HAL
open science

L'énergie entre les opportunités de développement et les risques de la dégradation de la qualité de l'environnement : cas du gouvernorat de Sfax (Tunisie)

Rania Ben Hamida

▶ To cite this version:

Rania Ben Hamida. L'énergie entre les opportunités de développement et les risques de la dégradation de la qualité de l'environnement : cas du gouvernorat de Sfax (Tunisie). Economies et finances. Université d'Auvergne - Clermont-Ferrand I; Université de Sfax (Tunisie), 2014. Français. NNT : 2014CLF10455 . tel-01168588

HAL Id: tel-01168588
https://theses.hal.science/tel-01168588

Submitted on 26 Jun 2015

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

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

Université d'Auvergne, Clermont-Ferrand 1
École d'Économie de Clermont-Ferrand

École Doctorale des Sciences Économiques, Juridiques et de Gestion Centre d'Études et de Recherches sur le Développement International (CERDI)

L'énergie entre les opportunités de développement et les risques de dégradation de la qualité de l'environnement : cas du gouvernorat de Sfax (Tunisie)

Thèse Nouveau Régime

Présentée et soutenue publiquement le 05 Novembre 2014

Pour l'obtention du titre de **Docteur en Sciences Économiques**

Par

Rania BEN HAMIDA

sous la direction de

Monsieur le Professeur Jean-Louis Arcand

Monsieur le Professeur Sami Hammami

Composition du jury

Pascale Combes Motel	Présidente	Professeur à l'Université d'Auvergne – CERDI
Ghazi Boulila	Rapporteur	Professeur à l'ESSEC - Université de Tunis
Moez Fodha	Rapporteur	Professeur à l'université de Paris1-Panthéon Sorbonne
Jean-Louis Arcand	Directeur	Professeur à l'IHEID - Graduate Institute_Genève
Sami Hammami	Directeur	Professeur à la FSEG-université de Sfax

DEDICACES

A mes parents Habib et Salwa,

Qui se sont sacrifiés pour mon bonheur et ma réussite,

A mes deux frères Wael et Wassim,

Pour leur amour et leur encouragement,

A mon mari Mohyédine,

Pour son soutien et sa patience,

A mon bébé d'amour Issa,

Pour tous les instants précieux que je lui ai volés,

A tous mes amis,

A mes oncles et mes tantes,

A mes cousins et cousines et tous les gens qui me sont chers,

A tous ceux,

Qui ont contribué de loin ou de près à l'achèvement de ce travail

REMERCIEMENTS

Elaborer une thèse de doctorat est une œuvre délicate, qui fait appel à des ressources, des personnes et des établissements bien précis, sans lesquels mon travail de recherche ne serait pas possible. Cette thèse de doctorat a été faisable grâce à l'assistance et aux recommandations de certaines personnes auxquelles je tiens à présenter tous mes remerciements et ma sincère gratitude.

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux directeurs de thèse, Mr Sami HAMMAMI et Mr Jean-Louis ARCAND qui m'ont guidée et conseillée tout au long de ces années de recherches tout en respectant mon autonomie de travail. Nos rencontres et discussions ont joué un rôle si important dans la description et la finalisation de ma thèse, ce qu'ils m'ont transmis se propage au-delà de ces pages.

Je remercie également Mme Pascales COMBES MOTEL, Mr Ghazi BOULILA et Mr Moez FODHA qui ont accepté d'être membres de mon jury de thèse et d'assister à ma soutenance.

Je remercie de même Sow Moussé Ndoye qui n'a pas hésité à m'a aider au niveau de la modélisation empirique et consacrer si de temps, je suis vraiment reconnaissante.

Je remercie aussi Mr Lasaad BEN HMID (STEG) Mr Hatem CHERIF (ANPE de Tunis), Mr Taoufik GARGOURI (ANPE de Sfax) ainsi que Mr Jamel HKIM et Mlle Najet DABBEBI (CHU Hédi Chaker) qui m'ont facilité la constitution de ma base de données, si importante pour l'avancée de mes travaux de recherches.

Je tiens également à remercier l'ensemble de l'équipe du CERDI, enseignants et personnel pour leur accueil et soutien.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Que nous vivons à la compagne ou au centre de la ville, nos moyens de subsistance et en conséquence nos vies sont fortement dépendants des biens fournis par les procédés naturels de la terre. Quelle que soit l'énergie consommée ou demandée, elle est avant tout un passage obligatoire pour satisfaire un besoin. L'énergie est un élément crucial de la prospérité économique et de l'organisation de la vie sociale de tous les pays.

Le développement économique tel que nous le connaissons depuis trois décennies se nourrit essentiellement des ressources naturelles non renouvelables fossiles extraites de la croute terrestre (le pétrole, le charbon, le gaz naturel) et dans une moindre mesure de combustibles fissiles comme l'uranium. Selon Chevalier J.M (2004), les ressources énergétiques traditionnelles comme la biomasse, l'éolien et l'hydraulique ont été marginalisées du mix énergétique des pays industrialisés. Les énergies fossiles étaient pour une bonne période abondantes et bon marché, parmi elles, le pétrole grâce à ses qualités exceptionnelles fut la principale source industrielle et militaire et parfois un objet inspirateur de confrontations et de guerres. Ayant une haute intensité énergétique, liquide, facilement transportable et stockable, l'or noir a facilement remplacé le charbon et il est devenu le moteur de la croissance que l'humanité a connu de façon inégale surtout au milieu du 20ème siècle. Le pétrole est la première source de carburants pour le transport terrestre et maritime, et même l'unique source pour l'aviation. Sa présence a envahi même les chaines de production de la nourriture ou encore les produits sanitaires et cosmétiques. La consommation de pétrole et de l'énergie n'est pas allouée de façon égale entre les pays, comme il existe une disparité dans la répartition des ressources naturelles, la demande énergétique à son tour n'est pas attribuée de manière équitable entre un citoyen appartenant aux pays du Nord et un autre résident dans un pays du Sud. Selon the World Energy Outlook (WEO) 2012, près de 1,3 milliard de personnes n'ont pas toujours accès à l'électricité et 2,6 milliards sont privées de combustibles et technologies de cuisson modernes. Cette disparité renvoie à un grand paradoxe, ce sont les pays importateurs de pétrole et les moins dotés de ressources naturelles qui consomment le plus et en conséquence polluent le plus. Cette hétérogénéité passe en partie à l'abri de l'innovation technologique et de la recherche qui ont permis à certains pays de gagner les premiers rangs dans le développement économique malgré leurs ressources limitées en énergie. Cette même inégalité peut également expliciter les fortes tensions entre les pays et l'alliance déguisée de certains pays du Nord avec certains pays du Moyen-Orient afin de garantir une certaine sécurité énergétique et en conséquence leur prospérité économique.

Toutefois, le modèle de développement énergivore qui, pour longtemps a facilité l'expansion économique et technologique, se trouve aujourd'hui confronté à trois contraintes majeures : l'épuisement des ressources naturelles, le changement climatique et la manifestation de cette dégradation de la qualité de l'environnement sur la santé et le bien-être des individus. Le rapport de la planète vivante 2012 dans sa synthèse a insisté sur le fait que la consommation de ressources, en perpétuelle augmentation, exerce des pressions extrêmes sur la biodiversité. Les menaces issues de la continuité des services écosystémiques risquent de nuire non seulement à la biodiversité, mais aussi à l'avenir, à la santé et au bien être de notre propre espèce.

Tout comme des dépenses non réfléchies sont à l'origine de la récession, la consommation excessive de l'énergie épuise le capital naturel du globe terrestre au point de mettre en danger notre prospérité future. Selon le rapport de la planète vivante 2012, « entre 1970 et 2008, la biodiversité a chuté de 30% à l'échelle du globe et de 60% sous les tropiques. La demande des ressources naturelles a doublé depuis 1966 au point que nous consommons aujourd'hui l'équivalent d'une planète et demie pour accomplir nos activités».

Nous ne pouvons plus négliger la question écologique et environnementale et s'intéresser uniquement au rôle joué par l'énergie dans les mécanismes de développement et de la croissance des pays. Le nouveau défi auquel l'humanité est confrontée n'est plus la hausse des prix énergétiques ou la rareté des ressources mais plutôt la crise climatique. Les problèmes environnementaux très présents ces dernières années ne sont pas nouveaux, ils étaient déjà soulevés au début des années 70 par le Club de Rome dans le rapport Meadows (1972) « halte à la croissance ». Ce rapport a tiré la sonnette d'alarme face aux périls des mécanismes de croissance intensivement énergivores. Il a affirmé que la croissance d'une économie au taux de 5% ne pouvait que rencontrer rapidement des risques de pénuries des énergies fossiles. Si le monde échappait à cette pénurie, disait le rapport, ce serait quelques décennies plus tard pour mieux mourir asphyxié par les diverses pollutions liées à une industrialisation et à une urbanisation aussi massives et générales que particulièrement négligentes des conséquences néfastes de leurs effluents et autres rejets (Chanel. A, 1993).

Van Duysen. J.C et Jumel. S (2008) ont souligné également que les politiques de croissance économique n'ont pas éliminé les inégalités, au contraire ils ont abouti à la dégradation remarquable de la planète à travers la surexploitation des ressources naturelles. Avant, nous considérons seulement les grandes villes et régions industrielles comme polluées mais plus

tard, il s'est avéré que la dégradation de la qualité de l'environnement est un phénomène général et aucune région n'est à l'abri. Chevalier J.M (2009) a affirmé que les tendances historiques de la consommation mondiale de l'énergie montrent que les cent cinquante dernières années ont institué une période exceptionnelle mais non soutenable : exceptionnelle en termes d'amélioration du confort et du niveau de vie de la population et non soutenable du point de vue de la dégradation de la qualité de l'environnement et du réchauffement climatique qui a dominé la planète. Depuis la civilisation humaine jusqu'au milieu du 19 ème siècle, l'être humain a utilisé les énergies renouvelables tels que le bois, le vent, l'eau, l'énergie animale et humaine. Pendant des siècles, ces énergies ont procuré une croissance économique jugée lente mais durable. En revanche, entre le milieu du 19ème siècle et aujourd'hui, la population mondiale a été multipliée par six et le PIB par soixante, plus de 80% de l'énergie consommée provient des énergies fossiles à forte pollution et non renouvelables qui étaient considérées pour longtemps comme abondantes et bon marché. Et c'est progressivement que nous avons pris conscience que nos modes de vie perturbent l'équilibre de la planète et engendrent des dommages assez graves. Aujourd'hui le phénomène de la pollution et du changement climatique est devenu une certitude reconnue par l'unanimité (Sommet de Rio de la conférence des Nations-Unis pour le commerce et le développement (CNUCED) en juin 1992, Protocole de Kyoto en décembre 1997, rapports du groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)).

La controverse à laquelle nous devons faire face aujourd'hui est que d'une part, des millions de personnes ont besoin d'augmenter leur consommation d'énergie pour alimenter et rattraper leur développement économique et d'autre part, il faut réduire les émissions des gaz à effet de serre (GES) pour que la planète soit propre et capable de supporter les générations futures. Cette problématique devient être encore plus complexe si nous prenons en compte la démographie qui est en forte croissance.

Les sociétés humaines ont, au cours des siècles, affecté l'écosystème local et modifié le climat régional. Les changements qui en découlent nous incitent à constater que la santé des populations dépend à long terme du fonctionnement stable et continu des systèmes écologique, physique et socioéconomique de la biosphère.

Le système climatique mondial fait partie intégrante de l'ensemble des processus nécessaires au maintien de la vie. Le climat a toujours eu un impact important sur la santé et le bien-être des humains mais malheureusement, il est en train de subir le contrecoup des activités

humaines. Au cours du 20ème siècle, la température moyenne globale à la surface s'est accrue d'environ 0,6°C, dont environ deux tiers de cette hausse reviennent aux années 70. Les climatologues prévoient à leur tour que le réchauffement, accompagné d'une modification des précipitations et de la variabilité du climat, va se poursuivre pendant ce siècle et au-delà.

Le changement climatique institue une nouvelle menace pour la santé publique et affecte la façon dont nous devons acquérir pour protéger les populations vulnérables. Selon le rapport de l'Organisation mondiale de la Santé (octobre, 2013), le réchauffement climatique intervenu depuis les années 1970 était à l'origine de plus de 140 000 décès supplémentaires par an. Plusieurs maladies importantes sont fortement sensibles au changement des températures et au régime des précipitations. Ce sont surtout les maladies à transmission vectorielle courantes comme le paludisme et la dengue ainsi que d'autres grandes tueuses comme la malnutrition et les maladies diarrhéiques.

L'histoire de l'énergie est complexe et mitigée et touche en même temps plusieurs piliers de l'économie, de l'environnement et de la santé publique. Ce constat nous a conduits à nous intéresser à chaque stade de l'histoire qui décrit la relation entre l'énergie et le développement de l'humanité. C'est-à-dire depuis qu'elle était utilisée dans la révolution industrielle comme un moyen et un stimulant de la croissance jusqu'au jour où son usage excessif est devenue une menace pour la pérennité du capital naturel et la santé de l'être humain.

Nous nous demandons en particulier jusqu'à quel point l'énergie est considérée comme un outil important dans les mécanismes de développement du pays et jusqu'à quelle mesure les retombées de son usage nuisent à la qualité de l'environnement ainsi qu'à la santé et l'état d'hygiène des individus

Adaptée à notre contexte d'étude, la réponse à cette problématique soulève trois points essentiels.

- Quelle est la nature de la relation établie entre la consommation de l'énergie et le développement économique,

-Quel est l'impact de la consommation de l'énergie sur la qualité de l'environnement, qui est en dégradation continue depuis les années 70.

- Est-ce que la pollution atmosphérique choisie comme un cas particulier le plus évident de la dégradation de la qualité de l'environnement impacte la santé et le bien être des individus exposés à ce phénomène.

Pour répondre à notre problématique, nous avons fait recours à des modèles théoriques et empiriques intéressants qui touchent différentes disciplines, notamment l'économie de l'énergie, l'économie de l'environnement et l'économie publique particulièrement le mouvement de la santé environnementale.

Les apports de notre recherche se situent à plusieurs niveaux.

En premier lieu, nous essayons d'analyser suite à une étude multidisciplinaire qui fait appel à plusieurs disciplines en même temps, le rôle que l'énergie s'est procurée pour assurer le développement économique des pays et évoquer par la même occasion sa responsabilité dans la détérioration de la qualité de l'environnement et la manifestation de certains troubles sanitaires, une telle étude est jugée être rare surtout lorsqu'elle s'applique à un contexte régional comme le nôtre.

En deuxième lieu, nous constituons nous-même la base de données sollicitée à chaque niveau d'analyse et qui fait appel à des données annuelles, mensuelles et journalières relevant du domaine de l'énergie, de l'industrie, de l'environnement et de la santé. Cette étape de la recherche a nécessité le recours à plusieurs organismes et le passage par des procédures administratives et bureaucratiques bien précises.

Sur le plan pratique, notre recherche offre un essai approfondie qui aide à la prise de décision et permet d'avoir une vision projetée et nuancée qui met en relief les opportunités ainsi que les contretemps de l'usage de l'énergie en évoquant par la même occasion l'ampleur des risques sanitaires résultants de la pollution atmosphérique et la nécessité ou non d'instaurer un système de veille sanitaire faisant appel à des spécialistes de domaines différents.

Ce document s'organise autour de trois chapitres, comprenant chacun deux parties. La première partie est consacrée à éditer le fondement théorique relatif à chaque axe de recherche, tandis que la deuxième partie expose l'analyse empirique des hypothèses de recherche.

Le premier chapitre étudie l'importance de l'énergie dans le développement des nations en passant par les faits de l'histoire, de la géopolitique, de la politique et de l'économie qui l'ont

contournée au fil du temps. Dans un second chapitre, nous avons insisté sur l'autre face de l'énergie, à savoir ses répercussions ou plutôt sa responsabilité dans le changement climatique et la dégradation de la qualité de l'environnement à une échelle mondiale et nationale. En dernier lieu, au niveau du troisième chapitre, nous avons clôturé par l'analyse de l'impact sanitaire de la dégradation de la qualité de l'environnement et ses retombées sur l'hygiène des individus.

Le gouvernorat de Sfax a été sollicité à chaque fois comme un champ d'analyse empirique. Son choix n'était pas au hasard, mais plutôt une élection bien ciblée. La ville de Sfax est une belle expression du développement économique tunisien étant donné qu'elle est le deuxième pôle industriel après la capitale Tunis, un producteur principal de pétrole et de gaz et du même coup, une ville fortement polluée. Par son choix, nous avons pu relever au niveau du premier chapitre le rôle de l'énergie dans l'essor économique de la région en ayant recours à la consommation de l'électricité moyenne tension destinée au secteur industriel (CE) comme un indicateur de la consommation de l'énergie et la somme des valeurs ajoutées destinée au même secteur industriel manufacturier comme un indicateur de développement régional (VA). Pour ce faire, les données de la (CE) ont été collectées à partir de la Société Tunisienne d'Electricité et de Gaz (STEG), précisément le district de Sfax ville et pour les (VA), nous avons sollicité l'Institut Nationale de la Statistique (INS) de Sfax ainsi que l'Agence de Promotion de l'Industrie (API) de Sfax. Pour le second chapitre, l'objectif de notre travail empirique est d'analyser l'impact de la consommation de l'énergie sur la destruction de la qualité de l'environnement, pour mener à terme cette analyse, nous avons réussi à réunir quatre polluants atmosphériques à savoir, le dioxyde d'azote (NO_2), le dioxyde de soufre (SO_2), l'ozone (O_3) et les particules en suspension dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres (PM_{10}). Chacun de ces polluants a été analysé séparément avec la (CE) afin de soulever les différentes interactions. Nous avons fait appel également aux facteurs météorologiques, qui influencent significativement la dispersion dans l'air des polluants ou bien leur concentration autour de leurs sources d'émission. Les polluants atmosphériques ont été collectés à partir de l'Agence Nationale de Protection de l'Environnement (ANPE) de Tunis ainsi que celle de Sfax, tandis-que les données de la météorologie ont été collectées auprès de l'Institut Nationale de la Météorologie (INM) subdivision de Sfax.

Pour finir, l'étude empirique menée au troisième chapitre a été consacrée à l'analyse de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique dans la région de Sfax. Pour l'évaluer, nous avons utilisé comme proxy, les admissions hospitalières pour motif cardiovasculaire et pour

motif respiratoire. Ces indicateurs sanitaires ont été compilés avec les indices de la pollution de l'air ainsi que de la météorologie développés au second chapitre.

La méthodologie empirique sollicitée au niveau des trois chapitres est l'étude des effets de long terme et de court terme entre les différents indicateurs cités ci-dessus selon l'objectif visé à chaque niveau, en passant en premier temps par la procédure de cointégration (autoregressive distributed lag approach) ARDL et le test de valeurs limites, et dans un second temps par le test de causalité de Granger (1969).

Dans la conclusion, nous exposons nos résultats de recherche et nous présenterons les limites de ce travail ainsi que les perspectives de recherches.

CHAPITRE 1 : IMPACT DE LA CONSOMMATION DE L'ENERGIE SUR LE DEVELOPPEMENT ECONOMIQUE : VALIDATION EMPIRIQUE POUR LE CAS DU GOUVERNORAT DE SFAX

Ce chapitre a fait l'objet d'une publication dont les détails sont ci-dessous :

Ben Hamida.R. (2013). Electricity consumption and industrial gross domestic product nexus in Sfax: an ARDL bounds testing approach. The journal of energy and development, vol 38, Nos 1and 2, pp.241-255.

Chapitre 1

Impact de la consommation de l'énergie sur le développement économique : validation empirique pour le cas du gouvernorat de Sfax

« On dit que l'argent n'a pas d'odeur : le pétrole est là pour le démentir. »

Pierre Mac Orlan

Introduction

L'existence de l'être humain a été accompagnée d'une expression continue pour un besoin énergétique en relation ultime avec sa vie quotidienne. En partant du rôle fondamental de l'énergie, nous remarquons que l'évolution des besoins de l'être humain, eux-mêmes subordonnés aux changements démographiques, économiques et sociaux, est le motif essentiel qui explique la dominance ou la marginalisation d'une énergie à un moment bien déterminé de l'histoire.

L'énergie s'est transformée d'un bien de consommation dont l'objectif principal est la satisfaction des besoins de l'homme à travers le temps à un bien stratégique, très vulnérable soumis à des enjeux économiques, politiques, financiers et technologiques et dans la plupart des cas un objet inspirateur de guerres et de fortes tensions. La question de l'énergie est tellement complexe qu'il fallait procéder à une étude géopolitique. Furfari. S (2007) a indiqué à ce propos que : « la géopolitique peut être définie comme étant une méthodologie d'analyse pluridisciplinaire, qui étudie les relations entre des territoires tout en tenant compte des rapports de force des pouvoirs que ceux-ci occasionnent. Il n'y'a pas de hasard en géopolitique, les choix et les actions qui se déroulent sous nos yeux en matière de politique internationale sont tous bien calculés, c'est un domaine qui laisse peu de place à l'improvisation et au laisser aller puisque les conséquences sont immédiates et lourdes ». Cette démarche prend en considération plusieurs aspects et facteurs qui expliquent le fonctionnement complexe et fascinant du secteur de l'énergie.

Au niveau de ce chapitre, nous étudions le rôle joué par l'énergie dans le développement économique des pays, pour y faire nous passons dans un premier temps par les facteurs essentiels qui ont contourné l'industrie de l'énergie. Dans un deuxième temps, nous nous concentrons sur le traitement théorique graduel de la relation énergie-croissance. Dans un dernier temps, nous aboutissons par une analyse empirique de la relation de cause à effet entre l'énergie et la croissance économique adaptée au gouvernorat de Sfax.

1-Volet théorique

1.1 Les aspects historiques et factuels de la consommation d'énergie dans le monde

1.1.1 La croissance démographique

A la fin des 18 siècles, le charbon a dominé le secteur énergétique essentiellement en Grande Bretagne et a supplée les autres premières sources énergétiques telles que le bois, le vent et l'eau. Ce changement n'est pas aléatoire et il est subordonné à plusieurs transformations qui ont caractérisé l'Europe en général et d'une façon plus précise l'Angleterre. Parmi ces évolutions, la première demeure la transformation démographique.

Le 19 siècle est sans doute le siècle de la révolution démographique, la population mondiale a passé de 850 à 1600 millions d'habitants grâce à la baisse exceptionnelle du taux de mortalité tout en tenant élevé le taux de natalité en Europe qui réunit 25% de la population mondiale en 1900. La France est le premier pays qui a vécu une transition démographique mais la relation entre la croissance démographique et l'industrialisation est assez complexe et c'est le Royaume-Uni qui a adhéré le premier dans la révolution industrielle et ensuite dans la transition démographique. La croissance de la population a suscité le développement de l'industrie et l'amélioration de la productivité agricole grâce à l'expansion des prairies artificielles, l'élevage et le recours aux engrais. Cette hausse de la demande pour le bois en Angleterre a engendré des inquiétudes vis-à-vis de la pénurie de cette énergie dont le prix a augmenté, d'où le développement du charbon bon marché et abondant.

La production textile s'est développée grâce à l'invention de la machine à vapeur alimentée par le charbon pour sa mise en marche et le minerai d'acier et de fer pour sa fabrication. Ceci a déclenché à son égard la demande pour le transport, d'où la naissance des bateaux à vapeur et des locomotives. En conséquence, l'aventure mondiale de chemins de fer a commencé à se développer en Grande Bretagne vers 1820 puis elle s'est répandue aux Etats-Unis, en

Allemagne, en Belgique et en France vers 1827. C'est ainsi que le charbon est devenu la première source énergétique destinée à la consommation domestique et industrielle en Grande Bretagne à la fin du 19 siècle. Sa dominance a été accompagnée par les premières tensions sociales et politiques à cause des conditions de travail assez difficiles et dangereuses qui ont caractérisé cette industrie.

En 1952, la communauté Européenne du charbon et de l'acier (CECA) a été créée pour organiser les conditions de travail et améliorer la rentabilité de l'industrie de charbon en Europe. Toutefois au début de la deuxième moitié du 20 siècle, le charbon Européen a été concurrencé par la houille blanche considérée comme plus efficace pour satisfaire les besoins d'une population en croissance continue et fournir de l'électricité, c'est le début du drame des houillères. Ce dernier a causé la condamnation économique de plusieurs mines qui se sont trouvées obligées de fermer. Ce phénomène ne s'est pas limité aux pays de l'Europe, il s'est propagé aux pays de l'Europe de l'ouest ainsi qu'au Japon. La prédominance du charbon a persisté même après la deuxième guerre mondiale et il est considéré avec l'acier comme les supports de la reconstitution économique de l'Europe. Toutefois, depuis les cent dernières années, le charbon se trouve en compétition avec le pétrole dans le secteur de transport. En 2005, le pétrole présente 35% tandis que le charbon 22%.

1.1.2 Les facteurs historiques qui ont contourné l'énergie

Au bout d'un siècle, le contexte énergétique s'est vivement changé suite à la dispersion rapide du charbon au profit du pétrole. L'industrie pétrolière demeure l'une des industries énergétiques les plus violentes et les plus complexes que l'histoire de l'humanité a vécu depuis son apparition au milieu du 19 siècle jusqu'au nos jours. Pour comprendre son fonctionnement, il est fondamentale de passer par son histoire et essentiellement les évènements déterminants qui l'ont contournée.

1.1.2.1 La première conquête du pétrole du Moyen-Orient

Le Moyen-Orient détient la plus grande part des réserves de pétrole dans le monde et son poids est assez important dans l'industrie pétrolière ce qui attise l'avidité infinie des grandes compagnies de l'occident.

En 1901, William Knox d'Arcy, l'homme d'affaire Britannique a réussi à obtenir une concession pétrolière en Iran. En 1908, il a construit l'Anglo Persian (AP) qui est British

Petroleum (BP) d'aujourd'hui. En 1911, Winston Churchill[1] décide de convertir la composante maritime de l'armée Britannique « Royal Navy » en pétrole afin d'être plus rapide que celle fonctionnant au charbon tel est le cas des navires Allemandes. Cette décision est très importante dans l'histoire de l'énergie, elle a transformé la Grande Bretagne qui, à ce moment-là demeure la première puissance mondiale, en un pays dépendant des gisements pétroliers du Moyen-Orient. Afin d'assurer son approvisionnement, l'Etat Britannique devient l'actionnaire majoritaire dans l'(AP) et construit des oléoducs énormes vers les terminaux du Golfe. En 1903, l'ingénieur Arménien Calouste Gulbenkian, chargé d'établir un rapport sur les ressources du pétrole de l'empire ottoman, participe en Londres en tant que négociateur prévenu au rapprochement de Shell avec la compagnie Hollandaise Royal Deutsch (RD).

Afin d'arrêter l'exploitation du pétrole Perse au profit de de William d'Arcy, Gulbenkian a construit en 1911 la Turkish Petroleum Company (TPC) et il s'associe à la Royal Deutsch Shell (RDS), l'(AP) et la Deutsche Bank (DB). En rémunération, Gulbenkian bénéficie jusqu'en 1940 de 5% sur les recettes de la (TPC) et restera dans l'histoire comme « Monsieur 5% ».

1.1.2.2 La guerre 1914-1918 et la naissance de Total

Au cours de la première guerre mondiale, Churchill a fait preuve d'une sureté vis-à-vis de l'importance de pétrole surtout que les Britanniques ont la facilité de s'approvisionner auprès de l'(AP). Les Allemands quant à eux, se sont appropriés les gisements de la Roumanie et les Américains ont profité de la situation et ils ont vendu avec prudence aux deux ennemis mais ils ont préféré de se limiter aux ventes locales afin d'éviter les dangers. La France se trouve absente sur la scène pétrolière et n'a pas bien estimé l'importance de pétrole en ce moment-là. C'est le président du Conseil Georges Clemenceau conscient de la gravité de la situation, a lancé un appel pour le président Wilson pour convaincre (SO) afin de reprendre ses livraisons à la France. En 1916, l'empire Ottoman est découpé par l'accord secret Sykes-Picot entre la France et la grande Bretagne. Cet accord procure aux Britanniques la région qui s'étale de Gaza jusqu'au Nord-Ouest de l'Irak et pour l'Etat Français le Liban et la Syrie. En avril 1920, la Conférence de San Remo rend valide l'accord de Sykes-Picot et attribue à la France les 25% détenus par la (DB) dans la (TPC) au titre des dommages de la première guerre

1 C'est un homme d'affaire Britannique qui a conduit le Royaume-Uni pendant la deuxième guerre mondiale.

mondiale. En 1924, la Compagnie Française des Pétroles (CFP) qui est l'ancêtre de Total a été créée par Ernest Mercier. Le Gouvernement Français a confié la gestion des titres de la (DB) qui étaient récupérés au Moyen-Orient à la (CFP) lors de sa création, il détient 35% des actions et 40% des droits de vote et il se base dans ses relations avec Total sur les conventions de 1924 et de 1930 conclues lors de la création de la (CFP).

1.1.2.3 L'accord de la ligne rouge et la création du cartel

Les Anglais ont bien profité du renforcement de leur position après la division de l'empire Ottoman pour refuser l'entrée des équipes de prospection des compagnies pétrolières Américaines. Ces dernières acharnées de s'implanter dans le Moyen-Orient, remettent en cause les accords de Sykes-Picot et défendent le principe de la porte ouverte[2] pourtant qu'elles assurent la majorité de la production pétrolière dans le monde. Les américains se sont introduits par l'intermédiaire de Near East Development Corporation (NEDC)[3] à concurrence de 21,25% dans la (TPC) qui est devenue Irak Petroleum Company (IPC) en 1929. La (CFP) à la même part que les Américains dans l'(IPC) tandis que les Anglais ont le double et Gulbenkian 5% comme d' habitude. En 1928, l'accord de la ligne rouge[4] a été signé et les compagnies concernées s'engagent à travailler en coopération dans l'espace qui englobe l'Arabie Saoudite, les Émirats du Golfe, le Qatar et le Bahreïn. Cet espace géographique a été répartie comme suit : l'(AP) occupe l'Iran, l'(IPC) couvre l'Irak et Qatar, la (NEDC) s'étend sur l'Arabie Saoudite et le Bahreïn. Un peu plus tard, Henry Deterding[5] invite ses amis qui sont les présidents de (SO) of New Jersey (Esso, Exxon, Exxon-mobil) et de l'(AP) pour une partie de chasse du coq de bruyère dans son château à Achnacarry en Ecosse. Le but de cette rencontre est de mettre fin à l'instabilité des prix et d'organiser d'une façon coopérative

2 Ce principe prévoit que tout territoire sous mondat doit être ouvert au commerce international de façon non discriminatoire.

3 Un groupe de certaines sociétés pétrolières Américaines dont (SO) Of New-York et of New Jersey font partie.

4 On l'appelle l'accord de la ligne rouge car Gulbenkian avait tracé avec un crayon rouge les anciennes frontières de l'empire ottoman.

5 Le président de la Royal Deutsch Shell entre 1900-1936 connu par le Napoléon de pétrole.

l'industrie pétrolière pour le profit de tous les acteurs économiques d'où la naissance du Cartel international de pétrole. Ce dernier va se charger de diriger avec rationalité le domaine pétrolier pendant une trentaine d'années et il arrive à fin vers les années 70. Cet accord définit un mode de fixation des prix « Golf plus[6] » appliqué pour n'importe quel emplacement dans le monde en prenant comme référence géographique le Golfe du Mexique. Ce système a favorisé d'une part, les sociétés internationales qui vendent à un prix maximum leur brut au Moyen-Orient dont le cout est assez faible et bénéficier d'une marge assez importante et d'autre part il a pénalisé l'Europe qui paie le pétrole du Moyen orient à un cout calculé comme il venait du golfe du Mexique, alors que le cout d'origine est presque la moitié.

1.1.3 Le pétrole est le moteur de la guerre

Au début de la première guerre mondiale, l'importance du pétrole n'est pas encore bien révélée. Elle apparait avec la réquisition des taxis de la Marne pour transporter au plus vite sur le front les troupes casernées à Paris et stopper l'avance des Allemands ainsi que l'alimentation en carburant de l'armée française et le transport des armes. Le pétrole s'est transformé au bout de quatre ans en une puissance militaire qui commande le comportement des politiciens et qui dirige des guerres. Nous constatons que le désir acharné pour le pétrole explique à cette époque-là : l'invasion des allemands pour la Roumanie afin de profiter des gisements de Ploesti, la contre-offensive du général Britannique Montgomery contre les Allemands en 1942 en Afrique du Nord qui a fini par son victoire, la bataille de Stalingrad entre les soviétiques et les allemands en 1942 pour le contrôle de la ville Volgograd, considérée comme un port fluvial ainsi qu'un haut lieu de commerce au 19ème siècle et l'étouffement de l'économie Japonaise à cause des difficultés de transport du pétrole suite à la dépendance de plusieurs pétroliers à l'aviation américaine.

1.1.4 Les premiers affrontements pour une indépendance pétrolière

Pendant des dizaines d'années, les compagnies internationales de pétrole profitaient des gisements pétroliers des pays producteurs en contrepartie de faibles redevances versées qui sont considérées non suffisantes et non représentatives. Ces sociétés multinationales ont gardé secret les couts d'extraction ainsi que les clauses exactes de chaque concession et c'est

6Est un système de tarification dans lequel l'acheteur paie un prix de base plus un prix d'expédition mis en fonction de la distance à partir d'un emplacement spécifique.

progressivement que les pays producteurs en Amérique Latine puis au Moyen- Orient ont pris conscience de l'inégalité dans la répartition de l'argent de pétrole.

