e^{-\delta\tau} \quad (7)$$

Comme $J(x, y, s) = e^{-\delta s} J(x, y, 0)$ et $D_3J(x, y, s) = -\delta e^{-\delta s} J(x, y, 0)$, alors on peut transformer l'équation (7) comme suit:

$$D_5V(x_0, y_0, x_\tau, y_\tau, \tau) = \delta [J(x_\tau, y_\tau, \tau) - K e^{-\delta\tau}] \quad (8)$$

§ 3. La phase postérieure à l'Innovation:

La solution optimale

Dans cette section, on résout (4). C'est le problème après avoir mis en place l'énergie backstop. Soit la fonction $v(\cdot)$, telle que $v(q_{1t} + q_{2t}, y_t) = U(f(q_{1t} + q_{2t}, y_t))$.

L'équation (4) se transforme comme suit:

$$J(x_\tau, y_\tau, \tau) = \text{Max}_{q_{1t}, q_{2t}} \int_{\tau}^{\infty} e^{-\delta t} [v(q_{1t} + q_{2t}, y_t) - h(q_{2t})] dt \quad (9)$$

Sous les contraintes suivantes:

$$\frac{dx}{dt} = -q_{1t}, \quad x_\tau \text{ donnée}$$

$$\frac{dy}{dt} = q_{1t} - a(y_t), \quad y_\tau \text{ donnée}$$

$$x_t, q_{1t} \geq 0, q_{2t} \geq 0, \forall t \geq \tau$$

Le Hamiltonien:

$$\mathcal{H} = e^{-\delta t} [v(q_{1t} + q_{2t}, y_t) - h(q_{2t})] - \lambda_t q_{1t} + \mu_t (q_{1t} - a(y_t))$$

Les équations adjointes:

$$\dot{\lambda}_t = -H_x = 0 \Rightarrow \lambda_t = \lambda = cte; \quad (10)$$

$$\dot{\mu}_t = -H_y = -e^{-\delta t} D_2 v(q_{1t} + q_{2t}, y_t) + \mu_t a'(y_t), \text{ avec } \mu_t \leq 0. \quad (11)$$

Le principe de maximum:

$$H_{q_1} = -e^{-\delta t} D_1 v(q_{1t} + q_{2t}, y_t) - \lambda + \mu_t \leq 0, \text{ avec égalité si } q_{1t} > 0; \quad (12)$$

$$H_{q_2} = e^{-\delta t} [D_1 v(q_{1t} + q_{2t}, y_t) - h'(q_{2t})] \leq 0, \text{ avec égalité si } q_{2t} > 0. \quad (13)$$

Le bien-être social dépend de la valeur initiale du stock du pétrole (x_0) ainsi que de celle de l'accumulation du CO₂ (y_0). Dans ce qui suit, on va étudier la solution optimale du modèle présenté ci-dessus. Pour y parvenir on distinguera trois cas selon les valeurs de x_0 et de y_0 .

§ 3.1. Cas 1: Le stock initial de pétrole est nul

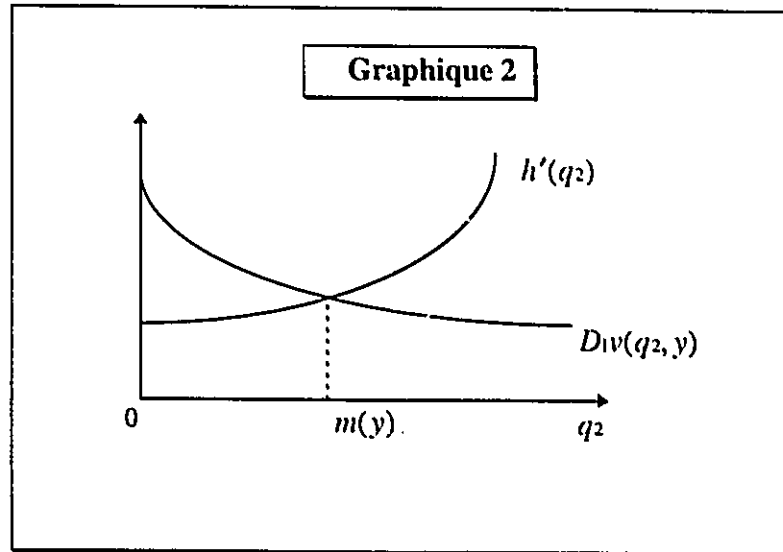
Dans ce cas, le seul input énergétique est celui tiré à partir du backstop. Sa valeur optimale est donnée par les conditions de l'offre et de demande. Elle est telle que le coût marginal est égal au bénéfice marginal:

$$D_1 v(q_{2t}, y_t) = h'(q_{2t}) \text{ ou encore } q_{2t} = m(y_t) \quad (14)$$

La dynamique de l'accumulation du CO₂ est gouvernée par l'équation différentielle suivante:

$$\frac{dy}{dt} = -a(y_t); \quad y_\tau \text{ donnée.} \quad (15)$$

Dans le graphique (2), $m(y)$ est défini comme étant l'unique valeur de q_2 qui vérifie l'équation (14).



§ 3.2. Cas 2: Le stock initial de pétrole est strictement positif et l'accumulation initiale du gaz carbonique est supérieure au seuil d'irréversibilité

Dans ce cas le système est déjà à l'état irréversible. Supposons qu'il n'est pas optimal d'exploiter le pétrole ($q_{1t} = 0$ pour tout $t \geq \tau$). Alors $\lambda = 0$ et $y_t = y_\tau$ pour tout $t \geq \tau$. L'input énergétique à chaque instant est donné par l'équation suivante:

$$D_{1v}(q_{2t}, y_0) = h'(q_{2t}), \text{ ou encore } q_{2t} = m(y_\tau) = \text{cte.}$$

Comme $a'(y_t) = 0$, l'équation (11) se transforme comme suit:

$$\dot{\mu}_t = -e^{-\delta t} D_{2v}(m(y_\tau), y_\tau)$$

Il s'ensuit que:

$$\mu_t = e^{-\delta t} \left[\frac{D_2 v(m(y_t), y_t)}{\delta} \right] + cte \quad (16)$$

De plus, puisque $y_t = y_\tau$ pour tout $t \geq \tau$, alors le prix efficace non escompté $e^{\delta t} \mu_t$ reste constant à travers le temps, ce qui implique que μ_t tend vers zéro quant t tend vers l'infini. La constante dans l'équation (16) est alors nulle. Par conséquent:

$$\mu_t = e^{-\delta t} \left[\frac{D_2 v(m(y_t), y_t)}{\delta} \right] \quad (17)$$

Etant donné que le prix efficace du pétrole est nul, l'équation (12) se transforme comme suit:

$$e^{-\delta t} D_1 v(m(y_t), y_t) + \mu_t \leq 0 \quad (18)$$

En combinant (17) et (18) on obtient:

$$e^{-\delta t} \left[D_1 v(m(y_t), y_t) + \frac{1}{\delta} D_2 v(m(y_t), y_t) \right] \leq 0 \quad (19)$$

On vient juste d'établir le résultat suivant:

Lemme 4.1: *Supposons que le stock initial du pétrole est strictement positif et que le système est déjà à l'état irréversible. S'il n'est pas optimal d'exploiter le pétrole alors:*

$$D_1 v(m(y_t), y_t) + \frac{1}{\delta} D_2 v(m(y_t), y_t) \leq 0 \quad (20)$$

On se propose dans ce qui suit de démontrer le sens inverse du lemme (1). Il s'agit de démontrer le résultat suivant:

Lemme 4.2: *Supposons que le stock initial du pétrole est strictement positif et que le système est déjà à l'état irréversible. Si l'équation (20) est vérifiée alors il n'est pas optimal d'exploiter le pétrole.*

Soient $\hat{q}_{1t} = 0$, $\hat{q}_{2t} = m(y_t)$ et $\hat{\mu}_t = \frac{e^{-\delta t}}{\delta} D_2 v(m(y_t), y_t)$ pour tout $t \geq \tau$. Sous ce programme, $y_t = y_\tau$ pour tout $t \geq 0$. Démontrons que $(\hat{q}_{1t}, \hat{q}_{2t})_{t \geq \tau}$ est un programme optimal étant donné les valeurs initiales x_τ et y_τ . Pour y parvenir on définit la fonction w comme suit:

$$w(q_1, q_2, y) = v(q_1 + q_2, y) - h(q_2).$$

Comme v est concave en q_1 , q_2 et y et comme h est convexe en q_2 , w est nécessairement concave en q_1 , q_2 et y .

A partir de (20) on a:

$$e^{-\delta t} D_1 w(\hat{q}_{1t}, \hat{q}_{2t}, y_\tau) + \hat{\mu}_t \leq 0; \quad (21)$$

De plus, les équations (11) et (13) donnent les égalités suivantes:

$$e^{-\delta t} D_2 w(\hat{q}_{1t}, \hat{q}_{2t}, y_\tau) = 0; \quad (22)$$

$$e^{-\delta t} D_3 w(\hat{q}_{1t}, \hat{q}_{2t}, y_\tau) = -\frac{d\hat{\mu}}{dt}. \quad (23)$$

Soit $(q_{1t}, q_{2t})_{t \geq \tau}$ un programme réalisable quelconque et y_t le stock du CO₂ correspondant ($y_t = y_\tau + \int_\tau^t q_{1s} ds$ pour tout $t \geq \tau$).

La différence de bien-être social escompté entre les deux programmes $(\hat{q}_{1t}, \hat{q}_{2t})_{t \geq \tau}$ et $(q_{1t}, q_{2t})_{t \geq \tau}$ est donnée par l'expression suivante:

$$\int_\tau^\infty e^{-\delta t} [w(\hat{q}_{1t}, \hat{q}_{2t}, y_\tau) - w(q_{1t}, q_{2t}, y_t)] dt \quad (24)$$

La concavité de la fonction w assure que (24) est au moins égale à l'expression suivante:

$$\int_{\tau}^{\infty} e^{-\delta t} [D_1 w(\hat{q}_{1t}, \hat{q}_{2t}, y_t)(\hat{q}_{1t} - q_{1t}) + D_2 w(\hat{q}_{1t}, \hat{q}_{2t}, y_t)(\hat{q}_{2t} - q_{2t}) + D_3 w(\hat{q}_{1t}, \hat{q}_{2t}, y_t)(y_t - y_t)] dt \quad (25)$$

Les expressions (22) et (23) permettent de transformer l'expression (25) comme suit:

$$\int_{\tau}^{\infty} -e^{-\delta t} D_1 w(\hat{q}_{1t}, \hat{q}_{2t}, y_t) q_{1t} - \frac{d\hat{\mu}}{dt} (y_t - y_t) dt \quad (26)$$

A partir de (21), l'expression (26) est au moins égale à l'expression suivante:

$$\int_{\tau}^{\infty} \hat{\mu}_t q_{1t} dt + \int_{\tau}^{\infty} \frac{d\hat{\mu}}{dt} (y_t - y_t) dt \quad (27)$$

L'intégration par partie du deuxième terme de cette équation permet de la transformer comme suit:

$$\int_{\tau}^{\infty} \hat{\mu}_t q_{1t} dt - \int_{\tau}^{\infty} \hat{\mu}_t \frac{dy}{dt} dt + \hat{\mu}_{\infty} (y_{\infty} - y_{\tau}) = \int_{\tau}^{\infty} \hat{\mu}_t q_{1t} dt - \int_{\tau}^{\infty} \hat{\mu}_t q_{1t} dt = 0 \quad (28)$$

(Ceci est vrai car $\frac{dy}{dt} = q_{1t}$ et $\hat{\mu}_{\infty} = 0$). Etant donné que (24) est au moins égale à (28), alors il n'existe aucun programme réalisable qui permette d'atteindre un niveau de bien-être social strictement supérieur à celui réalisé sous $(\hat{q}_{1t}, \hat{q}_{2t})_{t \geq \tau}$. Ce dernier est alors un programme optimal d'input énergétique étant donné la condition initiale (x_{τ}, y_{τ}) .

En combinant les lemmes (4.1) et (4.2) on obtient le résultat suivant:

Proposition 4.1: *Supposons que le stock initial du pétrole est strictement positif et que le système est déjà à l'état irréversible, alors le pétrole n'est exploité que si et seulement si la condition suivante est vérifiée:*

$$D_1 v(m(y_{\tau}), y_{\tau}) + \frac{1}{\delta} D_2 v(m(y_{\tau}), y_{\tau}) > 0 \quad (29)$$

Dans l'équation (29) $D_1v(m(y_t), y_t)$ représente l'augmentation instantanée (à court terme) du bien-être social réalisée grâce à l'utilisation de la première unité de pétrole pour la production du bien de consommation. Etant donné que la dégradation naturelle du CO_2 est nulle, chaque unité de pétrole utilisée entraîne l'augmentation de la concentration de ce gaz d'une unité. La perte à long terme du bien-être escompté qui en découle est mesurée par $\frac{1}{\delta} D_2v(m(y_t), y_t)$.

L'inégalité stricte dans l'équation (29) implique que si le gain à court terme de l'exploitation du pétrole est strictement supérieur à la perte causée à long terme alors il est optimal de l'utiliser.

D'après la condition de premier ordre (13), $D_1v(m(y_t), y_t)$ est égale à $h'(m(y_t))$. Par conséquent, si le coût marginal de la production de l'énergie backstop est assez élevé, alors il est plus probable que l'équation (29) soit vérifiée. En d'autres termes, dans ce cas il serait plus profitable de recourir à l'exploitation du pétrole qu'à l'utilisation de l'énergie backstop.

Notons que si δ tend vers zéro, alors $\frac{1}{\delta} D_2v(m(y_t), y_t)$ tend vers l'infini. Par conséquent, la partie gauche de (29) sera négative. De même, pour un taux d'intérêt donné si la valeur absolue de $D_2v(m(y_t), y_t)$ est suffisamment élevée, en d'autres termes, si une faible augmentation de la concentration du CO_2 entraîne une diminution dramatique de l'output, alors l'équation (29) sera violée. Dans les deux cas, l'utilisation du pétrole doit être arrêtée.

On note également que si δ tend vers l'infini, l'équation (29) sera nécessairement vérifiée. En d'autres termes, si l'on accorde plus d'importance à la génération présente qu'aux générations futures alors le pétrole doit être utilisé même si le système est déjà irréversible.

Proposition 4.2: *Supposons que le stock initial du pétrole est strictement positif et que le système est déjà irréversible. Soit la fonction $\varphi(y_0)$ tel que:*

$$\varphi(y_0) = \inf \left\{ y / y \geq y_0, D_1 v(m(y), y) \leq -\frac{1}{\delta} D_2 v(m(y), y) \right\}$$

4.2.a) *Si $x_0 \leq \varphi(y_0) - y_0$, alors il est optimal d'épuiser le stock du pétrole.*

4.2.b) *Si $x_0 > \varphi(y_0) - y_0$, alors il n'est pas optimal d'exploiter la totalité du stock de pétrole. Plus précisément, on doit arrêter l'exploitation du stock de pétrole dès qu'il atteint le niveau $x_0 - (\varphi(y_0) - y_0)$.*

D'après la Proposition 4.1, $\varphi(y_0)$ est définie comme étant la concentration du CO_2 minimale qui entraîne la non-utilisation du pétrole. Par conséquent, pour toute concentration de CO_2 inférieure à $\varphi(y_0)$, le pétrole doit être exploité. Comme $y_t \leq x_0 + y_0$ pour tout $t \geq 0$, alors sous les conditions de la Proposition (4.2.a), il est optimal d'exploiter la dernière unité de pétrole disponible.

Supposons maintenant que $x_0 > \varphi(y_0) - y_0$, alors par la définition de $\varphi(y_0)$ l'exploitation du pétrole doit être arrêtée dès que le stock du pétrole se réduise au niveau $x_0 - (\varphi(y_0) - y_0)$, car en dépassant cette limite, on se retrouvera avec une accumulation du $\text{CO}_2 (y)$ qui vérifie l'inégalité suivante: $D_1 v(m(y), y) \leq -\frac{1}{\delta} D_2 v(m(y), y)$. D'après la Proposition 4.1, il n'est pas optimal de continuer à exploiter le pétrole sous cette condition.

Lemme 4.3: Supposons que le stock initial du pétrole est positif et suffisamment faible, que le système est déjà à l'état irréversible et que l'inégalité (29) est vérifiée, alors le prix efficace du pétrole (λ) est strictement positif.

Considérons le programme d'input énergétique suivant:

$$\begin{aligned} q_{1t} &= \frac{x_0}{s} && \text{pour tout } t \leq s; \\ q_{1t} &= 0 && \text{pour tout } t > s; \\ q_{2t} &= m(y_0) && \text{pour tout } t \geq 0. \end{aligned}$$

(s étant un nombre positif donné)

Il en découle que $y_t = y_0 + t \frac{x_0}{s}$ pour tout $t \leq s$ et que $y_t = x_0 + y_0$ pour tout

$t > s$. Le bien-être social escompté obtenu sous ce programme est donné par l'expression suivante:

$$\int_0^s e^{-\delta t} \left[v\left(\frac{x_0}{s} + m(y_0), y_0 + t \frac{x_0}{s}\right) - h(m(y_0)) \right] dt + \int_s^{\infty} e^{-\delta t} \left[v(m(y_0), y_0 + x_0) - h(m(y_0)) \right] dt \quad (30)$$

On considère également le programme d'input énergétique suivant :

$$\begin{aligned} q'_{1t} &= 0 && \text{pour tout } t \geq 0; \\ q'_{2t} &= m(y_0) && \text{pour tout } t \geq 0. \end{aligned}$$

L'accumulation du CO₂ sous ce programme est $y_t = y_0$ pour tout $t \geq 0$. Le bien-être social escompté est alors:

$$\int_0^{\infty} e^{-\delta t} \left[v(m(y_0), y_0) - h(m(y_0)) \right] dt \quad (31)$$

Soit I la variation du bien-être social entre les deux programmes précités.

$$\begin{aligned}
 I &= \int_0^s e^{-\delta t} \left[v\left(\frac{x_0}{s} + m(y_0), y_0 + t \frac{x_0}{s}\right) - v(m(y_0), y_0) \right] dt & (32) \\
 &+ \int_s^\infty e^{-\delta t} \left[v(m(y_0), y_0 + x_0) - v(m(y_0), y_0) \right] dt \\
 &= \int_0^s e^{-\delta t} \left\{ \left[\frac{x_0}{s} D_1 v(m(y_0), y_0) + \alpha\left(\frac{x_0}{s}\right) \right] + \left[t \frac{x_0}{s} D_2 v(m(y_0), y_0) + \beta\left(t \frac{x_0}{s}\right) \right] \right\} dt \\
 &+ \int_s^\infty e^{-\delta t} \left[x_0 D_2 v(m(y_0), y_0) + \gamma(x_0) \right] dt
 \end{aligned}$$

Notons que $\alpha(\cdot)$, $\beta(\cdot)$ et $\gamma(\cdot)$ sont tels que:

$$\lim_{\frac{x_0}{s} \rightarrow 0} \frac{\alpha\left(\frac{x_0}{s}\right)}{\frac{x_0}{s}} = 0, \quad \lim_{t \frac{x_0}{s} \rightarrow 0} \frac{\beta\left(t \frac{x_0}{s}\right)}{t \frac{x_0}{s}} = 0 \quad \text{et} \quad \lim_{x_0 \rightarrow 0} \frac{\gamma(x_0)}{x_0} = 0.$$

Par définition, le prix efficace du pétrole (λ) mesure l'augmentation du bien-être social due à la disponibilité d'une unité supplémentaire de pétrole. Par conséquent:

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \lim_{x_0 \rightarrow 0} \frac{I}{x_0} & (33) \\
 &= \lim_{x_0 \rightarrow 0} \int_0^s e^{-\delta t} \left\{ \left[\frac{1}{s} D_1 v(m(y_0), y_0) + \frac{1}{s} \frac{\alpha\left(\frac{x_0}{s}\right)}{\frac{x_0}{s}} \right] + \left[\frac{t}{s} D_2 v(m(y_0), y_0) + \frac{t}{s} \frac{\beta\left(t \frac{x_0}{s}\right)}{t \frac{x_0}{s}} \right] \right\} dt \\
 &+ \int_s^\infty e^{-\delta t} \left[D_2 v(m(y_0), y_0) + \frac{\gamma(x_0)}{x_0} \right] dt \\
 &= \int_0^s e^{-\delta t} \left[\frac{1}{s} D_1 v(m(y_0), y_0) + \frac{t}{s} D_2 v(m(y_0), y_0) \right] dt + \int_s^\infty e^{-\delta t} D_2 v(m(y_0), y_0) dt \\
 &\geq \int_0^s e^{-\delta t} \left[\frac{1}{s} D_1 v(m(y_0), y_0) + \frac{t}{s} D_2 v(m(y_0), y_0) \right] dt + \int_s^\infty e^{-\delta t} \left[\frac{t}{s} D_2 v(m(y_0), y_0) \right] dt \\
 &= \int_0^s e^{-\delta t} \left[\frac{1}{s} D_1 v(m(y_0), y_0) \right] dt + \int_0^\infty e^{-\delta t} \left[\frac{t}{s} D_2 v(m(y_0), y_0) \right] dt
 \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{s\delta} \left[(1 - e^{-\delta r}) D_{1v}(m(y_0), y_0) + \frac{1}{\delta} D_{2v}(m(y_0), y_0) \right]$$

Par conséquent:

$$\lambda \geq \frac{1}{s\delta} \left[(1 - e^{-\delta r}) D_{1v}(m(y_0), y_0) + \frac{1}{\delta} D_{2v}(m(y_0), y_0) \right] \quad (34)$$

Par hypothèse, $D_{1v}(m(y_0), y_0) + \frac{1}{\delta} D_{2v}(m(y_0), y_0)$ est strictement positive. Alors,

quand s est suffisamment élevé, la partie droite de l'inégalité (34) est strictement positive.

Par conséquent, quand x_0 est assez faible, le prix efficace du pétrole est strictement positif.

***Lemme 4.4:** Supposons que $x_0 > 0$, $y_0 \geq \bar{y}$ et $x_0 + y_0 \geq \varphi(y_0)$, alors le prix efficace du pétrole est nul.*

Soit ε une faible quantité de pétrole strictement positive. D'après les hypothèses du lemme, il est clair que $x_0 + \varepsilon + y_0 \geq \varphi(y_0) + \varepsilon > \varphi(y_0)$. Ce fait et la Proposition (4.2.b) assurent qu'au moins la quantité ε de pétrole ne sera pas extraite du sol, puisqu'une fois extraite elle ne sera jamais exploitée. Donc, la contribution au bien-être social d'une unité supplémentaire de pétrole est nulle. Le prix efficace du pétrole est alors égal à zéro.

***Proposition 4.3:** Supposons que $x_0 > 0$, $y_0 \geq \bar{y}$ et $x_0 + y_0 < \varphi(y_0)$, alors le stock de pétrole sera épuisé en un temps fini. En plus, l'input énergétique ($q = q_1 + q_2$) est strictement décroissant juste avant l'épuisement du pétrole.*

Supposons que $q_{1t} > 0$ pour tout $t \geq 0$. En d'autres termes, supposons que le stock de pétrole soit épuisé en un temps infini. Comme $x_t > 0$ et strictement décroissant, alors il possède nécessairement une limite quand t tend vers l'infini ($\lim_{t \rightarrow \infty} x_t = x_{\infty} \geq 0$).

Dans ce cas, la concentration du CO_2 augmentera continuellement quand t tend vers l'infini pour atteindre une certaine limite y_{∞} , telle que $y_{\infty} = (x_0 - x_{\infty}) + y_0$.

Supposons également que l'input énergétique (q_{1t}, q_{2t}) , à chaque instant t , ne dépend que de l'état de (x_t, y_t) à ce temps. Alors, $(q_{1t}, q_{2t})_{t \geq 0}$ est aussi la solution optimale de l'input énergétique durant toute la trajectoire optimale:

$$q_{1t} = q_1^*(x_t, y_t), \quad q_{2t} = q_2^*(x_t, y_t)$$

Tels que $q_1^*(x, y)$ et $q_2^*(x, y)$ soient respectivement l'input optimal de pétrole et de l'énergie tirée à partir du backstop étant donnée l'état (x, y) .

Par conséquent:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} q_{1t} = 0 \tag{35}$$

Car sinon, $q_1^*(x_{\infty}, y_{\infty}) > 0$ implique que $\int_0^{\infty} q_{1t} dt = \infty$. Or, par hypothèse x_0 est fini.

A partir de (35) on peut s'assurer que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} q_{2t} = m(y_{\infty}) \tag{36}$$

Pour continuer, on note que $q_{1t} > 0$ pour tout $t \geq 0$, implique que la condition de premier ordre (12) est vérifiée avec égalité pour tout $t \geq 0$.

$$\text{Div}(q_t, y_t) = e^{\delta t} (\lambda - \mu_t) \tag{37}$$

Notons en passant, que l'utilité marginale de l'énergie en bien de consommation à chaque instant dépend à la fois du prix efficace du pétrole et du prix efficace de l'accumulation du CO₂. En d'autres termes, chaque fois que l'on mesure le bénéfice tiré de l'utilisation d'une unité de pétrole, il faut tenir compte de la baisse de l'utilité causée par l'accumulation du CO₂ qui en découle.

En différentiant l'équation (37) par rapport au temps, on obtient l'expression suivante:

$$D_{11}v(q_t, y_t) \frac{dq}{dt} + D_{12}v(q_t, y_t) q_t = -\frac{d\mu}{dt} e^{\delta t} + \delta e^{\delta t} (\lambda - \mu_t) \quad (38)$$

Sous les hypothèses de la proposition, l'équation (11) se transforme comme suit:

$$\frac{d\mu}{dt} = -e^{-\delta t} D_{22}v(q_t, y_t) \quad (39)$$

En combinant (37) et (39) on peut transformer l'équation (38) comme suit:

$$D_{11}v(q_t, y_t) \frac{dq}{dt} + D_{12}v(q_t, y_t) q_t = \delta \left[D_{11}v(q_t, y_t) + \frac{1}{\delta} D_{22}v(q_t, y_t) \right] \quad (40)$$

D'après les équations (35) et (36), quand t tend vers l'infini, q_t tend vers zéro et y_t tend vers $m(y_-)$. On sait en plus que y_t tend vers y_- à mesure que t tend vers l'infini. Donc pour un t suffisamment élevé, l'équation (40) donne le résultat suivant:

$$\frac{dq}{dt} \approx \frac{\delta \left[D_{11}v(m(y_-), y_-) + \frac{1}{\delta} D_{22}v(m(y_-), y_-) \right]}{D_{11}v(m(y_-), y_-)} \quad (41)$$

Par hypothèse, $x_0 + y_0 < \varphi(y_0)$, alors y_- est nécessairement strictement inférieure à $\varphi(y_0)$. Il s'ensuit que le numérateur de la partie droite de l'équation (41) est strictement positif. D'après la concavité de la fonction $v(\cdot)$ par rapport à (q) , le dénominateur est

strictement négatif. L'équation (41) indique alors qu'à mesure que t tende vers l'infini l'input énergétique décroît linéairement vers moins l'infini, d'où la contradiction. Alors, l'exploitation du pétrole doit être arrêtée en un temps fini.