Ledo. P.M (1965) a indiqué que ce désir pour la nationalisation a été initié au Mexique en 1912, lorsque le président Modero avait imposé une taxe sur l'exploitation de pétrole. Cette imposition a été triplée par la suite par le chef de l'armée Carranza, Ce qui a déclenché les premières oppositions des compagnies pétrolières. Cet homme politique avait continué sa politique de nationalisation qui s'est concrétisée à plusieurs niveaux. En 1914, il a établi le premier règlement concernant l'industrie pétrolière et suite à non application de cette charte par les pétroliers, il a suspendu totalement les nouveaux forages et a transféré à l'Etat tout ce qui a été entrepris sans autorisation légale ainsi que la révision des concessions déjà existantes. En 1938, le gouvernement a décidé la nationalisation en créant Pemex pour prendre en charge les actifs nationalisés. Cette série de contestations avait continué entre le Gouvernement et les compagnies et n'avait pris fin qu'en 1941 avec les derniers accords destinés à l'indemnisation des compagnies appauvries par le président Cardenas.

Les sociétés pétrolières ont retiré leurs techniciens et ont déclaré le boycott du pétrole mexicain afin de pousser le gouvernement à précipiter l'expropriation. Toutefois, l'Etat Mexicain était déjà suffisamment fort et il a réussi à tenir le cout envers les pressions extérieures. Ensuite, c'est l'Etat vénézuélien qui s'est mis en scène. Il a rectifié en 1948 le régime des concessions et a imposé le principe 'fifty-fifty ' pour le partage des bénéfices. Cette idée s'est transmise à d'autres pays du Moyen-Orient et le gouvernement vénézuélien avait bien expliqué le fondement de ses protestations. En 1950, l'Arabie saoudite et le Koweït ont adopté ce nouveau mode de partage et cette décision n'a pas gêné les compagnies Américaines dont la mesure où les impôts versés aux pays d'accueil sont déductibles de leurs assiettes imposables dans leur pays d'origine. L'objectif des pays Arabes est de gagner plus et de profiter des rentes de leurs réserves en énergie pétrolière. Toutefois les compagnies Britanniques avaient un comportement différent vis-à-vis de l'intention de nationalisation du gouvernement Iranien. L'Iran n'accepte plus les 16% reçues en contrepartie de l'exploitation de ses réserves énergétiques qui datent depuis 1872, elle prononce la règle de ''fifty-fifty'. En face du refus des britanniques, l'Iran procède à la nationalisation et créée la ''National Iranian Oil Compagny (NIOC)'' en 1951. L'Anglo Iranian Oil Compagny (AIOC) refuse cette nationalisation et retire tous ces experts décidant ainsi le boycott des exportations Iraniennes.

Les diplomates Américains se sont vite déplacés par inquiétude du prolongement de cette crise surtout que la raffinerie d'Abadan en Iran est considérée comme le principal fournisseur de mazout et d'essence d'aviation pour l'Europe. Nous sommes en pleine guerre froide et les Russes peuvent déclencher la guerre à tout moment, en conséquence l'aviation Américaine, fortement présente en Europe va se retrouver bloquée dès le départ.

Ce litige a été porté devant la cour internationale de la Haye qui a donné raison au gouvernement Britannique dans la même année. L'approvisionnement de l'Europe qui dépend de 20% de l'Iran n'est pas menacé vu que les majors ont augmenté leur production dans les autres pays au Moyen-Orient et l'(AIOC) expulsée de l'Iran devient (BP) en 1954.

Les recettes de pétrole en Iran diminuent de 398 millions de dollars au bout de trois ans et le gouvernement de Mossadegh n'a pas pu résister et fut remplacé au 13 Aout 1953 par le général Zahedi. La diplomatie reprend et les majors réussissent à s'entendre avec le Shah tout en gardant la nationalisation. Les profits pétroliers de la compagnie nationale seront distribués selon la règle 'fifty-fity' entre le gouvernement d'Iran et les sept majors comme suit : BP 40%, Shell 14%, les compagnies américaines 40% (Esso 7%, Gulf 7%, Texaco 7%, Mobil 7%, Socal 7%, des compagnies indépendantes 5%) et Total 6%. Après l'affaire Iranienne, les Etats-Unis ont fait preuve d'une position inévitable au Moyen orient.

Quant à la France, son épreuve pour l'indépendance pétrolière a débuté avec la création de la (CFP) en 1924 et le bureau de recherche pétrolière (BRP) en 1945 qui permet d'enchainer la recherche de pétrole. Les travaux d'exploration se sont orientés vers le Maroc, le Congo, le Gabon et l'Algérie et ils ont parvenu en 1956 aux découvertes du Sahara Algérien.

L'Etat Français a obligé les majors présents sur le territoire de raffiner une partie de pétrole produit dans la zone franc. La part de pétrole Algérien a progressé au cours du temps pour atteindre 35% en 1964. L'entreprise publique Française Elf-Aquitaine a été créée en 1966, elle a essayé de varier ses sources d'approvisionnement en proposant aux pays producteurs des clauses plus profitables que celles proposées par les majors et elle s'est implantée en Iran, en Irak, au Canada et en mer du Nord.

L'italien Enrico Mattei a pris la relève, il a pu mettre fin au pouvoir du Cartel. Animée d'enthousiasme et de patriotisme, il a réussi à équiper son pays d'une puissance pétrolière indéfendable. Il avait une logique différente qui consiste à ne pas nationaliser à cause de

l'insuffisance des capitaux privés mais plutôt amplifier les efforts de forage et de l'exploration des hydrocarbures. Il a créé en 1953 l'Ente Italiano Idrocarburi (ENI) dont la filiale pétrolière est Azienda Generale Italiana Petroli (Agip). Il avait une vision assez projetée et il s'est intéressé au gaz naturel bien que ce dernier fût sous-estimé à l'époque. Il a fini par construire le premier réseau de distribution du gaz naturel dans le monde dans la vallée de Po. Profitant de ses relations d'amitié avec des politiciens, il a pu implanter une loi qui limite les contrats privés dans son pays et il a réussi à augmenter la taxation de la valeur du brut à 60%.

Il a profité de la crise Iranienne, il a soudé de bonnes relations avec eux et il est devenu l'épouvantail des membres du cartel. Il a visé les pays du Maghreb et il a réussi à acquérir des concessions avec une coopération de 50/50 en Lybie, en Tunisie, au Maroc, au Soudan. Il a négocié avec le Ghana, le Pakistan, l'Inde, l'Argentine, le Chili en proposant des contrats 75/25 sans oublier son contrat avec la Russie qui stipule la livraison de 12 Mt durant la période 1961-1965 et qui était renouvelé en 1969, ce qui explique la présence répandue de l'(ENI) en Russie. Il avait même des contacts avec les résistants Algériens et il était menacé plusieurs fois par l'OAS[7] et la CIA[8] et il a disparau suite à un accident d'avion en 1962 dont les causes restent toujours douteuses.

Mattei a réussi avec succès de mettre sa trace sur la scène pétrolière, il a montré pour les pays du Cartel ainsi que pour tous les acteurs de l'industrie pétrolière qu'il va falloir négocier avec les pays pétroliers avec un partage équitable de moitié moitié et non de leur lancer les mies qui tombent de la table. Les pays producteurs sont devenus de plus en plus ambitieux et plusieurs compagnies nationales se sont créées avec des concessions de partage 'fifty-fifty' tel que Hispanoil[9], l'entreprise de recherche et d'activité pétrolière (Erap) qui s'est transformée par la suite à Elf et Deminex. Enrico Mattei a changé les concepts anciens et a initié le passage vers une nouvelle étape de l'histoire pétrolière.

7
L'Organisation armée secrète (OAS), elle était une organisation française politico-militaire clandestine partisane créée le 11février1961.

8
Est l'agence centrale de renseignement , fondée en 1947 par le National Security Act, est l'une des agences de renseignement les plus connues auxÉtats-Unis.

9
Est une compagnie pétrolière Espagnole.

1.1.5 La genèse de l'OPEP et la période avant choc

La création de l'organisation des pays exportateurs de pétrole (OPEP) a été mise en scène suite à la baisse du prix du baril en 1950 à cause de l'expansion de la concurrence. Le développement de la stratégie de volume a exigé la baisse du prix de départ, c'est-à-dire le prix payé aux pays producteurs afin d'inciter à la consommation du pétrole au lieu du charbon et surtout sur les marchés européens. Les pays producteurs ont été importunés par cette baisse et par l'exploitation des pays du Cartel. Suite à l'initiative du shah d'Iran et le président du Venezuela, l'OPEP a été créé le 14 septembre 1960 afin de mettre en œuvre une politique commune. À l'origine, seuls cinq pays en étaient membres : l'Arabie saoudite, l'Iran, l'Irak, le Koweït et le Venezuela. Leur premier intérêt était limité au prix du pétrole puis ils se sont souciés de l'implantation d'un régime fiscal commun qui règle les concessions et les transactions pétrolières et finalement ils se sont intéressés aux modalités de contrôle de la production.

En 1967, suite à la troisième guerre israélo-Arabe connue par la guerre des six jours, le canal de suez est de nouveau fermé, expliquant ainsi la montée du prix du brut. Les prix affichés sont inférieurs aux prix de marché et les pays producteurs se sont montrés plus que jamais embarrassés par l'exploitation des majors. Les pays de l'OPEP réagissent et expriment pour la première fois en 1968 leur intention pour la nationalisation avant même l'échéance des concessions. Cette décision a engendré la montée des prix affichés qui déterminent les royalties et qui pénalisent les compagnies internationales implantées sur le territoire des pays producteurs. La réalisation de ces objectifs était d'une façon progressive vue que la situation économique à cette époque-là n'était pas propice à un accroissement du prix surtout que le coût des quantités explorées fut assez bas. C'est en 1970 que l'augmentation du prix du baril a été concrétisé afin d'atténuer la différence entre les coûts intérieurs et les prix internationaux. Suite à cette hausse de prix, la production hors Moyen-Orient a augmenté et le pouvoir du cartel ainsi que l'hégémonie Américaine se sont réduits.

Avec le début des années 70, la souveraineté de décision s'est renversée au détriment des majors qui avaient profité pour longtemps de leur double position dans les pays producteurs ainsi que dans les pays consommateurs surtout que l'activité de commercialisation et de distribution des hydrocarbures est restée pour une bonne période sans contrôle. Cette phase de l'histoire de la scène pétrolière fut déterminante aussi en ce qui concerne les découvertes de

nouveaux gisements qui ont touché la Malaisie, la Lybie, le Nigeria et les pays bas. Pour l'Europe communautaire[10], l'implantation d'une politique pétrolière ne fait pas partie de ses priorités dans cette période sauf pour le cas du Royaume-Uni, la France et l'Italie. Par contre, beaucoup d'efforts sont fournis pour le développement du charbon et de l'énergie nucléaire.

1.1.6 Les deux chocs pétroliers de 1970

1.1.6.1 Le premier choc pétrolier

Suite à la guerre des six jours en 1967, l'Etat hébreu a pu élargir sa superficie grâce à la conquête de la bande de Gaza et la péninsule du Sinaï du côté de l'Egypte, le plateau de Golan de la part de la Syrie, la Cisjordanie et Jérusalem-Est du côté de la Jordanie.

Le 6 octobre 1973 qui fut le jour de la fête Juive de Yom Kippour, l'Egypte et la Syrie combattent Israël afin de l'obliger de leur redonner leurs territoires déjà envahis et une quatrième guerre inévitable entre les pays Arabes et Israël se déclenche. En soutien pour l'Egypte et la Syrie, les pays de l'OAPEP[11] ont décidé de faire un embargo sur les exportations à destination les Etats-Unis et les Pays bas qui ont épaulé Israël. Cette décision a été envisagée par l'augmentation du prix de pétrole de 70% et la diminution des exportations en hydrocarbures de 5%.

Le prix du brut a augmenté légèrement passant de 3$ à 5,75$ donnant naissance à une crise de l'énergie et depuis ce jour-là, le pétrole devient une arme stratégique pour lutter contre Israël et ses rapprochés. A la fin du mois d'octobre, l'embargo a été levé et la production rejoint son activité normale. Toutefois, le rapport des forces a été modifié et c'est les pays exportateurs qui ont pris le pouvoir de fixer les prix de pétrole sans concerter les compagnies pétrolières. En décembre 1973, le prix du baril a été multiplié par quatre, il a atteint 11,65$ et c'est le premier choc pétrolier qui s'annonçait.

10 C'est une organisation supranationale créée en 1957 dans le cadre d'une intégration économique entre l'Allemagne, la Belgique, la France, l'Italie, le Luxembourg et les pays bas, elle a connu des élargissements en 1967 pour inclure encore 6 pays.

11 C'est l'organisation des pays Arabes exportateurs de pétrole qui a été créée en 1968.

En conséquence, les pays occidentaux s'enfoncent dans une crise économique dont les signes d'alerte ont débuté vers la fin des années 60 donnant fin aux trente glorieuses. La crise économique qui a frappé l'Europe occidentale a entrainé une récession économique dans le secteur industriel, le textile, la construction navale et la sidérurgie. En réaction, les Etats-Unis et les pays de l'union Européenne ont rapidement crée l'agence Internationale de l'énergie (AIE) [12] en 1974 afin de faire face à des situations d'urgence, garantir leur sécurité d'approvisionnement et coordonner ensemble leur politique énergétique. Plusieurs mesures rigoureuses ont été mises en scène afin de baisser la consommation de pétrole et bien que l'OPEP produise avec 65% seulement de sa capacité, les prix sont restés toujours élevés. La scène pétrolière s'est complétement dessinée : les membres de l'OPEP ont pris le pouvoir de la fixation des prix ainsi que des quantités exploitées, la dominance des compagnies nationales pour la production de pétrole au détriment des compagnies privées. Suite aux perturbations vécues au Moyen-Orient, chaque pays a choisi de fixer son prix de vente et depuis ce moment-là c'est le marché libre qui a dominé, et c'est le prix spot qui devient le prix officiel. Les activités d'exploration se sont intensifiées partout dans le monde, les couts d'exploration se sont élevés et des compagnies de service ont vu le jour dans beaucoup de pays tel que la Bolivie, Chili, Brésil et la Colombie.

1.1.6.2 Le second choc pétrolier

Le second choc pétrolier s'est déclenché suite à la révolution Iranienne en 1979 qui a transformé l'Iran en république Islamique. En Septembre 1980, la guerre entre l'Iran et l'Irak a débuté sous prétexte d'un confit de frontière entrainant au départ la baisse des exportations de la part des deux pays. L'Irak a voulu profiter de la situation et agrandir sa rente pétrolière. Pour se faire, Saddam Hussein s'est permis de s'approprier des réserves pétrolières de l'Iran surtout qu'il s'agit d'un pays non Arabe et cette guerre a entrainé plus d'un million de victimes. En conséquence, la production en pétrole de l'Iran qui est le deuxième producteur de l'Europe s'est alignée à 0,4 Mb/j et un deuxième choc pétrolier s'est concrétisé ramenant le prix de baril de 14 $ par baril en 1978 à 35 $ par baril en 1981.

12
L'Agence internationale de l'énergie (AIE) est un organe autonome qui œuvre pour la production d'une énergie propre, sûre et accessible pour ses 28 pays membres et pour les pays non-membres.

Du côté des pays consommateurs, les compagnies pétrolières se sont trouvées limitées dans leur plan d'action à cause de la concurrence développée dans ce domaine ainsi que les politiques de contrôle de prix exigées par les Etats accueillants et qui expriment la méfiance de ces derniers vis-à-vis des firmes multinationales. Toutes ces éventualités ont amorti la rente pétrolière de ces dernières (les firmes multinationales) tandis que la continuité des activités d'exploration, d'épuration et de distribution des produits pétroliers exige des fonds de plus en plus croissants et rend impossible l'autofinancement quasi intégral de cette chaine d'activité. Cette insuffisance de financement oblige ces compagnies à faire le recours au marché des capitaux pour garantir la faisabilité de ces investissements ainsi que de discuter avec les autorités publiques des prix de vente qui sont plus élevés qu'au paravent. Une affirmation certes est que ces firmes ne sont plus les leaders du marché mais se sont transformées en intermédiaires techniques entre les états producteurs et les états consommateurs et certains d'entre eux ont décidé d'adopter de nouveaux terrains d'exploration telle que le Mexique et l'Alaska jugés plus rentables au moins pour une bonne dizaine d'années. Cette hausse vertigineuse des prix avait aussi encouragé la production hors Moyen-Orient. Elle a incité la réduction de la consommation au niveau des citoyens en utilisant des stratégies de lutte contre le gaspillage tel qu'une meilleure isolation des maisons, le recours à des procédés industriels moins couteux, le ralentissement du parc automobile, l'encourageant ainsi la montée en scène des premières intentions de développement des énergies renouvelables.

Vue la dépendance rude vis-à-vis de pétrole, l'absorption du choc n'était pas si facile et les conséquences persistent encore jusqu'à présent. Le marché spot[13] s'est développé au détriment du marché officiel. Le pouvoir des pays de l'OPEP s'est dégradé, et ils se sont trouvés obligés de réduire leur production d'un tiers en volume en 1980 afin de maintenir les niveaux de prix face à la baisse de la demande et à la surestimation de leur pouvoir. Toutefois, cette décision n'a pas abouti à la réconciliation des prix. En 1974, leur part de marché était de 50%, elle a baissé pour se stabiliser à 47% en 1979. L'Arabie Saoudite a joué un rôle important dans cette phase de l'histoire de l'industrie pétrolière, c'est elle qui a été le principal acteur dans la réduction de la production de l'OPEP et c'est elle qui a décidé de doubler sa production en

13

Il y'adeux types de marchés spot, le premier est destiné au pétrole brut et le second aux produits raffinés. Le marché spot de pétrole brut se divise à son tour à trois autres marchés. Chacun de ces trois marchés se réfère à une zone qui l'influence. On trouve le marché de Londres où est coté le baril de Brent qui est aujourd'hui encore l'une des meilleures références en matière de prix pour le pétrole brut, le marché spot de New-York qui cote le baril de WTI, puis le marché de Singapour qui correspond au marché spot de toute la zone de Dubaï. (Baril Dubaï Light)

1986 en réponse à la difficulté rencontrée par certains pays membres à respecter leurs quotas de production.

D'un autre côté, les pays Européens s'inquiètent pour leur dépendance aveugle envers les pays producteurs ainsi que leur pouvoir dans la fixation des prix et dans la sécurité des approvisionnements surtout après les deux chocs pétroliers et introduisent dans leur discours la forte liaison entre les échanges pétroliers et les relations commerciales qui garantissent le développement de ces pays. L'Europe insiste surtout sur les avantages que peut acquérir l'Arabie Saoudite si elle diversifie sa liaison avec les pays Européens mieux que de se contenter uniquement des Etats Unis qui assure sa protection politique et militaire mais qui, selon la vision Européenne, pourrait aussi être un outil de déséquilibre et un risque pour la stabilité du Moyen-Orient. La collectivité Européenne a défini une politique commune de l'énergie[14] qui organise et traite les problématiques énergétiques à long terme et qui a donné naissance à l'AIE suite au premier choc pétrolier.

1.1.6.3 Le contre choc des années 80

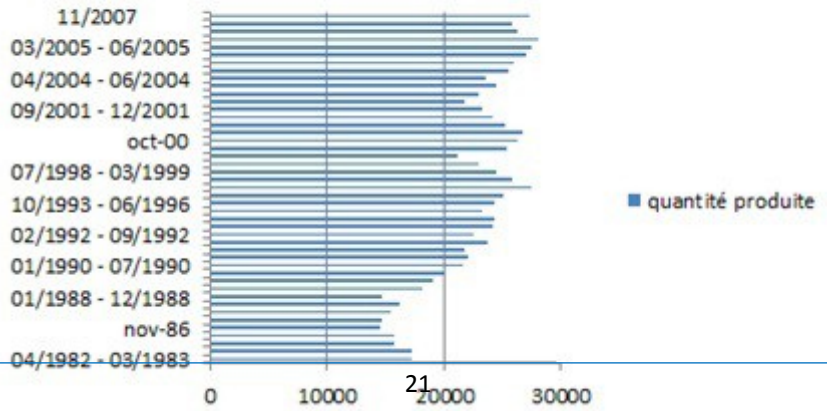
Entre 1982-1983, le marché pétrolier, dominé par les pays vendeurs s'est transformé au profit des pays acheteurs suite à l'exploitation de nouveaux gisements hors OPEP tel que le Mexique. Les politiques de maitrise de l'énergie appliquées par les pays consommateurs pour faire face aux deux chocs pétroliers ainsi que la diversification du bouquet énergétique grâce aux programmes de gazéification et de liquéfaction du charbon a dédié ses fruits au début du mois de janvier 1986 lorsque le prix de pétrole a chuté vers 10 $ le baril.

Ces bas prix ont stimulé la consommation et ont ralenti la production hors Moyen-Orient où les coûts d'exploitation sont plus élevés tel que le cas de l'extraction offshore. Pour les pays producteurs, l'effet était dévastateur particulièrement pour le Nigéria qui, à partir de 1984 ne reçoit que la moitié de la rente pétrolière dont il a l'habitude depuis quelques années et il a été obligé de réviser des investissements en cours et d'abandonner parfois. Ce contre choc a angoissé également les sociétés de service pétrolier dont les revenus ont chuté violemment et qui se sont trouvées dans l'obligation de licencier des employés. Plusieurs entreprises ont déclaré leur faillite, d'autres ont été achetées par les compagnies les plus fortes et quelques-

14 La politique commune de l'énergie est fondée autour de cinq directions qui décrivent son programme énergétique avec les pays producteurs et les pays de l'OCDE.

unes ont été fusionnées. Nous citons par exemple le cas de la société pétrolière Schlumberger qui a enregistré dans l'année 1986 la plus grande perte de l'histoire de Wall Street. En 1990, l'Irak a attaqué le Koweït mais cette fois ci, il ne s'agit pas d'un pays ennemi de l'occident, mais plutôt un allié aux Etats unis. Cette attaque a perturbé l'approvisionnement des produits pétroliers et a engendré une flambée immédiate des prix qui ont passé de 18/19 à 35/38 $. L'invasion du Koweït a menacé aussi la stabilité de l'Arabie saoudite qui représentait un rôle majeur dans le Moyen-Orient et qui a comblé pendant les deux chocs pétroliers le manque de production à cause de l'incapacité technique de certains pays membres. L'Arabie Saoudite a fait passer sa production de 5,4 Mb/j à 8,5Mb/j ce qui correspondait à 70% du déficit. Le Venezuela a augmenté aussi sa part de production afin de résorber les 10% restantes du déficit. Toutes les capacités de production se sont déployées et c'est devenu clair que l'Arabie Saoudite ne serait pas envahie par Saddam Hussein. Cette affirmation a influencé les prix pétroliers qui se sont stabilisés à 28/30 $ le baril. Les prix pétroliers ont continué à baisser et n'ont évolué qu'au milieu des années 90 avec la croissance économique des Etats-Unis et de l'Asie. Ils ont décliné de nouveau avec la crise financière asiatique de 1997 qui s'est poursuivie jusqu'à au début de l'année 1999 où le prix du baril s'est stabilisé à 10 $/ baril. Toutefois, suite à l'accord entre les pays de l'OPEP ainsi que d'autres pays tel qu'Oman, la Russie, le Mexique et la Norvège pour la réduction des quotas de la production, les prix ont augmenté de nouveau pour toucher 30 $ /baril un an plus tard. En réaction, l'OPEP a décidé cette fois-ci d'exploiter sa capacité de production afin de pouvoir stabiliser les prix entre 20 et 25 $/baril. Mais suite aux attentats du 11 septembre 2001, les prix ont progressé de nouveau légèrement, l'OPEP a décidé de réduire de nouveau sa production à partir de janvier 2002 à condition que les pays hors de l'OPEP contribuent également à cette baisse. La figure 1.1 ci-dessous explique les différentes fluctuations dans la production de l'OPEP durant la période 1982-2008.

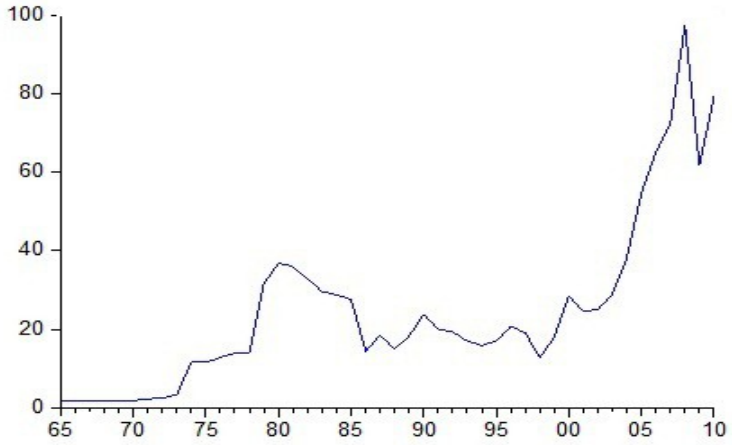
Figure 1.1- Les quotas de la production de l'OPEP en milliers de baril par jour



Source : Secrétariat de la CNUCED 2007.

Depuis 2001, le cours de pétrole a connu une hausse vertigineuse entre (voir figure 1.2 ci-dessous) grâce à la vivacité de l'économie chinoise et l'émergence des pays nouvellement industrialisés qui se sont obligés de se servir des stocks stratégiques[15] pour accélérer leur développement. Une affirmation certes est que ces facteurs à côté des opérations spéculatives et l'instabilité politique qui a régné certains pays du monde ont expliqué en partie le maintien du cours de pétrole assez élevé entre 2003 et 2004.

Figure 1.2- Evolution des prix de pétrole brut en $ Américain par baril



Source : Elaboration de l'auteur sur la base des données de BP 2010.

Le prix de pétrole brut a frappé un record au milieu de l'année 2008 soit 140 $/baril. Au cours de l'année 2011, selon le Financial Times, les cours de Brent sont suspendus au-delà de 110 $/baril. La facture pétrolière de l'Union Européenne (UE) s'est élevée à 402 milliards de

15 Ce sont des stocks de réserves exigés par les pouvoirs publics pour faire face à une rupture grave des approvisionnements.

dollars contre 280 milliards en 2010 ce qui est équivaut au montant de la dette publique grecque.

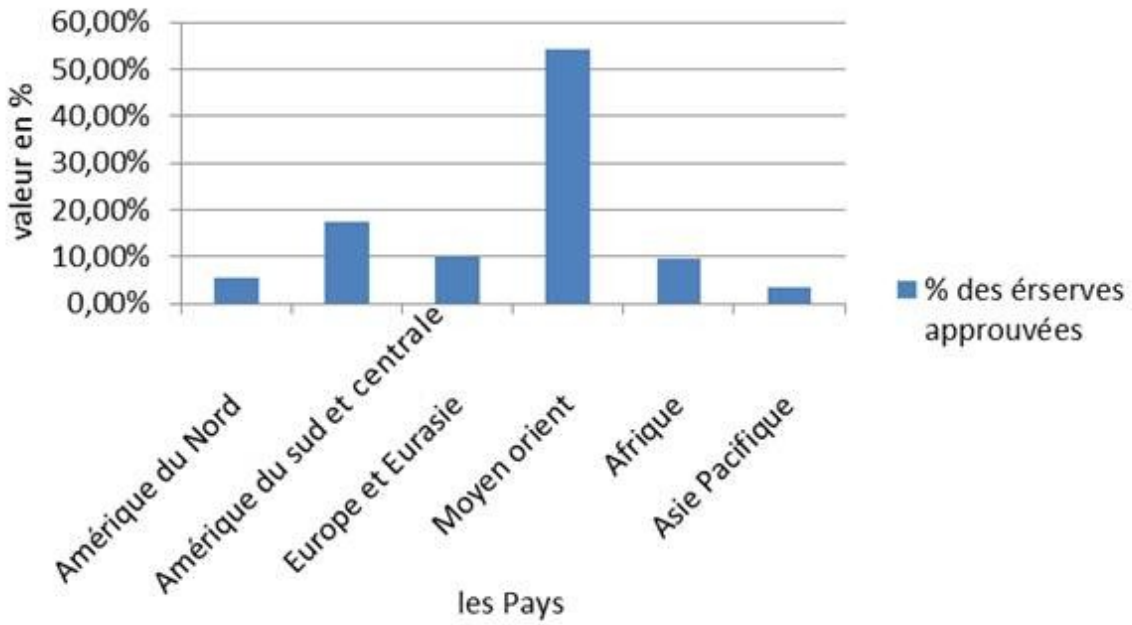
1.2Les disparités au niveau de la distribution des réserves entre les continents et son impact sur la politique énergétique

Chaque pays est doté de ressources énergétiques locales qui qualifient sa stratégie adoptée en termes de consommation énergétique. Certes, il existe des particularités concernant l'importance de chaque ressource énergétique dans le bilan énergétique, la répartition des réserves et le degré de dépendance vis-à-vis des importations. Tous ces motifs ont influencé la volonté des pays de privilégier une ressource énergétique par rapport à une autre ainsi que sa dominance dans le bilan énergétique à un moment donné.

1.2.1 La répartition des réserves énergétiques entre les pays

1.2.1.1 Le pétrole

Les réserves sont les quantités techniquement et économiquement exploitables à un moment donné, elles évoluent à travers le temps et ne sont pas des quantités stables. Furfari. S(2007) a distingué trois types de réserves : les réserves prouvées, qui à une date donnée contiennent les quantités déjà découvertes et qui peuvent être produites dans les conditions technologiques et économiques actuelles, les réserves probables qui peuvent être mise en exploitation selon les conditions actuelles sans certitude absolue et les réserves possibles comme leur nom l'indique ont la possibilité d'être exploitées à concurrence de 5 %. La notion de réserves selon les spécialistes énergétiques diffère de celle de ressources. En effet, les réserves sont dynamiques,



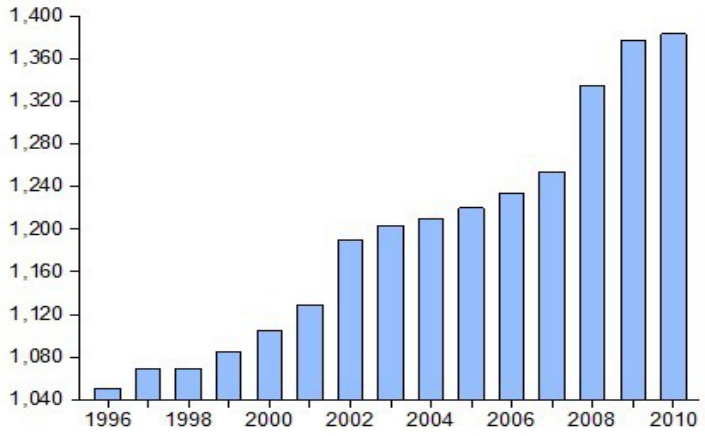
27

Source : Elaboration de l'auteur basée sur les données de BP 2010.

De plus, ces réserves n'ont pas cessé d'augmenter au cours du temps, les pays de l'OPEP exploitent 77,2% de ces réserves en 2010 tandis que les pays de l'UE ne possèdent que 0,5%. Selon le Statistical Review of World Energy(2011), Le Moyen-Orient alimente les pays asiatiques émergents (le Japon, l'Inde, la Chine et Singapour) à concurrence de 75%, l'Europe 12% et les Etats-Unis 9%. Les Etats-Unis délivrent 25% de ses exportations de pétrole au Mexique et presque 34% aux autres pays du Sud et du centre de l'Amérique. Toutes ces disparités au niveau des échanges commerciaux de pétrole sont expliquées essentiellement par des problèmes de proximité et de transport. Concernant la durabilité des réserves, il y'a deux opinions différentes : la première est celle des pessimistes qui s'alignaient avec le modèle de King Hubbert, qui stipule que la production annuelle de pétrole est en corrélation décalée avec les découvertes annuelles et l'extraction d'une ressource minérale suit une courbe en cloche qui atteint son maximum lorsque la moitié de cette ressource a été produite. Au niveau mondial, le décalage de la courbe d'Hubbert est de 45 ans et vu que la majorité des découvertes se sont établies aux années 60 cela implique que le pic de production devrait se manifester avant 2010. King Hubbert a démontré que la production Américaine de pétrole atteindrait son maximum en 1970. Au début, son hypothèse n'était pas trop appréciée par ses confrères, toutefois en 1971 lorsque la production Américaine passerait par son maximum puis déclinerait, ils se sont intéressés à ses prédictions. Les pessimistes ont enraciné un

cauchemar d'insécurité dans l'opinion publique occidentale. Leur chef demeure Colin Campbell, c'est le fondateur de l'association de l'étude du pic pétrolier (ASPO), il a étudié le pic à partir duquel la production décline. En 2004, cette école a montré que le pic de production pétrolier interviendrait en 2008, ils ont insisté sur la crise imminente d'approvisionnement en pétrole. La deuxième opinion est celle des optimistes, elle est basée sur le rôle primordial du progrès technique ainsi que sur la valeur économique des réserves. Ces derniers estiment que les réserves en hydrocarbures persistaient encore et il reste au moins entre deux ans à trois ans pour qu'on puisse dire qu'elles sont arrivées à leur fin. De plus les réserves en pétrole augmentaient avec l'exploitation. De point de vue économique, les pays les plus dotés en réserves pétrolières ne doivent pas trop s'investir dans la prospection afin d'éviter un excès de production comme le contrechoc de 1986 qui a entrainé une baisse brutale des prix pétroliers. C'est le cas de l'Arabie saoudite et de l'Irak qui détiennent presque 30% des réserves prouvées en 2010. Ces derniers produisent du pétrole brut à partir de quelques anciens champs sans faire recours aux autres gisements déjà découverts. Quant aux autres pays du Moyen-Orient qui ne sont pas ouverts aux investissements étrangers, les technologies utilisées sont dépassées et ces derniers ne sont pas motivés à investir dans la technologie de prospection vue que les réserves déjà disponibles sont assez importantes. C'est ainsi que les marchés boursiers ont offert des gains faciles qui ont pénalisé l'investissement dont les revenus nécessitent assez de temps pour être réalisés. C'est sur la base de cette école de pensée que les estimations de la BP et de l'United States Geological Survey (USGS) se sont inspirées. L'(USGS) a affirmé que différentes sources se sont alignées à ce que les réserves prouvées de pétrole mondial dépassent 1 trillion de baril et non pas comme ils ont annoncé à l'époque que la fin du pétrole est imminente.

Figure 1.4- les réserves prouvées de pétrole exprimées en billion de baril



Source : Elaboration de l'auteur sur la base de données de BP 2010.

Plusieurs facteurs ont contribué à élever les réserves pétrolières tels que :

-Le progrès du service parapétrolier qui occupe une place importante dans l'industrie des hydrocarbures, parmi ces compagnies nous citons à titre d'exemple Schlumberger, Aker, Technip. Ces dernières implantées partout dans le monde interviennent dans les activités de prospection pétrolière et de production à travers des techniques diversifiées de forage- tel que les forages horizontaux et dirigés, qui ont permis de pomper même dans des nappes situées à 10 km du puits.

- le procédé de la sismique à trois dimensions et l'imagerie électronique qui ont donné l'opportunité de posséder d'une cartographie plus détaillée du sous-sol, de bien aspecter le réservoir et d'atténuer le nombre de forages ainsi que le cout de prospection.

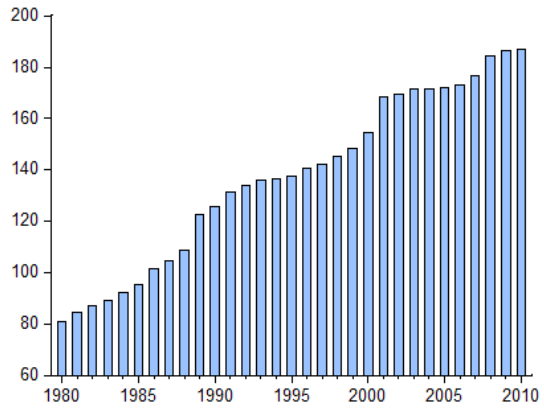
-L'amélioration du taux de récupération[17], il était de 22% au cours des années 70 et actuellement il varie entre 35% et 40%. La technologie de la récupération assistée augmente la pression qui éjecte à son tour les hydrocarbures piégés en dehors. Généralement cette technique est adoptée à la fin de vie du gisement, toutefois elle pourrait être utilisée même antérieurement, elle a participé à accroitre les réserves prouvées d'une façon proportionnelle. Furfari. S (2007) a affirmé que l'amélioration du taux de récupération de 1% augmente les réserves entre une et deux années de consommation.

1.2.1.2 Les réserves en gaz naturel

La prospection du gaz naturel diffère largement du celle du pétrole vue que les gisements visés sont plus profonds ainsi que les techniques utilisées sont plus spécifiques. Selon la figure 1.5 ci-dessous, le volume des réserves mondiales prouvées de gaz naturel est en augmentation continue plus intense que celle du pétrole surtout entre la période 1990-2000 (22% contre 10%). Les réserves sont actuellement de 187 trillion de mètres cubes (Tm^3), Cela peut être expliqué en revanche par l'évolution de l'innovation technologique ainsi que le développement du marché du gaz naturel.

17 C'est le rapport entre le volume de pétrole récupéré et le volume total contenu dans un gisement

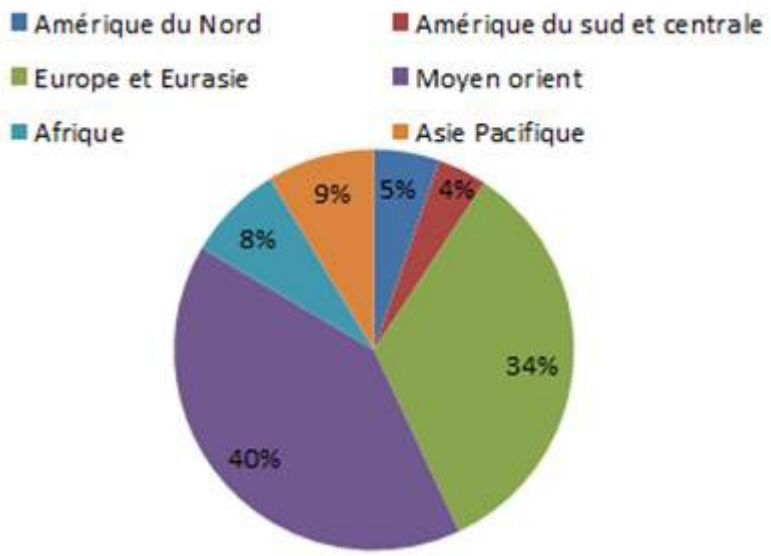
Figure 1.5- Evolution des réserves mondiales prouvées de gaz naturel exprimées en Tm^3



Source: Elaboration de l'auteur sur la base des données de CEDIGAZ (2011) et du secrétariat de l'OPEP (2010)

Pour la répartition de ces réserves, nous remarquons qu'elles sont plus au moins partagées que celles de pétrole même si que le Moyen Orient demeure la région la plus prometteuse de réserves en gaz naturel (l'Iran est le plus riche en gaz naturel avec une part proche de 40% suivie par Qatar avec un taux de 33% en 2010 contre 1,87% pour les réserves de pétrole). Toutefois, le continent de l'Europe et de l'Eurasie occupe le deuxième rang où la Fédération de la Russie est dotée de 25% des réserves de la région en gaz naturel suivie par la Turquie.

Figure 1.6- Les réserves prouvées du gaz naturel en 2010



Source : élaboration de l'auteur sur la base des données de BP 2010

Malgré que la zone du Moyen-Orient possède des réserves assez importantes en gaz naturel, la primauté reste toujours pour le pétrole. Selon le tableau 1.1 ci-dessous, la part du Moyen Orient dans les exportations par pipeline est très faible presque 4%, tandis qu'il occupe le 1/3 des exportations mondiales de GNL[18]. Le Qatar fait l'exception du Moyen-Orient dans la production du GNL, il est le premier pays exportateur avec 25% du total des exportations suivie de l'Indonésie (10,54%), de la Malaisie (10,26%) et du Nigéria (8,23%). L'Algérie occupe le sixième rang dans les exportations du GNL avec 6,5% des exportations.

Qatar qui ne représente que 1,87% des réserves prouvées de pétrole en 2010 compte énormément pour son avenir sur la production du gaz naturel surtout que ces réserves sont en hausse continue (elles étaient de 3,65% des réserves prouvées mondiales de gaz naturel en 1990 et elles ont atteint 13,52% en 2010). Qatar alimente l'Amérique du Nord à concurrence de 4%, certains pays de l'Europe tel que la France, l'Italie, l'Espagne et essentiellement le Royaume-Uni avec environ 20% de sa consommation et presque 40% des importations des pays de l'Asie tels que l'Inde, le Japon et la Corée du Sud. Parmi les compagnies multinationales qui sont implantées dans ce pays, nous citons Total et Exxon Mobil. ces dernières ont coordonné avec l'entreprise nationale du Qatar pour le projet Qatargas2 considéré parmi les projets les plus audacieux destinés au Royaume-Uni, à la France et aux Etats-Unis. La Russie quant à elle, a dominé la production mondiale de gaz naturel depuis 1986 et ce n'est qu'en 2010 que les Etats-Unis ont emporté le jeu. L'Algérie est considérée comme le premier pays Africain producteur de gaz naturel avec environ 40% suivie par l'Egypte 30%. En 2010, 98% des exportations en gaz naturel de l'Algérie sont destinées à l'UE et essentiellement la France, l'Espagne la Turquie et le Royaume-Uni, renforçant ainsi son poids dans le marché gazier Européen.

Tableau 1.1- Les exportations de gaz naturel et du GNL pour l'année 2010 exprimées en %

	exportations par pipeline	Exportations de GNL
Amérique du Nord	18.67	0.56
Sud et centre d'Amérique	3.1	7.46

18
Le GNL est du gaz naturel rendu liquide par refroidissement à moins de 160 °C.

Europe et Eurasie	63.15	6.28
Afrique et Egypte	8.04	37.94
Moyen-Orient	4.07	33.8
Asie pacifique	2.97	19.62

Source : Elaboration de l'auteur sur la base des données de Statistical Review of World Energy –full report 2011

En effet, le gaz peut être produit suite à l'exploitation d'un gisement de pétrole et il s'agit du « gaz associé ». Ce dernier représente à peu près le quart des réserves prouvées et il ne sera valorisé que lorsque la quantité produite est assez importante et que le lieu d'utilisation n'est pas trop loin, sinon il finit par être brulé en torchère. Ce dernier dégage le méthane (CH_4) qui est un GES plus lourd que le CO_2, ou bien il peut être réintroduit dans le puits dans le but de maintenir la pression nécessaire. Le gaz associé destiné à l'exploitation doit être comprimé et traité dans des usines bien spécifiques ce qui rend sa production assez complexe et couteuse. Toutefois, la production de gaz peut être faite isolement du pétrole, il s'agit de « gaz non associé » qui est nommé en tant que gaz sec s'il contient uniquement le CH_4 et de gaz humide s'il renferme d'autres gaz plus lourds que le CH_4. Il doit être dans ce cas soumis à un dégazolinage pour récupérer le méthane.

D'une manière générale, l'industrie de gaz naturel n'a pas cessé de se développer grâce aux avantages qu'elle requiert. A part son usage pour la génération de l'électricité et la production de la chaleur, cette ressource énergétique et surtout dans les pays riches a servi pour le développement de la pétrochimie. Cette dernière est considérée comme un secteur industriel fortement créateur d'emplois et de richesse. De plus, le gaz naturel est considéré comme le combustible fossile le plus propre qui favorise la convergence vers le protocole de Kyoto[19].

19
Est un accord international, adopté à l'unanimitéen 1997, il est bâti sur la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. Il met en place des objectifs légalement contraignants et des délais pour réduire les émissions de GES des pays industrialisés.

1.2.1.3 Les réserves en charbon

La distribution du charbon est considérée être plus équitable que celle du gaz naturel et de pétrole à travers les zones du monde. Les réserves de charbon se répartissent entre l'anthracite qui est formé de carbone pur, le charbon bitumineux ou la houille renferment 80% à 90% de carbone, le lignite qui inclut entre 65% et 70% de pouvoir calorifique, le charbon sub-bitumineux et finalement la tourbe connu par sa faible teneur en carbone (à peu près 50%). La prise en considération de ces critères dans la distribution des réserves prouvées donne la faveur d'un pays par rapport à un autre. Selon la figure 1.7 ci-dessous, le continent de l'Europe et de l'Eurasie est le plus riche en lignite et en charbon sub-bitumineux suivi par l'Amérique du Nord et par l'Asie Pacifique. Toutefois, pour le charbon anthracite, l'Asie pacifique renferme la plus part des réserves prouvées suivie par l'Amérique du Nord et la région de l'Europe et de l'Eurasie. Si nous procédons à une analyse par pays, les Etats-Unis est le pays le plus riche en lignite (28%) suivie par la Russie (24%), la Chine (11%) et l'Allemagne (9%). Pour l'anthracite, les Etats-Unis occupent toujours le premier rang, tandis que la Chine et l'Inde occupent le second et le troisième rang avec simultanément 15% et 14%. La fédération de la Russie quant à elle, se trouve au quatrième rang avec 16% suivie par l'Australie (9%). Le lignite et la tourbe ne font pas l'objet d'échanges internationaux du fait de leur faible pouvoir calorifique et c'est pour cette raison que les réserves en tourbe surtout ne font pas partie des prévisions de la CECA.

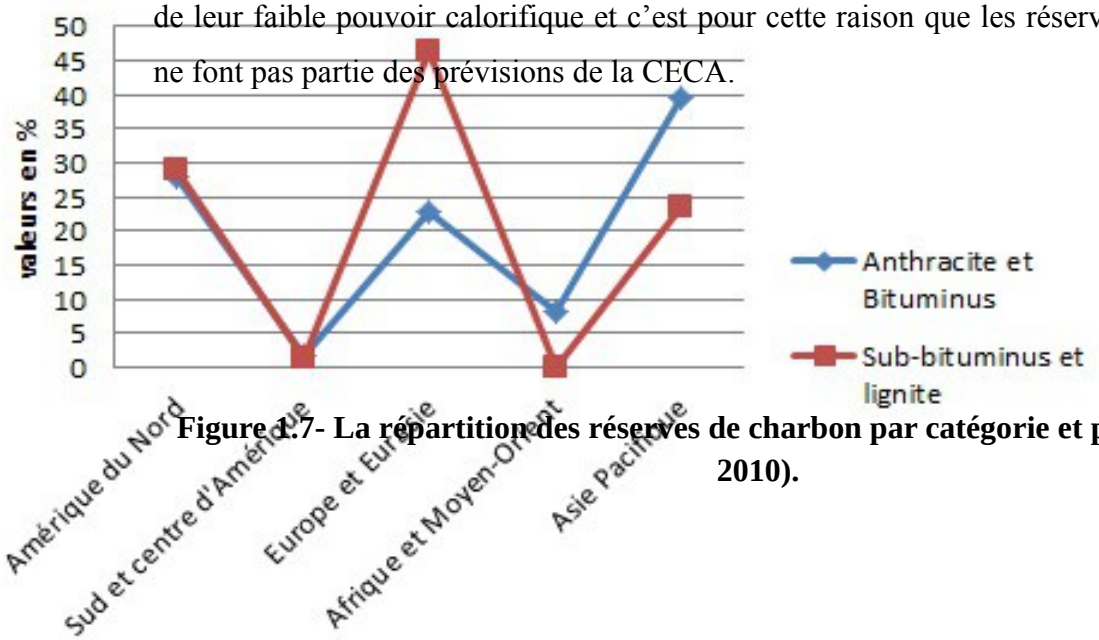


Figure 1.7- La répartition des réserves de charbon par catégorie et par pays en % (en 2010).

Source : Elaboration de l'auteur sur la base des données de l'enquête du conseil mondial des ressources énergétiques 2010.

Au niveau mondial, la chine est le pays qui consomme le plus les carburants solides commerciaux pour l'année 2010 et qui produit le plus avec des proportions presque égales (48%) suivie par les Etats-Unis (15%). L'Inde est un pays légèrement importateur net en charbon commercial (2%). Le charbon Européen et exactement la houille est plus cher que celui importé (150 $/tec contre 30 $/tec), cela est due essentiellement à ce que tout le charbon bitumineux exploité dans ce contient est extrait à partir des mines souterraines qui nécessitent des techniques d'abattage assez sophistiquées et non pas des mines à ciel ouvert qui sont moins couteuses tel est le cas de la Colombie, l'Indonésie, Venezuela, les Etats- Unis et l'Australie. Malgré toutes ces contraintes, l'extraction du charbon demeure moins onéreuse et exige moins de capitaux que l'extraction des hydrocarbures liquides et gazeux.

Le rôle du charbon s'est intensifié avec le développement de l'électricité, la majorité des centrales électriques en ce moment-là fonctionnaient au charbon à l'instar l'Inde, la Chine et l'Allemagne qui utilise près de 50% de charbon à vapeur pour ses besoins en électricité.

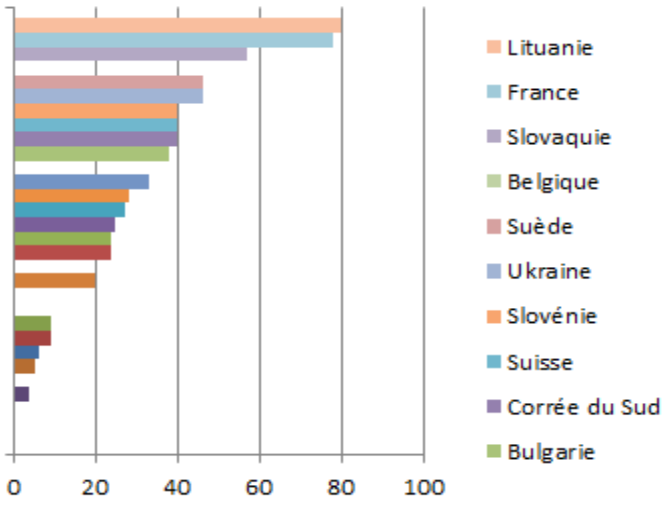
Cependant, les émissions de GES issues de son usage sont considérées comme les plus élevées et classifient le charbon comme étant un combustible fossile assez polluant. Le charbon génère 30% des émissions anthropiques de CO_2 dans le monde.

1.2.1.4 L'énergie nucléaire

Furfari. S(2007) a souligné que le recours à l'énergie nucléaire est fortement lié au domaine militaire et la première production expérimentale de l'électricité à partir de l'énergie nucléaire fut en 1951 aux USA. Le premier réacteur pour l'usage civil est mis en service par l'Union Soviétique en 1954. Les Etats-Unis, le Royaume-Uni, le Canada et la France ont procédé à leur tour à la mise en service de leurs premières centrales destinées à la production

d'électricité. Au cours des années qui suivent, la filière électronucléaire s'est développée et en conséquence la production mondiale a passé de 10 TWh en 1963 à 68 TWh en 1970. Et c'est suite au premier choc pétrolier que l'énergie nucléaire s'est transformée d'une énergie d'appoint à une énergie importante pour la production de l'électricité. L'énergie nucléaire est assez spécifique, elle ne sert qu'à produire de l'électricité. Son usage est caractérisé par une grande disparité géographique. Dans les pays de l'OCDE par exemple, l'énergie nucléaire participe à concurrence de 25% dans la production de l'électricité, au niveau de l'UE des 25, elle occupe 14,4 % du bilan énergétique totale en 2005. Par contre au niveau mondial, elle représente 16% de la quantité totale d'électricité produite et se place au second rang après le charbon pour la production de l'électricité. L'énergie nucléaire ne répond qu'à 6% des besoins mondiaux en énergie primaire contre 38% pour le pétrole, 26% pour le charbon et 24% pour le gaz. Le handicap majeur de cette industrie demeure le cout élevé des investissements nécessaires, tandis que le cout d'usage est économique à l'encontre des centrales conventionnelles thermiques.

Figure 1.8- Production de l'électricité à partir de l'énergie nucléaire en % en 2003



Source : Elaboration de l'auteur sur la base des données collectées de Furfari. S (2007) page 375

La France, la Lituanie et la Belgique produisent de l'électricité à partir de l'énergie nucléaire à concurrence de 80%, 78% et 39% respectivement. Toutefois, certains pays de l'UE tels que l'Italie, elle n'est pas présente dans cette scène énergétique et importe presque un quart de sa consommation électrique nucléaire de la France. La production d'électricité nucléaire se concentre dans les pays développés. Plus de la moitié des réacteurs du monde sont localisés

en Amérique du Nord et en Europe et moins de 10% se trouvent dans les pays en développement.

1.2.2 Le transport des hydrocarbures et la sécurité d'approvisionnement

Le transport des hydrocarbures est un grand enjeu géopolitique qui influence le cout de l'énergie transportée, son accessibilité, sa sécurité d'approvisionnement ainsi que la primauté d'un pays par rapport à un autre. Le transport des hydrocarbures est assuré pour sa majorité par la voie maritime à travers les navires : 90% des échanges internationaux de charbon[20], 25% du GNL et 75% de brut et des produits pétroliers. En 2005, 63% de la quantité consommée de pétrole dans le monde a fait l'objet d'un transport maritime.

Au niveau mondial, il existe entre 400 et 450 super tankers qui sont capables de transporter entre 200.000 et 350.000 de tonnes du pétrole brut. Il y'a aussi les Ultra Large Crude Carriers (ULCC) dont leur capacité de transport dépasse les 650.000 tonnes. Ce genre de marché de transport est contrôlé par le Baltic Exchange Clean Tanker Index (BCTI), qui mesure les couts d'affrètement de ces navires. Ce dernier est la seule source indépendante dans le monde de l'information du marché maritime. Le (BCTI) est volatile et fortement influencé par les circonstances qui l'entourent, il est utilisé comme un indice de développement des marchés de transport maritime qui est en hausse continue depuis le début des années 70.

Toutefois, le transport maritime pétrolier cause des problèmes environnementaux tels que les marées noires, les fuites dans les réseaux de gazoducs sous-marins et d'oléoducs et l'encombrement de certaines zones de transit comme celle du Bosphore qui représente la limite entre les continents de l'Europe et de l'Asie. Une autre difficulté qui se configure, est celle du transport maritime à travers la Méditerranée qui occupe 30% du trafic d'hydrocarbures dans la zone euro- méditerranéenne. Il s'agit d'une mer clôturée écologiquement délicate. Face à ces contraintes, la commission Européenne a pris plusieurs mesures afin d'accentuer le contrôle des navires maritimes. Citons la directive 2002/84 portant modification aux directives relatives à la sécurité maritime et à la prévention de la pollution par les navires, l'instauration d'un système d'indemnisation des victimes de la pollution à travers les fonds internationaux d'indemnisation pour les dommages dus à la

20
Entre 1970 et 2003, le charbon destiné aux centrales électriques et transporté par mer est passé de 15 à 430 Mt/an .Pour la même période, le charbon métallurgique transporté est passé de 86 à 180Mt/an.

pollution par les hydrocarbures connus par les trois FIPOL. Tous ces risques qui entourent le trafic maritime dans les eaux de l'euro-méditerranéenne donnent la faveur à étudier la possibilité de construction de liaisons fixes à travers les pipelines qui relient l'Arabie Saoudite à l'Égypte, l'Iraq à la Turquie, le bassin de la mer Caspienne à l'Algérie et la Lybie aux pays de l'UE. Certes la construction de ces oléoducs est assez couteuse par rapport au transport maritime mais reste de loin la plus sure et la plus respectueuse pour l'environnement. Pour le transport du gaz naturel, il exige un réseau de transport assez élevé avec des investissements extrêmement couteux étant donné que la distribution du gaz naturel peut atteindre même le secteur résidentiel dans les pays développés et la génération de l'énergie électrique dans les pays en voie de développement.

Il existe deux usages pour le transport du gaz naturel à savoir les gazoducs et les méthaniers. Le mode du transport diffère selon le type du gaz transporté et selon les caractéristiques du projet. Bien que le gaz naturel renferme des difficultés dans sa composition à cause de son état gazeux, il est considéré comme une énergie à un réseau de transport interconnecté où son développement est fortement lié à l'innovation technologique. Pour les distances assez éloignées, la pression au niveau des gazoducs devrait augmenter pour favoriser plus de compression et assurer les exportations des pays qui sont riches en gaz naturel tel que la Russie et les pays du Moyen-Orient. Parmi ces réseaux de transport figure les réseaux transeuropéens[21] de gaz qui sont fondés sur des projets prioritaires qui relient l'UE aux différents pays du monde et qui assurent la sécurité d'approvisionnement sur de longues distances dans des conditions géopolitiques et environnementales diversifiées.

Quant au GNL qui est en développement soutenu, occupant ainsi un rôle important dans la diversification du bouquet énergétique, son transport est assuré par les méthaniers dont le nombre est de 360 en 2010. Cette technique de transport nécessite un capital assez élevé et ne s'impose que lorsque le transport par gazoduc s'avère impossible à cause de son cout ou traversant beaucoup de pays surtout ceux qui sont politiquement instables. L'Algérie est le premier pays qui a exporté le GNL en 1964. Le transport du GNL est en hausse continue, d'ici 2030, il est estimé qu'il occupera la moitié du commerce de gaz et 16% de la consommation

21
Les réseaux transeuropéens d'énergie sont fondés sur des axes de projets prioritaires : NG1, NG2, NG3, NG4, NG5 et NG6 qui décrivent pour chacun les pays qui sont reliés pour un transport sécurisé du gaz.

mondiale. L'Amérique par exemple compte avoir encore neuf nouveaux terminaux de GNL d'ici 2025.

La sécurité physique est assez ambiguë au niveau des conduites ainsi que le risque qui règne les routes des échanges commerciaux. En effet, il y'a six endroits risqués et vulnérables où passe les hydrocarbures. Nous citons le détroit d'Ormuz qui relie le golfe Persique au golfe d'Oman constituant plus de 30% du commerce mondial de pétrole, le détroit de Malacca situé entre l'Indonésie, la Malaisie et Singapour et qui est considéré comme la principale voie d'approvisionnement en pétrole des deux premiers consommateurs dans le monde qui sont le Japon et la Chine, Le canal de Suez qui facilite le passage des navires de l'Europe vers l'Asie sans passer par l'Afrique, le détroit de Bab el Mandab qui relie la mer rouge au golfe d'Aden, le Bosphore et le canal de Panama qui relie l'océan Pacifique à l'Océan Atlantique. Parmi ces détroits, celui d'Ormuz et de Malacca sont considérés les plus stratégiques et les plus importants pour les pays consommateurs tels que la Chine, le Japon, la Corée, l'Australie tandis que leur portée s'atténue pour les pays de l'Europe.

Dans ce même contexte, l'intention prononcée par les pays Européens en janvier 2012 d'imposer un embargo sur le pétrole iranien apparait comme une décision imprudente. En cas de ces nouvelles sanctions occidentales contre son programme nucléaire, Iran menace de sa part de fermer le détroit d'Hormuz par lequel circule 20% de la production mondiale de brut.

1.3. Les premières controverses autour de l'émergence des ressources naturelles dans l'économie

La relation entre l'énergie et l'activité économique n'est pas spontanée et elle est précédée de la relation qu'entretient l'homme avec son environnement naturel. Théodore Monod en 1962[22] a décortiqué l'histoire de l'homme avec la nature en trois phases :

-La première phase de l'histoire s'étend depuis son existence jusqu'au 18 ème siècle, au cours de cette période, l'être humain est en dépendance absolue de la nature où l'agriculture prédomine et ses moyens sont assez limités. La pression de l'être humain est estimée nulle ou assez faible sur l'écosystème. Vallée. A (2002) a affirmé qu'en ce moment-là, l'ordre naturel

22
est un scientifique naturaliste, explorateur et humaniste Français. Il était indissociable du Sahara qu'il a parcourue de 1923 à 1989.

est un ordre divin et l'obéissance aux lois naturelles est une soumission à l'ordre divin. La notion de croissance économique a été inexistante.

-La deuxième phase est celle de la révolution industrielle où l'homme domine sur la nature et l'exploite avec toute sa force, donnant ainsi une augmentation spectaculaire de la productivité et une accumulation de ses richesses. Le savoir scientifique s'impose face à la religion, selon Théodore Monod : « la nature devient plus une proie à saccager qu'un capital à ménager ».

-La troisième phase se déclenche lorsque l'homme prend en considération graduellement les risques encourus de cette forte exploitation de la nature et se transforme à un simple usufruitier de la nature soucieux de ses actes à l'égard des générations futures.

La science économique a requiert son autonomie au 18ème siècle. Elle a commencé à porter intérêt aux ressources naturelles à travers ses différents courants de pensée qui étaient différents dans leur comportement avec le milieu naturel.

1.3.1 L'école Physiocratique

L'école physiocratique s'est développée au milieu du 18ème siècle, parmi ses principaux fondateurs, nous citons François Quesnay. Ce dernier a édité le tableau économique en 1758, qui avait schématisé l'économie à cette époque-là et qui était essentiellement basée sur l'agriculture. Quesnay avait considéré les ressources naturelles comme la seule source de richesse. Le Baron Turgot (1707-1781) a éprouvé également un grand intérêt pour la loi naturelle. Cette école de pensée a adopté l'idée que la seule source de productivité fut la terre, insistant sur le fait que la richesse se base sur la production de biens et non pas sur la possession d'or et d'argent. Pour les physiocrates, l'industrie ne fait que transformer la terre, donc elle est stérile en termes de création de richesses.

1.3.2 L'école classique

L'école classique s'est prospérée à la fin du 18ème siècle, elle a donné une nouvelle vision d'apprécier l'importance de la nature et de la richesse. Adam Smith dans son ouvrage « recherches sur la nature et les causes de la richesse des nations » paru en 1776 a montré que l'origine de la prospérité des nations est le travail des hommes. Afin de s'enrichir, il faut prendre en considération trois facteurs à savoir : la division du travail, l'accumulation du capital et la taille du marché. Il ne considère pas le travail comme le seul facteur de production mais montre son importance à l'encontre des physiocrates et des mercantilistes.

David Ricardo et T.R. Malthus avaient fait recours au principe de la rareté de la terre qui est en quantité limitée et au fur et à mesure de sa mise en culture, les rendements décroissent. Cette suggestion était à la base de la théorie de la surpopulation qui prévoit que la population croit à un ordre géométrique tandis que la production agricole ne croit qu'à une progression arithmétique. La rente différentielle de Ricardo adopte aussi ce même principe, elle a un caractère non pas absolu lié au monopole de la terre mais plutôt différentiel lié à la fertilité inégale des terres. Malgré cet intérêt pour les ressources naturelles et surtout la terre, la relation entre l'homme et la nature commence à décliner avec ce courant de pensée. Vallée. A(2002) a souligné qu'avec le développement du marché, une distinction a été créée entre : les ressources naturelles marchandes tel que la terre qui est limitée en quantité et qualité, les matières premières extraites de la nature et les ressources non marchandes ou libres délivrées gratuitement par la nature et ne font pas l'objet d'une analyse économique.

David Ricardo a parlé en 1817 dans son œuvre « des principes de l'économie politique et de l'impôt » des facultés primitives et indestructibles de la terre. Say. J.B (1832) a énoncé que : « Les richesses sont inépuisables, car, sans cela, nous ne les obtiendront pas gratuitement. Ne pouvant être multipliées ni épuisées, elles ne sont pas l'objet des sciences économiques. »

La théorie de valeur qui s'est bien développée avec les théoriciens du capitalisme Adam Smith et David Ricardo a écarté le rôle de la terre dans la constitution de la valeur. Pour eux, l'accumulation de la richesse est entièrement liée à la combinaison du travail et du capital qui, lui-même totalement produit par le travail, d'où le travail est l'unique source de richesse.

L'utilitarisme, qui s'est répandue au 19 ème siècle et qui était fondé sur le principe d'utilité, a élargi l'écart entre l'activité économique et la nature. Adam Smith (1776) avait soutenu la théorie de la main invisible qui, selon lui est un phénomène naturel où tous les individus ne cherchant que leur propre intérêt, participaient spontanément au bien de la société.

Karl Marx, que certains historiens le considèrent comme le dernier des classiques, a souligné l'importance des ressources naturelles dans la combinaison productive avec le travail. Lors de son analyse sur le mode de production capitaliste où la richesse est basée sur l'accumulation de marchandises, Karl Marx (1867) a affirmé que « l'homme ne peut point procéder autrement que la nature elle-même, c'est-à-dire il ne fait que changer la forme des matières. Bien plus, dans cette œuvre de simple transformation, il est encore constamment soutenu par des forces naturelles. Le travail n'est donc pas l'unique source des valeurs d'usage qu'il produit, de la

richesse matérielle, il en est le père et la terre est la mère ». Cependant ce dernier a marginalisé les ressources naturelles non marchandes. Karl Marx a considéré aussi que l'extension de la sphère de la valeur d'échange est en contradiction avec les principes du capitalisme, et entraine la dévaluation de toutes les valeurs étant donné que la valeur absolue du bien qui est normalement indépendante des taux d'équivalence exprimés par les valeurs d'échange sera remplacée par la valeur relative permettant l'échange contre tous. La perte du repère absolu et le fait de rattacher un bien au marché des marchandises constitue le début de sa dépréciation.

Avec cette école de pensée l'hégémonie de la nature et de la loi naturelle avait diminué et les ressources naturelles ne constituaient plus une priorité dans l'analyse économique. Cette attitude va encore s'intensifier avec l'école néoclassique.

1.3.3 L'école Néoclassique

Depuis 1870, les Néoclassiques se sont intéressés à l'étude de l'allocation optimale des ressources rares entre usages alternatifs bien que certains fondateurs de cette école de pensée se sont occupés du milieu naturel et étaient conscients de son importance dans l'activité économique. Nous citons l'exemple de William Stanley Jevons (1865) qui a approuvé des inquiétudes vis-à-vis de l'épuisement des stocks de charbon surtout que la consommation est croissante, suit un ordre géométrique et contrainte par des réserves fixes exploitées à rendements décroissants, aboutissant à l'épuisement des mines et au déclin de la Grande Bretagne au bout d'un siècle.

Avec le principe d'utilité marginale, qui s'est répandue avec William Stanley Jevons dans la « théorie de l'économie politique (1871) », Carl Menger dans « les principes d'économie politique (1871) » et Léon Walras dans « les éléments d'économie politique pure (1874) », l'analyse économique s'est focalisée sur le comportement du consommateur et du concept d'utilité marginale mesurée en termes monétaires et qui est à la base de toute valeur d'un bien. En contrepartie, les néoclassiques ont rejeté de leur champ d'analyse les facteurs naturels considérés comme des biens libres non marchands et hors marché. Le cadre naturel est ignoré depuis qu'il est consommé et n'engendrant plus d'utilité même si que ses résidus sont lancés dans l'environnement. Nous constatons que l'école néoclassique apparait comme un courant de pensée assez mécanique en dichotomie avec le milieu naturel.

1.3.4 La reconnaissance des ressources naturelles par la théorie économique

C'est au début des années 70 que la théorie économique s'est intéressée réellement à l'épuisement des ressources naturelles à la suite des années glorieuses d'expansion économique. Les économistes se sont rendu compte des effets pervers de la consommation excessive des ressources naturelles sur leur épuisement ainsi que sur la croissance économique.

En 1972, le rapport du club de Rome « limits to growth » a diffusé des prévisions inquiétantes sur l'épuisement des ressources naturelles, ce qui a éveillé l'attention des économistes et a permis le retour à des travaux antérieurs tel que l'article de Hotelling (1931) « the economics of exhaustible resources ».

Les ressources non renouvelables sont définies par les stocks d'énergie fossiles (le pétrole et ses dérivées, le gaz naturel, le charbon, l'uranium et les autres combustibles nucléaires) et les minerais (ce sont des roches qui contiennent des minéraux utiles en proportion suffisamment intéressante pour justifier leur exploitation et nécessitant une transformation pour être utilisées par l'industrie). Elles sont constituées suite à des transformations géologiques sur des millions d'années, elles existaient sous forme de stocks finis et leur extraction ne peut pas être renouvelée.