Supposons que l'on arrête l'exploitation du pétrole sans l'épuiser. Alors on peut trouver un certain temps fini s tel que $q_{1s} = 0$ pour tout $t > s$. Etant donné que x_s est strictement positif, alors $x_s < \varphi(y_0) - y_s = \varphi(y_0) - (x_0 + y_0) + x_s$. La Proposition (4.2.a) indique que, dans ce cas, il n'est jamais optimal de laisser un stock de pétrole strictement positif au temps τ . Donc, sous les hypothèses de la proposition, le stock de pétrole doit être complètement épuisé en un temps fini.

Supposons que s corresponde au temps exact de l'épuisement du pétrole. Alors l'équation (40) est vérifiée pour tout $t \leq s$. En plus $q_{1t} = 0$ pour tout $t > s$. Par conséquent, $q_{1s} = 0$ par continuité. Juste avant d'atteindre le temps s , l'équation (40) donne l'expression suivante:

$$\frac{dq}{dt} \Big|_{t=s} = \frac{\delta [D_{1v}(m(x_0 + y_0), x_0 + y_0) + \frac{1}{\delta} D_{2v}(m(x_0 + y_0), x_0 + y_0)]}{D_{11v}(m(x_0 + y_0), x_0 + y_0)} < 0 \quad (42)$$

Cette équation indique que l'input énergétique ($q_1 + q_2$) est strictement décroissant au voisinage de s , le temps exact de l'épuisement du pétrole.

§ 3.3. Cas 3: Le stock initial du pétrole est strictement positif, le stock initial du CO₂ est inférieur au seuil d'irréversibilité et la somme de ces deux stocks est supérieure au seuil d'irréversibilité

Dans ce cas, il pourrait être optimal de ramener le système à l'état irréversible. Le résultat suivant donne la condition qui garantit la non-réalisation de cette possibilité.

Proposition 4.4: Supposons que $x_0 > 0$, $y_0 < \bar{y}$ et $x_0 + y_0 \geq \bar{y}$.

Si $D_{1v}(m(\bar{y}), \bar{y}) + \frac{1}{\delta} D_{2v}(m(\bar{y}), \bar{y}) < 0$, alors il n'est pas optimal de ramener le stock du CO_2 à l'état irréversible. En plus, le stock du pétrole sera épuisé en un temps fini et la concentration du CO_2 à long terme tend vers zéro. Après l'épuisement du pétrole l'input énergétique augmentera pour se stabiliser à \hat{q}_2 (c'est l'input énergétique optimal à long terme) quand l'accumulation du CO_2 atteint y^b .

Supposons que l'on atteigne le seuil d'irréversibilité à un certain temps $s > 0$. Par hypothèse $D_{1v}(m(\bar{y}), \bar{y}) + \frac{1}{\delta} D_{2v}(m(\bar{y}), \bar{y}) < 0$, alors d'après la Proposition 4.1, $q_t = 0$ pour tout $t > s$ (même si le restant du stock du pétrole au temps s est strictement positif), le prix efficace du pétrole (λ) est alors égal à zéro. En plus, l'input de pétrole (q_1) tend vers zéro au voisinage de s .

Au temps s , la condition de premier ordre (12) s'écrit comme suit:

$$D_{1v}(m(\bar{y}), \bar{y}) = -e^{\delta s} \mu_x \quad (43)$$

La solution de l'équation adjointe (11) en ce même temps est donnée par l'expression suivante:

$$\mu_x = \frac{e^{-\delta s}}{\delta} D_{2v}(m(\bar{y}), \bar{y}) \quad (44)$$

En combinant (43) et (44) on obtient le résultat suivant:

$$D_{1v}(m(\bar{y}), \bar{y}) + \frac{1}{\delta} D_{2v}(m(\bar{y}), \bar{y}) = 0 \quad (45)$$

Or, par hypothèse, la partie gauche de cette équation est strictement négative, d'où la contradiction. Donc, sous les conditions de la proposition, il n'est pas optimal de ramener le stock du CO_2 à l'état irréversible.

Supposons qu'à un certain temps s , on arrête l'exploitation du pétrole sans l'épuiser. Comme le système est réversible, la concentration du CO_2 diminuera continuellement à partir du temps s . Dès qu'elle atteint un niveau inférieur à y^b , l'effet de ce gaz sur la production devient nul. Dans ce cas, il est possible d'augmenter la production en utilisant le pétrole (au moins tant que l'accumulation du CO_2 est inférieure à y^b). Ce qui se traduit par l'augmentation de la consommation et par suite du bien-être social. Ceci est vrai tant que le stock du pétrole n'est pas totalement exploité.

Après l'épuisement du stock du pétrole, l'équation qui gouvernera la concentration du CO_2 est la suivante:

$$\frac{dy}{dt} = -a(y) \quad (46)$$

Etant donné que $a(y)$ est strictement positive, on assistera à la diminution continue du stock de CO_2 qui, à long terme va tendre vers zéro.

Dans le graphique 3, on représente la valeur de la production de l'énergie backstop à long terme \hat{q}_2 . En effet, après l'épuisement du stock de pétrole (au temps s), la diminution de la concentration du CO_2 entraîne le déplacement de la courbe $D_{1v}(q_2, y)$ vers le haut. Ceci doit continuer tant que le CO_2 affecte la production, plus précisément, tant que son accumulation dans l'atmosphère est strictement supérieure à y^b . Quand y_t atteint y^b , la production de l'énergie backstop sera maintenue définitivement à \hat{q}_2 . C'est l'input énergétique à long terme déterminé par la condition suivante:

$$D_{1v}(\hat{q}_2, y^b) = h'(\hat{q}_2) \quad (47)$$

A partir de ce moment, l'économie jouira d'une valeur de bien-être social escompté donné par l'expression suivante:

$$\frac{1}{\delta} [v(\hat{q}_2) - h(\hat{q}_2)] \quad (48)$$

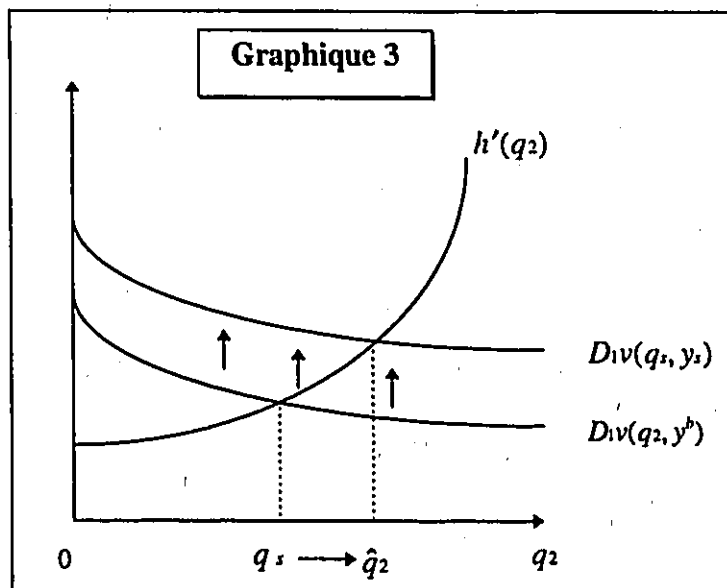
Notons que la Proposition 4.4 est valable dans le cas suivant: $x_0 > 0$, $y_0 < \bar{y}$ et $x_0 + y_0 < \bar{y} - \int_0^{\infty} a(y_t) dt$. On sait en effet que l'évolution du stock de CO₂ est donnée par l'équation différentielle suivante:

$$\frac{dy}{dt} = q_t - a(y_t) \quad (49)$$

L'intégration de l'équation (49) donne le résultat suivant:

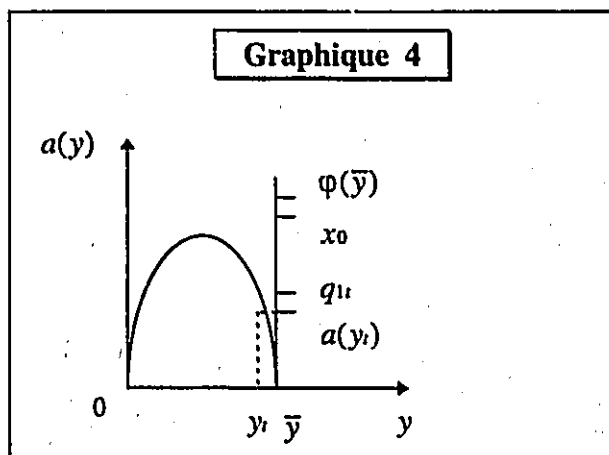
$$x_0 + y_0 = y_{\infty} - \int_0^{\infty} a(y_t) dt \quad (50)$$

Par y_{∞} on désigne l'accumulation du CO₂ à long terme. Si $x_0 + y_0 + \int_0^{\infty} a(y_t) dt < \bar{y}$, alors y_{∞} est strictement inférieure au seuil d'irréversibilité. Dans ce cas, les résultats présentés ci-dessus sont valables.



Proposition 4.5: Supposons que $x_0 > 0$, $y_0 < \bar{y}$, avec y_0 suffisamment proche de \bar{y} . Si $D_{1v}(m(\bar{y}), \bar{y}) + \frac{1}{\delta} D_{2v}(m(\bar{y}), \bar{y}) > 0$, alors il est optimal de ramener le stock de CO_2 à l'état irréversible.

Comme $D_{1v}(m(\bar{y}), \bar{y}) + \frac{1}{\delta} D_{2v}(m(\bar{y}), \bar{y}) > 0$, alors d'après la Proposition 4.1, il est optimal d'exploiter le pétrole au temps s' . s' est défini comme étant le temps où la concentration de CO_2 atteint \bar{y} . Par continuité, il est aussi optimal d'exploiter le pétrole pour des niveaux d'accumulation de CO_2 au voisinage de s' . En particulier, $q_{1s'}$ est strictement positif juste avant d'atteindre le seuil d'irréversibilité. Par contre, la dégradation naturelle du CO_2 à ce niveau est presque nulle (voir graphique 4). L'évolution du stock de CO_2 est donnée par l'équation (49), il est alors croissant avant d'atteindre le temps s' .



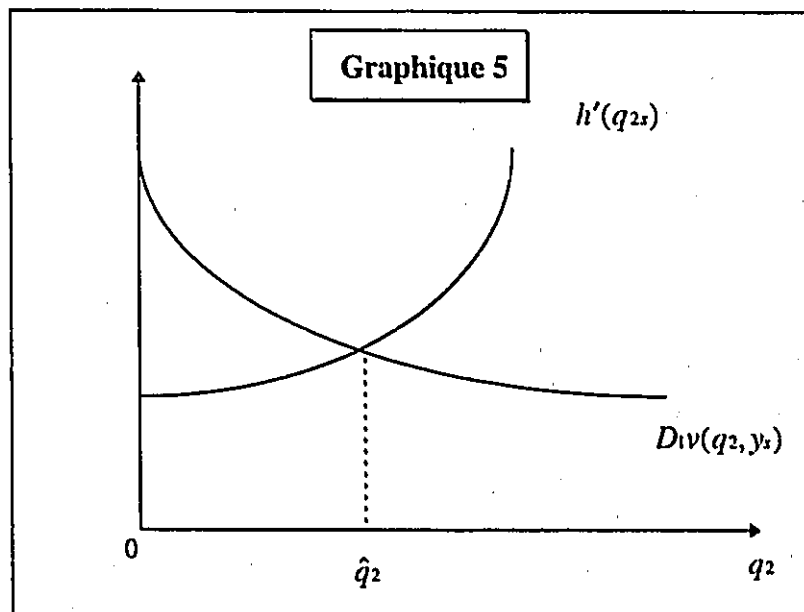
Notons que dans tout les cas étudiés précédemment, si l'accumulation du CO_2 à long terme est supérieure au seuil d'irréversibilité, alors la production de l'énergie à long

terme (\hat{q}_2) est celle réalisée au temps s , le temps où l'on arrête définitivement l'exploitation du pétrole (même sans l'épuiser). Elle est donnée par la condition suivante (voir graphique 5):

$$Div(\hat{q}_2, y_s) = h'(\hat{q}_2) \quad (51)$$

A partir de ce moment, l'économie jouira d'un bien-être escompté égal à:

$$\frac{1}{\delta} [v(\hat{q}_2, y_s) - h(\hat{q}_2)] \quad (52)$$



Proposition 4.6: *L'énergie backstop remplace graduellement le pétrole avant d'arrêter définitivement son exploitation.*

Tout d'abord on se propose de dégager une expression plus simple du prix efficace de l'accumulation du CO_2 (μ_t).

On a:

$$\frac{d}{dt} \left[\mu_t e^{-\int_0^t a'(y_w) dw} \right] = \left[\frac{d\mu}{dt} - \mu_t a'(y_t) \right] e^{-\int_0^t a'(y_w) dw} \quad (53)$$

Par conséquent, d'après l'équation (11) on obtient:

$$\left[\frac{d\mu}{dt} - \mu_t a'(y_t) \right] e^{-\int_0^t a'(y_w) dw} = -e^{-(\delta t + \int_0^t a'(y_w) dw)} D_{2v}(q_t, y_t) \quad (54)$$

En se servant de (53) on peut avoir l'égalité suivante:

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow \frac{d}{dt} \left[\mu_t e^{-\int_0^t a'(y_w) dw} \right] &= -e^{-(\delta t + \int_0^t a'(y_w) dw)} D_{2v}(q_t, y_t) \\ \Leftrightarrow \mu_t e^{-\int_0^t a'(y_w) dw} &= -\int_0^t e^{-(\delta t + \int_0^t a'(y_w) dw)} D_{2v}(q_s, y_s) ds + cte \\ \mu_t &= e^{\int_0^t a'(y_w) dw} \left[\mu_0 - \int_0^t e^{-\int_0^s \delta + a'(y_w) dw} D_{2v}(q_s, y_s) ds \right] \end{aligned} \quad (55)$$

A partir de l'équation (55), on peut remarquer que l'effet de l'accumulation du CO₂ sur la production à chaque instant est escompté à la fois au taux d'intérêt et au taux de dégradation naturelle du gaz carbonique ($e^{-\int_0^t \delta + a'(y_w) dw}$).