1.3.4.1 Le principe de la règle d'Hotelling

La règle d'Hotelling constitue le point de référence de toutes les analyses relatives aux ressources non-renouvelables, comme renouvelables.

Le modèle d'Hotelling (1931) a considéré la ressource naturelle non-renouvelable comme un actif procurant un revenu au cours du temps. Toutefois cet actif a la particularité d'être épuisable et sa rareté progresse au fur et à mesure de son exploitation, d'où la nécessité de mener une analyse intertemporelle. La problématique posée par Hotelling repose sur un arbitrage statique qui se manifeste dans la question suivante : extraire et vendre ou laisser la ressource en terre et un arbitrage intertemporel : extraire aujourd'hui ou demain.

Dans son analyse, Hotelling est parti d'un certain nombre d'hypothèses à savoir : l'homogénéité de la ressource en qualité, la disponibilité de la ressource en quantité finie et connue et l'indépendance du cout d'extraction de la ressource par rapport à la taille du stock.

L'entreprise exploitante qui cherche à maximiser son profit doit comparer d'une part la valeur d'extraction à la valeur de la ressource en terre et d'autre part le taux de rendement de l'actif naturel aux autres taux de rendement sur le marché des actifs.

Concernant l'arbitrage d'aujourd'hui, la règle de décision est d'exploiter la ressource jusqu'à ce que la valeur d'extraction (Pt –Ct) relative à l'hypothèse extraire et vendre sera égale à la valeur en terre de la ressource λt appelée aussi le cout d'opportunité de l'épuisement de la ressource relative à l'hypothèse ne pas extraire. La condition d'efficacité statique correspondante est que le bénéfice marginal net tiré de la ressource doit être le même quelque soient ses usages. Donc le prix de marché d'une ressource épuisable est supérieur à son coût marginal d'extraction : Pt = Ct+ λt.

λt peut être définie en tant que le coût supplémentaire au-delà du coût d'extraction, égal à la réduction des profits futurs en raison de la moindre disponibilité de la ressource ou plutôt la rente qui provient uniquement du caractère épuisable de la ressource.

Quant à l'arbitrage intertemporel, il est représenté comme suit : extraire et vendre aujourd'hui dans ce cas P_t-C_t = λ_t ou extraire et vendre demain P_{t+1}-C_{t+1} = λ_{t+1}.

Afin de décider, l'exploitant doit égaliser

λt à $\frac{\lambda t+1}{1+r}$ d'où r = $\frac{(\lambda t+1)-\lambda t}{\lambda t}$, c'est la condition d'efficacité dynamique ou la règle d'Hotelling.

A l'optimum, les profits marginaux actualisés de l'exploitant de la ressource doivent être égaux sur toutes les périodes, dans le cas contraire il serait possible de modifier le profil d'extraction pour extraire davantage la ressource lorsque le profit marginal est élevé et moins lorsqu'il est faible. Le profit marginal (Pt-Ct) issu de l'exploitation de la ressource étant égal à la rente de rareté λt. La valeur actualisée de celle-ci doit être constante au cours du temps, donc elle doit évoluer au taux d'actualisation r. A l'optimum, les gains en capital appelés aussi taux de rendement doivent correspondre au taux d'intérêt du marché.

Le principe dans l'économie des ressources non renouvelables est que l'épuisement de la ressource doit suivre un rythme de telle façon que le taux de croissance de son prix net doit correspondre au taux d'intérêt. Pour cette raison, si la valeur en terre de la ressource croit plus vite que le taux d'intérêt, l'exploitant de la ressource a intérêt à décaler l'extraction de la

ressource car elle est considérée dans ce cas comme un placement plus profitable que les actifs financiers.

1.3.4.2 Les extensions du modèle d'Hotelling

Le modèle d' Hotelling a vécu une extension et son application s'est étalée vers la branche d'activité du monopole, de l'oligopole ainsi que du cartel.

- **Le monopole**

En situation de monopole, l'entreprise contrôle à la fois son taux d'extraction et le prix du marché. Toutefois, elle ne peut pas maitriser les quantités achetées à ce prix. Il est évident que le niveau de prix et la quantité demandée sont déterminés dépendamment l'un de l'autre car le monopoleur doit tenir lieu de la demande. La recette marginale est décroissante du prix, plus le prix augmente, plus la quantité diminue et en conséquence la recette marginale diminue.

Le monopoleur va se comporter d'une manière à accroître le prix et réduire la quantité par rapport à la situation de concurrence et pour cette raison que le monopoleur est considéré comme celui qui défend l'environnement. Toutefois, Dasgupta. P et Heal.G.M (1979) ont affirmé que le rythme d'extraction de la ressource dépend de l'élasticité de la demande par rapport au prix et prend en considération la réaction de la demande face à la décision d'extraction. Au fur et à mesure de l'extraction, le prix de la ressource diminue, mais il garde toujours le même raisonnement d'arbitrage. La recette marginale diminuée du cout marginal doit égaler le coût d'opportunité d'épuisement de la ressource. Rmt-Cm= λt avec

$$\frac{(\lambda t+1)-\lambda t}{\lambda t} = r$$

Le revenu marginal décroit avec la quantité et adopte le même comportement du prix sans lui être égale. Rmt = Pt $(1+\varepsilon t)$ avec εt est l'élasticité de la demande par rapport au prix, elle mesure la sensibilité de la demande suite à un changement de prix.

Si εt décroit avec la quantité, le monopoleur sera dans ce cas plus conservateur que le producteur en situation de concurrence, sa durée d'extraction sera plus prolongée et il épuisera plus lentement le stock de la ressource. Hotelling (1931) a montré que dans le cas de monopole, la durée d'extraction de la ressource sera plus éloignée que dans le cas concurrentiel. Toutefois dans le cas contraire, c'est à dire si l'élasticité-prix de la demande est croissante avec la quantité ou bien elle est décroissante avec le temps en cas de substituts

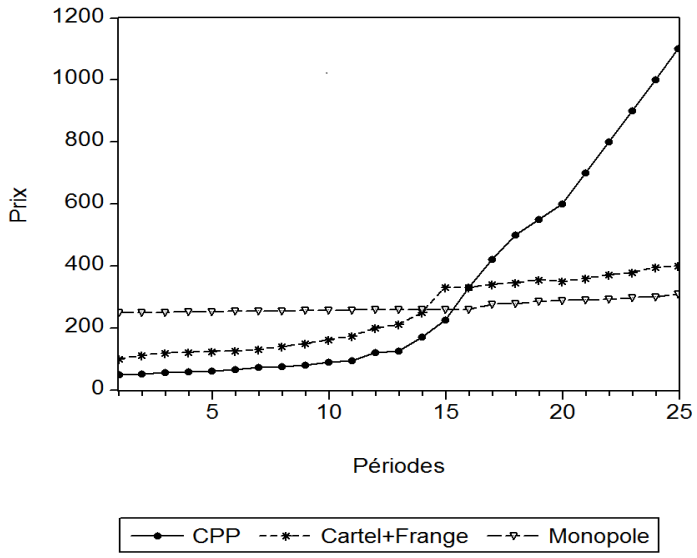
disponibles, le monopoleur dans ce cas sera moins conservateur que le producteur concurrentiel car il est amené à accélérer l'extraction.

- **L'oligopole**

A partir du début des années 70, le modèle initial d'Hotelling a été élargi à la structure du marché d'oligopole, suggéré être plus représentatif de la nature des marchés de ressources naturelles épuisables.

Selon Salant. S.W(1976), la structure actuelle de l'industrie pétrolière au monde ne ressemble guère aux hypothèses posées par la littérature théorique concernant les ressources épuisables. De nombreuses industries extractives en dehors de l'industrie pétrolière comme a réclamé Hotelling ont des structures de marché différentes que celles applicables aux ressources épuisables. Bien qu' Hotelling ait reconnu l'hypothèse de l'oligopole dans les industries extractives, il n'a pas analysé ce cas de figure d'une façon bien détaillée. Son article pionnier était concentré sur le fondement théorique des ressources épuisables selon des cas extrêmes rares qui sont le monopole et la concurrence parfaite. Le cartel est considéré comme une entreprise unique qui domine les autres producteurs en raison de ses grandes réserves. Le prix d'équilibre et les ventes sont déterminés de telle façon à ne donner ni au producteur dominant ni à la frange concurrentielle toute incitation à changer son comportement intertemporel. L'industrie mondiale de pétrole est considérée comme la collection de firmes indépendantes à partir de laquelle les consommateurs achètent le pétrole avec un prix identique. Chaque firme participe au jeu non coopératif de Cournot en admettant que le cout d'extraction est nul, le prix de départ au sein du cartel est plus élevé que celui de la concurrence pure et parfaite, le taux d'intérêt croit à la première phase d'extraction puis finit par diminuer dans la seconde période. Chaque firme maximise son propre profit en prenant en considération la tendance des ventes des autres entreprises et en conséquence le niveau de la production optimal de chaque firme est une fonction décroissante de la production attendue de la firme concurrente. La figure 1.9 ci-dessous explique la variation des prix ainsi que des quantités selon les trois scénarios possibles.

Figure 1.9- Mouvement des prix selon les trois cas de figures de marché des RNE.



Source : Elaboration de l'auteur sur la base des prix estimés selon les trois scénarios.

Gilbert. R.J (1978) quant 'à lui, a décrit le comportement de Stackelberg vis-à-vis de la fixation du prix par une entreprise dominante sur le marché des RNE. Les résultats obtenus diffèrent énormément de ceux qui sont relatifs à une situation de monopole. Il a analysé le modèle de maximisation de profit et la stratégie de marché des ressources épuisables dominées par le cartel. Ce dernier fixe les prix (Price-maker) et il le propose à tous les autres producteurs du marché qui sont des (Price-taker).

Le modèle de Stackelberg admet l'hypothèse d'une ressource unique et homogène. Le montant total des réserves et le prix des produits de substitution sont connus avec certitude. Le commerce et la demande ne modifient pas les activités d'extraction et les objectifs des membres du cartel sont identiques. Gilbert. R.J (1978) s'est intéressé à étudier les interactions stratégiques dans un marché oligopolistique de ressources épuisables en s'inspirant des analyses émouvantes de la concurrence et du monopole de Rothschild. M et Stiglitz. J (1976), Sweeney. J (1974) et Dasgupta. P et Stiglitz.J.E (1975).

Selon ce modèle, l'entreprise dominante prend en compte les autres entreprises dans sa politique de fixation de prix, tandis que toutes les autres entreprises de la frange concurrentielle prennent les prix comme une donnée ou une variable exogène. Ceci semble à la description réelle du marché mondial de pétrole. L'OPEP détient 70% des réserves, pour le reste il n'existe pas une seule firme ou un groupe coordonné des entreprises qui détient tout seul 5% des réserves. Même si que l'OPEP est un exemple frappant d'un cartel dominant, le

modèle décrit par Gilbert. R.J (1978) n'est pas destiné à décrire le comportement du marché pétrolier mondial.

- **L'importance des coûts d'extraction**

Hotelling (1931) a supposé que le coût marginal est constant au cours de la période d'extraction et indépendant du stock. En ce qui concerne la rente de rareté λt, elle évolue selon le taux d'intérêt. Toutefois, si nous considérons que le cout marginal d'extraction est non négligeable, dans ce cas l'évolution du prix sera plus compliquée. Cette complexité provient essentiellement du fait que ce cout est tenu par deux effets opposés :

D'une part le progrès technologique permet de baisser le cout d'extraction marginal et d'autres parts, ce dernier croit avec l'extraction du fait de l'épuisement de la ressource.

Pour mettre en évidence la variation du prix au cours du temps, nous partons de la règle de Hotelling, soit : $\frac{P(t+1)-P(t)}{P(t)-C(t)} - \frac{C(t+1)-C(t)}{P(t)-C(t)} = r$

Nous pouvons écrire $\frac{P(t+1)-P(t)}{P(t)-C(t)} * \frac{P(t)}{P(t)} - \frac{C(t+1)-C(t)}{P(t)-C(t)} * \frac{C(t)}{C(t)} = r$

Ou encore $\frac{(P(t+1)-P(t)) * P(t)}{(P(t)-C(t)) * P(t)} - \frac{(C(t+1)-C(t)) * C(t)}{(P(t)-C(t)) * C(t)} = r$

Si nous considérons $\theta t = \frac{C(t)}{P(t)}$

On déduit alors que $\frac{P(t+1)-P(t)}{P(t)} = \frac{C(t+1)-C(t)}{C(t)} * \theta t + r(1-\theta(t))$

Nous remarquons ainsi que le taux de variation du prix de marché de la RNE peut être déduit comme la combinaison linéaire du taux d'intérêt et du taux de variation du cout marginal (Cm).

Si nous supposons que le cout marginal est constant, dans ce cas le prix de marché varie moins vite que le taux d'intérêt : $\frac{P(t+1)-P(t)}{P(t)} = r(1-\theta(t))$

Si le cout marginal décroit rapidement et qu'il est peu différent du prix ($\theta = 1$), alors

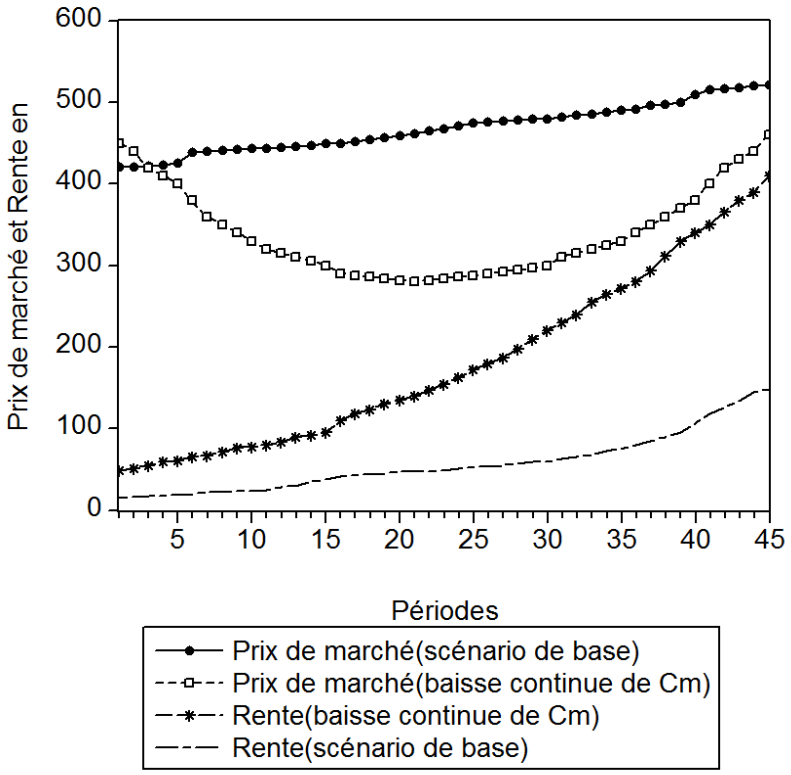
$$\frac{P(t+1)-P(t)}{P(t)} = \frac{C(t+1)-C(t)}{C(t)} < 0$$

Le prix décroit dans un premier temps mais il augmente par la suite étant donné que la baisse du cout marginal prétend qu'il y aura plus de prélèvement prochainement et cette extraction ne fait qu'augmenter la rareté de la ressource et en conséquence augmenter le prix de marché. D'où nous constatons que le prix évolue selon une tendance non linéaire.

Ce même résultat a été affirmé par Slade. M.E (1982). Elle a analysé le mouvement des prix à long terme pour un certain nombre de métaux et d'hydrocarbures pour la période comprise entre 1870-1978 suite à une innovation technologique. Elle a constaté qu'avec un modèle linéaire, la significativité des coefficients a été reprochée d'où nous ne pouvons guère généraliser que la rareté de la RNE suit un modèle linéaire de prix. Toutefois si nous considérons une tendance quadratique des prix, nous révélons trois évolutions caractérisées par une baisse suivie d'une stabilité et finalisée par une hausse.

En appliquant cette analyse à différents métaux, nous remarquons que chaque type de métal suit une tendance spécifique, par exemple l'aluminium a une tendance à la baisse, le zinc est connu par la stabilité de ces prix tandis que le prix de l'étain a évolué vers la hausse. Salde. M.E (1982) a stipulé qu'il ne faut pas penser à ces trois évolutions de prix correspondantes aux différentes catégories de minéraux en tant que trois phases de prix distinctes mais il faudrait plutôt les considérer comme trois phases différentes d'un cycle de vie d'une ressource minérale respective. Le modèle proposé par Slade. M.E (1982), jugé assez simplifié pour analyser l'évolution des prix des différents minerais et métaux suite à un changement technologique, a permis de constater que les prix relatifs correspondants évoluent dans le temps selon une courbe en forme de U. Cette constatation a permis de concilier les prédictions théoriques du modèle de Hotelling qui affirment que les prix relatifs sont destinés à la hausse. La figure 1.10 ci-dessous récapitule la variation des prix d'une RNE suite à la baisse du Cm.

Figure 1.10- Evolution non linéaire du prix de marché suite à une baisse continue de Cm



Source : Elaboration de l'auteur en se basant sur des prix estimés selon les deux scénarios.

- **Les polémiques d'un indicateur de rareté**

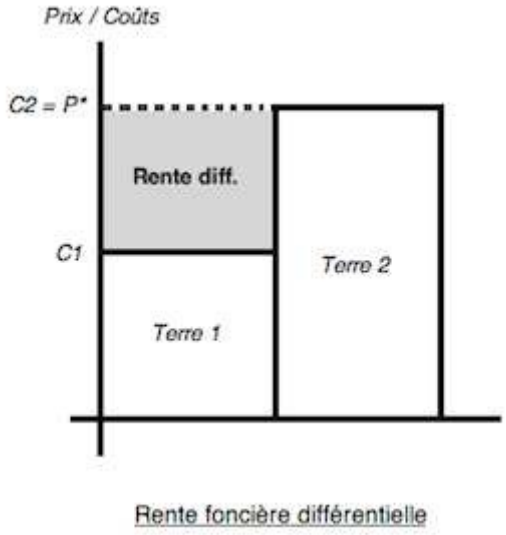
La question de la rareté des RNE a attiré l'attention à plusieurs reprises tout au long de l'histoire du secteur industriel. Elle a été discutée pour la première fois en 1798 avec les observations de Thomas Malthus[23]. Ce dernier a insisté sur la fécondité de la nature humaine et l'avarice relative de la terre. Les rendements marginaux décroissants constituent un obstacle pour l'économie classique et ont joué un rôle important dans sa vision pessimiste pour les perspectives de la croissance économique. Malthus a écrit à une époque caractérisée par un grand bouleversement social : la population Anglaise croit de plus en plus rapidement et les prix des aliments de base ont augmenté suite à des restrictions sur les importations de céréales. Krautkraemer. J.A(2005) a ajouté que le mouvement des enclosures à l'époque avait incité des milliers de déménager de leurs villes agricoles pour la recherche du travail. Malthus

23
La théorie de la surpopulation de Malthus a été bien décrite précédemment.

n'a pas pu prévoir la rapidité du progrès technologique et la baisse de la fécondité qui ont permis pour une grande partie du monde d'éviter son piège ou son dilemme.

A partir de 1860, l'activité industrielle a exigé de nouvelles ressources énergétiques telles que le charbon et les ressources épuisables qui ont renversé la notion de la seule terre. Ce bouleversement a mis en place la notion classique de la rente foncière. William Stanley Jevons a discuté en 1865 la question de la pénurie des ressources charbonnières dans son œuvre ''The Qoal Questions, 1865''ainsi que la théorie de la rente en 1871 dans ''Theory of Political Economy''. Un débat a été évoqué par les économistes sur le fait que Jevons n'a pas fait de liens entre l'économie des ressources naturelles et la théorie de la rente bien qu'il ait les cartes en main pour le faire. Jevons était convaincu que l'Angleterre ne perdra jamais la totalité de son stock au futur toutefois, son charbon sera plus cher par rapport aux autres régions du monde, l'épuisement chez Jevons est un problème purement économique et non pas physique. D'un côté statique, cette distinction peut être expliquée d'une part par la différence de nature entre le sol et les ressources naturelles. En effet la terre constitue un facteur de production tandis que le charbon et les RNE constituent un output résultant d'une extraction et qui peut devenir par la suite un imput pour l'industrie mais jamais un facteur de production dans le sens strict du terme. Il est donc nécessaire de comparer la terre avec la mine et non pas avec le charbon. D'autre part, une terre possède à un instant 't' un seul cout de production, tandis qu'une mine dispose éventuellement de plusieurs couts d'extraction selon les profondeurs. Cette divergence conduit peut être à des rentres distinctes. D'un côté dynamique, toutes les terres continuent à être exploitées et ce sont les terres les plus fertiles qui offrent une rente en raison des différentiels entre les prix et les couts de production.

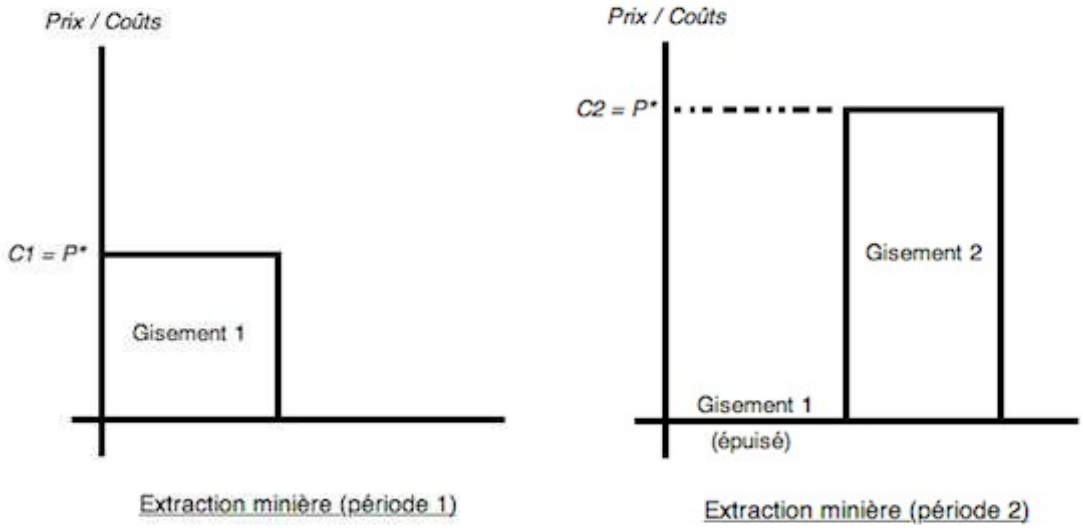
Figure 1.11



Source : Missemer. A (2011), page 13.

La figure 1.11 ci-dessus décrit la rente différentielle observée dans le cas des terres. Cependant pour le cas des mines (voir figure 1.12 ci-dessous), seul le dernier gisement mis en exploitation fournit un output et les autres gisements étant épuisés. Il y'a donc un seul coût d'extraction qui ne permet pas de faire apparaitre une rente différentielle.

Figure 1.12



Source : Missemer. A (2011), page 14.

La montée des prix pétroliers vécue sur le marché est due essentiellement à la réaction des compagnies pétrolières agissant en cartel qui refusent l'accroissement de leur production, ce qui entraine la hausse des prix et rend rentable l'exploitation des gisements les moins

accessibles dont les couts de production sont élevés. C'est donc en raison du comportement concurrentiel dû à une certaine rétention de l'offre que les couts de production sur le marché pétrolier sont différents et donnent l'opportunité à avoir une rente ou plutôt un surprofit d'oligopole. Nous constatons alors que c'est le comportement concurrentiel qui est à l'origine de la rente et non pas les spécificités des ressources épuisables. Cette étude confirme bien que la distinction que Jevons avait établie au cours du 19 ème siècle n'était pas aléatoire mais raisonnée et bien justifiée.

L'approche économique trouve une ambiguïté dans la fixation d'un indicateur de rareté et de le quantifier. Rotillon. G (2005) a indiqué que les économies trouvent des difficultés dans l'évaluation des stocks de ressources naturelles et que l'exploitation d'une telle ressource ne sera configurée que si elle est rentable.

- **Les indicateurs de rareté**

L'analyse économique a proposé trois indicateurs de rareté à savoir : le cout d'extraction, le prix de marché et la valeur en terre ou prix implicite de la ressource ou encore le cout d'usage. Cependant beaucoup de critiques ont été soulevées à ce propos.

Le premier travail empirique des tendances historiques de la rareté et de la croissance fut avec Barnett. H.J et Morse. C (1963), qui ont examiné les hypothèses de la rareté pour une variété de ressources naturelles qui sont : les minéraux, les sols, les forêts et la pêche pour la période 1870-1958 aux Etats-Unis. Sauf le cas des forets a enregistré une rareté croissante tandis que les autres ont vécu en général une baisse dans leur tendance de rareté.

Barnett. H.J et Morse. C (1963) et Barnett. H.J (1979) ont confirmé que la rareté des ressources n'a pas menacé la croissance économique et en conséquence elle ne constitue pas un obstacle comme certains ont annoncé. Smith. N (1979) s'est intéressé ainsi à la relation entre la rareté et la croissance à un moment où la préoccupation est accrue pour les ressources naturelles et l'environnement. Les prix des ressources naturelles ont augmenté et essentiellement les prix des énergies fossiles. Adelman. M.A (1990) a confirmé que le prix mondial de pétrole et les changements survenus depuis 1973 ne peuvent pas être expliqués par la rareté ni par les changements dans la rareté des ressources. Il a montré que les indicateurs économiques mesurent l'information disponible du moment sur la rareté, mais ne permettent pas de prévoir les évolutions futures.

i. Le coût d'extraction

L'exploitation des RNE entraine des couts d'extraction qui augmentent au fur et à mesure de l'exploitation, donc à priori il s'avère que le cout d'extraction et la rareté varient dans le même sens. Barnett. H.J et Morse. C (1963) se sont concentrés principalement sur le cout d'extraction qui est calculée comme la somme du capital et du travail nécessaire pour produire une unité d'output. Cette mesure est fondée sur la vision de l'économie classique qui prévoit, qu'avec des rendements marginaux décroissants et des ressources naturelles limitées, le cout d'usage des ressources naturelles doit augmenter selon la hausse de la demande et l'épuisement, tandis que la tendance à l'augmentation des couts d'extraction peut être compensée par le progrès technologique.

La période d'étude qui s'est étalée entre 1870 et 1985 a été spécifique aux Etats-Unis, elle a été caractérisée par un fort développement de la population et une économie en croissance. Barnett. H.J et Morse. C (1963) ont affirmé que les données étudiées ont abouti à des résultats qui ne coïncident pas avec la croissance de la rareté des ressources. Le cout d'extraction unitaire pour la production minérale a baissé significativement, le même cas pour la pêche commerciale et l'agriculture. Seul le cout d'extraction forestière unitaire a augmenté et il tend à se stabiliser après 1920. Les couts estimés des industries de ressources naturelles ont été mises à jour par Barnett. H.J (1979) dans ''Scarcity and Growth Reconsidered'. Cette étude a abouti au même résultat. D'autres économistes ont constaté une hausse statistiquement significative du cout d'extraction du charbon et de pétrole aux Etats Unis dans les années 70. Selon Hall. D.C et Hall. J.V(1984), cette tendance à la hausse du cout d'extraction est due au pouvoir de marché plutôt qu'à une variation de la rareté. Toutefois, Tietenberg. T.H (1984) a critiqué le cout d'extraction employé par Barnett. H.J et Morse. C (1969), qui ne prend en considération que le capital et le travail tandis que les autres intrants énergétiques des biens d'équipements au cours de la même période d'étude ont été négligés.

Toutefois, le progrès technique fait baisser le cout d'extraction tandis que la rareté continue à augmenter donc cet indicateur ne reflète plus la rareté. De plus, les couts d'extraction peuvent augmenter tandis que la rareté décroit avec l'incorporation de nouveaux substituts. En effet, si la RNE atteint un prix plafond appelé (choke price), une possibilité de faire recours à des substituts est favorable surtout que le prix plafond constitue un parapluie qui protège le nouveau substitut qui s'adhère au début de son cycle de production avec des prix aussi élevés mais qui diminuent suite à son développement.

Barnett. H.J et Morse. C (1963) ont souligné également que le cout d'extraction n'intercepte l'information que du côté de l'offre, alors que la rareté peut aussi augmenter du fait d'une augmentation de la demande plus rapide que le déclin des coûts. En effet, la forte demande induit à l'exploitation des gisements les moins attrayants qui sont plus difficiles à extraire et engendrent des couts assez élevés. La baisse de la demande ne diminue pas non plus les couts d'extraction parce que les gisements les plus attrayants et dont l'accès est plus facile sont déjà totalement épuisés. Donc dans tous les cas de figures, le cout d'extraction peut biaiser le sens de la rareté et en conséquence il n'est pas un bon indicateur.

ii. Le prix de marché

Le prix de marché est la somme du cout direct d'extraction et du cout d'opportunité. Selon Devarajan. S et Fisher. A.C (1979), la mesure de la rareté de la ressource devrait obéir à une propriété essentielle, qui est de contenir les couts directs et les couts indirects qui sont engagés pour obtenir une unité de la ressource, car le prix permet de capturer à la fois le cout d'usage et le cout d'extraction actuel. Northaus. W.D et Tobin. J (1973) ont affirmé que la croissance économique est limitée par le fait que les ressources naturelles sont épuisables, les ressources énergétiques est un cas d'examen des ressources susceptibles de rareté. Northaus. W.D et Tobin. J (1973) ont attesté que les prix qui sont exprimés différemment sont en réalité des indicateurs appropriés de la rareté compte tenu des préférences et des dotations initiales de la société. Ils ont distingué entre les couts d'extraction, le cout marginal par unité et la royaltie. Cependant leur travail a été critiqué par plusieurs économistes.

Smith .N (1979) a analysé la tendance des prix relatifs de quatre groupes de ressources qui sont similaires à ceux de Barnett. H.J et Morse. C (1969) en excluant les produits de la pèche. Il a conclu que seul le prix forestier est en hausse. Il a déduit le même résultat que celui du cout d'extraction. Mais il a étendu son analyse en faisant recours aux statistiques de Brown-Durbin et Quandt pour s'assurer de la stabilité des coefficients. Il a déduit que ces séries de prix sont instables. A l'issu de ces résultats, Smith. N (1979) a conclu qu'il est difficile de juger d'une tendance quelconque et en conséquence d'une rareté croissante des ressources. Il a relié cette instabilité aux modifications dans la composition des groupes agrégés de ressources ainsi qu'aux changements économiques et institutionnelles qui ont influencé la société Américaine au cours de la période d'étude. Toutefois, le prix de marché peut évoluer suite à la structure de marché adoptée ou à des anticipations pour la consommation future dans certains pays du monde sans pour autant avoir une liaison avec la rareté. De plus, les

chocs pétroliers vécus n'étaient pas liés à un accroissement de la rareté mais plutôt dus à des questions d'offre, de production, de demande, de raffinage, des raisons géopolitiques ou climatiques mais aucune liaison avec la question d'épuisement des ressources.

Sullivan.D.E et al (2001) ont souligné qu'au 20 ème siècle, pour la majorité, la tendance des prix des ressources naturelles était constante ou avait baissé. Ceci est particulièrement vrai pour les prix des minéraux. Salade. M.E (1982), a indiqué que pendant une bonne période du temps, de nombreux prix des ressources naturelles essentiellement le cuivre, le fer, le nickel, l'argent, l'étain, le charbon, le gaz naturel et les minéraux ont montré une tendance à la hausse. Presque tous les prix ont augmenté après l'embargo pétrolier de 1973, ceci ressemble à la courbe en U dans le cas de la baisse des couts d'extraction suite à l'implantation d'une nouvelle technologie d'où le choix du prix de marché comme un indicateur de la rareté est sans doute biaisé.

iii. La Rente de rareté

La valeur en terre est un bon indicateur de rareté cependant elle est soumise à plusieurs contraintes. D'une part, elle s'appuie sur un arbitrage absolu renvoyant aux possibilités futures, or l'arbitrage dépend de l'information dont possèdent les agents sur ces possibilités. Donc la valeur en terre est un indicateur de rareté conditionnel à l'état des connaissances et non pas absolu. D'autre part, il n'est pas observable directement. Pour en dépasser cet obstacle, nous nous référerons aux prix auxquels s'échangent les réserves, or peu de transactions s'écoulent de cette façon. Nous pouvons proposer comme indicateur de la valeur en terre, le cout des activités d'exploration, hors l'exploration n'est mené que seulement si le bénéfice marginal est positif. Toutefois, ce dernier constitue en lui-même un indicateur de rareté. Devarajan. S et al (1982), ont proposé la rente de la ressource pour mesurer la rareté des ressources naturelles, ils se sont intéressés au vieux controverse qui n'a pas cessé d'ailleurs et qui se présente comme suit : si les ressources naturelles constituent une limite à la croissance, alors il y aura un problème avec la rente de la terre qui est jugé l'indicateur préféré étant donnée qu'elle est inobservable. Devarajan. S et al(1982) ont développé un modèle d'exploration et d'extraction qui suggère un lien étroit entre la rente et le cout supplémentaire engagé pour retrouver une unité de ressource. En se référant au comportement des couts d'exploration de pétrole et de gaz dans le contexte Américain, certaines preuves ont indiqué que ces couts ont augmenté sensiblement au cours de la période 1946-1970 tandis que d'autres indicateurs utilisés pour exprimer la rareté ont annoncé une abondance importante de

certaines ressources. Devarajan. S et al(1982) ont pris en considération aussi dans leur analyse le principe de l'incertitude et son effet sur les décisions d'exploration et d'extraction. Storelly. K.R (1983) a appliqué le modèle d'épuisement de Hotelling pour le cas particulier de l'industrie du nickel en faisant recours à la rente de la ressource par tonne de nickel comme indice de rareté de la ressource exploitée. L'évolution de la rente dans le temps a indiqué que le modèle utilisé explique bien le comportement de l'industrie de nickel et que l'épuisement de la ressource est un déterminant important des prix et de la rente dans cette industrie.