Soit s un temps suffisamment proche du temps où l'on arrête l'exploitation du pétrole. Alors, q_{1s} est assez faible. Supposons qu'au temps s , la quantité de l'énergie backstop utilisée est nulle. En ce temps, l'équation (12) est vérifiée avec égalité, elle s'écrit comme suit:

$$D_{1v}(q_{1s}, y_s) = e^{\delta s} (\lambda - \mu_s) \quad (56)$$

D'après la Proposition 4.3, s est fini. Comme l'effet de l'accumulation du CO₂ sur la production est fini pour n'importe quelle valeur de y , alors à partir de l'équation (55) le prix efficace du CO₂ au temps s est fini. Par conséquent, la partie gauche de

l'équation (56) est finie. Or, la partie gauche de cette équation tend vers l'infini quand s s'approche du temps où l'on arrête l'exploitation du pétrole, d'où la contradiction.

Donc, l'énergie backstop est positive avant d'arrêter l'utilisation du pétrole, elle augmente à mesure que q_{1t} tend vers zéro.

§ 4. Avant l'innovation: Analyse de la trajectoire optimale

Dans cette section on considère le problème avant l'innovation tel qu'il est décrit par (1) ou d'une façon équivalente par (2). L'optimisation dans ce modèle, commence au temps zéro.

Rappelons que τ correspond au temps exact auquel l'investissement du coût fixe K est fait dans le but de ramener l'énergie backstop au processus de production. Il est clair que si $K = 0$, alors $\tau = 0$ est le temps optimal de l'innovation. D'autre part, si K est suffisamment élevé, alors le bénéfice tiré de la nouvelle technologie n'est pas suffisant pour contrebalancer le coût excessif de son instauration. Dans ce cas, la technologie ne sera jamais opérationnelle. En d'autres termes, τ infini. Ainsi, lorsque k augmente à partir de zéro, elle passe par différentes dates auxquelles le temps optimal de l'innovation τ est positif mais fini.

Pour valider l'analyse de cette section on suppose que $\tau < \infty$.

Il est clair que si $x_0 = 0$, alors l'énergie backstop doit être introduite dans le processus de production immédiatement. Le bien-être social escompté dans ce cas est donné par $J(0, y_0, 0) - K$ et la solution optimale se réduit alors à celle discutée dans la section (3.1).

donné par $J(0, y_0, 0) - K$ et la solution optimale se réduit alors à celle discutée dans la section (3.1).

Si K est suffisamment faible, il peut se produire que $\tau = 0$. Ceci veut dire que la technologie backstop doit être opérationnelle au début de la période d'optimisation. Dans ce cas, le comportement de la trajectoire optimale est similaire à celui étudié dans les sections (3.2) et (3.3) et le bien-être social escompté est donné par $J(x_0, y_0, 0) - K$.

Concernant l'exploitation du pétrole, celle-ci sera arrêtée en un temps fini et la nouvelle technologie prend sa place graduellement dans le processus de production.

Quand $\tau > 0$, il est clair que $x_\tau < x_0$. Cependant, il peut se produire que $x_\tau = 0$. En d'autres termes, le stock de pétrole est épuisé au moment de l'innovation. Dans ce cas, l'input énergétique peut faire un saut discret au temps τ .

Les conditions qui garantissent ce fait sont extrêmement compliquées; voir Hung et Quyen (1994, proposition 2.3 a, p 64) pour la discussion de cette possibilité. Ce cas peut être résumé comme suit: le stock de pétrole est totalement épuisé avant que la nouvelle technologie ne prenne sa place dans le processus de production.

Quand $\tau > 0$ et $0 < x_\tau < x_0$, la transition est graduelle. Dans ce cas, les conditions de premier ordre (5), (6) et (7) sont vérifiées.

La condition (5) indique que le prix efficace de pétrole reste le même après l'innovation. De plus le prix efficace de CO_2 ne fait aucun saut au temps τ .

En se servant de ces résultats, on peut s'assurer que lorsque t tend vers τ à partir de la gauche, le taux d'extraction de pétrole vérifie l'expression suivante:

$$e^{-\delta t} Div(q_t, y_t) - \lambda_t + \mu_t = 0 \quad (57)$$

De plus quand t tend vers τ à partir de la droite, les conditions de premier ordre suivantes sont vérifiées.

$$e^{-\delta t} D_{1V}(q_{1t} + q_{2t}, y_t) - \lambda + \mu_t \leq 0 \quad (58)$$

$$D_{1V}(q_{1t} + q_{2t}, y_t) - h'(q_{2t}) = 0 \quad (59)$$

Notons que la condition de premier ordre (59) doit être vérifiée avec égalité, car après l'innovation de la nouvelle technologie doit être mise en place immédiatement. Sinon, la valeur escomptée de l'investissement backstop $K e^{-\delta \tau}$ sera réduite.

Par conséquent, l'input énergétique (pétrole et backstop) est continu au temps τ , mais le taux d'exploitation du pétrole peut faire un saut discret vers le bas au temps de l'innovation.

En définitif, la solution optimale peut être décrite comme suit : avant τ , le pétrole est le seul input énergétique. A partir de τ , à la fois le pétrole et l'énergie backstop sont utilisées. De plus durant la phase transitoire les deux sources d'énergie sont utilisées.

A long terme, après avoir arrêté définitivement l'exploitation du pétrole, l'énergie backstop devra subvenir aux besoins énergétiques de l'économie.

Si le seuil d'irréversibilité pour le CO_2 n'est jamais dépassé, alors l'accumulation de celui-ci tend vers zéro à long terme. Dans le cas contraire, il est absurde qu'elle reste indéfiniment au niveau atteint au moment de l'épuisement du pétrole.

§ 5. Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié de la question de l'innovation, la question de l'exploitation optimale de l'énergie et le problème de l'irréversibilité. La réponse aux questions posées au départ peuvent se résumer comme suit:

Le temps de l'innovation dépend essentiellement du coût fixe nécessaire pour la mise en place de la nouvelle technologie et de la valeur initiale du stock de pétrole. Le plus le capital backstop est élevé, le plus le temps de l'innovation est retardée. Un stock de pétrole assez faible pourrait entraîner l'introduction de la nouvelle technologie le plutôt possible. Avant l'innovation, le seul input énergétique est le pétrole. Vers la fin de cette phase, il serait très probable d'assister à une phase de transition, dans laquelle l'énergie backstop se substitue (généralement d'une façon graduelle) au pétrole.

L'épuisement du stock du pétrole est intimement lié à la concentration du CO_2 dans l'atmosphère. En effet, si l'accumulation de ce gaz est réversible durant toute la trajectoire optimale alors le prix efficace du pétrole est strictement positif et son stock sera épuisé en un temps fini. Dans le cas contraire deux possibilités peuvent se produire. Si pour tout accumulation de CO_2 irréversible, le gain marginal tiré de l'exploitation du pétrole est supérieur au dommage escompté causé par l'augmentation de la concentration de CO_2 d'une unité alors le stock de pétrole sera épuisé en un temps fini. Dans le cas contraire, l'exploitation du pétrole sera arrêtée sans l'épuiser totalement. Notons que si l'accumulation du CO_2 durant toute la trajectoire optimale n'atteint pas le seuil d'irréversibilité, à long terme l'accumulation de ce gaz dans l'atmosphère tend vers un niveau faible. Ce niveau n'aurait aucun effet sur l'activité économique.

L'optimalité de ramener le stock de CO_2 à l'état irréversible dépend de plusieurs variables. En effet, dans le cas où la somme des stocks intérieurs de pétrole et de CO_2 est inférieure au seuil d'irréversibilité, il est absurde que la concentration de ce gaz ne puisse jamais dépasser le seuil d'irréversibilité.

Si le taux d'intérêt est assez faible, il serait plus probable que le seuil d'irréversibilité ne soit pas dépassé. Ce cas se produit également si l'on se situe dès le départ au voisinage du seuil d'irréversibilité et que le dommage marginal causé par le niveau irréversible est inférieur au gain marginal tiré de l'exploitation du pétrole.

Le coût de l'énergie backstop joue également un rôle important dans la question de l'irréversibilité. En effet, si le coût marginal de production de cette énergie excède l'effet escompté d'une unité supplémentaire de gaz carbonique sur l'output, on serait obligé de recourir à l'exploitation du pétrole quelque soit le niveau d'accumulation de CO_2 . Dans ce cas, le seuil d'irréversibilité finirait par être dépassé.

Les efforts des scientifiques dans les domaines environnementaux, en l'occurrence dans celui de la pollution, est crucial. Grâce à eux, il serait possible de découvrir une énergie renouvelable et non polluante à un coût tolérable. Une telle découverte pourrait sauver la planète de la concentration irréversible du CO_2 .

Un taux d'intérêt adéquat pourrait également contribuer à donner les mêmes chances de développement aux générations futures. Elles auront la possibilité de vivre dans un monde sain dans la mesure où la pollution de l'air aurait un effet mineur sur leurs activités.

Chapitre V

LA CROISSANCE OPTIMALE SOUS CONTRAINTE DE LA POLLUTION DE L'AIR

Introduction

Dans le chapitre précédent, on s'intéressait essentiellement à la question de la gestion optimale du stock de pétrole, à la possibilité de baser l'économie sur une énergie non polluante et au problème de l'irréversibilité. Certes, toutes ces questions sont d'une importance cruciale. Mais les réponses étaient-elles suffisantes pour éliminer l'inquiétude quant à l'économie et à l'environnement?

Dans ce chapitre on se propose d'étudier la croissance optimale en présence de la pollution de l'air. Le modèle proposé est structurellement le même que celui du chapitre précédent. En effet, il s'agit toujours de maximiser la somme actualisée des flux d'utilité qui ne dépendent que d'un seul bien. La production agrégée dépend de l'input énergétique et du niveau de l'accumulation du CO₂ dans l'atmosphère. Sauf que dans ce modèle on intègre l'accumulation du capital backstop.

§ 1. Hypothèses

La majorité des hypothèses du chapitre précédent sont utilisées dans ce chapitre.

Hypothèse -1-:

Soit $U(c)$ la fonction d'utilité. Elle ne dépend que de la consommation (c). On suppose que: $U(0) = 0$, $U'(c) > 0$, $U''(c) < 0$, $U'(0) = +\infty$ et $U'(\infty) = 0$.

Hypothèse -2-:

Soit $f(q, y)$ la fonction de production, agrégée. Elle dépend de l'input énergétique (q) et de la concentration du CO_2 dans l'atmosphère (y). On suppose que: $f(0, y) = 0$, $D_1 f(q, y) > 0$, $D_1 f(0, y) = +\infty$, $D_1 f(\infty, y) = 0$, $D_{11} f(q, y) < 0$, $D_2 f(q, y) \leq 0$ et $D_{12} f(q, y) < 0$.

Par D_i , on désigne la dérivée première de la $i^{\text{ème}}$ variable.

Hypothèse -3-:

Par input énergétique on désigne la somme de la quantité de pétrole (q_1) et de l'énergie backstop (q_2). On suppose que $q_{1t} \geq 0$, $q_{2t} \geq 0$; pour tout $t \geq 0$.

Hypothèse -4-:

La fonction de production de l'énergie backstop est $g(k)$. Elle ne dépend que de la quantité de capital (k). On suppose que $g(0) = 0$, $g'(k) > 0$, $g''(k) < 0$, $g'(0) = \infty$ et $g'(\infty) = 0$.

Hypothèse -5-:

On suppose que le stock du capital backstop au début de la période d'optimisation est donné et que son évolution dans le temps est déterminée par la différence entre la production $f(q, y)$ et la consommation (c):

$$\frac{dk}{dt} = f(q_{1t} + q_{2t}, y_t) - c_t, \quad k_0 \text{ donnée}$$

Hypothèse -6-:

On suppose que le coût de l'exploitation du pétrole est nul.

Hypothèse -7-:

On suppose que la disponibilité du pétrole au début de la période d'optimisation (x_0) est finie, connue avec certitude et que le stock de pétrole à chaque instant est donné par l'équation suivante:

$$\frac{dx}{dt} = -q_t, \quad x_0 \text{ donnée.}$$

Hypothèse -8-:

On suppose que la concentration initiale du CO_2 est connue avec certitude. On suppose également que l'utilisation d'une unité de pétrole conduit à l'émission d'une unité de gaz carbonique et qu'une proportion de ce gaz quitte l'atmosphère naturellement. Soit $a(y)$ la fonction qui mesure cette dégradation naturelle. La concentration du CO_2 à chaque instant est alors donnée par l'équation différentielle suivante:

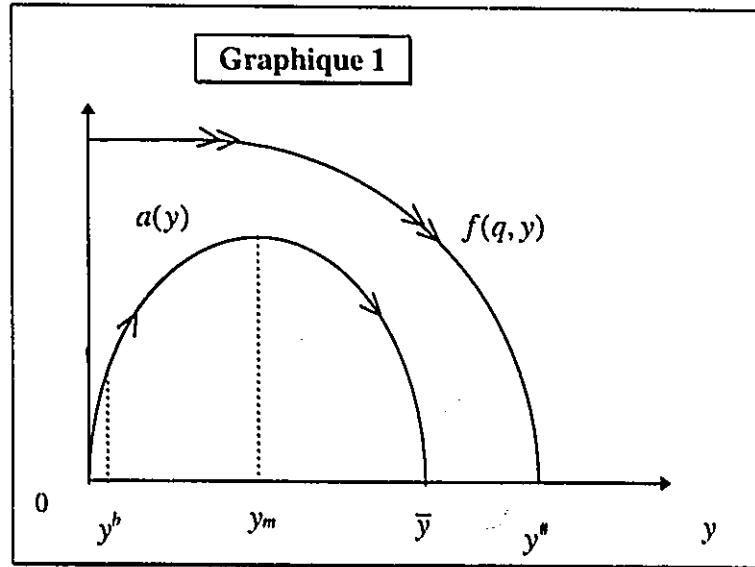
$$\frac{dy}{dt} = q_t - a(y), \quad y_0 \text{ donnée.}$$

Hypothèse -9-:

Dans le graphique 1, on représente la fonction $a(y)$. Par \bar{y} , y^b et y^* on désigne respectivement le seuil d'irréversibilité, le niveau de concentration de CO_2 au-dessous duquel l'effet de ce gaz sur la production est nul et le niveau de la concentration du CO_2 à partir duquel la production est nulle quelque soit le niveau d'input énergétique ($D_2f(q,y) = 0$ pour tout $y \leq y^b$ et $f(q,y^*) = 0$ pour $y \geq y^*$ et $q \geq 0$). On suppose également que pour des niveaux d'accumulation de CO_2 assez faibles, la dégradation naturelle de ce dernier est strictement croissante. Elle atteint son maximum à y_m , puis elle décroît pour s'annuler à partir de \bar{y} .

Hypothèse -10-:

On suppose que le taux d'escompte est le taux d'intérêt réel.



§ 2. Présentation du modèle

Il s'agit de choisir la quantité de pétrole (q_t) et le niveau de la consommation (c_t)

à chaque instant de façon à maximiser l'expression suivante:

$$\Psi(x_0, y_0, k_0, 0) = \text{Max}_{q_t, c_t} \int_0^{\infty} e^{-\delta t} U(c_t) dt \quad (1)$$

Sous les contraintes suivantes:

$$\frac{dx}{dt} = -q_t, \quad x_0 \text{ donnée}$$

$$\frac{dy}{dt} = q_t - a(y_t), \quad y_0 \text{ donnée}$$

$$\frac{dk}{dt} = f(q_t + q_{2t}, y_t) - c_t, \quad k_0 \text{ donnée}$$

$$q_{2t} = g(k_t)$$

$$q_{1t} \geq 0, q_{2t} \geq 0 \text{ et } x_t \geq 0 \text{ pour tout } t \geq 0$$

§ 3. La disoussion de la solution optimale

La solution optimale pour le modèle présenté ci-dessus dépend des valeurs initiales x_0 , k_0 et y_0 . Dans ce que suit, on va discuter les différents cas qui peuvent se présenter selon ces valeurs. Au cours de cette analyse, on va supposer que $x_0 + y_0 < y^*$, car dans le cas inverse il est absurde qu'il n'est jamais optimal de ramener le stock de CO₂ au voisinage de y^* (le niveau de concentration de CO₂ qui ramène la production à zéro).

Le Hameltonien

$$\mathcal{H} = e^{-\delta t} U(c_t) - \lambda_t q_{1t} + \mu_t (q_{1t} - a(y_t)) + v_t (f(q_{1t} + g(k_t), y_t) - c_t)$$

Les équations adjointes

$$\dot{\lambda}_t = -H_x = 0 \Rightarrow \lambda_t = \lambda = cte \quad (2)$$

$$\dot{\mu}_t = -H_y = \mu_t a'(y_t) - v_t D_2 f(q_{1t} + g(k_t), y_t) \quad (3)$$

$$\dot{v}_t = -H_k = -v_t g'(k_t) D_1 f(q_{1t} + g(k_t), y_t) \quad (4)$$

Le principe de maximum

$$e^{-\delta t} U'(c_t) = v_t \quad (5)$$

$$v_t D_1 f(q_{1t} + g(k_t), y_t) - \lambda + \mu_t \leq 0 \text{ avec égalité si } q_{1t} > 0 \quad (6)$$

§ 3.1. Cas 1 *Le stock initial de pétrole est nul*

Si $x_0 = 0$, alors on doit nécessairement avoir un certain montant de capital au temps zéro. Sinon, la production s'annule ce qui entraîne l'explosion du système. Par

conséquent, l'analyse de la solution optimale dans cette section sera menée en supposons que $x_0 = 0$ et $k_0 > 0$.

Concernant la valeur de y_0 , on distingue deux cas:

- L'accumulation du CO₂ à long terme est irréversible.
- L'accumulation initiale du CO₂ peut être inférieure au seuil d'irréversibilité. Dans ce cas, l'accumulation du CO₂ à long terme est réversible.

3.1.1 *Le stock initial de pétrole est nul et l'accumulation du CO₂ est irréversible*

Dans ce cas, les conditions qui caractérisent la solution optimale sont les suivantes:

Les equations adjointes

$$\dot{\mu}_t = -v_t D_2 f(g(k_t), y_0) \quad (7)$$

$$\dot{v}_t = -v_t g'(k_t) D_1 f(g(k_t), y_0) \quad (8)$$

La condition de premier ordre maximisant le hameltonien

$$e^{-\delta t} U'(c_t) = v_t \quad (9)$$

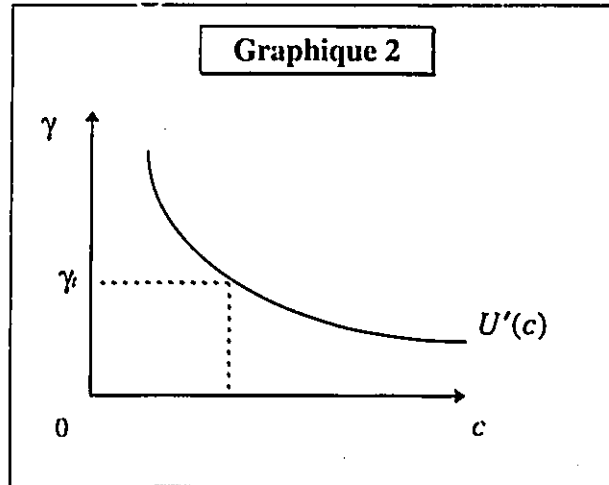
La dynamique du stock de capital

$$\dot{k}_t = f(g(k_t), y_0) - c_t \quad (10)$$

Soit γ_t tel que $\gamma_t = v_t e^{\delta t}$. D'après l'équation (9), $U'(c_t) = \gamma_t$ (voir graphique 2). On note par $\phi(\cdot)$ la fonction inverse de la fonction $U'(\cdot)$.

On peut donc réécrire (9) comme suit:

$$c_t = \phi(\gamma_t) \quad (11)$$



Les équations (10) et (11) permettent d'avoir l'égalité suivante:

$$\dot{k}_t = f(g(k_t), y_0) - \phi(\gamma_t) \quad (12)$$

Le logarithme de γ_t est donné par l'expression suivante:

$$\begin{aligned} \text{Log}(\gamma_t) &= \delta t + \text{Log}(\gamma_1) \\ \Rightarrow \frac{\dot{\gamma}_t}{\gamma_t} &= \delta + \frac{\dot{\gamma}_t}{\gamma_t} \end{aligned} \quad (13)$$

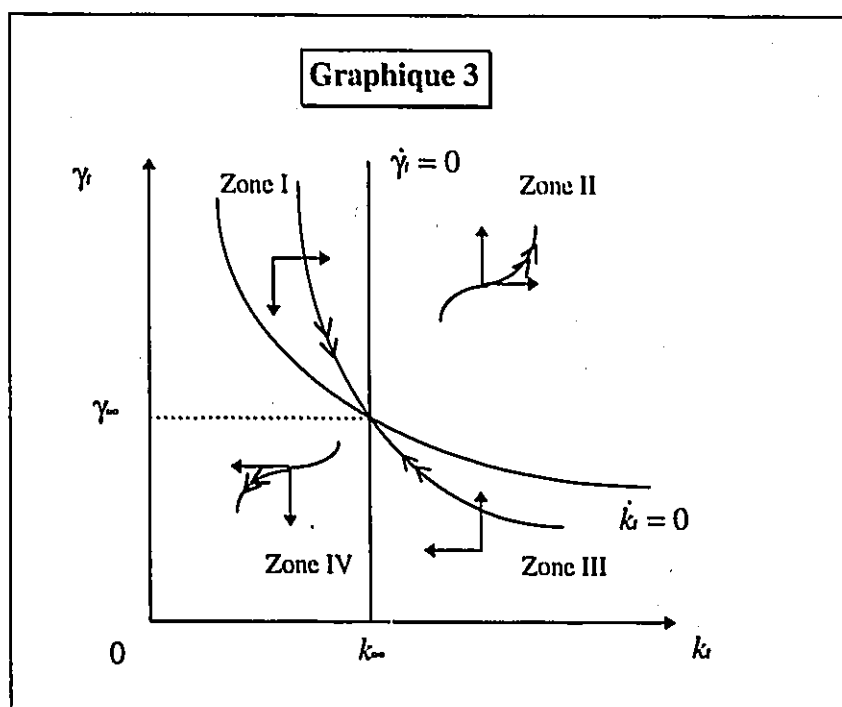
En se servant de (8), on peut transformer cette équation comme suit:

$$\frac{\dot{\gamma}_t}{\gamma_t} = \delta - g'(k_t) D_1 f(g(k_t), y_0) \quad (14)$$

Dans les équations (12) et (14) le temps n'intervient pas explicitement. Ceci permet d'étudier la convergence vers l'état stationnaire dans le plan (k, γ) .

Dans le graphique 3, on représente le diagramme des phases pour ces deux équations. La meilleure façon de comprendre ce diagramme est de considérer que dans le plan (k, γ) , les équations différentielles (12) et (14) tracent toutes les trajectoires possibles pour le capital et la consommation. Ces trajectoires ne peuvent jamais se couper car chacune d'entre elles dépend du point initial (k_0, γ_0) . On note que la consommation et le capital peuvent aussi bien augmenter que diminuer selon qu'on soit situé au Nord-Est, au Sud-Est, au Nord-Ouest ou au Sud-Ouest dans le plan (k, γ) .

L'analyse du diagramme des phases est bien connue, voir par exemple la discussion du modèle pour un seul secteur de K.J. Arrow et M.Kurz (1970, p 64) ou de A. Takayama (1985, p 617).



Dans le graphique ci-dessus, k_{∞} est défini par l'équation suivante: $\delta = g'(k_{\infty})D_1 f(g(k_{\infty}), y_0)$. Pour tout point se situant sur la droite verticale passant par k_{∞} , la consommation est stationnaire ($\dot{\gamma}_t = 0$). Pour des niveaux de capital supérieurs à k_{∞} , γ_t est croissante. Ceci implique que la consommation est décroissante (rappelons que $U'(c_t) = \gamma_t$ et que la fonction d'utilité est concave). Par analogie, la consommation est croissante pour tout niveau de capital inférieur à k_{∞} . Par les petites flèches verticales, on représente le mouvement de γ_t dans le plan (k, γ) .

La courbe décroissante dans ce graphique, représente la fonction $f(g(k_t), y_0) - \phi(\gamma_t) = 0$. Le long de cette courbe le capital est stationnaire. Il est croissant (respectivement décroissant) au-dessus (respectivement au-dessous) de la courbe en question. Par les petites flèches horizontales, on décrit le mouvement du stock du capital backstop dans le plan (k, γ) .

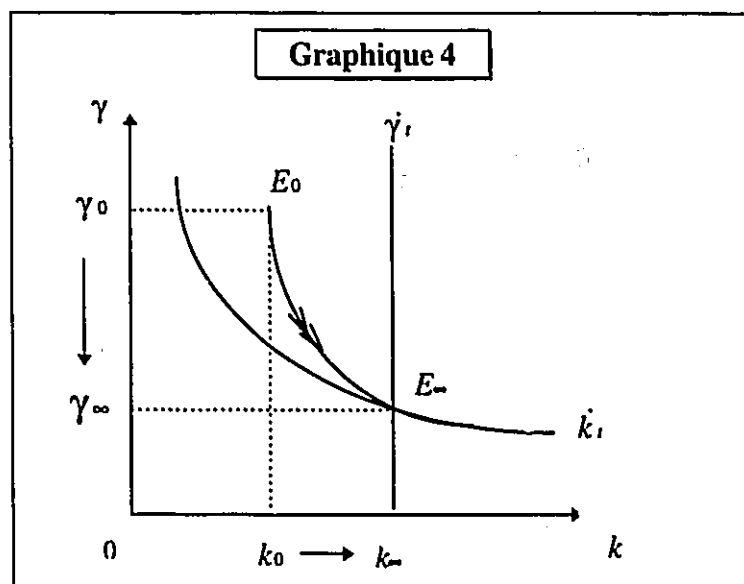
Les deux courbes $\dot{k}_t = 0$ et $\dot{\gamma}_t = 0$ coupent le plan (k, α) en quatre zones. Pour un couple (k_t, γ_t) se situant dans la zone II, à la fois k_t et γ_t tendent vers l'infini à mesure que t tende vers l'infini. La fonction d'utilité est strictement concave. Par conséquent, l'augmentation de γ_t dans le temps doit entraîner la décroissance de la consommation. Il est clair qu'une telle trajectoire n'est pas optimale: le stock de capital devient arbitrairement élevé alors que la consommation décroît continuellement vers zéro.