D'une manière générale, il s'avère qu'il n'existe pas un indicateur de rareté parmi les trois proposés ci-dessus qui est incontestable, la raison pour laquelle les travaux empiriques ont incité à utiliser conjointement les indicateurs proposés par la théorie économique.

Un changement significatif a dominé le débat sur la rareté économique des ressources naturelles ces dernières années qui s'est manifesté essentiellement dans les effets environnementaux des ressources épuisables et de la croissance qui s'avère être plus important que la hausse même de la rareté. En effet, le succès historique de l'adaptation des produits des ressources naturelles à la hausse de la demande d'une population en croissance grâce à l'innovation technologique et l'ingéniosité humaine ne constitue en aucun cas une garantie pour le succès au futur.

- **L'incertitude**

La théorie économique de la firme des ressources extractives non renouvelables a été fondée jusqu'à récemment sur l'hypothèse de la certitude. Or l'activité d'exploration a pour objectif la recherche et l'acquisition d'informations sur les caractéristiques de nouvelles réserves. Ces dernières sont soumises à une grande incertitude et s'ajoutent à un stock existant dont les caractéristiques sont connues avec certitude. Gilbert. R (1976) a stipulé que : « lorsque la distribution des coûts des gisements est connue et lorsque l'exploration ne procure aucune information additionnelle concernant les caractéristiques du stock de la ressource, le processus de localisation et ensuite d'extraction est simplement une technique de production alternative à l'extraction à partir de gisements déjà identifiés».

La littérature du secteur minier est divisée en deux courants en ce qui concerne la présence d'incertitude. Le premier recommande un horizon minier plus long et une capacité initiale d'extraction plus petite qu'en régime de certitude. Browne. R (1907) a affirmé qu'il est plus opportun de minimiser le capital fixe au début de la phase d'extraction afin d'atténuer les

risques et au fur et à mesure que le processus d'extraction sera bien engagé, l'entreprise exploratrice peut étendre son capital, cette stratégie permet de prolonger la vie du gisement. Hoover. T.J (1948) a expliqué cette politique par le fait que les investisseurs montrent une certaine hostilité par rapport au risque et optent pour l'investissement dans des mines où les réserves sont sures avant de commencer l'extraction. Ce phénomène sera alors assuré sur plusieurs années.

Paish. F.W (1938) a intégré l'exploration dans son analyse de l'offre d'or et a insisté sur son caractère aléatoire qui influence l'offre de minerai à long terme. Il a souligné trois sources d'incertitude qui sont : le contenu de la mine, les couts futurs des facteurs de production et finalement le prix à venir. Ces facteurs d'incertitude empêchent la mine d'atteindre la taille optimale envisagée en certitude et sa durée de vie sera prolongée.

Le deuxième courant prévoit un horizon plus court et un taux d'extraction plus rapide qu'en régime de certitude. Les spécialistes du domaine minier ont prévu cette hypothèse parce qu'ils estiment que le sentier optimal d'extraction est proche du présent, la capacité de production est accélérée et le cycle de vie de la mine est rétrécie. Dans sa politique recommandée à l'extraction, Hoover. H.C (1909) a réclamé qu'il faudrait adopter une production maximale par période étalée sur un nombre minimum de périodes.

Herfindahl. O.G (1959) a proclamé que l'industrie minière est similaire à l'industrie manufacturière même avec la présence de l'activité d'exploration et du facteur d'incertitude. Le niveau de stock, le profit attendu ainsi que la force d'exploration sont liés à l'aide d'une relation systématique et non pas aléatoire qui tend vers l'équilibre à long terme suite à la compensation des risques individuels. Fisher. F (1964) est le premier qui a établi une étude économétrique exhaustive de l'activité d'exploration en introduisant le taux de succès de sondage comme une variable liée à l'incertitude. Il a montré que la relation entre l'effort d'exploration et sa rentabilité en termes de réserves est assez compliquée et modifiable suite à des facteurs économiques. Il a ajouté que l'offre de l'activité d'exploration est plus sensible au prix que l'offre de la ressource elle-même et ceci à cause de la sensibilité du taux de succès ainsi que la taille moyenne des réserves découvertes au prix. Dasgupta. P et al (1974) ont considéré que la découverte d'un nouveau gisement de la même ressource est un substitut et l'incertitude se manifeste non pas dans l'existence de ce substitut mais plutôt au moment de sa disponibilité. Pour établir leur analyse, ils ont supposé certaines hypothèses restrictives et un taux d'exploration plus élevé que celui en cas de certitude. Ils ont conclu que le fait

d'augmenter le taux d'exploration n'est pas justifié si l'incertitude sur la date à venir de la découverte peut être perturbée par des faits comme l'appropriation d'informations supplémentaires.

Gilbert. R, Kemp. M.E et Loury.G.G (1976) ont stipulé que l'allocation concurrentielle n'était pas optimale qu'il ait ou non une activité d'exploration. Ceci s'explique par le fait que les réserves détenues par les firmes ne sont connues qu'au moment de leur consommation totale. En conséquence, les contrats à terme relatifs à l'état de la nature de ces réserves n'ont aucun sens parce qu'ils dépendent des actions des agents, d'où l'existence d'un problème de risque moral. De plus, les probabilités que les consommateurs déterminent les livraisons à venir ne sont pas exactes et doivent être révisées à chaque date selon l'information du non épuisement de la ressource. Les agents préfèrent alors établir leurs échanges après la date limite du marché. Les firmes pourraient également truquer en cédant des contrats à terme sur leurs avoirs en ressources dont ils sachent déjà qu'ils sont épuisés.

A partir de cette traversée théorique, nous remarquons que la formulation d'une théorie économique exhaustive de l'exploration est assez ambiguë et que la prise en compte de l'incertitude n'est pas si simple. Si nous adoptons cette dernière solution, les résultats obtenus sont précis à la période initiale de l'exploration mais par la suite ils deviennent généraux et confus.

1.4Le débat théorique autour de la relation énergie-croissance

L'énergie est considérée comme un bien de consommation finale ou de consommation intermédiaire qui joue un rôle important dans les mécanismes de production. La relation établit à un moment donnée entre la consommation d'énergie primaire et le PIB varie dans le temps et dans l'espace suite à l'interférence de plusieurs facteurs politiques, technologiques, structurels, réglementaires ou climatiques. Afin de comprendre les relations entre les ressources naturelles y compris les ressources énergétiques et l'économie, il fallait reconnaître l'énergie ainsi que les matières premières en tant que facteur de production. Perçebois. J (1978) a stipulé que la relation énergie-croissance est discutée au niveau global à l'aide des élasticités et au niveau sectoriel à l'aide des coefficients d'intensités énergétiques.

Pour mieux comprendre les déterminants de la demande d'énergie dans le mécanisme du développement, il faut faire recours à la fonction de production qui est représentée comme

étant l'expression mathématique des relations qui, à un moment donné, peuvent être mises en évidence entre le PIB ou la valeur ajoutée et l'ensemble des facteurs de production[24].

Au cours des années 70, la nécessité d'expliquer la relation entre la tendance des ressources naturelles y compris les ressources énergétiques et l'économie a incité à intégrer l'énergie (E) puis les matières premières (M) en tant que facteur de production d'où l'apparition des fonctions de production KLE (capital, travail et énergie) ou KLEM (capital, travail, énergie et matières premières). Ces facteurs peuvent être combinés dans des proportions variables dans le temps et dans l'espace sous l'effet du progrès technique et en fonction du niveau de prix de chacun d'eux. Certains prévoient une complémentarité rigoureuse entre ces facteurs, d'autres suggèrent une substituabilité partielle ou quasi parfaite. Ces fonctions étaient à l'origine des modèles macro-énergétiques développés au cours des années 80. Nous citons l'exemple du modèle «Hermès » qui a été développée par la CEE dont l'objectif est de décrire la demande de l'énergie et toutes ses interactions avec l'économie, le modèle Français « Mélodie » réalisé par le centre d'énergie atomique entre 1980 et 1983 et revu en 1986.

1.4.1 Typologie des fonctions de production de type K.L.E.M

Pour prendre en considération les différentes interactions entre les divers facteurs de production, Perçebois. J et Girod. J (1981) ont proposé dans leur étude trois types de fonctions.

Des fonctions « putty-putty » qui supposent une substituabilité parfaite ex ante et ex post entre les facteurs de production. Nous retenons comme prototype la fonction de type Cobb Douglas qui postule une substituabilité parfaite entre l'énergie, le capital et le travail, voire les matières premières. Le choix de la combinaison productive se fait en fonction des prix relatifs des divers facteurs. La fonction Cobb Douglas peut s'écrire à un niveau macro-économique sous la forme suivante :

$$Y= A.K^{\alpha}.L^{\beta}.E^{\partial}$$

24
La présence des facteurs de production a été le sujet d'un débat économique, par exemple les classiques prévoient que le travail est le facteur essentiel de la prospérité des nations et afin de s'enrichir il faut prendre en considération trois facteurs à savoir : la division du travail, l'accumulation du capital et la taille du marché, d'autres comme les néoclassiques retiennent plusieurs facteurs de production et insistent sur la productivité de chacun d'entre eux.

Où Y représente le PIB, K le stock de capital, L la quantité de travail, E la quantité d'énergie et A un facteur de dimension caractéristique de l'économie. Les éléments α , β et σ correspondent aux élasticités de la production par rapport au capital, au travail et à l'énergie respectivement.

$$\alpha = \frac{\frac{\partial Y}{Y}}{\frac{\partial K}{K}} \; ; \quad \beta = \frac{\frac{\partial Y}{Y}}{\frac{\partial L}{L}} \quad \text{et} \quad \sigma = \frac{\frac{\partial Y}{Y}}{\frac{\partial E}{E}}$$

Cette fonction est généralement soumise à des rendements d'échelles positifs mais décroissants[25] et à des rendements d'échelle constants ($\alpha + \beta + \sigma = 1$). Cette fonction est supposée simple à manipuler toutefois elle est peu réaliste et ne prend pas en considération l'indivisibilité des équipements et la rigidité technologique. Lors des phénomènes de mécanisation et d'automatisation des processus productifs, l'énergie et le travail peuvent être substitués l'un à l'autre et nous constatons d'ailleurs que la substitution de l'énergie au travail requiert de même une substitution du capital au travail. L'énergie et le capital peuvent être aussi substituables même si la relation de complémentarité l'emporte parfois et ceci en cas de possession de machines gaspilleuses d'énergie et couteuses, nous procédons à les remplacer par l'énergie bon marché. Cette décision est économiquement justifiée en période de bas prix d'énergie. Par ailleurs, au cours de la période 1960-1975, une forte substitution capital-travail a dominé les pays industrialisés et a exigé l'usage d'équipements à forte intensité énergétique et en conséquence une élévation du contenu énergétique de l'activité économique. Toutefois, les substitutions inter-énergétiques (remplacer une énergie par une autre énergie plus efficace) peuvent entrainer ou du moins accélérer la substitution capital-énergie. Nous changeons parfois d'équipement donc du capital pour l'incorporation d'une énergie même si en pratique c'est le changement d'équipement qui oblige l'instauration d'une nouvelle énergie. Il reste discutable de joindre toute la responsabilité des substitutions entre les facteurs aux seuls prix relatifs. Les variations de prix sont une condition nécessaire aux substituons mais n'est pas la seule, il y'a d'autres facteurs qui viennent s'imposer entre la demande d'une forme d'énergie et son prix telle que les équipements qui complexifient cette relation. D'où la relation énergie-capital doit être analysée avec plus de précaution.

25
Des rendements marginaux positifs mais décroissants signifie que $\partial Y / \partial K > 0$ et $\partial^2 Y / \partial^2 K < 0$

Faucheux. S (1990) a ajouté que le recours à ces fonctions (avec une élasticité de substitution constante) dans les modèles macro-énergétiques mène vers des conclusions précipitées et non nuancées en ce qui concerne la substituabilité partielle ou totale du facteur énergie. Ces modèles s'alignent avec la théorie traditionnelle de la « back stop technology » qui suppose qu'il existe une technologie pour chacune des énergies capable de fournir les services des systèmes d'énergie traditionnels avec des couts constants , de telle façon qu'à une certaine date la ressource est substituable d' une façon illimitée à un certain prix.

Face à la substituabilité parfaite de la fonction Cobb-Douglas, les fonctions « clay-clay » qui supposent une stricte complémentarité entre l'énergie et les facteurs de la production viennent de s'installer, la fonction de Leontief est le meilleur prototype, elle est formulée comme suit :

$$Y = \frac{K}{V} = \frac{L}{U} = \frac{E}{W}$$

Avec V, U, W sont respectivement le coefficient de capital, l'intensité en main d'œuvre et l'intensité énergétique de la production. La fonction de Leontief se caractérise par sa rigidité totale au niveau de la combinaison des facteurs de production, elle se situe à court terme et ignore les substitutions entre les facteurs qui peuvent exister avec le temps et avec le progrès technique. Pour pallier à ce handicap sans pour autant tomber dans la substituabilité parfaite, nous faisons recours aux fonctions « clay-clay » à générations de capital. Ces dernières permettent de retenir des coefficients fixes entre capital et travail d'une part et entre capital et énergie d'autres part. Toutefois, cette fixité ne concerne qu'une seule génération donnée d'équipement et les coefficients peuvent varier d'une génération à une autre. Son avantage par rapport à la fonction Cobb-Douglas est qu'elle réintroduit explicitement la structure du capital et tient compte de l'hétérogénéité qui caractérise à un moment donné l'appareil productif ainsi que son évolution. Elle permet aussi de visualiser l'accumulation d'un certain nombre de strates qui représentent des combinaisons entre le capital, le travail et l'énergie. Elle suppose la disponibilité d'une masse importante d'informations statistiques se rapportant aux techniques disponibles, aux investissements réalisés à chaque période et à la façon dont ces équipements se comportent au cours du temps en particulier les phénomènes de vieillissement et d'obsolescence. Cependant, ce type de fonctions élimine toute substitution ex ante au niveau de chaque génération de capital, autrement dit il n'existe aucun degré de liberté au niveau de la combinaison productive à un moment donné.

Une seule technique est imposée alors même que la réalité oblige qu'une certaine marge de manœuvre existe étant donné qu'un industriel dispose au moins de deux ou trois techniques pour élaborer à un moment donné un produit déterminé.

La solution peut résider dans les fonctions « putty- clay » qui supposent une substitution ex ante entre les divers facteurs de production mais refusent toute substitution ex-post. Ces fonctions proposent une marge de manœuvre au départ concernant la combinaison productive et le choix technique dépendra du niveau des prix relatifs des divers facteurs et des anticipations faites par le décideur quant à l'évolution de ces prix. Mais une fois réalisé, le choix de la technique de production est irréversible.

Pour ces fonctions, les possibilités de substitution entre facteurs ne concernent que la nouvelle génération d'équipements à installer. Elles permettent de réintroduire dans le processus productif des choix différenciés d'intensité capitalistique et d'intensité énergétique au moment où un renouvellement ou une extension du parc d'équipements est décidée.

D'une manière générale, les fonctions de type Cobb-Douglas ainsi que type Leontief sont difficiles à être opératoires réellement. Elles demandent une plateforme de données assez exhaustive et nécessitent des calculs complexes, ce qui légitime le recours aux fonctions globales CES (Constant Elasticity of Substitution) nommées aussi S.M.A.C relativement à leurs fondateurs (Solow, Minhas, Arrow et Chenery). Ce passage est jugé comme un pas important vers la détente des deux hypothèses lourdes de substituabilité parfaite et de la complémentarité rigide.

Les CES se caractérisent par une élasticité de substitution constante de même valeur quel que soit la combinaison des facteurs prise en compte, qui ne varie pas en fonction de changement de prix mais seulement avec la technologie sous-jacente à la fonction de production. D'où le critère d'élasticité de substitution qui permet de distinguer complémentarité ou substituabilité se révèle complétement inexploitable.

Avec le début des années 70, une importante controverse a opposé d'une part Brendt. E.R et Wood. D.O (1979), Brendt .E.R (1976) et Jorgenson. D.W (1973) qui ont supporté le principe de la complémentarité entre l'énergie et le capital et d'autres parts Griffin. J.M (1977) ainsi que Pindyck. R.S (1977), qui ont adopté une substituabilité parfaite entre ces deux facteurs de production. En conséquence et afin de réconcilier cette contestation, les fonctions de production de type VES (variable Elasticity of Substitution) ont pris le devant de la scène. Ces

dernières ne posent aucune contrainte à priori sur les élasticités de substitution entre facteurs. Parmi elles, les plus utilisées sont les fonctions translog (fonction duale transcendentale logarithmique) qui sont strictement croissantes et deux fois différentiables. En tenant compte du théorème de dualité de Samuelson-Schepard, la fonction de cout translog peut prendre la forme suivante : $\ln C = \ln\alpha_0 + \ln Y + \sum_i \alpha_i \ln p_i + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j b_{ij} \ln p_i \ln p_j$

avec i,j=K,L,E,M ; Y est l'output et p est le prix des facteurs de production (cas d'une fonction de production associée homogène de degré 1. Les fonctions translog permettent de tester économétriquement les relations qui peuvent s'établir entre l'énergie et le capital selon les branches et les époques sans pour autant exiger le calcul statistique qui rejoint les fonctions à générations de capital. Comparée aux deux autres formes de fonction de production CES, Cobb-Douglas et Leontief, la fonction translog représente avec plus de précision la réalité. Le facteur énergie n'est plus susceptible d'être remplacé d'une façon illimitée par le capital et sa présence au sein de la fonction de production n'est plus provisoire.

Toutefois, les résultats encourus suite aux analyses empiriques des fonctions « translog » sont contradictoires étant donné que certaines parmi elles renvoient à la substituabilité tandis que d'autres aboutissent à la complémentarité. Perçebois. J (1999) a souligné que Brendt et Wood (1979) ont expliqué théoriquement l'origine de ces divergences qu'ils estiment qu'elles sont dues essentiellement à la façon avec laquelle le problème de la séparabilité au niveau de la fonction de production et de la fonction de cout a été traité. Ils ont insisté sur le fait qu'il ne faut pas confondre la substituabilité technique brute et la complémentarité économique nette. En fait le capital et l'énergie peuvent être des substituts bruts sur le plan technique mais sont plus probablement des compléments nets sur le plan économique.

1.4.2 Les fonctions de demande d'énergie issues des fonctions de production

Les fonctions de demande d'énergie sont généralement issues des fonctions économétriques, le recours à des modèles de demande d'énergie de type E= f (Y, p) avec Y le niveau d'activité ou le revenu et p le prix de l'énergie permet de vérifier empiriquement la corrélation entre le niveau d'activité économique et la consommation d'énergie d'une part, et entre cette dernière

et le niveau des prix d'autres part. Nous pouvons faire le recours aux élasticités-revenu présentées par $\varepsilon r = \frac{\frac{\partial E}{E}}{\frac{\partial Y}{Y}}$ et élasticités prix de la forme $\varepsilon p = \frac{\frac{\partial E}{E}}{\frac{\partial p}{p}}$

En incorporant une variable intermédiaire fondamentale, qui est le taux d'équipement des différents usagers, la décomposition de la variation du contenu énergétique du PIB en deux sous-groupes différents se présente comme suit :

$$\Delta(\frac{énergie}{PIB}) = \Delta(\frac{énergie}{tauxd'équipement}) * \Delta(\frac{tauxd'équipement}{PIB})$$

De même, l'élasticité prix de la demande d'énergie peut être décomposée de la même façon :

$$\Delta(\frac{énergie}{prix}) = \Delta(\frac{énergie}{tauxd'équipement}) * \Delta(\frac{tauxd'équipement}{prix})$$

Cette décomposition peut expliquer d'une part la sensibilité du taux d'utilisation des équipements au prix de l'énergie et d'autres parts la sensibilité de la demande d'énergie au taux d'utilisation des équipements disponibles. La flambée du prix de l'énergie influence la façon avec laquelle nous nous comportons vis-à-vis des équipements déjà disponibles et sur la décision de modifier l'équipage existant. L'incorporation de l'énergie dans la fonction de production au même titre que le capital et le travail permet de donner une assise analytique robuste aux fonctions de demande d'énergie qui résulte d'un comportement optimal de minimisation des couts de production sous une contrainte de production. Perçebois. J (1991) a indiqué qu'on associe à chaque fonction de production une fonction duale de cout correspondante afin de contourner les différentes fonctions de demande d'énergie susceptibles à être opérées.

Un grand débat s'est instauré à propos des fonctions de demande d'énergie au moment des chocs pétroliers entre les partisans d'une approche économétrique et ceux qui soutiennent la démarche technico-économique. Réellement, les deux approches sont complémentaires et le recours à l'économétrie demeure indispensable dans certains cas complexes. Le recours à la technique de cointégration d'Engle et Granger (1987) ainsi que le modèle de Johansen (1991) a permis d'aboutir à des relations d'équilibre à long terme. La technique des mécanismes à

correction d'erreur a rapporté également une dynamisation utile à la prévision. Les approches économétriques sont actuellement tout à fait pertinentes et capables de prendre en considération les ruptures dans les évolutions suite à des chocs et reflètent convenablement la réalité. Perron. P et Vogelsang. T.J (1992) ainsi que Zivot. E et Andrews. K (1992) ont introduit une variable muette pour prendre en considération la rupture qui peut caractériser une telle série.

1.4.3 Le débat autour de la relation énergie-progrès technique

L'analyse des élasticités de substitution relie directement les quantités aux prix et exclue le progrès technique bien qu'il semble non raisonnable de joindre toutes les réflexions et en conséquence les décisions au seul facteur prix. L'incorporation du progrès technique se renforce encore si on est dans le cas d'une analyse à long terme de la relation énergie-croissance-environnement. Afin de prendre en considération la technologie dans la fonction de production qui inclut déjà le facteur énergie, il ne suffit pas de se contenter des technologies déjà existantes, il faut intervenir le progrès technique afin d'ajouter une dynamique à la fonction de production.

Afin de tester la capacité des fonctions de production qui incluent déjà le facteur énergie à prendre en compte le progrès technique, nous devons distinguer entre l'origine du progrès technique et ses effets.

1.4.3.1 La prise en compte de l'énergie comme origine dans l'analyse du progrès technique

Faucheux. S (1990) a affirmé que la croissance de la production au fil du temps n'est pas expliquée seulement par l'accroissement quantitatif des facteurs de production, il faut intégrer un facteur supplémentaire noté (t) qui représente le progrès technique autonome qui se manifeste au cours du temps et qui réunit tout ce qui permet d'accroitre la production nationale en tenant constante la productivité des facteurs de production. Il apparait comme le résidu exogène du taux de croissance de l'output qui ne peut pas être expliqué par les taux de croissance des inputs. Avec ces conditions, la présence du facteur énergie est neutre et avec l'incorporation du progrès technique au capital, l'investissement acquiert une importance fondamentale comme un vecteur de ce progrès technique et non pas comme un facteur de croissance. Cependant, ces fonctions de production même au cas où elles font intégrer le facteur énergie, elles ne s'intéressent jamais aux formes énergétiques d'un côté

thermodynamique de plus en plus concentrées et capables de fournir un travail plus efficace. Elles ont oublié le rôle du progrès technique dans la transformation de l'énergie en biens utiles à la production. Le bon exemple et le passage au 18 ème siècle du bois au charbon qui s'est répandue en Angleterre et qui a conduit à l'industrialisation. Par ailleurs, la croissance économique qui a dominé le monde au cours des trente glorieuses du 20 ème siècle était en forte liaison avec la hausse de la quantité des énergies ainsi que de leur qualité, qui sont eux même corrélées au progrès technique incorporé au facteur énergie.

Les fonctions de production KLEM et KLE n'expliquent pas que l'énergie est à l'origine du progrès technique, ceci peut être induit à cause de la complexité de la relation entre le développement économique, le progrès technique et les ressources énergétiques qui empêchent la dissimilation entre les causes et les effets du progrès technique.

En outre les retombées du progrès technique sur l'efficacité sont indépendantes de ses modalités d'apparition, parfois le progrès technique incorporé au facteur capital amplifie seulement l'efficacité du facteur travail. Ce cas de figure se complexifie encore avec les modèles macro-énergétiques de type KLEM et KLE.

La plupart des travaux sur les fonctions KLE ou KLEM affirment que le progrès technique est neutre au sens de Hicks. Il augmente la productivité des facteurs de production sans changer les quantités relatives de facteurs. Nous pouvons donc révéler que tout changement dans les proportions de facteurs est dû aux phénomènes de substitution induits par les prix. Cela s'explique essentiellement par le fait que ce type de fonctions de production ne peut pas incorporer à la fois le progrès technique et la substitution. Si la fonction est de forme Cobb-Douglas ou CES, l'accent est mis dans ce cas sur la substituabilité d'où le progrès technique est nécessairement neutre au sens de Hicks. Cependant, s'il s'agit d'une fonction imposant la complémentarité (de type Leontief par exemple), les seules variations probables de la fonction de production sont liées au progrès technique qui, dans ce cas, n'est jamais neutre au sens de Hicks. D'une manière générale, les fonctions KLE et KLEM ignorent la non neutralité du progrès technique et insistent sur la substituabilité des facteurs. L'impact du progrès technique sur l'efficacité énergétique ainsi que l'introduction des équipements plus économes en énergie et l'analyse de leurs effets sur l'amélioration de la productivité des inputs hors effet prix n'est jamais traité.

1.5 Les spécificités de l'industrie de réseau

Une industrie de réseau est une activité structurée sur une infrastructure lourde dont le cout des charges fixes est assez élevé en comparaison avec les couts variables. L'industrie de réseau a souvent le caractère d'un monopole naturel car sa duplication entraine des charges immenses et les rendements d'échelles sont croissants et importants.

Les activités de réseau sont la source d'externalités de demande positives appelées ''effets de club'' grâce aux interconnexions qui amplifient l'utilité de réseau avec le nombre d'utilisateurs ainsi que d'externalités d'offre qui mènent à la diversification des services offerts sur le réseau. Les industries de réseau sont allocataires de missions de service public appelées ''essential facilities'' qui permettent l'accès à tous. Ce phénomène nécessite l'intervention obligatoire de l'Etat ou de la collectivité locale et rend nécessaire la présence d'un régulateur qui est chargé de vérifier si les différents usagers sont traités d'une façon équitable. Les services publics peuvent être exploités par des organismes publics ou privés. Ce phénomène a apporté des restructurations au niveau de la tarification à adopter pour l'usager final.

1.5.1 La dérégulation des industries de réseau

Dans certains pays, les entreprises publiques bénéficiant d'un statut d'EPIC (établissement public à caractère industriel ou commercial) sont devenues concessionnaires de service public, tandis que dans d'autres pays, ce sont les entreprises privées qui sont chargées de gérer les services publics du gaz et d'électricité. La théorie des couts de transaction et la théorie des marchés contestables ont aidé à justifier le phénomène de la dérégulation des industries de réseau.

1.5.1.1 La théorie des couts de transaction

La théorie des coûts de transaction fait partie de la théorie des organisations, elle apparait pour la première fois avec Coase. R.H (1937) qui prévoit que la firme permet d'économiser les couts de marché. Williamson. O.E (1975) a entretenu cette idée et a ajouté que les firmes doivent agir dont l'objectif de minimiser à chaque fois les couts, expliquant leur intérêt parfois à internaliser (intégration verticale) ou à externaliser les activités. Il existe des couts qui sont inévitables pour chaque organisation tels que les couts de recherche de l'information, les couts contractuels, les couts liés à l'incertitude et à l'opportunisme des agents ainsi que les couts de contrôle. Le recours à l'intégration verticale n'est pas seulement appliqué dans le cas

d'une fonction de cout sous-additive[26] mais plutôt dans le cas d'un actif spécifique qui, dans le cas de rupture de la relation contractuelle, sa reproduction entraine des couts irrécupérables en plus des couts humains. Ce genre d'actifs doit être établi dans le cadre de relations durables qui protègent les investissements engagés contre l'opportunisme des agents. Les industries gazières et électriques sont considérées comme étant producteurs d'actifs spécifiques où l'intégration verticale permet d'économiser les couts de transaction en comparaison avec les couts prospérés sur le marché grâce aux économies d'échelles et à la mise en œuvre des relations contractuelles moins couteuses pour accéder à l'information. Toutefois, si l'actif n'est plus spécifique ou sa spécificité a diminué, le recours à l'intégration verticale n'est plus justifié et la firme doit se diriger vers des échanges plus concurrentiels. La spécificité des actifs a tendance à diminuer avec le progrès technique ainsi qu'avec l'interconnexion des réseaux tel est le cas des actifs électriques dans l'amont de l'industrie électrique. La production de l'électricité ne constitue plus un monopole naturel et l'intégration verticale n'est plus systématique ce qui justifie le recours à la concurrence dans certaines activités de réseaux.

1.5.1.2 La théorie des marchés contestables

Cette théorie s'aligne avec la théorie précédente dans la mesure où elle encourage la concurrence entre les industries de réseau. Son apparition fut au début des années 80 avec Willig.R, Baumol.W et Panzar.J. Cette théorie prévoit que l'entrée et la sortie sur le marché est sans couts, c'est-à-dire sans barrières à l'entrée et à la sortie. Les industries déjà implantées ne sont pas favorisées par rapport aux entrants potentiels ainsi que le retrait d'une firme ne lui procure aucun cout réversible. La concurrence potentielle suffit à elle-même à réguler l'industrie, à éviter les comportements abusifs et en conséquence à se substituer au régulateur. Cette contestabilité se configure indépendamment du nombre de firmes existantes et n'exige pas une concurrence pure et parfaite. Ce qui compte dans cette théorie est la liberté d'entrée et de sortie et non pas le nombre d'acteurs. Dans ce cas de figure, le rôle de l'Etat consiste à contrôler l'absence des barrières juridiques à l'entrée.

1.5.2 La tarification optimale des entreprises concessionnaires de service public

26 Dans ce cas, il est plus opportun qu'une seule entreprise produit la quantité demandée mieux que deux ou plus.

Au niveau de la tarification des charges de consommation, Perçebois. J (1999) a ajouté qu'il y'a des propositions différentes : les juristes, qui ont fait référence aux principes du droit administratif[27] ont proposé une tarification au cout moyen. Ils ont exigé une péréquation[28] temporelle et spatiale des tarifs. Les économistes quant à eux, ont prévu une tarification selon le cout marginal en se basant sur la théorie de l'optimum de Pareto. Dans ce cas, le bien-être social est maximisé lorsque le consommateur paie un cout supplémentaire égal aux couts fixes anticipés ainsi que le cout variable engagé par l'entreprise suite à sa présence sur le réseau, ce qui justifie les tarifs élevés aux heures de pointe. Les tarifs sont également élevés dans les zones éloignées à cause de la hausse des couts de raccordement et la faiblesse des rendements d'échelle. Les économistes prévoient que cette discrimination tarifaire est compatible avec le principe d'équité entre les usagers. Selon eux, ceux qui ont les mêmes conditions seront facturés de la même manière et ceux qui sont placés dans des conditions temporelles et spatiales différentes payent un tarif différent. Perçebois. J (1999) a ajouté que la tarification au cout marginal a été adoptée graduellement par l'entreprise d'électricité de France (EDF) en 1956 puis en 1965 avec des tarifs spécifiques pour le secteur industriel ainsi que pour les ménages. Et depuis, cette différenciation horo-saisonnière des tarifs a incité les usagers à s'absenter aux heures de pointes afin de bénéficier des avantages financiers pour le reste du temps. Cependant, la tarification au cout marginal pose des difficultés lorsqu'il s'agit d'un monopole naturel multiservices qui fait intervenir en plus de l'activité de production, une activité de transport et de distribution. Dans ce cas, ces firmes travaillent en phase de rendements croissants donc de couts décroissants et en conséquence le cout marginal est inférieur au cout moyen ce qui entraine des pertes. Face à cette problématique, la théorie de monopole naturel a proposé quatre possibilités pour faire face à cette multiplicité de demandes :

-La première est d'appliquer la solution du premier rang qui se manifeste dans la pratique par la tarification au cout marginal, dans ce cas, l'Etat s'engage à financer les couts fixes du réseau de transport et de distribution.

27
Ces principes sont essentiellement ; l'égalité dans le traitement des usagers, la continuité et l'adaptabilité du service public.

28
Est unmécanisme de redistribution qui permet de réduire les écarts de richesse, et en conséquence les inégalités entre les différentes collectivités territoriales.

-La deuxième est d'opter pour un optimum de second rang en appliquant une tarification du type Ramsey-Boiteux qui postule que l'application de la tarification du cout marginal entraine des pertes, donc il faut appliquer une tarification supérieure au cout marginal et inversement proportionnelle à l'élasticité prix du bien. Le but est de récupérer les couts fixes en priorité sur les usagers captifs[29]. La tarification de type Ramsey-Boitteux suppose que l'entreprise est en mesure de segmenter ses clients selon l'élasticité prix de la demande. La facture payée par l'usager est une fonction affine du prix dans chaque tranche. Les tranches de consommation sont prédéfinies comme suit :

$T_1(q) = E_1+p_1.q_1$ si $q \leq q_1$

$T_2(q) = E_2+p_1.q_1+p_2(q- q_1)$ si $q_1 < q \leq q_2$

$T_3(q) = E_3+p_1.q_1+p_2(q_2- q_1) + p_3(q-q_2)$ si $q_2 \leq q$

Avec $E1<E_2<E3$ et $p_1>p_2>p_3$

Avec un tarif de courte utilisation, la prime fixe est faible mais le prix unitaire du kwh est relativement élevé, les tranches de consommation les plus basses étant généralement situées aux heures de pointe. Avec le tarif de très longue utilisation, la prime fixe est élevée mais le prix des tranches les plus élevées est relativement faible, la demande est alors élastique et se situe relativement plus aux heures creuses. Cependant, cette segmentation est jugée couteuse.

-La troisième est le choix de la tarification non linéaire binôme, qui permet de détecter ex-post la propension à payer des usagers sans les différencier à priori. Le cout de cette discrimination est inclue aux usagers qui se présentent à des niveaux différents du barème et choisissent eux-mêmes leurs options préférées. Cette tarification est de la forme suivante :

$T= E+ p.q$

Avec E est une prime fixe indépendante des quantités consommées q et p est le prix unitaire du bien. E permet de couvrir les couts fixes de l'infrastructure, elle est égale à F/n avec F sont les couts fixes et n représente le nombre des usagers. Willig. R.D (1978) a montré que le tarif optionnel non linéaire est préférable à un tarif de type Ramsey-Boiteux. Coase. R.H (1946) a

29
Un usager captif est un acheteur qui n'est pas en mesure de pouvoir choisir son fournisseur, cet empêchement peut être de nature légale, technique ou contractuelle. L'usage captif est relatif, il dépend du temps (court moyen ou long terme) ainsi qu'aux possibilités de substitution.

proposé les prix non linéaires optimaux qui permettent de couvrir les charges fixes et a opté pour une tarification au cout marginal pour les usagers. Perçebois. J (1999) a stipulé que la disponibilité à payer de chaque usager doit être supérieure à la charge fixe (F/n) pour que l'allocation optimale des ressources soit atteinte. Dans le cas contraire, certains clients seraient abusivement exclus de l'accès au réseau.

En pratique, nous appliquons souvent une tarification de second rang du type tarification par blocs.

-La quatrième possibilité est de faire supporter à chaque consommateur le coût variable attribuable à sa demande et d'additionner une proportion des coûts fixes commune à tous les utilisateurs selon le principe de la tarification au coût complet (Fully Distributed Cost Pricing). Les coûts fixes peuvent être imputés proportionnellement à la quantité consommée ou aux recettes variables récupérées ou aux coûts imputables à chaque usager. Braeutigam. R.R (1980) a montré que cette méthode de tarification procure un bien-être collectif plus faible que celui de la tarification selon la méthode Ramsey-Boiteux mais elle est jugée comme la plus équitable étant donné que chaque consommateur contribue au financement des coûts fixes selon un critère jugé objectif. Généralement les industries de réseau pratiquent souvent la tarification non linéaire par tranches tel est le cas d'EDF et de GDF en France.

1.5.3 La tarification des charges d'accès au réseau en cas d'ATR

A partir des années 80, les industries de réseau ont été soumises à un phénomène de déréglementation afin de promouvoir la concurrence et ne laisser survivre que les monopoles naturels. Ce phénomène a donné l'intérêt à l'accès des tiers au réseau (ATR) et à la régulation de cette activité. La mission du régulateur est de contrôler le gestionnaire du réseau transport-distribution et éviter son abus et son opposition aux nouveaux entrants ainsi que les comportements discriminatoires. Ce contrôle est amplifié au cas où le gestionnaire du réseau et lui-même l'opérateur historique d'où l'obligation d'envisager une tarification d'accès au réseau équitable. Le principe suivi pour fixer cette tarification selon la règle de Faulhaber-Sharkey[30] est qu'elle soit comprise entre le coût incrémental moyen, défini comme la somme des coûts variables ainsi qu'une proportion des coûts fixes que l'opérateur historique doit subir pour déverrouiller son réseau aux nouveaux entrants et le coût de fourniture isolée, qui correspond au coût supporté par le nouveau entrant qui se procure de la même technologie

30 Cette règle permet de fixer les bornes inférieures et supérieures de la tarification de l'accès des tiers au réseau.

que l'opérateur historique s'il devait construire seul un nouveau réseau. La marge séparant les deux bornes pour le calcul de la charge de l'ATR est large ce qui complique le choix de ce tarif. Ce dernier, d'une part, ne doit pas être trop élevé pour ne pas constituer une barrière à l'entrée et d'autres part ne doit pas être trop faible afin d'éliminer les opérateurs inefficaces.

Plusieurs issues ont été proposées et même testées dans certains pays tels que le Royaume-Uni, les Etas-Unis et l'Australie. D'une manière générale, la formule la plus utilisée aujourd'hui et qui a tendance à remplacer le cost plus[31] est le prix cap, appelé aussi prix plafond. Ce dernier est fixé selon une relation contractuelle entre l'entreprise régulée et le régulateur. Il est de la forme suivante : $P_1=P_0+RPI-X$

Avec P_0estle prix de l'année 0, P_1 est le prix de l'année 1, RPI (le retail price index) est l'indice du cout de la vie et X est un facteur d'efficacité convenu entre le régulateur et le régulé. Cette tarification présente l'avantage qu'elle est limitée par un plafond et l'entreprise est incitée à réduire ses couts et être plus efficace. Si les gains de productivité observés excèdent les gains attendus par le régulateur, l'opérateur conserve cette marge considérée comme une rente de monopole. Toutefois, une difficulté demeure dans le choix des valeurs au début de la période à cause de l'asymétrie d'informations qui réside entre le régulateur et le régulé au profit de ce dernier. Bien que le régulateur puisse effectuer une comparaison internationale, le risque d'erreur subsiste toujours et sera supporté généralement soit par les actionnaires soit par les usagers du réseau.

2. Contexte de la région de Sfax, données et analyse économétrique

2.1 Présentation du gouvernorat de Sfax

« Entre le bleu du ciel et le bleu de la mer, entre les mamelons de sable qui rougissent aux premiers baisers du jour, s'étendent, comme une ville sous une housse blanche, des remparts qu'on dirait bâtis de la veille, des maisons qui semblent avoir les pieds dans les vagues, destours, des créneaux, des dômes roses que surmonte le croissant… C'est Sfax. »

Marius Bernard, 1893.

Le gouvernorat de Sfax est situé au Centre-Est de la République Tunisienne. Il est délimité par la mer méditerranée à l'Est, par le gouvernorat de Mahdia au Nord, par le gouvernorat de

31 Il consiste à établir le prix proposé à partir du cout réel auquel on ajoute la marge qu'il souhaite réaliser.

Kairouan, Sidi Bouzid et Gafsa à l'Ouest et par le gouvernorat de Gabès au Sud. Il occupe 7545 km^2, correspondant à 5 % de la superficie totale du pays.

Figure 1.13 - Cartographie de Sfax

Source :Guide des exportations de Sfax 2010

Sfax se place au second rang après la capitale Tunis du point de vue démographique avec une population totale estimée à 963062[32] habitants en 2013 soit 8,89 % de la population totale.

2.1.1 Le gouvernorat de Sfax : quelques aspects économiques

Le gouvernorat de Sfax est caractérisé par sa large ouverture sur la mer avec un littoral de près de235 km ainsi que sa position géographique privilégiée entre le centre et le Sud du pays qui, lui ont donné un rôle prédominant dans les échanges de produits au niveau national et international. Le port commercial de Sfax est l'un des plus anciens, il date depuis 1905. Il permet l'exportation des produits qui viennent essentiellement du Centre et du Sud du pays, en plus de la production locale comme le sel marin, l'huile d'olive, les phosphates traités et divers autres produits semi-finis ou finis de certaines industries comme la confection, l'habillement, les conserves de poissons et autres. Sfax importe également les produits alimentaires, les produits chimiques, les matériaux de construction, les céréales et tous les équipements nécessaires pour le pays. Bien que cette ville soit située dans un milieu semi-aride, elle occupe une place économique prospère dans le pays, ceci trouve son explication dans le savoir ainsi

32
INS Sfax 2013.

que le dynamisme de ses habitants qui étaient et demeurent toujours de bons commerçants et artisans. Ceci a permis à ce gouvernorat de se doter d'atouts importants lui favorisant une évolution multisectorielle rapide dans les domaines de l'agriculture, de l'industrie et des services. L'économie du gouvernorat de Sfax, hier basée essentiellement sur l'huile d'olive, la pêche et les phosphates, connaît depuis les années soixante d'importantes mutations économiques. Ce phénomène est dû à la multiplication de petites et moyennes industries manufacturières, le développement rapide du secteur tertiaire et la diversification du secteur agricole par l'émergence de nouveaux créneaux d'investissement comme l'élevage bovin, le maraîchage, l'aviculture et les cultures biologiques.

Premier producteur en Tunisie, Sfax produit en moyenne 40% d'huile d'olive et 30% d'amande par rapport au niveau national. Son tissu industriel emploie 25% de la population active. Le nombre des entreprises qui emploient dix ouvriers est plus s'élève à 756 unités, soit 36% du total des entreprises Tunisiennes[33]. Les entreprises totalement exportatrices présentent 25% du tissu industriel et 43% des emplois du secteur. Les Industries Textiles et Habillement représentent 68.4% suivies de loin par les Industries Agro-alimentaires 15.1%, indiquant ainsi une spécialisation et une concentration sectorielles du tissu industriel régional.

Tableau 1.2 - Répartition des entreprises par type et par secteurs en pourcentage

	Répartition des entreprises totalement exportatrices par secteur	Répartition des entreprises non totalement exportatrices par secteur
Industries Agro-alimentaires	15.1	24.2
Industries des matériaux de construction et de verre	1.9	5.9
Industries mécaniques et métallurgiques	4.5	18.5
Industries électriques, électroniques et de l'électroménager	2.8	2.7
Industries chimiques	1.9	13.3
Industries textiles et de l'habillement	68.4	12.9
Industries du bois, du liège et de l'ameublement	1.8	7.4
Industries de cuir et de la chaussure	2.8	6.6
Industries diverses	0.8	8.5

33 Agence de Promotion de l'Industrie (API) Sfax 2011.

Source : Guide des exportations de Sfax 2010.

En plus des concentrations portant sur le nombre d'entreprises et le nombre d'emplois par secteur, une autre forme de concentration a un caractère spatial. Selon les statistiques de l'API 2011, les délégations de Sfax-Ville, Sfax-Ouest, Sfax-Sud, Sakiet Eddaier, Sakiet-Ezzit et Thyna attirent 78.2% et 77.7% des entreprises et des emplois du secteur industriel respectivement. L'attractivité particulièrement exercée par le Grand Sfax s'explique d'une part, par la proximité des fournisseurs et des clients des entreprises industrielles, la diversité des services connexes à proximité et essentiels à leur bon fonctionnement, les infrastructures d'accompagnement et, d'autre part, par la disponibilité d'espaces d'accueil dans les zones industrielles aménagées. Le reste des entreprises est dispersé dans le tissu urbain.

Les entreprises industrielles totalement exportatrices sont détenues à concurrence de 73% par des Tunisiens et le reste est détenu par des partenaires de nationalité Française qui participent avec 11% à l'emploi auxquels s'ajoute 3% représentant des partenaires Français associés à d'autres portants d'autres nationalités. Sfax est aussi la deuxième ville du pays pour les activités tertiaires. En effet, le secteur tertiaire est en particulier le commerce y a été toujours florissant. Le nombre d'emplois dans le tertiaire a été évalué à 100.000 en 2010.

Un autre atout de l'économie Sfaxienne est l'exploitation des ressources énergétiques fossiles essentiellement le pétrole. Les zones maritimes au large de ses côtes comptent 13 gisements dont 12 en cours d'exploitation. Ces gisements sont détenus par huit compagnies pétrolières de différentes nationalités dont les plus importants sont : Miskar qui est considéré comme le premier champ à gaz en Tunisie détenu par la compagnie Britannique British Gaz. Sa production journalière représente plus de 45 % de la production nationale en gaz suivi par le gisement Ashtart. Ce dernier est un champ d'hydrocarbure liquide, situé en mer à environ 76 km de côte de gouvernorat de Sfax. Sa production journalière représente environ 10% de la production nationale en huile. Un programme de développement complémentaire est en cours de réalisation afin d'améliorer sa capacité de production. Le gisement de Didon occupe le troisième rang, c'est un champ marin situé à une distance de 150 km de Sfax. Sa production journalière est d'environ 9% de la production nationale d'huile. Sfax se classe au premier rang concernant la production de gaz avec un taux dépassant 70% de la production nationale. Ce résultat reflète son rôle dans l'activité du secteur des hydrocarbures en Tunisie et l'apport de son sous-sol pour répondre aux besoins de l'approvisionnement du marché local ainsi qu'international.

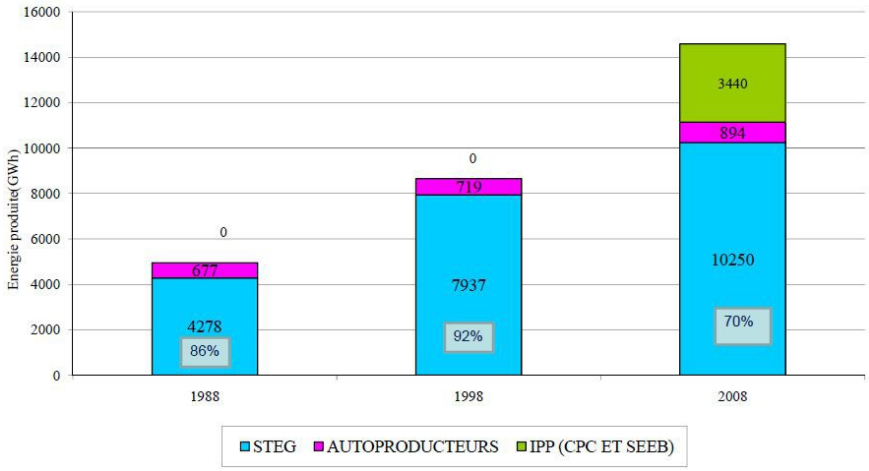
Premier producteur d'huile, premier port de pêche, deuxième pôle industriel, producteur de pétrole et de gaz, la ville de Sfax représente une belle expression du développement Tunisien. L'indicateur de développement choisi dans notre étude est la somme des valeurs ajoutées du secteur industriel manufacturier du Gouvernorat de Sfax (VA). Les sous-secteurs manufacturiers pris en considération sont : les industries agricoles et alimentaires, les industries de matériaux de construction et de verre, les industries mécaniques et électriques, les industries chimiques, les industries d'habillement et de cuir et les industries diverses. Cet indicateur est exprimé en millions de dinars aux prix courants pour la période comprise entre 1980 et 2010.

2.1.2 L'électricité en Tunisie et à Sfax

L'électricité en Tunisie est fournie essentiellement par la Société Tunisienne d'électricité et de Gaz connue par la STEG fondée Suite à la loi du 3 Août 1962. Suite à ce décret, l'Etat a décidé de nationaliser la production, le transport et la distribution de l'électricité et du gaz et de confier toutes ces activités à la STEG. Il s'agit d'un (EPIC) appartenant à l'Etat Tunisien sous tutelle du Ministère de l'Industrie. A part l'activité de production de l'énergie électrique, les autres activités sont monopolistiques.

La STEG dispose d'un parc de production diversifié et réparti en 24unités de production (Turbines à gaz, turbines à vapeur, cycles combinés, hydrauliques, éoliennes) d'une puissance installée de l'ordre de 3598 MW en 2010. La production de l'électricité en Tunisie est ouverte, elle fait appel au secteur privé tel est le cas de CPC (Carthage Power Compagny) qui est un producteur privé d'énergie électrique. L'arrivée de CPC sur le territoire Tunisien justifie que la privatisation bien gérée est bénéfique pour le pays en termes de compétitivité, de progrès technique et d'innovation. De plus, la libre concurrence constitue un support pour la croissance économique. Le graphique 1.14 ci-dessous montre la répartition de la production de l'électricité en Tunisie au fil du temps.

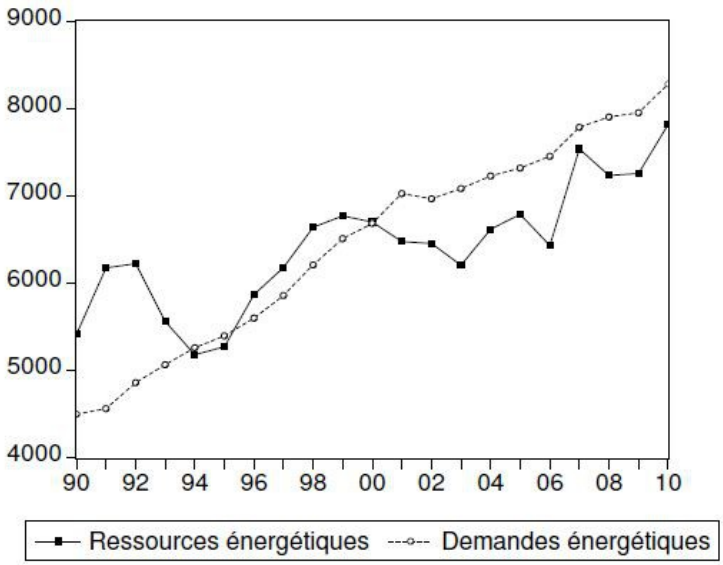
Figure 1.14- Evolution de la répartition de la production d'électricité par producteur



Source : STEG 2008.

Les recettes de l'électricité en Tunisie représente en 2010, 6% du PIB et la moyenne de consommation individuelle d'un Tunisien est de 2210 Kwh /an. Cette moyenne est considérée comme la plus élevée des pays de la rive sud du bassin Méditerranéen, malgré que les ressources énergétiques en Tunisie soient relativement limitées surtout à partir de la fin des années 90 où la Tunisie a vécu une transformation dans sa situation énergétique. Après avoir été pour des décennies un pays énergétiquement excédentaire, elle s'est transformée avec le début de l'an 2000 en un pays déficitaire énergétiquement.

Figure 1.15- Ressources et consommation d'énergie primaire en Ktep



Source : Elaboration de l'auteur sur la base de données de l'ANME de la Tunisie (Juin 2011).

Grace à sa politique d'électrification mise en place, la STEG a réussi en 40 ans à ramener le taux d'électrification de 20% à 100% presque en milieu urbain et de 6% à 99% en milieu rural.

L'administration de la STEG réparti la république en 6 régions[34] et 34 districts. Le district est une unité financièrement autonome, qui représente la société auprès des autorités locales. Il se charge de l'exécution des activités techniques commerciales et administratives. Il assure le branchement des nouvelles lignes, le tirage des conducteurs, l'entretien des anciennes lignes et l'électrification de nouveaux locaux. Il exploite les réseaux afin d'assurer la continuité du courant électrique et la réparation en cas d'incidents.

Au niveau de cette analyse empirique, nous nous contentons d'étudier le cas du district de Sfax ville qui couvre le périmètre géographique de la délégation de Sfax-Ouest limitée par la route El Ain du côté Nord et la route de Gabès du côté Sud-Est. Il renferme également les zones suivantes : la Sokra, Chaker, el Aliya, wed el Rmal, cité Bahri et el Houda[35].

34
La région est une unité chargée de la coordination des moyens du contrôle et de l'assistance des activités opérationnelles au sein de l'ensemble des districts.

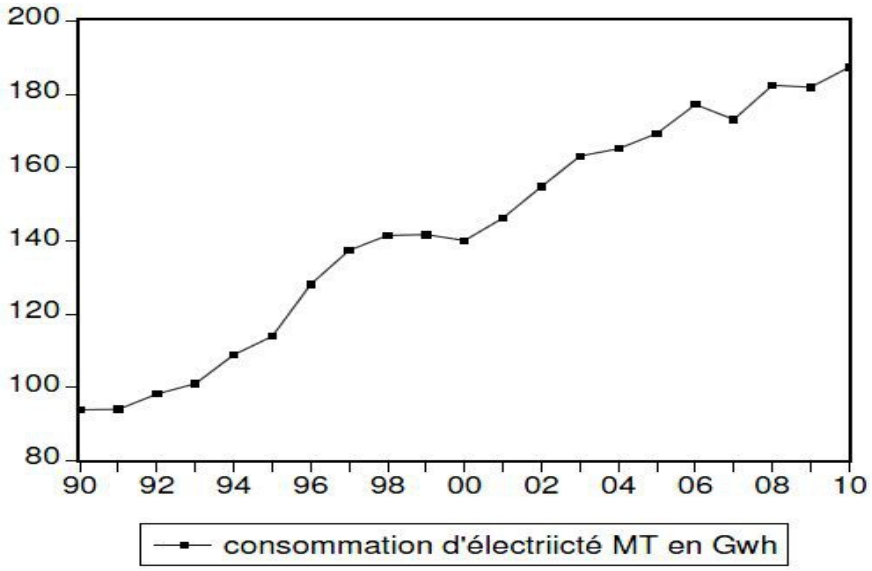
35
Ces données sont fournies selon la cartographie fournie par le district de Sfax ville établie à une échelle 1/200000.

La consommation de l'énergie pour le gouvernorat de Sfax est exprimée par la consommation d'électricité moyenne tension (MT) nommée (CE) destinée au secteur industriel et précisément le secteur manufacturier qui renferme : les industries alimentaires, les industries du textile et de l'habillement, les industries du papier et de l'édition, les industries chimiques et du pétrole. Généralement, pour présenter la consommation d'énergie, nous faisons recours soit à différentes formes d'énergie (électricité, pétrole, gaz, ….), soit à la consommation totale d'énergie ou encore à un indice agrégé, pondéré par les divers sources d'énergie. En ce qui nous concerne, en se référant aux travaux déjà engagés à ce propos (Ambapour.S et Massamba. C (2005)), et en dépit de la difficulté de collecter des données fiables sur la consommation totale d'énergie pour la région de Sfax, la consommation d'électricité a été utilisée comme proxy de la consommation d'énergie.

Pour le calcul de cet indicateur, nous faisons référence aux données collectées par la STEG et précisément le district de Sfax ville et aussi aux rapports annuels publiés par la STEG afin de prélever la proportion approximative des ventes d'électricité MT destinées au secteur manufacturier au fil des années. L'électricité MT combinée avec l'électricité haute tension (HT) servent à alimenter les industries manufacturières ainsi que les industries extractives, les services, le tourisme, le transport et communication, l'activité de pompage (eaux et services sanitaires), l'activité de pompage agricole ainsi que les industries diverses. Les ventes d'électricité MT se positionnent au premier rang avec un pourcentage compris entre 46% et 48% pour la période comprise entre 2000 et 2006, suivie par les ventes basse tension (BT) avec un taux variant entre 41% et 43% pour la même période et en dernier lieu la consommation d'électricité HT avec une composition entre 10% et 12%[36]. La consommation d'électricité MT n'a pas cessé d'augmenter au cours du temps.

36
Ces données sont fournies dans le rapport annuel de la STEG 2004 et 2006 pages 23 et 21 respectivement.

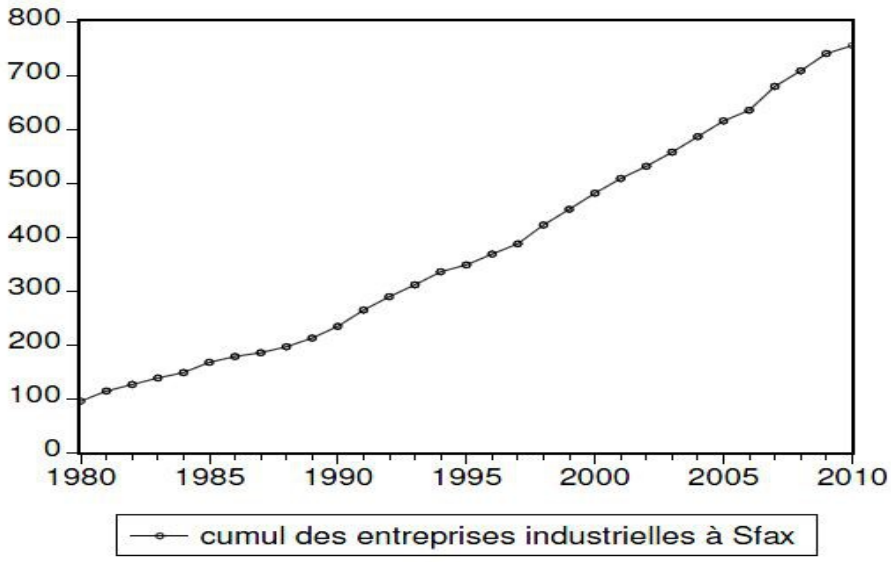
Figure 1.16-Variation de la consommation d'électricité MT pour le gouvernorat de Sfax (district Sfax ville)



Source : Elaboration de l'auteur selon les données annuelles de la STEG (administration régionale de distribution au Sud) et du district de Sfax ville.

Cette tendance haussière de la consommation d'électricité s'explique par l'augmentation respective du nombre des abonnés issue du développement des différents secteurs économiques à Sfax et particulièrement le secteur industriel qui n'a pas cessé de progresser depuis les années 60.

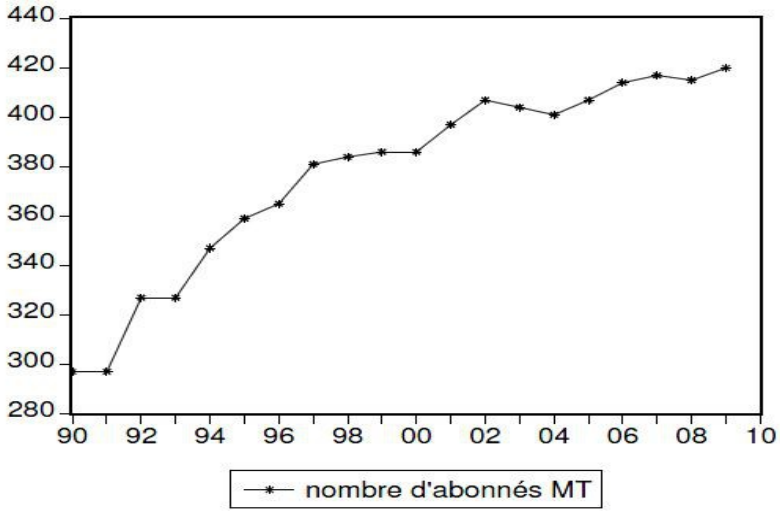
Figure 1.17-Evolution des entreprises industrielles à Sfax



Source : Elaboration de l'auteur sur la base des données fournies par l'API de Sfax (2010).

Si nous combinons la tendance des abonnés pour l'électricité MT avec la variation des entreprises industrielles au cours du temps , nous constatons un certain décalage ainsi qu'une tendance un peu différente qui peut s'expliquer par le fait que les ventes MT n'alimentent pas uniquement le secteur industriel manufacturier mais aussi les autres secteurs économiques comme a été déjà mentionné ci-dessus.

Figure 1.18- Variation du nombre des abonnées MT pour le gouvernorat de Sfax (district de Sfax ville)



Source : Elaboration de l'auteur selon les données annuelles et mensuelles de la STEG (administration régionale de distribution au Sud)

2.2 Revue de la littérature empirique

Depuis les années 70, les travaux empiriques qui ont examiné la relation de causalité entre la consommation d'énergie et la croissance économique dans les pays développés et les pays en voie de développement sont nombreux. La littérature assimile quatre hypothèses pour la relation croissance-consommation d'énergie. Il s'agit de l'hypothèse de conservation, l'hypothèse de la croissance, l'hypothèse de la neutralité et l'hypothèse de réciprocité ou feedback.

L'hypothèse de conservation est vérifiée si une augmentation du PIB entraine une augmentation de la consommation d'énergie. Elle stipule que les politiques de conservation d'énergie qui se traduisent par une réduction de la consommation d'énergie n'ont pas d'effets négatifs sur le PIB réel et sur la croissance d'une façon plus générale.

Cette hypothèse a été soutenue par Kraft. J et al (1978), Abosedra. S et al (1989), Masih.A.M et al (1996), Cheng.B.S et al (1997), Cheng.B.S (1998, 1999), Soytas et al. (2001), Soytas. U et al (2003,2006), Lee.C.C (2006), Zachariadis. T (2007), Zamani. M (2007), Mehrara. M (2007), Lise. W et al (2007), Lee.C.C et al (2007), Chiou-Wei. S et al. (2008), Ang. J.B (2008), Zhang. X.P et al (2009) et Wolde-Rufael. Y (2009).

L'hypothèse de croissance suppose qu'une augmentation, respectivement une (diminution) de la consommation d'énergie entraine une augmentation, respectivement une (diminution) du PIB réel. Dans ce cas, l'énergie cause le PIB et l'économie est considérablement dépendante de l'énergie. Squalli. J (2007) a affirmé que l'impact négatif de la consommation d'énergie sur le PIB réel peut être attribué à une consommation excessive d'énergie dans les secteurs improductifs de l'économie ou à une offre inefficiente d'énergie.

Cette opinion a été affirmée dans les travaux de Stern. D.I (1993), Masih.A.M et al (1996), Glasure.Y.U et al(1997), Stern. D.I (2000), Asafu-Adjaye. J (2000), Soytas.U et al (2003, 2006), Wolde-Rufael. Y (2004, 2009), Thoma. M (2004), Lee.C.C (2005, 2006), Lee. C.C et al (2007), Ho.C.Y (2007), Climent. F.J et al (2007), Ang. J.B (2007), Narayan.P.K et al (2008), Chiou-Wei. S et al. (2008), Odhiambo. N.M (2009), Tsani.S.Z (2010) et Pereira. A.M et al (2010).

L'hypothèse de neutralité considère que la consommation d'énergie n'est qu'une minime partie des facteurs de la production et que son effet sur le PIB réel est faible ou nul. Cette hypothèse se justifie en cas d'absence d'une relation causale entre consommation d'énergie et PIB réel. Elle a été supportée par Akarca. A.T et al (1980), Yu. E.S.H et al (1984, 1985, 1988, 1992), Erol. U et al(1987), Cheng.B.S (1996), Masih. A.M et al (1996), Glasure. Y.U et al (1997), Fatai. K et al.(2002), Soytas. U et al (2003, 2007), Altinay. G (2004), Chontanawat. J et al. (2006,2009), Jobert.T et al (2007), Lee.C.C (2006), Zachariadis.T (2007), Chiou-Wei. S et al. (2008), Karanfil. F (2008), Yuan. J.H et al.(2008), Halicioglu. F (2009), Payne. J.E (2009), Soytas. U et al (2009) et Wolde-Rufael. Y (2009).

L'hypothèse de rétroaction (feed-back) suggère qu'il existe une relation causale bidirectionnelle entre la consommation d'énergie et le PIB réel de telle sorte qu'une mise en œuvre d'une politique de consommation efficiente n'a aucun effet négatif sur le PIB réel.

Cette supposition a été vérifiée dans les travaux de Hwang. D et al(1991), Masih.A.M et al (1996, 1997), Asafu-Adjaye. J (2000), Yang. H.Y (2000), Hondroyiannis.G et al.(2002),

Glasure.Y.U (2002), Soytas. U et al (2003,2006), Paul. S et al (2004), Oh et Lee (2004a, 2004b), Ghali.K.H et al (2004), Lee.C.C (2006), Zachariadis. T (2007), Mahadevan. R et al (2007), Erdal.V et al.(2009) et Wolde-Rufael.Y (2009).

La majorité des travaux destinés aux pays en voie de développement concernent les pays d'Asie et de l'Amérique Latine. Le nombre de travaux destiné aux pays de l'Afrique du Nord reste réduit. Les analyses déjà effectuées ont abouti à des résultats divergents (voir annexe 1.1).

Pour le cas de la Tunisie il y'a un nombre limité d'analyses empiriques dans ce domaine, nous citons à titre d'exemples l'étude de Belloumi. M (2009). Ce dernier a abouti à une causalité bidirectionnelle à long terme entre la consommation d'énergie et la croissance économique en Tunisie ainsi qu'une causalité unidirectionnelle partant de la consommation d'énergie vers la croissance économique à court terme. Chouaibi. N et al (2011) ont conclu qu'une relation de causalité unidirectionnelle à long terme de la consommation d'électricité vers la croissance économique en Tunisie a été détectée.

Concernant les analyses de la causalité entre la consommation d'énergie et la croissance économique à un niveau régional pour le cas de la Tunisie, elles sont quasi inexistantes. Dans notre étude, nous nous intéressons à analyser la relation de causalité à long terme ainsi que les effets de court terme entre la (CE) et la (VA) pour le cas du gouvernorat de Sfax[37].

La plupart des études réalisées dans ce domaine ont utilisé le test de cointégration d'Engle et Granger (1987), le test de maximum de vraisemblance de Johansen (1988) et de Johansen et Juselius (1990).Toutefois cette technique de cointégration demeure non appropriée dans le cas d'un échantillon réduit et où les variables n'ont pas le même ordre d'intégration.

2.3 Les techniques d'estimation

2.3.1 Le test de stationnarité

La première étape de l'analyse économétrique est l'étude de la stationnarité des deux séries temporelles lVA et lCE, avec lVA est le logaritme deVA et lCE est le logarithme de la CE. Pour rendre stationnaires les deux séries, nous faisons recours au test de Phillips-Perron (PP, 1988) qui ont introduit une correction non paramétrique des statistiques de Dickey-Fuller Augmenté (ADF) afin de tenir compte d'une éventuelle autocorrélation et/ou d'une

37 Ces deux indicateurs ont été biens expliqués dans la section précédente.

hétéroscédasticité des résidus. Le test de PP requiert le choix du nombre de retards à prendre en compte dans le calcul de l'autocorrélation des résidus. Okey. M et Komlagan. N(2009) ont annoncé que le traditionnel test de racine unitaire (ADF) souffre d'un problème de faible pouvoir de rejet de l'hypothèse nulle de stationnarité des séries, surtout pour les données de courte période. Araujo. C et al (2008) ont indiqué que le test de PP procède à une correction non paramétrique robuste à une autocorrélation mais également à une hétéroscédasticité de forme inconnue.

Ces arguments nous ont conduits à faire appel au test de PP qui est fondé sur les trois modèles suivants :

$\Delta x_t = (\ell - 1)\, x_{t-1} + \varepsilon_t$: processus sans tendance et sans constante

$\Delta x_t = (\ell - 1)\, x_{t-1} + \alpha + \varepsilon_t$: processus sans tendance et avec constante

$\Delta x_t = (\ell - 1)\, x_{t-1} + \alpha + \beta_t + \varepsilon t$: processus avec tendance et avec constante

Comme dans le cas d'ADF, les hypothèses à vérifier restent les mêmes.