Si (k_t, γ_t) se situe dans la zone IV, alors k_t et γ_t diminuent quand t tend vers l'infini. Dans ce cas, deux possibilités peuvent se produire.

- Si la trajectoire coupe l'axe horizontal, alors la consommation devient infinie. Le capital est par contre fini. Cette alternative est à écarter, une telle trajectoire étant irréalisable.

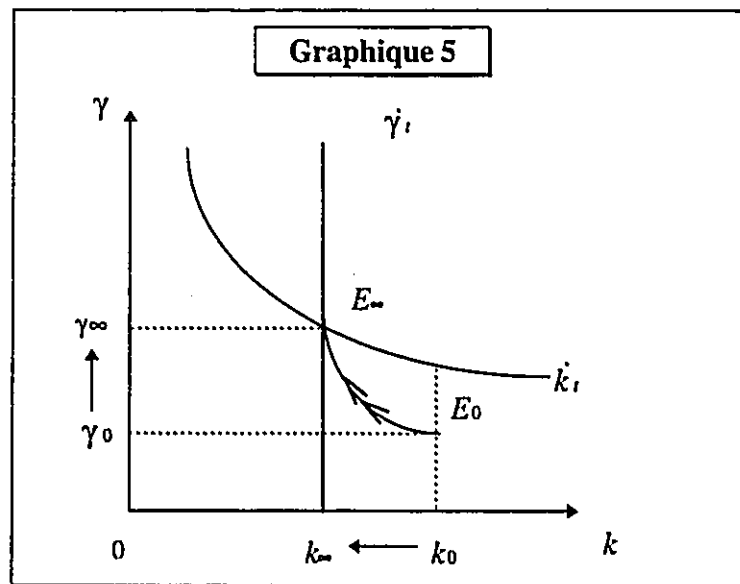
- Dans le cas où la trajectoire coupe l'axe vertical, le capital s'annule alors que la consommation est positive. Cette trajectoire est également irréalisable.

Par conséquent, la trajectoire optimale doit rester dans la zone I ou la zone III. Pour k_0 inférieur à k_* , il existe une valeur unique γ_0 telle que la trajectoire commence dans la zone I et la solution optimale du système d'équations différentielles (12) et (14), sous la condition initiale (k_0, γ_0) , reste dans la même zone en convergeant vers (k_*, γ_*) quand t tend vers l'infini. Dans le graphique 4, on représente cette trajectoire par la courbe (E_0, E_*) . Le long de la trajectoire optimale, le stock du capital backstop augmente en se dirigeant vers la valeur de l'équilibre à long terme (k_*). Pour sa part, la consommation augmente à partir de sa valeur initiale $c_0 = \phi(\gamma_0)$ vers sa valeur stationnaire $c_* = \phi(\gamma_*)$. C'est la valeur de l'équilibre à long terme de la consommation.



De même, si k_0 est supérieur à k_∞ , la solution optimale est telle qu'il existe une valeur unique de γ_0 qui permette à la trajectoire de commencer à la zone III et d'y rester jusqu'à ce qu'elle atteigne l'équilibre stationnaire.

Dans le graphique 5, (E_0, E_∞) représente cette trajectoire. Tout au long de la trajectoire optimale, à la fois le capital et la consommation décroissent continuellement jusqu'à ce qu'ils atteignent l'équilibre de long terme (k_∞, c_∞) .



Il reste à étudier le comportement du prix efficace de l'accumulation du CO_2 (μ_t).

Soit β_t tel que $\beta_t = e^{\delta t} \mu_t$. Par conséquent:

$$\frac{\dot{\beta}_t}{\beta_t} = \delta + \frac{\dot{\mu}_t}{\mu_t} \quad (15)$$

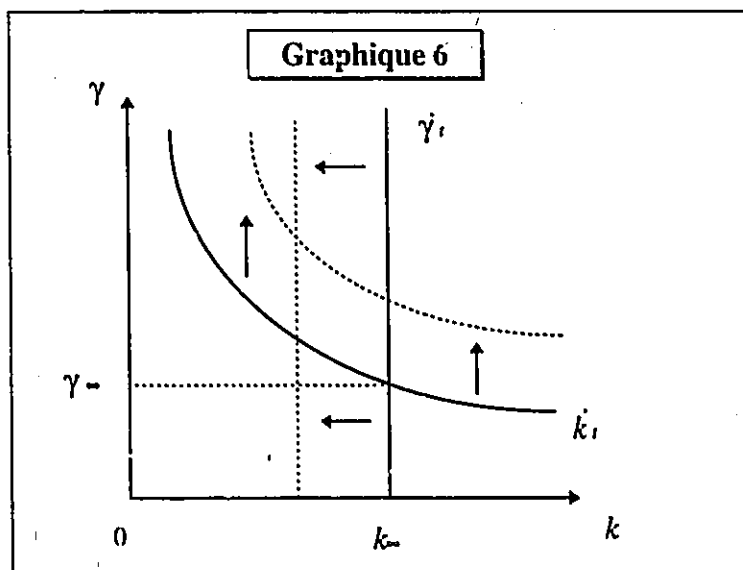
A partir de l'équation adjointe (3), on peut transformer cette équation comme suit:

$$\dot{\beta}_t = \delta\beta_t - \gamma_t D_2 f(g(k_t), y_0) \quad (16)$$

A long terme β_t tend vers β_{∞} , défini par la condition suivante:

$$\beta_{\infty} = \frac{1}{\delta} \gamma_{\infty} D_2 f(g(k_{\infty}), y_0) \quad (17)$$

On note que quand y_0 augmente, la droite verticale $\dot{\gamma}_t = 0$ se déplace vers la droite et la courbe $\dot{k}_t = 0$ se déplace vers le bas (voir graphique 6). L'équilibre stationnaire se déplace alors vers le haut à gauche. Il en résulte un niveau de capital backstop et une consommation à long terme moins élevés.



Dans la proposition suivante, on résume les résultats discutés ci-dessus.

Proposition 5.1: *Supposons que $x_0 = 0$ et $y_0 \geq \bar{y}$. Soit k_* , γ_* et β_* définis respectivement par les conditions ci-dessous.*

$$g'(k_*)D_1f(g(k_*), y_0) = \delta, \gamma_* = U'(f(g(k_*), y_0)) \text{ et } \beta_* = \frac{1}{\delta}\gamma_*D_2f(g(k_*), y_0), \text{ alors:}$$

5.1.a) *La solution optimale indique qu'à long terme le stock du capital backstop converge vers k_* , la consommation converge vers $\phi(\gamma_*)$ et le prix efficace courant de l'accumulation du CO_2 converge vers β_* . De plus, si le niveau initial du capital backstop est inférieur à son niveau d'équilibre de long terme, alors à la fois c_t et k_t augmentent en convergeant vers leurs valeurs de long terme. D'autre part, si k_0 est supérieur à k_* le système atteint l'équilibre stationnaire par un capital et une consommation continuellement décroissants.*

5.1.b) *Plus le stock de pollution est élevé, moins le stock de capital et la consommation de long terme sont élevés.*

3.1.2 *Le stock initial de pétrole est nul et l'accumulation initiale du CO_2 est strictement inférieure au seuil d'irréversibilité*

Dans ce cas, l'évolution du système est gouvernée par les équations différentielles

suivantes:

$$\frac{\dot{\gamma}_t}{\gamma_t} = \delta - g'(k_t)D_1f(g(k_t), y_t) \quad (18)$$

$$\dot{k}_t = f(g(k_t), y_t) - \phi(\gamma_t) \quad (19)$$

$$\dot{y}_t = -a(y_t) \quad (20)$$

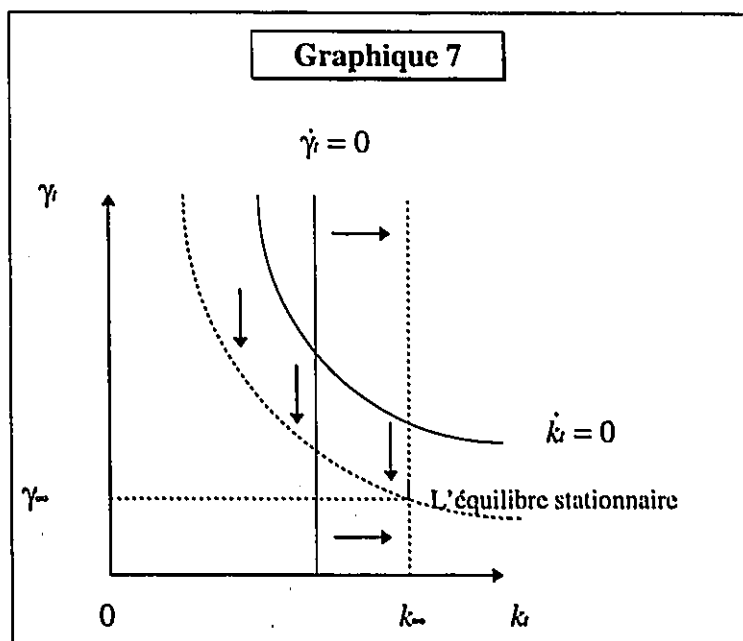
$$\dot{\beta}_t = \delta\beta_t - \gamma_t D_2f(g(k_t), y_t) \quad (21)$$

Le diagramme des phases correspondant à ces cas, est représenté par le graphique 7.

L'analyse de ce graphique est similaire à l'analyse des graphiques 3, 4 et 5, sauf que dans ce cas, l'accumulation du CO_2 diminue continuellement. D'après l'équation (20), elle

tend vers zéro à long terme.

La dégradation de la concentration du CO₂ entraîne le déplacement de la courbe $\dot{\gamma}_t = 0$ vers la droite et de la courbe $\dot{k}_t = 0$ vers le bas (voir graphique 7).



Les courbes $\dot{\gamma}_t$ et \dot{k}_t atteignent leurs positions finales en un temps fini quand y_t atteint y^b . Car au-dessous de y^b , l'effet de l'accumulation du CO₂ sur la production est nul (voir hypothèse 9).

Notons qu'à court terme, le comportement de k_t et γ_t est difficilement analysable. Ils peuvent aussi bien augmenter que diminuer puisqu'ils dépendent instantanément de la valeur de y_t .

En suivant le même raisonnement que dans le cas 2.1.1, on obtient la proposition suivante:

Proposition 5.2: Supposons que $x_0 = 0$, $y_0 < \bar{y}$. Soit k_∞ et γ_∞ tels que:

$$\delta - g'(k_\infty)D_1f(g(k_\infty), 0) = 0 \text{ et } \gamma_\infty = U'(f(g(k_\infty), 0)).$$

A long terme, l'accumulation de CO_2 tend vers zéro. Le stock de capital tend vers k_∞ et la consommation tend vers c_∞ telle que $c_\infty = \phi(\gamma_\infty)$. De plus, si le niveau initial de capital k_0 est inférieur à son niveau d'équilibre de long terme, alors à la fois c_t et k_t augmentent en convergeant vers leurs valeurs de long terme. D'autre part, si k_0 est supérieur à k_∞ , le système atteint l'équilibre stationnaire par un capital et une consommation décroissants.

On note que le comportement de la trajectoire optimale dans le cas où $x_0 > 0$, $y_0 < \bar{y}$ et $x_0 + y_0 \leq \bar{y}$, est semblable au cas étudié ci-dessus ($x_0 = 0$ et $y_0 < \bar{y}$). Car, l'accumulation de CO_2 durant toute la trajectoire optimale ne peut pas dépasser le seuil d'irréversibilité $y_t < x_0 + y_0 \leq \bar{y}$.

§ 3.2. Cas 2 Le stock initial de pétrole est strictement positif

On note que, quand $x_0 > 0$, k_0 peut être aussi bien positif que nul. Plusieurs possibilités peuvent se produire dans ce cas.

Dans cette section on distingue deux cas:

- Le stock de CO_2 de départ est irréversible ($y_0 \geq \bar{y}$).
- Le stock initial de CO_2 est inférieur au seuil d'irréversibilité et la somme $x_0 + y_0$ est supérieure à \bar{y} .

3.2.1 Le stock initial de pétrole est strictement positif et la concentration du CO_2 est irréversible

Dans ce cas, la solution optimale est caractérisée par les conditions suivantes:

$$U'(c_t) = \gamma_t \tag{22}$$

$$\gamma_t D_1 f(g(k_t) + q_{1t}, y_t) + \beta_t - \lambda e^{\delta t} \leq 0 \quad (23)$$

$$\frac{\dot{\gamma}_t}{\gamma_t} = \delta - g'(k_t) D_1 f(g(k_t) + q_{1t}, y_t) \quad (24)$$

$$\dot{k}_t = f(g(k_t), y_0) - c_t \quad (25)$$

$$\dot{\beta}_t = \delta - \gamma_t D_2 f(g(k_t) q_{1t}, y_t) \quad (26)$$

• Si $k_0 = 0$, le seul input énergétique provient du secteur pétrolier. Dans ce cas, le pétrole doit être utilisé dans le processus de production même si le système est déjà irréversible. L'exploitation du pétrole entraîne l'augmentation continue de l'accumulation du CO₂ dans l'atmosphère. Cet état de fait doit continuer tant que l'on n'a pas accumulé suffisamment de capital backstop pour répondre aux besoins de l'économie.

Par continuité on peut dire que quand le stock initial de capital est assez faible, le pétrole doit être exploité immédiatement au temps zéro.

Notons que quand k_0 est élevé, la consommation au temps zéro est également assez élevée. Par conséquent, γ_0 sera borné supérieurement. Elle tend vers zéro quand k_0 tend vers l'infini. Ainsi, l'expression $\gamma_0 g'(k_0) D_1 f(g(k_0) + q_{10}, y_0)$ tend vers zéro quand k_0 tend vers l'infini. De plus, puisque $\lambda \geq 0$ et β_0 est négative (car l'effet de l'accumulation du CO₂ sur le processus de production est négatif), alors il est clair que la partie gauche de l'inéquation (23) est strictement négative quand k_0 tend vers l'infini.