2.3.2 La technique de cointégration ARDL

Dans cette étude, nous faisons recours à l'approche de cointégration ARDL afin d'examiner la relation de cointégration à long terme entre l'indicateur de la consommation d'énergie et de la croissance économique. La procédure de cointégration ARDL a été introduite par Pesaran et Shin (1999) et a été prolongée par Pesaran et al. (2001).

L'approche de cointégration ARDL a des avantages en comparaison avec les autres méthodes de cointégration. D'une part, et contrairement aux autres techniques de cointégration, elle n'impose pas l'hypothèse selon laquelle toutes les variables sont issues du même ordre d'intégration. En d'autres termes, cette approche de cointégration peut être appliquée même si les variables sont I(1) ou I(0). D'autres parts, elle n'est pas sensible à la taille de l'échantillon et elle est jugée plus appropriée dans le cas d'un nombre limité d'observations. En effet, Narayan. P.K et Smyth. R (2005) ont souligné que cette technique de cointégration est jugée bien adaptée parce qu'elle permet de tester la relation de cointégration à long terme sans imposer que toutes les séries soient intégrées du même ordre de même la technique de cointégration traditionnelle n'est pas appropriée lorsqu'il s'agit d'un petit échantillon comme notre cas.

Le modèle ARDL utilisé dans notre analyse est exprimé comme suit :

Cas 1 : lVA est la variable endogène

$$\Delta lVA_{t} = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \square_{\beta 1i} \Delta lVA_{t-i} + \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \square_{\beta 2i} \Delta lCE_{t-i} + \beta_3 lVA_{t-1} + \beta_4 lCE_{t-1} + \mu_t \quad (1)$$

Cas 2 : lCE est la variable endogène

$$\Delta lCE_{t} = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \square_{\alpha 1i} \Delta lCE_{t-i} + \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \square_{\alpha 2i} \Delta lVA_{t-i} + \alpha_3 lVA_{t-1} + \alpha_4 lCE_{t-1} + \mu_t \quad (2)$$

Avec μ_t est le terme d'erreur du bruit blanc et Δ est l'opérateur de première différence. L'hypothèse nulle de non cointégration dans l'équation (1) stipule que ($H_0 : \beta_3 = \beta_4 = 0$) contre l'hypothèse alternative ($H_1 : \beta_3 \neq \beta_4 \neq 0$).Tandis que dans l'équation (2), l'hypothèse nulle de non cointégration est vérifiée quand ($H_0 : \alpha_3 = \alpha_4 = 0$) contre l'hypothèse alternative ($H_1 : \alpha_3 \neq \alpha_4 \neq 0$).

Pesaran. M.H et Pesaran. B (1997) et Pesaran. M et al. (2001) ont fixé pour chaque niveau de significativité deux classes de valeurs critiques relatives aux bornes inférieures et supérieures, correspondant au cas où les variables sont I(0) et I(1) respectivement. Si la valeur statistique calculée est supérieure à la borne supérieure, l'hypothèse H_0 est rejetée et la présence d'une relation de cointégration à long terme est confirmée. Toutefois, si la valeur statistique calculée est inférieure à la borne inférieure du test ARDL, l'hypothèse H_0 est validée d'où l'absence d'une relation de cointégration à long terme. Cependant si la valeur statistique calculée est comprise entre les deux bornes du test, dans ce cas le test de cointégration est jugé être non aboutissant et nous ne pouvons pas l'interpréter.

2.3.3 Le test de Causalité de Granger

Une fois la relation de cointégration est identifiée, l'étape suivante est d'analyser la causalité de Granger à court et à long terme. Takaendesa. P et Odhiambo. N.M (2007) ont souligné que

la causalité de Granger prétend que le futur ne peut en aucun cas causer le passé tandis que le passé peut influencer le futur. En appliquant cette définition, la série temporelle X_t cause une autre série temporelle Y_t, si cette dernière peut être mieux prédite en utilisant les valeurs passées de X_t que de ne pas l'utiliser. D'où, si les valeurs passées de X_t contribuent significativement aux prévisions de Y_t,dans ce cas, nous affirmons que X_t cause au sens de Granger Y_t et vice versa.

Guilkey. D.K et Salemi. M (1982) et Geweke. J et al(1983) ont souligné que la méthode de causalité de Granger est préférée à d'autres alternatives étant donné qu'elle est la plus valable pour les petits et les grands échantillons. L'hypothèse nulle du test de causalité de Granger suppose que X_t ne cause pas Y_t et vice versa. Elle est présentée par les deux régressions ci-dessous.

$$Y_t = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_{1i} Y_{t-i} + \sum_{i=1}^{n} b_{1i} X_{t-i} + u_t \quad (3)$$

$$X_t = b_0 + \sum_{i=1}^{n} a_{2i} Y_{t-i} + \sum_{i=1}^{n} b_{2i} X_{t-i} + \varepsilon_t \quad (4)$$

Avec u_t, ε_t sont les processus d'erreur des bruits blancs et 'n' représente le nombre de retards relatif aux variables. Selon Granger. C.W.J (1969), l'hypothèse nulle selon laquelle X_t ne cause pas Y_t est rejetée si b_{1i} est significatif. Toutefois, Granger. C.W.J (1988) a indiqué que le test traditionnel de causalité a deux défaillances méthodologiques. La première défaillance est que le test standard n'examine pas les propriétés de base des séries temporelles des différentes variables. Si les variables sont cointégrées, ce test devient mal spécifié à moins qu'on inclue un terme à correction d'erreur retardé. La deuxième défaillance est que ce test rend les variables automatiquement stationnaires à travers la différenciation et en conséquence, il élimine les informations de long terme contenues dans les données d'origine.

A l'opposé de la technique de causalité traditionnelle, le test de causalité basé sur la correction d'erreur permet d'inclure le terme à correction d'erreur retardé issu de l'équation de cointégration. En incorporant ce dernier, l'information de long terme perdue par la différenciation sera réintroduite de manière statistiquement acceptable. La technique de causalité de Granger utilisé entre lVA et lCE est présentée comme suit :

Cas 1 : lVA est la variable endogène

$$\Delta lVA_t = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_{1i} \Delta lVA_{t-i} + \sum_{i=1}^{n} \beta_{2i} \Delta lCE_{t-i} + ECM_{t-1} + \mu_t \quad (5)$$

Cas 2 : lCE est la variable endogène

$$\Delta lCE_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{n} \alpha_{1i} \Delta lCE_{t-i} + \sum_{i=1}^{n} \alpha_{2i} \Delta lVA_{t-i} + ECM_{t-1} + \mu_t \quad (6)$$

Avec ECM_{t-1} est le terme à correction d'erreur retardé obtenu à partir de la relation d'équilibre à long terme.

ECM_{t-1} dans le cas où lVA est la variable endogène est exprimé comme suit :

ECM_{t-1}=lVA- 1,967- (0,75)*lVA_{t-1}+ (0,175)*lCE_{t-1}-0,032 (7)

ECM_{t-1} dans le cas où lCE est la variable endogène est exprimé comme suit :

ECM_{t-1}=lCE+203,396+ (1,064)* lVA_{t-1}- (68,403)*lCE_{t-1} (8)

Bien que l'existence de relations de long terme entre la CE et la VA suggère qu'il y aura nécessairement une causalité de Granger mais elle n'indique pas le sens de cette causalité temporelle entre les variables. La direction de la causalité dans ce cas peut être déterminée seulement par la F-statistique et le terme à correction d'erreur retardé. Odhiambo. N.M (2009) et Narayan.P.K et Narayan. S (2006) ont souligné que le t-statistique du coefficient du terme à correction d'erreur retardé représente la relation de causalité de long terme, tandis que la F-statistique des variables explicatives représente l'effet de causalité de court terme. Narayan.P.K, Narayan. S (2006) et Morley. B (2006) ont souligné que même si le terme à correction d'erreur est incorporé dans les équations (5) et (6), seulement les équations où l'hypothèse nulle de non cointégration est rejetée peuvent être estimées avec le terme à correction d'erreur, c'est-à-dire sauf si la relation de long terme est justifiée.

2.4 Résultats empiriques

2.4.1 Le test de stationnarité

Bien que la technique de cointégration ARDL n'exige pas que toutes les variables sont I(1), il reste important de vérifier que toutes les variables ne sont pas non plus I(2). Les valeurs critiques des F-statistiques calculées par Pesaran. M et al (2001) et Narayan.P.K et al (2005) sont fondées sur l'hypothèse que toutes les variables sont I(0) ou I(1). Les résultats du test de PP sont présentés dans le tableau 1 et montrent que lCE est I(1) et lVA est I(0).

Tableau 1.3

	Statistique de PP	
	En niveau	En 1 différence
LCE	2,54	- 4,24***
V. critique 1%	-2,64	-3,67
V. critique 5%	-1,95	-2,96
V. critique 10%	-1,61	-2,62
	Statistique de PP	
	En niveau	
LVA	-6,63***	
V. critique 1%	-3,67	
V. critique 5%	-2,96	
V.critique 10%	-2,62	

***,** et * indiquent la significativité au niveau de 1%, 5% et 10%.

2.4.2 Le test de cointégration

Dans cette section, la relation de long terme entre [lVA, lCE] est examinée en utilisant la procédure de cointégration ARDL. La première étape est de déterminer le nombre de retards de l'équation(1) et (2) en se basant sur le critère d'information d'Akaike (AIC) et le critère d'information bayésien (BIC). Le tableau 1.4 ci-dessous indique le nombre de retards optimal selon les deux critères cités ci-dessus. Une fois le nombre de retards optimal est déterminé, la seconde étape est d'appliquer le test des valeurs limites d'ARDL pour les équations (1) et (2) dans le but de détecter l'existence de relations de long terme entre les variables faisant l'objet de notre étude. Une fois une ou plusieurs relations de long terme est déterminée, la troisième étape consiste à estimer cette relation de cointégration (voir tableau 1.6).

Les résultats du test ARDL sont rapportés dans le tableau 1.5. Ils affirment que dans le cas où lVA est la variable expliquée, la valeur statistique calculée est supérieure à la borne supérieure au seuil de 10%. Dans le cas où lCE est la variable endogène, la valeur statistique calculée est supérieure à la borne supérieure au seuil de 5%. Ceci implique qu'il existe deux vecteurs de cointégration.

Tableau 1.4- Détermination du nombre de retards optimal

lVA	AIC	BIC
0	-0,592	-0,545
1	-5,338	-5,243
2	-5,314	-5,173
lCE		
0	-1,379	-1,332
1	-5,609	-5,513
2	-5,607	-5,467

Tableau 1.5- Détection de la relation de long terme

1er Cas : lVA est la variable endogène

Variable avec tendance et constante	Nombre de retard optimal	F-statistique	probabilité	résultat
lVA endogène	1	4,935*	0,036 (5%)	cointégration

Les valeurs critiques asymptotiques	1%		5%		10%	
	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)
30	7,593	8,350	5,377	5,963	4,427	4,957
35	7,477	8,213	5,233	5,777	4,380	4,867

2ème Cas : lCE est la variable endogène

Variable sans tendance et avec constante	Nombre de retard optimal	F-statistique	probabilité	résultat
lCE endogène	1	5,982**	0,022 (10%)	cointégration

Les valeurs critiques	1%	5%	10%

asymptotiques	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)
30	6,027	6,760	4,090	4,663	3,303	3,797
35	5,763	6,480	3,957	4,530	3,223	3,757

*et** dénotent la significativité au seuil de 10% et de 5% respectivement.

Les valeurs critiques asymptotiques sont obtenues à partir de Narayan.PK (2005), p. 1987.

Tableau 1.6- Estimation de la relation de long terme

1er Cas : lVA est la variable endogène

lVA endogène	coefficient	significativité
Constante	2,788*	1%
tendance	0,046**	5%
lCE	-0,248**	5%

R^2 =0,99

2ème Cas : lCE est la variable endogène

lCE endogène	coefficient	significativité
Constante	0,012*	10%
lVA	0,085***	1%

R^2 =0,98

* ,**, *** dénotent la significativité au seuil de 10% ,5% et 1% respectivement.

2.4.3 Analyse de la causalité à court et à long termes

Après avoir détecté l'existence de deux relations de cointégration entre [lCE, lVA] dans les équations (1) et (2), l'étape suivante est de tester la causalité entre les variables à travers l'intégration du terme à correction d'erreur retardé dans les équations (7) et (8) respectivement. La causalité dans ce cas est examinée à travers la significativité du coefficient du terme à correction d'erreur retardé et la significativité des variables explicatives en différence retardées en se basant sur le test de Wald[38]. Les résultats de ce test de causalité est reporté au tableau 1.7 ci-dessous. Ils montrent qu'il existe une relation de causalité unidirectionnelle partant de la (CE) vers la (VA) à court terme et à long terme. La causalité de

38 Ce test est introduit automatiquement dans le logiciel Stata.

long terme de la consommation d'électricité vers la croissance économique est soutenue par le coefficient du terme à correction d'erreur retardé (dans la fonction où lVA est la variable endogène) qui est négatif et statistiquement significatif. La causalité à court terme partant de la consommation d'électricité vers la croissance économique est interprétée par la F-statistique de la fonction de la croissance économique (dans le cas où lVA est la variable endogène) où elle est statistiquement significative. Toutefois la causalité inverse c'est-à-dire de la (VA) vers la (CE) est rejetée par le coefficient du terme à correction d'erreur retardé ainsi que la F-statistique de la fonction de la consommation d'électricité (dans le cas où lCE et la variable endogène) qui sont statistiquement non significatives. Un récapitulatif du test de la causalité entre les deux variables est présenté au tableau 1.8.

Tableau 1.7- Test de la causalité de Granger

Variable dépendante	Flux de causalité	F-statistique	t-statistique d' ECM	R^2
Consommation d'électricité et croissance économique				
Croissance économique (VA)	Consommation d'électricité (CE) →croissance économique (VA)	2.8067 (0.0482)**	-2.7041** (0.0123)	0.31
Consommation d'électricité (CE)	Croissance économique (VA) → Consommation d'électricité (CE)	0.7752 (0.5188)	0.0426 (0.9663)	0.41

** indiquent la significativité statistique au niveau de 5%.

Tableau 1.8- Récapitulatif du test de la causalité

Variables	Causalité	Conclusion
Croissance économique (ΔlVA) et consommation d'électricité (ΔlCE)	Il existe une relation de causalité unidirectionnelle de la consommation d'électricité vers la croissance économique à court et à long terme.	La consommation d'électricité Granger—cause la croissance économique.

Conclusion

L'étude empirique que nous avons menée au niveau de ce chapitre a permis de montrer la présence de relations inter-temporelles entre la consommation d'énergie et la croissance économique à Sfax. En utilisant la technique de cointégration ARDL, les résultats empiriques affirment qu'il existe une relation de causalité unidirectionnelle partant de la consommation

d'électricité vers la croissance économique à Sfax à court et à long terme. Ce constat permet d'apprécier le rôle de l'énergie électrique dans les mécanismes de croissance à Sfax. Le progrès de la consommation d'électricité permet de soutenir et de stimuler la croissance économique, cependant, la pénurie de la production de l'électricité peut dans certains cas freiner cette croissance. D'où l'électricité peut être considérée comme étant un facteur qui limite la performance économique en cas de perturbations qui peuvent toucher les différentes phases du processus de la production.

Ce résultat s'aligne avec l'hypothèse de croissance qui prévoit que l'augmentation de la consommation d'énergie entraine une amélioration de la situation économique. C'est-à-dire, l'énergie cause le PIB et l'économie est considérablement dépendante de l'énergie. En conséquence, les politiques adoptées dans le domaine énergétique doivent prendre en considération l'importance du secteur énergétique et le mettre en priorité tout au long de ses différentes phases et surtout en ce qui concerne sa capacité ainsi que la qualité des services rendus étant donné qu'il agit directement sur la croissance économique du gouvernorat et peut contribuer au développement soutenable de Sfax et de la Tunisie d'une façon plus générale. En conséquence, l'élaboration d'un mécanisme d'harmonisation entre le régulateur et la structure du marché de l'industrie électrique en Tunisie s'avère vitale afin de stimuler la croissance économique.

Nous pouvons également déduire que la relation entre la consommation de l'énergie et le développement économique à Sfax est en opposition avec l'école néoclassique qui ignore les facteurs naturels dans son analyse et elle est en dichotomie avec son milieu naturel.

Toutefois ce constat coïncide avec le modèle de Hotelling (1931) qui considère la ressource naturelle non-renouvelable comme un actif procurant un revenu au cours du temps.
En ce qui concerne les travaux déjà effectués à ce propos, notre analyse et en concordance avecChouaibi N et Abdessalem T (2011), qui ont affirmé l'existence d'une relation de causalité unidirectionnelle partant de la consommation d'électricité vers la croissance économique en Tunisie. Ils ont énoncé que l'augmentation de la consommation d'électricité peut être considérée comme un indicateur majeur pour soutenir la croissance économique, toutefois, le manque dans la production d'électricité peut freiner la performance économique. Ce résultat, selon eux, a des implications importantes sur la politique énergétique de la Tunisie. Une politique de gestion de l'énergie concernant la consommation d'électricité n'entraîne pas d'effets négatifs éventuels sur la croissance économique en Tunisie mais la

politique de la croissance de la consommation d'électricité doit au moins stimuler la croissance économique par l'investissement, la création d'emploi, encourager les investissements directs étrangers, etc.

Mounir. B (2009) quant à lui, a indiqué qu'il existe, d'une part une relation de causalité à long terme bidirectionnelle entre la consommation d'énergie et le PIB en Tunisie et d'autres parts une causalité de court terme partant de la consommation d'énergie vers le PIB. En conséquence, l'énergie est un facteur limitant pour la croissance en Tunisie et les chocs qui touchent l'offre de l'énergie peuvent avoir un effet négatif sur la croissance.

Avant de clôturer ce chapitre, nous voulons mettre l'accent sur l'importance du secteur énergétique dans les mécanismes de développement à Sfax, considérée comme le deuxième pôle industriel de la Tunisie et parmi les villes les plus dynamiques économiquement, toutefois la consommation excessive de l'énergie entraine l'émission des GES et déclenche des effets pervers sur la qualité de l'environnement. Pour cet effet, le deuxième chapitre est consacré à l'analyse de l'impact de la consommation de l'énergie sur la dégradation de la qualité de l'environnement à Sfax.

CHAPITRE2 : IMPACT DE LA CONSOMMATION DE L'ENERGIE SUR LA DEGRADATION DE LA QUALITE DE L'ENVIRONNEMENT : VALIDATION EMPIRIQUE POUR LE CAS DU GOUVERNORAT DE SFAX

Une partie de ce chapitre (la partie théorique se rapportant à la courbe de Kuznets environnementale est analysée empiriquement pour le cas de la Tunisie) a fait l'objet d'une publication dont les détails sont ci-dessous :

Ben Hamida.R.,Feki.A and Hammami.S.(2012).Energy, polluting emissions and economic development in Tunisia. The Journal of Energy and Development, vol 37, n°1, pp.115-128.

Chapitre 2

Impact de la consommation de l'énergie sur la dégradation de la qualité de l'environnement : validation empirique pour le cas du gouvernorat de Sfax

« Nos ancêtres devaient se protéger des caprices de la nature ; qui aurait pu croire que viendrait le temps où c'est la nature qu'il faudrait à son tour protéger »

Jean-Marie Pelt

Introduction

Les questions environnementales et énergétiques sont indissociables, les dernières années ont donné quelques aperçus des risques que ferait courir le changement climatique au continent mondial. Comme toutes les activités humaines, la production, la distribution, la consommation d'énergie présentent un risque d'atteinte involontaire à l'environnement. Les populations et les écosystèmes peuvent être ainsi affectés par des pollutions et des perturbations.

Aujourd'hui, dans toutes les régions du monde, les questions de l'énergie et du climat sont étroitement liées. Pour longtemps la réalité du changement climatique a été sous-estimée. Si l'exploitation économique des ressources naturelles est fondamentale et avantageuse pour l'homme, elle peut aussi donner lieu par la même occasion à des effets pervers qui influencent la qualité de l'environnement. Les retombées de la consommation excessive de l'énergie n'est plus à justifier de nos jours et fait l'approbation de l'unanimité. Le changement climatique auquel nous faisons face s'aggrave encore avec la croissance exponentielle de la population mondiale qui épuise plus et en conséquence pollue plus.

Nous avons l'intention dans ce chapitre d'étudier en premier lieu les faits qui ont abouti à ce déséquilibre naturel en passant par les différents types de pollution ainsi que les conséquences des changements climatiques constatées à une échelle mondiale et régionale. En second lieu, nous exposons le fondement théorique du phénomène de la dégradation de la qualité de

l'environnement dans son ensemble. En dernier lieu, nous essayons d'analyser empiriquement pour le cas de la région de Sfax, l'impact de la consommation de l'énergie sur la variabilité du cadre naturel en faisant recours à la pollution atmosphérique choisie comme une cause évidente de ce constat climatique.

1- Volet théorique

1.1 La croissance démographique et la dégradation de l'environnement

L'accroissement de la consommation de l'énergie résulte de l'accélération de la demande des individus pour le confort ainsi que de l'expansion de la population mondiale.

Si la population mondiale évolue au même rythme actuel soit 1,2% annuellement, la population se rapprochera vers environ 20 milliards d'habitants en 2100 au lieu de 6,5 milliards en 2005. Toutefois, ces dernières années une tendance au ralentissement s'est envisagée, le taux de croissance annuelle après avoir atteint 2,1% en 1965, décline régulièrement depuis cette date et la population mondiale pourrait s'arrêter de croire vers 2050. Selon l'Organisation des Nations- Unies (ONU), la population mondiale serait de 9 milliards vers cette date. Le Conseil Mondial de l'Energie (CME) a ajouté que la population pourrait même diminuer à 7 milliards d'habitants en 2100.

Bernard. D (2007) a montré que les pays en voie de développement très peuplés comme la Chine, l'Inde, le Brésil et le Mexique sont en train de se développer intensivement et ils vont peser lourdement sur la consommation mondiale de l'énergie. Toutefois, la plus grande partie de la croissance démographique sera focalisée dans les pays à moyens limités et dont le niveau d'éducation et de technologie est assez réduit. Les projections d'accroissement démographique dans la plus part des pays Africains indiquent un taux de croissance annuel moyen de 3,1%. Cela mène à croire que ces pays vont rencontrer des difficultés pour se développer ainsi la constitution à l'échelle mondiale de deux groupes de population, l'un à fort dynamisme démographique mais incapable par faute de moyens et d'éducation à faire sa révolution industrielle, l'autre bien développé et bien éduqué mais en récession démographique. Si la consommation énergétique du premier groupe ne pèsera pas sur la consommation d'énergie commerciale, elle pèsera sur la consommation d'énergie non

commerciale[39], essentiellement la biomasse[40] et sera donc à l'origine de plusieurs problèmes environnementaux. Cette explosion démographique est susceptible d'aggraver la dégradation de l'environnement à travers l'accroissement de la production des déchets, la mise en culture de nouvelles terres entrainant la baisse des rendements, le déboisement et l'épuisement des eaux ainsi que l'accélération de l'urbanisation. L'urbanisation est considérée comme un élément important de l'évolution démographique. Selon le rapport d'ONU-Habitat (2006), le monde compte désormais plus d'urbains que de ruraux. Chaque année, la population urbaine mondiale croit de plus de 60 millions de personnes. La pauvreté est généralement plus élevée dans les zones rurales que dans les zones urbaines. L'urbanisation entraine une augmentation de la consommation énergétique notamment à cause des transports privés et publics. Elle entraine une plus grande utilisation de charbon de bois au lieu du bois de feu et un besoin accru pour les produits pétroliers (kérosène, butane, essence, gasoil) et d'électricité en plus du problème de la gestion des déchets.

1.2 Une vue d'ensemble du bilan énergétique mondial

Au début du 21ème siècle, la situation énergétique mondiale a été caractérisée par la domination des combustibles fossiles à concurrence de 80% de notre consommation : 35% pour le pétrole, 25% pour le charbon, 20% pour le gaz naturel. Les combustibles fossiles sont non renouvelables et trop polluants. La biomasse présente moins de 15%, l'énergie nucléaire 6% et l'hydraulique 2%[41]. Ce même bilan soulève une grande disparité, un citoyen Chinois consomme en moyenne moins d'un tep/an, tandis qu'un citoyen Américain consomme annuellement près de 8 tep/an. Les Etats-Unis qui représentent environ 5% de la population

39
L'énergie commerciale est celle qui fait l'objet d'un commerce. Sauf mention particulière, seules les énergies commerciales sont retenues dans les statistiques. Les énergies non commerciales recouvrent l'autoconsommation énergétique dans un grand nombre de zones rurales : collecte du bois de feu, de la tourbe, des déchets animaux et végétaux.

40
La biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale. Les principales formes de l'énergie de biomasse sont: les biocarburants pour le transport (produits essentiellement extraits à partir de céréales, de sucre, d'oléagineux et d'huiles usagées) ; le chauffage domestique (alimenté au bois) et la combustion de bois et de déchets dans des centrales produisant de l'électricité, de la chaleur ou les deux.

41
Les données de l'AIE 2007.

mondiale totalisent plus de 25% de la consommation mondiale d'énergie et sont responsables de 18% des émissions de GES.

En revanche, un citoyen Européen consomme environ 4 tep/an. Les pays émergents y compris la Chine ont besoin d'être plus énergivores pour stimuler leur croissance ce qui signifie plus d'émissions polluantes. Chevalier. J.M (2009) a souligné qu'en analysant les bilans énergétiques nationaux, nous remarquons que chaque pays possède sa propre répartition énergétique liée à ses ressources disponibles, à son niveau de développement ainsi qu'à sa politique énergétique adoptée. Par exemple en Chine, le charbon domine son bilan énergétique (70%), l'énergie nucléaire conquiert le bilan Français, le pétrole et le gaz naturel importées constituent la grande partie d'énergie consommée en Italie. L'Allemagne garde un bilan plus diversifiée avec le pétrole (36%), le charbon (25%), le gaz naturel (23%) et le nucléaire (12%). L'électricité a dominé la consommation énergétique depuis la seconde guerre mondiale et l'économie moderne est jugée fortement dépendante de l'électricité qui est devenue un bien essentiel pour le développement des nations. Même les mécanismes de chauffage non électriques ont besoin de l'électricité pour leur mise en marche. La production de l'énergie est également considérée comme un facteur important dans la constitution des économies modernes. Actuellement, la consommation de l'énergie est responsable de 24% des émissions de GES. L'analyse des systèmes énergétiques montre qu'aujourd'hui l'énergie et l'environnement sont étroitement liés, la production et la consommation de l'énergie en France sont responsables de 95% des émissions de CO_2. Cependant, cette relation n'est pas encore bien incorporée dans les choix individuels et les politiques publiques. Godard. B (2007) a stipulé que Stern dans son rapport sur l'économie du changement climatique a indiqué clairement que ceux qui émettent les GES, qui produisent de l'électricité qui polluent, sont en train de vivre en confort, se déplacer entre les pays et ne sont pas en train de payer les couts du changement climatique résultant de leur contribution à l'accumulation des émissions polluantes. Pour lui, c'est le plus grand échec des mécanismes de marché dans l'histoire économique. Ceci prouve la grande confrontation soulevée entre les biens privés et un bien public spécifique, le climat.

Le tableau 2.1 ci-dessous montre que la consommation énergétique des pays asiatiques est fortement dominée par le carbone. La Chine représente à elle seule 25% des émissions mondiales de CO_2 en 2010 suivie par l'Inde 5%. En revanche, les Etats-Unis occupent le deuxième rang avec un taux de 19%. Vu que la plupart des pays asiatiques sont des pays

émergents, il demeure difficile de leur imputer la responsabilité du changement climatique. Selon les prévisions à l'horizon 2030, la Chine et l'Inde représenteront entre 50 et 60% de l'augmentation des émissions de CO_2, de sorte qu'ils seraient alors les premier et troisième émetteurs, tandis que le Japon serait cinquième. Selon ces perspectives, les émissions chinoises devraient même dépasser celles des États-Unis de 2/3 d'où les mesures suivies pour atténuer les émissions de CO_2 doivent nécessairement passer par l'Asie.

Tableau 2.1- Les émissions de CO_2 dans le monde en pourcentage en millions de tonnes (année 2010)

Les pays	Les émissions en %
Amérique du Nord	21,7
Sud et centre d'Amérique	3,8
Europe et Eurasie	21,6
Moyen-Orient	5,8
Total d'Afrique	3,2
L'Asie pacifique	43,9

Source: Statistical review of world energy full report 2011.

1.3 La pollution

Pierre. M (2008) a indiqué que la pollution est l'émission dans un milieu (air, eau, sols, etc.) des produits qui le modifient et engendrent une gêne ou une nuisance. Les conséquences d'une pollution peuvent concerner l'état des biens et surtout, la santé des espèces animales, de l'espèce humaine et végétales qui vivent dans ce milieu ou utilisent ses produits ou, simplement, provoquer une atteinte à leur intégrité physique (maladies) ou à leur bien-être (odeur). La pollution peut se transmettre d'un milieu à un autre dans le cadre des échanges climatiques, d'un milieu à une espèce ou d'une espèce à une autre. Nous distinguons les émissions de (GES) qui ne sont pas nécessairement des polluants, le principal d'entre eux est le (CO_2) qui est naturellement présent dans l'atmosphère et dans les autres milieux.

La pollution peut être d'origine biologique tel que les bactéries ou d'origine chimique tel que les oxydes de carbone, les oxydes d'azote, les hydrocarbures, etc. Par extension, nous parlons de pollution physique lorsque les caractéristiques du milieu sont modifiées par exemple dans

le cas d'un bruit (pollution sonore), de la chaleur (pollution thermique), de la radioactivité (pollution radioactive).

1.3.1 Les différents types de pollution

La classification de la pollution doit être opérée selon le milieu atteint c'est-à-dire selon qu'il s'agit de l'air, des eaux continentaux, de la mer ou du sol.

1.3.1.1 La pollution atmosphérique

La pollution de l'air est la résultante de multiples facteurs qui caractérisent la civilisation contemporaine : la croissance de la consommation d'énergie fortement corrélée avec la croissance démographique et l'urbanisation, le développement des industries extractives, métallurgiques et chimiques, la circulation routière et aérienne, l'incinération des ordures ménagères, des déchets industriels, des décharges de pesticides en agriculture, etc.

- **La pollution atmosphérique locale**

La pollution atmosphérique locale résulte de l'utilisation des énergies fossiles, essentiellement le charbon et avec une responsabilité moindre le pétrole et le gaz. Les principaux polluants sont :

- Le dioxyde de soufre (SO_2). Il est produit par la combustion du souffre contenu dans le charbon, le fioul et le gazole. Sous l'effet de l'eau de pluie, il produit l'acide sulfurique qui se transforme en pluies acides et entraine l'acidification des lacs et attaque les pierres de construction lorsqu'elles sont calcaires et cela pour centaines de kilomètres.
- L'hydrogène sulfuré (H_2S). Il est contenu à fortes doses dans certains gisements de gaz naturel ou produit par les raffineries de pétrole. Il est extrêmement toxique et mortel même à faible teneur dans l'atmosphère.
- Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Ils sont produits par la combustion de tous les combustibles fossiles mais aussi de la biomasse. Ils sont la cause du cancer pour les fumeurs étant donné que la biomasse fait partie des composantes du tabac.
- Les particules ou les suies. Elles sont issues de la combustion de tous les combustibles fossiles et de la biomasse. Les moteurs diesel en produisent beaucoup sous forme de fumées noires qu'on aperçoit en circulant derrière les voitures et les camions anciens

ou mal entretenus. Les particules dont le diamètre est inférieur à 10µ sont nommées PM_{10} et celles dont le diamètre est inférieur à 2,5µ $PM_{2.5.}$

- Les goudrons. Ce sont des produits de décomposition des combustibles par la température qui n'ont pas le temps d'être brulés lors de la combustion. Ils forment les dépôts noirs et visqueux observables dans les conduits de cheminée. Ils sont produits essentiellement avec le bois et le charbon.
- Les oxydes d'azote appelés souvent (NO_x) parce qu'il s'agit d'un mélange de différents oxydes. Ils sont produits par combinaison de l'azote et de l'oxygène de l'air à très haute température. La plupart des installations utilisant des combustibles et les moteurs à combustion interne produisent des quantités notables de l'ordre de 0,5 grammes par kilomètre parcouru pour la plupart des véhicules.
- Les composés organiques volatiles (COV). Ils proviennent de l'évaporation ou de la combustion incomplète des carburants et surtout de l'essence. Ils contribuent par des réactions photochimiques impliquant les oxydes d'azote et l'oxyde de carbone à la formation d'ozone (O_3) troposphérique en périphérie des villes. Celui-ci est un toxique et un irritant respiratoire. Certains COV sont cancérigènes à très faible teneur dans l'atmosphère comme le benzène.
- Le monoxyde de carbone (CO). Il est produit par une combustion en manque d'oxygène. C'est un gaz mortel à faible dose. Nous le trouvons surtout dans les gaz d'échappement des voitures.
- Le plomb qui est présent dans les anciens supercarburants à l'état de plomb tétraéthyl. Il est extrêmement toxique et sa destruction libère un peu partout du plomb qui est un toxique du système nerveux responsable de la maladie de saturnisme.
- Le mercure et l'arsenic. Ils sont contenus parfois sous forme de (COV) dans le gaz naturel mais sont éliminés de celui-ci avant usage. ils sont aussi contenus en petite quantité dans le charbon, d'où ils sont impossibles à éliminer. Ils se trouvent aussi dans les fumées de combustion et peuvent s'éparpiller à des distances considérables et contaminer la chaine alimentaire.
- Les cendres minérales. Elles sont produites plus particulièrement par la combustion du charbon et du bois. Les plus fines se retrouvent dans les fumées et peuvent se disperser sur de vastes surfaces. elles contiennent des traces d'éléments radioactifs à savoir le potassium 40 et le carbone 14.
- Les aérosols. Ce sont des particules minérales ou organiques extrêmement fines. Elles restent en suspension dans l'atmosphère et peuvent circuler très loin de leur source et même faire plusieurs fois le tour de la terre avant de se déposer.