Ceci implique que si k_0 est suffisamment élevé, on doit avoir $q_{10} = 0$. Plus précisément, le pétrole ne sera pas exploité au début de la période d'optimisation (on discutera plus tard avec plus de précision les conditions qui entraînent la non-utilisation du pétrole).

Dans la proposition suivante, on résume le résultat auquel on vient d'aboutir:

Proposition 5.3: *Supposons que $x_0 > 0$ et $y_0 \geq \bar{y}$. Si le stock initial de capital est assez faible, alors le pétrole doit être exploité immédiatement au temps zéro. D'autre part, si k_0 est assez élevé, le pétrole ne sera pas exploité au début de la période d'optimisation.*

• Supposons que l'on n'exploite pas le pétrole. Dans ce cas, le problème se réduit au cas étudié en (2.1.1) et la convergence vers l'état stationnaire se fait de la même manière (voir l'analyse des graphiques 3, 4, et 5).

Le fait de ne pas utiliser le pétrole implique que son prix efficace est nul ($\lambda = 0$).

La solution optimale est alors caractérisée par les conditions suivantes:

$$c_t = \phi(\gamma_t) \quad (27)$$

$$\beta_t + \gamma_t D_1 f(g(k_t), y_0) \leq 0 \quad (28)$$

$$\dot{\beta}_t = \delta \beta_t - \gamma_t D_2 f(g(k_t), y_0) \quad (29)$$

$$\frac{\dot{\gamma}_t}{\gamma_t} = \delta - g'(k_t) D_1 f(g(k_t), y_0) \quad (30)$$

$$\dot{k}_t = f(g(k_t), y_0) - c_t \quad (31)$$

Ainsi, l'équilibre à long terme est donné par les conditions suivantes:

$$g'(k_\infty) D_1 f(g(k_\infty), y_0) = \delta \quad (32)$$

$$\gamma_\infty = U'[f(g(k_\infty), y_0)] \quad (33)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \beta_t = \beta_\infty = \frac{1}{\delta} \gamma_\infty D_2 f(g(k_\infty), y_0) \quad (34)$$

Par conséquent, quand t tend vers l'infini, l'équation (28) se transforme comme suit:

$$\beta_{\infty} + \gamma_{\infty} D_1 f(g(k_{\infty}), y_0) \leq 0 \quad (35)$$

En se servant de l'équation (34), on peut transformer cette inéquation comme suit:

$$D_1 f(g(k_{\infty}), y_0) + \frac{1}{\delta} D_2 f(g(k_{\infty}), y_0) \leq 0 \quad (36)$$

On vient juste d'établir le résultat suivant:

Proposition 5.4 *Supposons que $x_0 > 0$ et $y_0 \geq \bar{y}$. S'il n'est pas optimal d'exploiter le pétrole, alors l'inégalité suivante est vérifiée à chaque instant:*

$$\beta_t + \gamma_t D_1 f(g(k_t), y_0) \leq 0 \text{ pour tout } t \geq 0 \quad (37)$$

De plus, à long terme, le système converge vers l'état stationnaire $(k_{\infty}, \gamma_{\infty})$, tel que k_{∞} est défini implicitement par (32) et γ_{∞} (l'utilité marginale non escomptée) définie par (33).

La convergence vers l'état stationnaire se fait de la manière décrite dans la Proposition 5.1. Notons qu'en particulier, (37) s'écrit comme suit à l'infini:

$$D_1 f(g(k_{\infty}), y_0) + \frac{1}{\delta} D_2 f(g(k_{\infty}), y_0) \leq 0 \quad (38)$$

Dans l'équation (37), β_t et γ_t sont les prix efficaces courants respectivement de l'accumulation du CO₂ et du capital backstop durant toute la trajectoire optimale. Notons que la dynamique de k_t , β_t et γ_t est gouvernée par les équations (29), (30) et (31) ainsi que par les conditions de limite (32), (33) et (34).

Le résultat suivant découle de la Proposition 5.4.

Corollaire 5.1: *Supposons que $x_0 > 0$ et $y_0 \geq \bar{y}$. Soit k_{∞} l'accumulation du CO₂ à l'état stationnaire (avec k_{∞} est donnée par $g'(k_{\infty}) D_1 f(g(k_{\infty}), y_0) = \delta$). Si l'inéquation suivante est vérifiée, alors le pétrole est utilisé pour un certain temps.*

$$D_1 f(g(k_{\infty}), y_0) + \frac{1}{\delta} D_2 f(g(k_{\infty}), y_0) > 0 \quad (39)$$

• Supposons maintenant que le pétrole est exploité. La dynamique du système est alors donnée par les équations différentielles suivantes:

$$\frac{dx}{dt} = -q_t, \quad x_0 \text{ donnée} \quad (40)$$

$$\frac{dy}{dt} = q_t, \quad y_0 \text{ donnée} \quad (41)$$

$$\frac{dk}{dt} = f(q_t + g(k_t), y_t) - c_t, \quad k_0 \text{ donnée} \quad (42)$$

On note que les parties droites de ces équations sont concaves par rapport à leurs arguments. On note également que la fonction objective (la fonction d'utilité) est strictement concave. Sous ces conditions, d'après K.J.Arrow et M.Kurz (1970, Proposition 8, p 49) les conditions données par le principe de maximum sont à la fois nécessaires et suffisantes. Alors, le sens inverse de la Proposition 5.4 est vrai. Ce qui donne le résultat suivant:

Proposition 5.5: *Supposons que $x_0 > 0$ et $y_0 \geq \bar{y}$. Soit (k, γ, β_t) la solution du système d'équations différentielles (29), (30) et (31) ainsi que des conditions des limites (32), (33) et (34). Si l'inéquation (37) est vérifiée pour tout $t \geq 0$, alors le pétrole ne doit pas être exploité durant toute la trajectoire optimale.*

Dans l'inéquation (37), $D_1 f(g(k^-), y_0)$ mesure le gain tiré de l'utilisation d'une unité supplémentaire d'énergie. L'expression $\frac{1}{\delta} D_2 f(g(k^-), y_0)$ représente la perte escomptée à long terme causée par l'augmentation de l'accumulation du CO₂ d'une unité (Rappelons que cette augmentation ne peut provenir que de l'exploitation du pétrole). Ainsi, la Proposition 5.4 indique que si le gain marginal tiré de l'exploitation de l'énergie

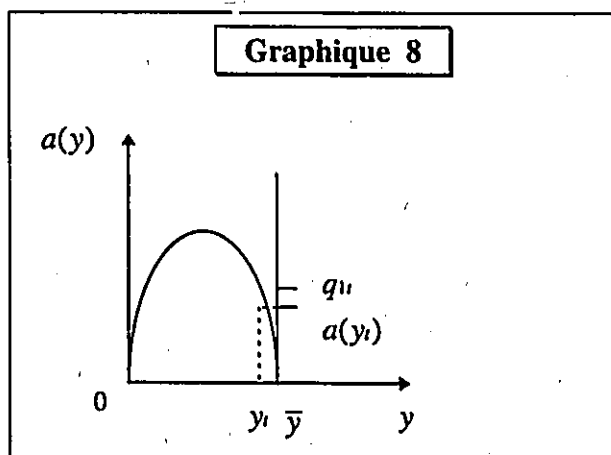
est au plus égal à la perte causée par l'augmentation de la concentration du CO_2 d'une unité, alors le pétrole ne doit pas être utilisé.

3.2.2 *Le stock initial de pétrole est strictement positif, le stock initial de CO_2 est inférieur au seuil d'irréversibilité et la somme de ces deux stocks est supérieure au seuil d'irréversibilité*

Si $y_0 < \bar{y}$ et $x_0 + y_0 \geq \bar{y}$, alors il peut se produire qu'il soit optimal de ramener le stock de CO_2 à l'état irréversible. Dans la proposition suivante on discute cette possibilité.

Proposition 5.6: *Supposons que $x_0 > 0$ et $y_0 < \bar{y}$ mais y_0 est suffisamment proche de \bar{y} . Si le stock initial de capital est assez faible, alors il est optimal de ramener le stock de CO_2 à l'état irréversible.*

En effet, supposons que $k_0 = 0$. Dans ce cas, le pétrole doit être exploité pour permettre un niveau positif de consommation. Ainsi $q_{1t} > \varepsilon > 0$ pour t au voisinage de zéro. De plus, si y_0 est suffisamment proche de \bar{y} , le taux de dégradation de CO_2 est presque nul. Par conséquent, $q_{1t} > \varepsilon > a(y_t)$ au voisinage de $t = 0$ (voir graphique 8). Ceci implique que le seuil d'irréversibilité sera atteint en un temps fini. Par continuité, quand k_0 est suffisamment faible, le stock de CO_2 sera ramené à l'état irréversible.



A cause de la rareté du capital dans les pays en développement, ces derniers seront obligés de continuer son exploitation; et ce, quel que soit le niveau de l'accumulation de CO_2 . A partir de la Proposition 5.6, dans le cas où l'accumulation de CO_2 est assez proche du seuil d'irréversibilité, les pays pauvres continueraient à polluer afin de subvenir à leurs besoins de base, ce qui mènerait le stock de ce gaz à l'état irréversible. Par contre, les pays développés sont en mesure de se procurer une énergie non polluante en cas d'urgence environnementale (dans le cas où l'accumulation du CO_2 s'approche du seuil d'irréversibilité). En fait, on pourrait s'attendre à ce qu'il y ait un transfert technologique vers les pays en développement (une fois que l'insertion de la nouvelle énergie dans le processus de production soit devenu une obligation). On pourrait s'attendre également à ce que les pays riches aident les pays pauvres afin qu'ils ne soient plus obligés de porter atteinte à l'environnement, les menaces de la pollution étant globales et générales.

En général, il n'est pas facile de déterminer s'il est optimal de dépasser le seuil d'irréversibilité. La réponse dépend de la fonction de dégradation naturelle du gaz carbonique $a(y)$. Si $a(y)$ est assez faible au voisinage de \bar{y} , il est plus probable que le stock de CO_2 devienne irréversible. D'autre part, si $a(y)$ est assez élevée pour toutes les valeurs appartenant à l'intervalle $[0, \bar{y}]$, la concentration de CO_2 peut rester réversible durant toute la trajectoire optimale.

L'analyse dynamique du problème de l'irréversibilité est extrêmement compliquée. Dans ce qui suit on présente un essai sur cette question. Rappelons d'abord les conditions qui caractérisent la solution optimale.

$$c_t = \phi(\gamma_t) \quad (43)$$

$$-\lambda e^{\delta t} + \beta_t + \gamma_t D_1 f(q_{1t} + g(k_t), y_t) \leq 0, \text{ avec égalité si } q_{1t} > 0 \quad (44)$$

$$\dot{\beta}_t = \delta \beta_t - \gamma_t D_2 f(q_{1t} + g(k_t), y_t) \quad (45)$$

$$\frac{\dot{\gamma}_t}{\gamma_t} = \delta - g'(k_t) D_1 f(q_{1t} + g(k_t), y_t) \quad (46)$$

$$\dot{x}_t = -q_{1t} \quad x_0 \text{ donnée} \quad (47)$$

$$\dot{y}_t = q_{2t} - a(y_t) \quad y_0 \text{ donnée} \quad (48)$$

$$\dot{k}_t = f(q_{1t} + g(k_t), y_t) - c_t \quad k_0 \text{ donnée} \quad (49)$$

A partir de la condition de premier ordre (44), on peut trouver q_{1t} en fonction de $\alpha_t = \lambda e^{\delta t}$, β_t , γ_t , k_t et y_t . On peut donc avoir une certaine fonction φ telle que:

$$q_{1t} = \varphi(\alpha_t, \beta_t, \gamma_t, k_t, y_t). \quad (50)$$

En substituant (43) dans (49) et (50) dans (45), (46), (47), (48) et (49), on peut réécrire les équations différentielles (45), (46), (47), (48) et (49) sous forme d'un système autonome dans la mesure où le temps n'intervient pas explicitement dans les équations transformées. La dynamique de ce système dépend uniquement des valeurs courantes de β_t , γ_t , x_t , y_t et k_t .

Notons que l'on dispose des conditions de limites suivantes pour les équations différentielles citées ci-dessus:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_t = 0, \quad x_0, y_0 \text{ et } k_0 \text{ sont données} \quad (51)$$

Si le seuil d'irréversibilité n'est jamais atteint, alors la limite de y_t quand t tend vers l'infini est zéro. Dans ce cas, le système converge vers l'état stationnaire $(\hat{k}_\infty, \hat{\gamma}_\infty, \hat{\beta}_\infty)$. Plus précisément:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} k_t = \hat{k}_\infty, \quad (52)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \gamma_t = \hat{\gamma}_\infty \quad (53)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \beta_t = \hat{\beta}_\infty = \frac{1}{\delta} \hat{\gamma}_\infty D_2 f(g(\hat{k}_\infty), 0) \quad (54)$$

Avec k_∞ et γ_∞ satisfaisant respectivement les conditions suivantes:

$$\delta - g'(\hat{k}_\infty) D_1 f(g(\hat{k}_\infty), 0) = 0 \quad (55)$$

$$\hat{\gamma}_\infty = U'(f(g(\hat{k}_\infty), 0)) \quad (56)$$

D'autre part, si la concentration de CO₂ devient irréversible, alors la limite de y_t quand t tend vers l'infini est y_∞ avec $y_\infty \geq \bar{y}$. Dans ce cas, le système tend vers l'état stationnaire défini par les conditions suivantes:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} k_t = \tilde{k}_\infty \quad (57)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \gamma_t = \tilde{\gamma}_\infty \quad (58)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \beta_t = \tilde{\beta}_\infty = \frac{1}{\delta} \tilde{\gamma}_\infty D_2 f(g(\tilde{k}_\infty), y_\infty), \quad (59)$$

Avec k_∞ et γ_∞ satisfaisant les conditions suivantes:

$$\delta - g'(\tilde{k}_\infty) D_1 f(g(\tilde{k}_\infty), y_\infty) = 0 \quad (60)$$

$$\tilde{\gamma}_\infty = U'(f(g(\tilde{k}_\infty), y_\infty)). \quad (61)$$

Il est clair que la solution des expressions (45), (46), (47), (48) et (49) qui satisfait les conditions évidentes données par (51), ne peut satisfaire en même temps le système (52), (53) et (54) et le système (57), (58) et (59).

Par conséquent, si le système d'équations différentielles n'admet pas de solutions sous les conditions de limite (52), (53) et (54), alors la trajectoire optimale doit entrer dans la zone irréversible.

Résumons les résultats qu'on vient d'obtenir dans la Proposition 5.7 suivante:

Proposition 5.7: *Si le système d'équations différentielles (45), (46), (47) et (48) n'a pas de solutions qui vérifient les conditions de limite (51), (52), (53) et (54), alors il est optimal de ramener le système à l'état irréversible. Dans le cas contraire, la solution optimale exige que le stock de CO_2 soit réversible à long terme.*

§ 4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié la croissance optimale en présence de l'effet de l'accumulation du CO_2 sur la production agrégée. L'étude a été menée en distinguant différents cas selon les valeurs initiales du stock de pétrole, du stock de capital et du niveau de l'accumulation du CO_2 dans l'atmosphère au début de la période d'optimisation.

Dans l'analyse de la croissance optimale, on a pu conclure qu'à long terme à la fois la consommation et le capital convergent vers l'état stationnaire. Si le niveau du capital backstop au début de la période d'optimisation est inférieur à son niveau d'équilibre de long terme, la convergence vers l'état stationnaire se fait généralement par une

consommation et un capital généralement croissants. Dans le cas contraire, à la fois le capital et la consommation diminuent pour converger vers l'état stationnaire à long terme.

On note de même que la trajectoire convergente vers l'état stationnaire dépend instantanément de l'accumulation du CO₂ dans l'atmosphère. En particulier, le plus le stock initial de CO₂ est élevé, le moins le stock de capital et le niveau de consommation à l'état stationnaires sont élevés.

Le monde contemporain assiste à une augmentation continue de l'accumulation de CO₂ dans l'atmosphère. Il y a lieu donc d'agir rapidement et de prendre en compte l'effet du gaz sur l'activité économique.

Il est à remarquer aussi que le comportement de l'input de pétrole à court terme est assez complexe. En effet, il dépend essentiellement du stock du capital et de l'accumulation du CO₂ dans l'atmosphère. En particulier, si le stock initial du capital est assez faible, le pétrole est exploité immédiatement au début de la période d'optimisation. Dans le cas contraire celui-ci ne sera pas exploité, du moins au début. De même, si l'évaluation à long terme du bénéfice marginal tiré de l'exploitation de l'énergie indique que ce dernier excède le dommage marginal escompté de l'accumulation du CO₂, alors le pétrole doit être exploité au moins pour un certain temps durant la période d'optimisation.

La question de l'irréversibilité dépend essentiellement du capital backstop. En particulier, si l'économie est située au voisinage gauche du seuil d'irréversibilité et que le capital backstop est suffisamment faible, elle doit alors recourir à l'exploitation du pétrole pour subvenir au minimum à ses besoins essentiels. Dans ce cas, l'état irréversible sera atteint.

Chapitre VI

CONCLUSION GENERALE

Cette recherche est une contribution modeste à la problématique économique et environnementale. Les menaces globales sur l'environnement ont été le point d'ancre de cette étude. Ensuite, et dans un effort d'analyse et de compréhension des phénomènes ainsi exposés, des modèles ont été proposés ainsi que des essais de résolution afin de mettre en évidence les différentes interactions qui mettent en jeu l'énergie, en l'occurrence les fossiles fuels, et la pollution de l'air.

Il est ressorti de la première analyse menée que la cause principale de l'aggravation du problème de la pollution de l'air est l'exploitation des combustibles fossiles. Dans une perspective de développement durable, il devient, pour ainsi dire, vital d'oeuvrer afin de mettre en place une solution radicale de la problématique de la pollution. La solution qui reçoit de plus en plus d'appréciations parmi les chercheurs et les politiciens consiste à trouver les moyens de baser l'économie sur une nouvelle énergie non polluante et renouvelable.

Dans la suite de l'analyse on s'est servi de ces idées pour passer à la modélisation de la problématique de l'énergie et de la pollution.

On a ainsi réservé le quatrième chapitre à l'étude de la question de l'innovation, de l'irréversibilité et de l'exploitation optimale de l'énergie. Dans un cinquième chapitre on a jugé bon de reprendre les mêmes questions discutées dans le quatrième chapitre mais cette fois-ci, dans une perspective de croissance économique .

Les principaux résultats théoriques auxquels on a abouti au quatrième chapitre peuvent être résumés comme suit:

- ◆ Le plus le coût fixe nécessaire pour la mise en place de l'énergie backstop est élevé, le plus la date de l'innovation est retardée.
- ◆ Si le stock initial de pétrole est suffisamment faible, l'innovation doit se produire au début de la période d'optimisation.
- ◆ Durant toute la trajectoire optimale, lors de l'évaluation de l'utilité marginale du pétrole en bien de consommation, il faut prendre en compte l'effet de l'accumulation du CO_2 sur la production.
- ◆ Dans tous les cas étudiés, si le stock de CO_2 ne dépasse pas le seuil d'irréversibilité, alors à long terme il tend vers zéro. Dans ce cas, on peut s'assurer que le stock de pétrole sera épuisé en un temps fini.
- ◆ Sous certaines conditions, même si le stock de CO_2 passe à l'état irréversible, le stock de pétrole est épuisé en un temps fini.
- ◆ Juste avant d'arrêter définitivement l'exploitation du pétrole, l'énergie backstop se substitue généralement de façon graduelle à l'ancienne source d'énergie. De plus, si le seuil d'irréversibilité n'est pas dépassé, alors le niveau d'équilibre de l'input énergétique est celui utilisé au moment de l'épuisement du pétrole. Dans le cas contraire, l'input d'énergie augmenterait pour un certain temps puis il se stabiliserait à son niveau d'équilibre de long terme lorsque l'effet de l'accumulation du CO_2 sur la production serait nul.

◆ Le fait de ramener le stock de CO₂ à l'état irréversible, dépend essentiellement des taux d'intérêts, du dommage marginal de l'accumulation du CO₂ à l'état irréversible, du bénéfice marginal de l'exploitation du pétrole et du coût de production de l'énergie backstop. En effet:

- Un taux d'intérêt suffisamment faible permet de ne pas dépasser le seuil d'irréversibilité.
- Si le gain tirée de l'exploitation d'une unité supplémentaire de pétrole est inférieur à l'effet de l'accumulation du CO₂ à l'état irréversible, alors il n'est pas optimal de dépasser le seuil d'irréversibilité.
- Si le coût marginal de production de l'énergie backstop est excessivement élevé, alors il serait probable qu'il soit optimal de dépasser le seuil d'irréversibilité.

Quelques résultats ont été confirmés par l'étude menée dans le cinquième chapitre. On se contentera de ne reprendre que les résultats qui constituent en eux-mêmes une originalité par rapport à ceux du quatrième chapitre. En effet:

- ◆ A long terme, le capital et la consommation convergent vers l'état stationnaire. De plus, si le niveau initial du capital est inférieur à son équilibre de long terme, à la fois la consommation et le capital augmenteraient tout en convergeant vers l'état stationnaire. Dans le cas contraire, ils décroissent pour atteindre leurs valeurs d'équilibre de long terme.
- ◆ Le plus le stock initial de CO₂ est élevé, le plus le niveau de la consommation et du capital à l'équilibre de long terme sont bas.

♦ Si le niveau initial de capital est suffisamment faible et le stock de CO₂ se situe au voisinage du seuil d'irréversibilité, alors il pourrait être optimal de ramener le stock du gaz carbonique à l'état irréversible.

Notons que les résultats évoqués ci-dessus ne sont pas à généraliser. Chacun d'entre eux dépend de conditions bien spécifiques.

La principale difficulté rencontrée durant cette analyse réside dans le fait qu'on ne dispose pas d'une fonction explicite décrivant la dégradation naturelle de la concentration du CO₂. Cette faiblesse avait rendue l'analyse de court terme de certaines variable des modèles quasiment impossible.

La façon par laquelle l'accumulation du gaz carbonique affecte la production agrégée était assez générale. L'impact du seuil d'irréversibilité sur l'activité économique n'était pas suffisamment précis. Tous ces éléments constituent un handicap pour l'avancement de réponses encore plus claires et plus précises.

Le modèle présenté dans cette thèse ne tient pas compte de l'effet direct de l'accumulation sur la fonction d'utilité (effet sur la santé...). Tout effet sur le bien-être social passe par la fonction de production.

L'estimation de la fonction de dégradation naturelle du CO₂ et d'une fonction mesurant d'une façon explicite la manière par laquelle ce gaz affecte l'activité économique sera sans doute une tâche extrêmement difficile. De même, intégrer d'autres variables dans la fonction d'utilité devrait rendre l'étude plus compliquée. Cependant, appliquer ces recommandations devrait donner des résultats encore plus précis.

BIBLIOGRAPHIE

- L. R. Browan, H. B. Brough, A.T. Durning, H. F. French, C. Flavin, J. L. Jacobson, L. Lenssen, M. D. Lowe, S. Postel, M. Renner, J. C. Ryan, L. Starke, J. E. Young (1992), "L'état de la Planète, Ed Economica, Paris.
- M. Brower (1990), "Cool Energy: The Renewable Solution to Global Warming", A report by the Union of Concerned Scientists, New York.
- J. Darmastadter, H. H. Landsberg, H. C. Morton, M. J. Coda (1983), "Energy Today and Tomorrow Living with Uncertainty", Prentice Hall, Inc New Jersey.
- Dasgupta, Partha (1982), "The Control of Resources", Cambridge, Mass: Harvard University Press.
- S. Deraieme (1993), "Economie et Environnement", Editions Le Monde, Bruxelles.
- A. K. Dixit (1990), "Optimisation in Economic Theory", Second Edition, Oxford University Press.
- S.Facheux & J. F. Noël (1990), "Les Menaces Globales Sur L'environnement", Edition La Découverte, Paris.
- E. Gronier (1994), "L'écologie Humaine", Press Universitaire de France.
- Gus. Hall (1972), "Ecology: Can We Survive Under Capitalism?", International Publishers, New York.
- N.M. Hung & N.V. Quyen (1994), "Dynamic Timing Decision Under Uncertainty Essays on Invention, Innovation and Exploration in Resource Economics", Edition Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona and Budapest.
- M. Munasinghe (1993), "Environmental Economics and Sustainable development", World Bank Paper Number 3, Washington, D.C.
- P. Paraire(1992), "L'Utopie Verte, Ecologie des Riches Ecologie des Pauvres", Hachette, France.

- R. Pethig, (1992), "Conflict and Cooperation in Managing Environmental Resources", Edited by W. Guth, J.Mc. Millan and H.-W. Sinn, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona and Budapest, pp132-191.
- J. B. Ramsey (1981), "The Economics Of Exploitation for Energy Resources", J.A.I Press Inc, London England.
- M. Redclift (1984), "Development and the Environmental Crisis Red or Green Alternatives", Methuen London and New York.
- C. Ronneau (1990), "Energie Pollution Environnement: Les éléments du débat ", Société De Science Ethique De Boeck-Wesmael, s.a, Bruxelles.
- S.W. Sawyer (1986), "Renewable Energy, Prospects ", Resources Publication in Geography, Washington.
- H. Siebert (1987), "Economics of the Environment: Theory and Policy", 2^{ème} Ed Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo.
- A. Takayama, " Mathematical economics" 2nd edition, Cambridge university press, London, New York, New Rochsette, Malbourne, Sydney,(1985).
- J. Vernier (1992), "L'environnement", 1^{er} édition, Presse Universitaire De La France,.
- "An Agenda of Science for Environment and Development into the 21st century", Cambridge University Press (1991).
- "Confronting Climate Change", National Research Council, Committee on Alternative Energy Research and Development Strategies, National Academy Press, Washington, D.C. (1990).
- "Energy and climate change", Report of the D.O.E Multi-Laboratory Climate Change Comity (DOE department of energy), Edition Lewis Publishers, Michiningan, (1990).
- "Energy Alternatives", Report by the Special Comities on Alternative Energy and Oil Substitution, House of common, Canada, (1980-1981).
- "Energy Resources and the Environment", Proceeding of the first US-China Conference, S. W Yan, Pergomen press, (1982).
- "L'énergie Solaire au Service du Développement", Technique et Documentation pour Commission des Communautés Européenne, Italie, (1979).

- "Environmental Data Report", (1989-1991).
- "Pollution Charges in Practice", The Organization for Economic Co-operation and Development, Paris, (1980).
- "Towards a fossil free energy future", A Technical Analyses For Green Peace, International Stockholm Environment Institution Boston Center ,(1993).
- "Studies in Geophysics Energy and Climate", Geophysics Study Committee, Geophysics Research Board, Assembly of Mathematical and Physical Sciences, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, D.C, (1977).