Ces polluants et leurs caractéristiques justifient la pollution intense en chine qui est caractérisée par une consommation très intense en charbon. 25% des décès annuels en Chine sont dus à des maladies respiratoires. Dans les provinces charbonnières chinoises, il existe une grave pollution atmosphérique due à la combustion lente du charbon dans les mines où l'exploitation a été mal maitrisée.

- **La pollution atmosphérique globale : l'effet de serre anthropique**

Selon les déclarations du GIEC (1996), les émissions de GES issues des activités humaines influencent le climat et ont des effets économiques, sociaux et géopolitiques majeurs. L'effet de serre est analysé pour la première fois par le scientifique Suédois Arrhenius en 1895. Il est dû à la présence dans l'atmosphère de très faibles quantités de certains GES suite :

- Aux rejets domestiques provenant en plus du chauffage au charbon, du gaz naturel et du fioul, de divers appareils ménagers tels que les réfrigérateurs qui dégagent des chlorofluorocarbures, attaquant directement la couche d'ozone, en plus des incinérateurs[42] d'ordures ménagères et des décharges qui sont à l'origine du dégagement de méthane.
- A l'agriculture qui émet du méthane (CH_4) suite aux fermentations du fumier et de la riziculture et de l'oxyde nitreux (N_2O) émanant du fumier et des engrais azotés.

La pollution atmosphérique est à son maximum en zone urbanisée, non seulement en raison de la concentration des industries et des foyers domestiques, mais aussi à cause de la circulation des véhicules à moteur. Néanmoins, certains polluants sont responsables de la diffusion de la pollution et contaminent l'ensemble de l'atmosphère et cela à une échelle globale. Ce sont, en particulier, les rejets des GES : le (CO_2), (CH_4) et (NO_2).

Il existe en outre d'autres GES qui sont :

- L'hexafluorure de soufre (S_6F_6) utilisé comme isolant dans les transformateurs
- Les chlorofluorocarbones (PFC_s) utilisés dans les réfrigérateurs, les bombes aérosols et les climatiseurs des voitures.
- l'(O_3) produit par la circulation automobile et certaines activités industrielles.

De tous les GES déjà cités, seuls les (PFC_s) et l'(S_6F_6) ne sont produits que par les activités humaines. En revanche, la majorité des quantités de CO_2, de CH_4, de NO_2 d'O_3 et de vapeur d'eau sont d'origine naturelle.

L'effet de serre est le phénomène selon lequel le rayonnement solaire qui arrive à la terre et qui est réfléchi par celle-ci est partiellement conservé dans l'atmosphère par suite de son absorption par des molécules de certains gaz contenus dans l'air.

42 Méthode de traitement thermique des déchets qui consiste en une combustion (technologie et température variant selon la nature du déchet) et un traitement des fumées.

Le rayonnement solaire essentiellement composé de rayonnement visible, est en effet en partie (30%) réémis directement vers l'espace par la haute atmosphère et par les nuages et pour le reste absorbé par l'atmosphère (20%) ainsi que par la terre et par les océans (50%) qui le réchauffent avant d'être rétabli sous forme de rayonnement infrarouge. Toutefois une partie de ce rayonnement réintroduit est absorbé par des molécules des gaz dits à effet de serre. Il en résulte une élévation de la température de l'atmosphère par rapport à celle qu'en l'absence de ce mécanisme. Grâce à ce phénomène naturel, la température moyenne de l'air à la surface de la Terre est d'environ + 15°C. Sans ce régulateur naturel, la température moyenne serait de – 18°C.

En effet, l'activité humaine a amplifié la teneur de plusieurs GES tel que le CO_2 suite à l'usage des combustibles fossiles et la déforestation, le CH_4 et le protoxyde d'azote à cause de l'activité de l'agriculture.

Les quantités de ces gaz d'origine anthropique excèdent la capacité de réutilisation naturelle et le temps consacré pour leur résidence dans l'atmosphère est jugé très long : de cinquante à cent ans pour le CO_2, de cent cinquante ans pour le protoxyde d'azote et de dix ans pour le CH_4. Selon les déclarations du GIEC (2004), l'augmentation de l'effet de serre depuis le début de l'ère industrielle est due pour 63% au CO_2, pour 18% au CH_4, pour 6% au NO_2 et pour 13% aux composés halogénés de carbone. L'augmentation incontrôlée de l'effet de serre pourrait provoquer selon les pires prévisions (violents incendies de forêts dus aux sécheresses et réchauffement progressif des océans entraînant la fonte puis la remontée à la surface du méthane stocké au fond des mers) et si rien n'est fait pour diminuer les rejets humains des GES, une augmentation de la température du globe jusqu'à 10°C en moyenne d'ici à 2150.

1.3.1.2 La pollution des eaux continentales

La pollution des eaux continentales provient, premièrement de l'introduction dans l'eau d'impuretés qui peuvent engendrer des pollutions naturelles telles que les parasites, les virus et les bactéries ou des pollutions dues au rejet de matières fécales qui peuvent provoquer des maladies telles que la typhoïde, le choléra et la dysenterie ou finalement des pollutions résultant du ruissellement de l'eau de pluie sur les sols où elles absorbent des hydrocarbures imbrulés[43], des engrais et des pesticides[44].

43
Un imbrûlé est un résidu émis par un dispositif de combustion.

44
Un pesticide est une substance répandue sur une culture pour lutter contre des organismes considérés comme nuisibles.

Elle peut être également due aux rejets de déchets industriels dans les rivières. En outre, il existe aussi la pollution thermique des eaux due au rejet dans les rivières ou dans les lacs d'eaux qui ont servi au refroidissement des usines et des centrales thermiques et nucléaires des déchets radioactifs.
La concentration des polluants dans les eaux continentales dépend de l'importance des rejets mais aussi du régime hydrologique[45], elle est maximale en période d'étiage[46]. De plus les polluants peuvent réagir entre eux et avoir des effets secondaires.
La détérioration des lacs résulte de l'arrivée d'eaux chaudes chargées d'engrais ce qui entraine une prolifération d'algues qui absorbent l'oxygène pendant sa décomposition et entrainent la disparition de la faune et de la flore aquatique.

1.3.1.3 La pollution des mers

La pollution des mers résulte de l'introduction de corps étrangers qui affectent ses caractéristiques. Les polluants peuvent être sous forme dissoute qui les rendent invisibles ou bien sous forme de particules en suspension qui changent sa couleur et diminuent la transparence de l'eau. Ces polluants peuvent être :

- Des micro-organismes tels que les bactéries et les virus qui sont naturellement présents ou qui proviennent du rejet des matières fécales.
- Des produits organiques provenant de l'agriculture et de l'usage domestique tels que les engrais, les pesticides et les détergents.
- Des produits pétroliers issus des rejets des bateaux, du dégazage de certains navires, des accidents, etc.
- Des sels biogènes à base d'azote et de phosphore qui entrainent la multiplication des algues.
- De métaux provenant des rejets industriels.
- De radionucléides[47] artificiels provenant des explosions atomiques ou de rejets contrôlés.

La pollution des mers est directement liée à celle de l'air, des eaux continentales et des sols. Elle est transportée par les pluies et les rivières. La mer a un pouvoir d'autoépuration par

45
Le régime hydrologique désigne l'ensemble des variations de l'état et des caractéristiques d'une formation aquatique, qui se répètent régulièrement dans le temps et dans l'espace et passent par des variations cycliques, par exemple, saisonnières.

46
Qui correspond à la période de l'année où le débit d'un cours d'eau atteint son point le plus bas.

47
Ce sont des atomes d'éléments radioactifs naturels ou artificiels.

sédimentation des particules, décomposition des matières organiques sous l'action de bactéries, destruction des micro-organismes marins par des micro-organismes terrestres. Cependant, ce pouvoir n'est plus efficace s'il y'a une concentration trop élevé de polluants tel est le cas des marées noires. Les pollutions marines elles-mêmes se déplacent avec les courants marins. L'évaporation des eaux de mer peut transférer ces pollutions à l'air puis, à travers les précipitations aux sols et aux eaux continentales.

1.3.1.4 La pollution des sols

La pollution des sols résulte du ruissellement des eaux de la pluie ou d'irrigation et des rejets des déchets ou d'eaux usées. Les sols urbains sont beaucoup plus pollués que les sols ruraux à cause des concentrations des individus et leurs activités. La pollution des sols a été au début organique suite aux matières fécales puis minérale causée par les métaux utilisés dans l'industrie et la construction dont certains sont très dangereux tels que le mercure, le plomb, le zinc et l'arsenic[48].

Les pollutions récentes des sols sont liées à la circulation automobile tels que le rejet d'huiles lourdes et d'hydrocarbures lessivés par les pluies et à l'agriculture telle que les engrais et les pesticides en plus des usines à risque à produits toxiques et les accidents lors du transport de matières dangereuses.

1.3.2 La pollution d'origine énergétique

En France, l'énergie est responsable de plus des deux tiers de la pollution atmosphérique. Selon l'AIE (2010), la production et la consommation de l'énergie sont responsables de 94% des émissions de CO, de plus de 80% de SO_2, de 60% des NO_x et de 56% des poussières. Ces polluants dépendent de la source d'énergie ainsi que du secteur d'utilisation.

Si nous considérons les polluants par type d'énergie, nous constatons que les émissions de SO_2 sont issus principalement de la consommation du fioul lourd et du charbon mais avec une moindre mesure du fioul domestique et des ordures ménagères. Celles des NO_x résultent du pétrole consommé sous forme de carburant et surtout du carburant diesel à destination des poids lourds. En revanche, le bois et les déchets sont moins polluants que le charbon. La combustion incomplète des moteurs de véhicules automobiles et aussi des chaufferies de bois

48
L'Arsenic est un élément chimiquement proche du phosphore et naturellement présent dans la croute terrestre dans les minerais.

amplifient considérablement les émissions de NO_x et entrainent les émissions de (CO) et d'hydrocarbures. Toutefois, les émissions de CO_2 émanant du charbon sont inférieures à celles provenant des produits pétroliers à l'exception du fioul lourd et du gaz naturel. Par contre, les autres énergies autres que les fossiles c'est-à-dire le nucléaire, l'hydro-électricité, la géothermie, l'éolien, le solaire et l'hydrogène ne produisent pas ou avec de faibles quantités les polluants et le CO_2 de façon directe. En outre, la constitution de l'infrastructure nécessaire à leur production, à leur transport et à leur utilisation émet des émissions polluantes avec des proportions différentes.

Les biocarburants[49] sont aussi une source de pollution importante soit directe tel que les engrais et les pesticides ou indirecte suite à l'activité de production, de transport, de raffinage ou de distribution. Plus la place des énergies fossiles est élevée, plus sont importantes les pollutions et les émissions de GES. Mais il convient de prendre en considération à part la nature de l'énergie utilisée, la source d'énergie primaire. Pour l'usage de l'électricité essentiellement, il faut tenir compte de la répartition des sources primaires utilisées telles que la thermique, l'hydraulique, le nucléaire, le solaire et l'éolienne. Ceci signifie que dans un pays comme la France où 90% de l'électricité est produit à partir de l'énergie nucléaire et hydraulique, les émissions polluantes et les GES sont faibles par rapport à d'autres pays comme la Chine où l'électricité est d'origine thermique essentiellement alimentée par le charbon, qui est une source principale de pollution.

Le secteur du transport (maritime, routier et aérien) est le plus dépendant du pétrole. Il représente plus de la moitié de la consommation de pétrole en France et il est le principal responsable des émissions de CO (42%), de NO_x (46%), de poussières (30%), de COV (27%) et de SO_2(6%). L'agriculture fait également appel à des dérivés de pétrole, elle fait parvenir les engrais et les pesticides qui sont responsables des émissions de CH_4 suite au stockage du fumier.

Merlin. P (2008) a souligné que l'industrie est également responsable avec la sidérurgie du quart des émissions des hydrocarbures, de COV, de CO, de CO_2, de CH_4 et des NO_x. Elle partage avec l'agriculture la responsabilité de la pollution des sols et des eaux.

49
Un biocarburant est un carburant produit à partir de matériaux organiques non fossiles, provenant de la biomasse.

1.4 Analyse théorique du phénomène de la dégradation de la qualité de l'environnement

La pollution, les GES, le changement climatique, la déforestation….ce sont tous des faits qui ont suscité l'intérêt du débat public à partir du début des années 70. Les soucis se rapportant à l'environnement ont accentué la pensée autour de la relation entre les activités anthropiques et la nature.

La relation entre l'activité humaine en forte croissance et la qualité de l'environnement en dégradation peut être analysée en théorie selon le principe des effets externes ou un peu plus tard en se référant à la courbe environnementale de Kuznets qui a suscité l'intérêt de plusieurs analystes.

La pollution peut être définie comme étant la résultante des effets redoutables issus des activités humaines sur les milieux naturels. Les activités de production et de consommation nuisent aux milieux naturels de telle sorte que les écosystèmes sont incapables de se régénérer. Pour analyser économiquement le phénomène de la pollution ainsi que son impact sur le bien-être, nous faisons référence à l'économie de l'environnement. Cette dernière a trouvé ses inspirations à partir de l'analyse néoclassique et de l'un de ses prolongements l'économie du bien-être. Cette dernière se présente comme une filiation de l'économie qui évalue les situations du bien-être social défini comme optimal au sens de Pareto. Elle étudie les façons dont les ressources pourraient procurer le bien-être collectif maximal en présence de troubles dans le système économique. Arthur Cecil Pigou est l'un de ses principaux précurseurs avec son ouvrage « the economics of welfare » publié en 1920. Il s'est inspiré de l'analyse néoclassique et néo-utilitariste.

1.4.1 Analyse de la pollution selon le concept d'effets externes : une vue historique

L'étude de la pollution est basée sur le concept d'effet externes et des biens publics développés au début du 20 ème siècle. C'est en termes d'externalités que les mal faits de la pollution et la dégradation de la qualité de l'environnement sont interprétés.

L'analyse économique considère la dégradation du bien-être comme une perte d'utilité non compensée par les mécanismes de marché. C'est la théorie néoclassique qui avait l'initiative de définir les effets externes comme des défaillances par rapport au cadre de la concurrence parfaite et la pollution comme un cas particulier de ces effets externes. L'analyse économique

de la pollution est fondée sur l'imbrication d'effets externes, de biens collectifs et de droits de propriété.

Sidgwick. H (1887) est le premier qui a pris conscience des difficultés engendrées par les effets externes dans une économie décentralisée, dans le chapitre II du livre III, il a annoncé que : « même dans une société constituée uniquement ou principalement ''d'homo-economicus''[50], le système de la liberté naturelle peut n'avoir pas tendance à réaliser les résultats bénéfiques qu'on lui attribue….. Qu'il existe des utilités qui, par leur nature, ne peuvent pas pratiquement être appropriées par ceux qui les produisent... ».

Il soumet comme exemple la lumière d'une maison qui peut être exploitée par des bateaux (ce même exemple a été repris plus tard par Pigou.A.C (1920)), les effets favorables d'une forêt sur le système des pluies (repris par Pigou.A.C (1920) et Meade.J.E (1952)) et d'autres exemples concernant les biens publics. Laffont. J.J (1975) a stipulé que Marshall. A(1890) est le second qui a contribué au concept d'économie externe. Il a introduit les expressions d'économies internes (celles qui dépendent des ressources des entreprises individuelles et de l'efficacité de leur gestion) et externes (celles qui dépendent du développement général de l'industrie) dans un contexte qui a fortement influencé l'évolution des idées. En effet, son approche l'a conduit à des confusions qui étaient longues à écarter.

Laffont. J.J (1975) a énoncé que l'analyse de Marshall qui confond courte et longue périodes, équilibre partiel et équilibre général est peu déductive, mais elle met en relief le caractère positif des groupements et l'interdépendance des agents économiques. En faisant recours à la courbe de prix d'offre, Marshall. A (1890) n'a pas fait la distinction entre les économies provenant des mouvements de prix et les économies technologiques. S'il évoque essentiellement l'aspect positif des externalités, quelques remarques montrent qu'il est très conscient du problème théorique des déséconomies. Cependant, comme à son époque ce n'est pas tellement un problème de fait, Marshall l'a généralement écarté.

A côté de l'analyse dynamique de Marshall. A(1890), Pigou.A.C (1920) a expliqué le concept d'effet externe statique en se référant au principe de l'optimum qui exige l'égalité des produits marginaux sociaux nets et des produits marginaux privés nets bien que les intérêts privés ne favorisent pas cette égalité. La divergence entre ces deux produits marginaux éloigne de

50 Est une représentation théorique du comportement de l'être humain qui est à la base du modèle néoclassique. L'homo-economicus est considéré comme rationnel.

l'optimum. Pour lui, les effets externes statiques sont l'une de ces causes qu'il examine. Il a illustré une série d'exemples à ce propos tels que la lumière envoyée par la porte d'une maison qui éclaire la rue, l'implantation des espaces verts qui sont visités par les citoyens, la construction d'une usine dans une cité résidentielle, etc. Pour éliminer ces divergences, Pigou.A.C (1920) a proposé l'intervention de l'Etat à travers les subventions et les impôts, il s'est placé dans les conditions de la concurrence parfaite quand il a proposé sa solution. Clapham.J.S (1922) a édité la controverse « des boites vides », selon laquelle il a montré que les concepts ou boites d'industries à rendements croissants, constants et décroissants employés par Marshall. A (1890) et Pigou. A.C (1920) ne reflètent pas la réalité. Laffont. J.J (1975) a précisé que les effets externes statiques exposés par Pigou. A.C (1920) sont technologiques, ce sont les seuls à avoir une signification pour la théorie du bien-être, cependant, ils sont peu importants. Les autres économies ou déséconomies externes liées aux rendements croissants ou décroissants sont pécuniaires, c'est-à-dire passent par l'intermédiaire des prix de marché et révèlent seulement la nécessité d'une analyse d'équilibre général.
Les conclusions tirées de la controverse des « boîtes vides » ont conduit à un désintéressement du sujet des effets externes et c'est en 1943 qu'Ellis. H et Fellner. W (1943) ont publié un article qui reprend les analyses de Pigou, ils ont confondu économies pécuniaires et technologiques. Toutefois, ils ont fait la distinction entre les économies externes « réversibles » et les économies externes « irréversibles ». Ces dernières nécessitent une théorie dynamique qui n'est pas faite et qui devrait en particulier justifier en avenir incertain des mesures de politique économique injustifiables dans une théorie statique.

Meade. J.E (1952) est le premier à prendre nettement conscience de cette distinction et à étudier les effets externes technologiques en tant que tels. Il a distingué deux sortes d'effets externes, « les facteurs non payés » et les « créations d'atmosphère ». Les facteurs non payés sont expliqués par l'exemple de l'apiculteur et du verger. Les abeilles fournissent le service de fécondation des fleurs au propriétaire des arbres fruitiers qui, de son côté, fournit du suc à l'apiculteur. Il s'agit d'économies externes réciproques. Les « créations d'atmosphère » considèrent le cas de reboisement d'un terrain qui rectifie le régime des pluies sur les différentes terres au voisinage. La collectivité retire plus d'avantage que le propriétaire du terrain. La distinction entre ces deux types d'effets externes est importante dans la mesure où elle aboutit à des implications en termes de politique économique qui sont différentes. Dans le premier cas, la correction des externalités n'est pas nécessaire puisqu'elle diminuerait le bien

être des agents qui deviennent obligés de se doter du même service par d'autres moyens. Pour le second cas, il est possible de proposer une rémunération au propriétaire du terrain.

1.4.1.1 Les différents types d'externalités

Les travaux postérieurs ont donné lieu à toute une littérature permettant la distinction entre les différents types d'externalités parmi lesquels il y'a ceux qui se rattachent au domaine de l'environnement.

- **Les externalités pécuniaires et non pécuniaires**

Scitovsky. T(1954) a le mérite d'éclairer une nouvelle fois la distinction entre les deux types d'effets externes (pécuniaires ou technologiques).Il a insisté sur l'inutilité d'évoquer l'effet externe pécuniaire et depuis, il sera entendu par effet externe l'effet externe technologique c'est-à-dire, tout effet indirect d'une activité de production ou de consommation sur une fonction d'utilité, un ensemble de consommation ou une fonction de production.Buchanan. J.M (1969) et Meade. J.E (1973) ont distingué entre les externalités pécuniaires et non pécuniaires. L'externalité pécuniaire est issue d'une interdépendance entre les agents qui affecte indirectement les prix. Faucheux. S et Noel. J.F (1995) ont proposé l'exemple de l'installation d'une nouvelle entreprise dans une zone, entrainant ainsi la hausse des loyers industriels ou domestiques et engendrant l'accroissement des dépenses. Les firmes déjà présentées subissent une externalité négative étant donné qu'aucune compensation ne leur est versée suite à la hausse du prix des loyers. Toutefois, les incidences des comportements des différents agents se fait par l'intermédiaire des prix sur un marché donc nous ne pouvons pas parler d'effets externes au marché et il sera meilleur de se limiter aux externalités non pécuniaires ou technologiques.

- **Les externalités « Pareto relevant » et « Pareto irrelevant »**

Buchanan. J.M et Stubblebine.W (1962) ont proposé une classification entre, d'une part l'externalité relevant de l'optimum de Pareto dont l'internalisation engendre un gain net pour

la collectivité et permet donc de se rapprocher de cet optimum et d'autre part l'externalité ne relevant pas de l'optimum de Pareto qui, au contraire son internalisation ne procure pas de gain social net et donc n'est pas recommandée.

Si nous appliquons cette distinction à l'environnement, nous constatons que le niveau optimal de la pollution est rarement nul, la pollution restante forme une externalité dont l'élimination n'est pas conseillée étant donné que cette action évince de l'optimum, les couts excèdent les avantages donc il s'agit d'une externalité non relevant de l'optimum.

- **Les externalités bilatérales et multilatérales**

Vallée. A (2002) a ajouté que les externalités bilatérales résultent de l'action d'un agent sur un autre agent (deux entreprises, deux consommateurs, une entreprise et un consommateur), tandis que les externalités multilatérales sont le fait de l'action de ''n''agents et affectant '' n'' autres agents. En ce qui concerne l'environnement, la pollution issue des différentes activités peut être classée dans cette dernière catégorie. Baumol. W et Oatas. W (1975) ont affirmé que le critère de rivalité ou de non rivalité permet d'affiner cette distinction en faisant la différence entre les externalités privées ou rivales et les externalités publiques ou non rivales. Quand le dommage ou l'avantage subi par un agent réduit celui subi par les autres agents, nous parlons d'externalités privées. Toutefois, quand le dommage subi ou l'avantage subi par un agent ne diminue pas celui supporté par les autres, c'est-à-dire il s'agit d'un même effet pour tous, l'externalité est dans ce cas est publique. Nous citons à titre d'exemple le cas d'un agent qui respire l'air pollué ne diminue pas les dommages imposés à un autre individu se retrouvant dans le même espace.

- **Les externalités statiques et dynamiques, diffusés ou non**

Pearce. D.W (1976) a introduit la distinction entre les externalités statiques et dynamiques qui s'appliquent surtout au domaine de l'environnement. Les externalités statiques sont localisées et ont un impact réversible sur le bien être des agents, les politiques d'internalisation peuvent résoudre le problème. Par contre, les externalités dynamiques ont des effets persistants, irréversibles et globaux, les stratégies d'internalisation dans ce cas sont inefficaces. Nous disons que les externalités sont diffusées s'il s'avère impossible ou s'il est difficile d'identifier

l'origine de la pollution ou le point de réception, tel est le cas de la pollution globale issue de l'effet de serre.

- **Les externalités positives et négatives**

Les externalités environnementales peuvent être positives ou négatives selon qu'elles engendrent l'amélioration ou la dégradation de la qualité de l'environnement. La variation de la qualité de l'environnement comporte deux aspects. Le premier illustre une modification physique, chimique ou biologique de l'environnement tandis que le deuxième aspect concerne la nuisance causée par toute action anthropique utilitariste. Ces mêmes effets externes sont différenciés selon leur source : production ou consommation.

Les effets externes issus de la production peuvent être positifs mais sont rares, si par exemple l'activité d'un producteur améliore le bien être d'un autre producteur ou consommateur, ceci peut être même réciproque comme l'exemple classique de l'apiculteur et de l'arboriculteur qui ont des services réciproques. Par ailleurs, les effets externes peuvent être négatifs tel que la pollution issue des modes de production agricoles.

Les effets externes issus de la consommation peuvent également être positifs ou négatifs. Ils sont positifs dans le cas par exemple où chaque individu contribue à la propreté de l'environnement de telle sorte que l'harmonie et la beauté du paysage sera conservée, et négatifs si la consommation d'un bien quelconque génère une pollution tels que le tabagisme, le bruit et l'utilisation de l'automobile dans les zones urbaines. D'une façon générale, ces externalités sont toujours liées à l'utilisation d'un bien d'environnement collectif.

1.4.1.2 L'environnement naturel en tant que bien collectif

En économie publique, un bien collectif est défini à partir de sa consommation, il fait l'objet d'une consommation collective et possède deux caractéristiques, la non rivalité d'usage et la non-exclusion (Vallée.A, 2002). La non rivalité signifie que la consommation du bien par un individu ne réduit pas la quantité disponible de ce bien pour les autres agents même si il est consommé simultanément. La non exclusion indique qu'il est impossible d'exclure ou de priver un individu de l'usage de ce bien. A travers ces deux caractéristiques jugées indépendantes, nous pouvons repérer les biens entre les deux extrêmes qui sont les biens privés purs et les biens collectifs purs.

Tableau 2.2

	Exclusion possible	Exclusion impossible
rivalité	Biens privés purs	Biens communs
Non-rivalité	Biens de club	Biens collectifs purs

Source : Annie vallée (2002).

Les biens privés purs renvoient à une consommation individuelle qui prive les autres individus de la possibilité de consommer ces mêmes biens (aliments, vêtements....). En opposition, les biens collectifs purs sont consommés en quantité et qualité égales par une communauté d'individus plus au moins étendue. Un bien collectif pur peut être ; locale tel que l'éclairage public, le silence, la qualité de l'air ; nationale comme la défense et la sécurité nationale ; ou internationale comme l'atmosphère terrestre. Vallée. A (2002) a souligné qu'un bien d'environnement considéré comme une ressource d'aménité[51]peut être un bien privatif tel que l'exemple d'un jardin d'agrément donnant à ses propres propriétaires la jouissance d'un agréable paysage, donc le bien d'environnement n'est pas générateur d'effet externe. Toutefois si les promeneurs peuvent en bénéficier, il s'agit dans ce cas d'un effet externe positif. Généralement les biens d'environnement appartiennent aux autres trois catégories autre que les biens privés purs. Ils peuvent être soit :

- Des biens collectifs purs comme nous venons de souligner, leur dégradation pour cause de pollution est considérée alors comme un mal collectif,

- Des biens club, il s'agit d'un type particulier de bien collectif dont la consommation respecte le principe de non rivalité mais qui a la possibilité d'être rendu excluable. Nous citons l'exemple de la télévision cryptée où il faut payer pour accéder à la chaine en clair, mais le fait de la regarder n'empêche pas les autres abonnées à faire de même, une autoroute avec son péage exclut un certain nombre d'individus de son usage, mais ceux qui ont payé l'entrée peuvent y conduire sur l'autoroute sans rivalité avec les autres automobilistes,

- Des biens communs appartiennent à tous et à personne, chaque individu peut le consommer, le récolter et il y'a donc absence d'exclusion, toutefois si un individu s'en est approprié, il en prive les autres consommateurs potentiels, il s'agit donc d'une rivalité d'usage, nous citons, comme exemple le poisson pêché dans des zones sans exclusion qui se trouvent dans les cours d'eau et dans la haute mer, les champignons récoltés dans les forêts publiques. En absence de mesures spécifiques telles que l'exigence des droits de propriétés sur ces ressources, la

51 Elle concerne les aspects agréables de l'environnement ou de l'entourage social qui ne sont ni appropriables ni quantifiables en termes de valeur monétaire.

surexploitation de ces ressources menace leur pérennité. Ce genre de comportement crée un dommage pour la collectivité et pour l'individu lui-même, l'effet externe négatif est le même pour tous donc il s'agit d'une externalité publique. Chacun en est la cause et la victime.

L'intensité de la rivalité et de l'exclusion n'est pas fixe et se modifie avec l'avancement de la technologie et du droit. Dans une économie de marché où les services publics et privés se partagent, pour maximiser le bien être de la collectivité il faut déterminer ce qui appartient à l'offre publique et ce qui appartient à l'offre privée. L'offre de la qualité de l'environnement est soumise aussi à ce problème de choix, l'arbitrage dans ce cas doit tenir compte des deux critères essentiels qui sont l'efficacité et l'équité.

Vallée. A (2002) a affirmé que les biens d'environnement étaient considérés pour longtemps comme des biens libres et leur propriété a été mal définie. Cette faiblesse représentée par l'absence des droits de propriétés sur des ressources devenues rares est la source principale de gaspillage et pour certains biens la cause inévitable de leur dégradation.

1.4.1.3 Le concept de droits de propriété

Vallée. A (2002) a indiqué que l'échange marchand ne peut aboutir à un optimum social que si les ressources échangées sont soumises à des droits de propriété. Cependant, ces droits de propriété doivent obéir à quatre critères à savoir : l'universalité signifiant que toutes les ressources font l'objet d'appropriation privative et les titres de propriété sont clairement définis, l'exclusivité indique que tous les couts et les bénéfices issus de la possession et de l'usage de ses ressources doivent être supportés par le propriétaire ou lui revenir à la suite d'un échange marchand, la transférabilité signalant que les agents peuvent librement transférer leurs droits de propriété par un échange volontaire, l'applicabilité stipule que les droits de propriété doivent être respectés et protégés contre l'appropriation d'autrui. Pour les biens d'environnement collectifs, ces critères ne sont pas respectés et le marché ne permet pas de les gérer convenablement. Donc nous pouvons conclure que la surexploitation des ressources d'environnement est essentiellement due à l'absence de définition des droits de propriété.

En effet l'attention autour des droits de propriété n'est pas récente, elle a apparu pour la première fois avec le politicien Aristote qui a signalé que : « ce qui appartient à tout un chacun est le plus négligé car tout individu prend le plus grand soin de ce qui lui appartient en propre, quitte à négliger ce qu'il possède en commun avec autrui ». L'écologiste

Hardin.G(1968) a énuméré les conséquences dangereuses de la pratique des vaines pâtures[52] connu au moyen âge en Angleterre. Les pâturages étaient accessibles à tous et chaque berger a intérêt à accroitre son troupeau, il en résulte la surexploitation et l'épuisement de la ressource engendrant ainsi la perte commune. Ce même phénomène est appliqué dans le cas des biens d'environnements collectifs et il est considéré comme l'origine des pollutions. Au cours des années 60, beaucoup d'écologistes ont déclaré que la propriété privée et l'économie de marché sont des causes majeures de la dégradation de l'environnement naturel. La maximisation de l'intérêt privé n'est pas compatible avec la préservation de l'environnement. Les mécanismes de marché sont considérés comme les responsables de la surexploitation de la biosphère. L'usage de l'environnement naturel doit faire l'objet d'une régulation publique qui peut être locale, nationale ou internationale afin d'assurer l'intérêt de la collectivité à long terme. Cependant, certains économistes tels que Coase. R.H (1960), Demsetz. H (1967), Dales. J.H (1968), Falque. M et Massenet. M (1997) prévoient le contraire, ils ne reprochent pas le fonctionnement du marché mais prévoient plutôt que l'absence des droits de propriété est la cause majeure qui empêche le marché de fonctionner correctement. Bramoullé. G (1997) a ajouté que : « Plus qu'une défaillance du marché, l'externalité est un défaut de droit….l'externalité n'est pas une fatalité technique ou économique, mais la conséquence d'une difficulté d'ordre juridique : l'absence de droits de propriété clairement définis ».

Il faut attribuer aux ressources naturelles les droits de propriété adéquats et laisser le marché jouer son rôle. L'échange marchand peut dans ce cas fonctionner et assurer l'efficacité de leur utilisation. Pour Coase. R.H (1960), les effets externes ne sont pas un échec de marché mais plutôt la résultante de l'absence des droits de propriété sur un bien d'environnement commun.

- **Explication du théorème de Coase**

Le théorème de Coase peut s'énoncer comme suit : si les droits de propriété sont bien définis, condition préalable à toute possibilité de transaction, si les couts de transaction sont nuls, les agents corrigent spontanément les externalités. L'allocation des ressources est efficace quelle que soit l'attribution initiale des droits de propriété. L'optimum peut être donc atteint sans intervention de l'Etat autre que celle qui, consistant à institutionnaliser ces droits. Les points de base de ce théorème se présentent comme suit :

i. L'absence des couts de transaction

52 C'est un droit d'usage qui permet de faire paitre gratuitement son bétail en dehors de ses terres.

Les couts de transaction constituent les couts de fonctionnement d'une procédure d'arrangement, soit qu'il s'agit d'un marché ou d'une réglementation. Lors d'une transaction marchande, il s'agit par exemple des couts de collecte d'informations sur le prix et la qualité. Pour le secteur public, ces couts peuvent correspondre aux couts des démarches administratives. Pour que le secteur marchand ne soit pas déficient, il faut que les couts de transaction soient nuls. Les transactions économiques s'échangent entre les agents économiques jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de gain à échanger et aucune personne ne peut améliorer son bien être sans détériorer celui d'autrui d'où la notion de l'optimum de Pareto.

Dans le cas où les couts de transaction ne sont pas nuls dans un marché avec droits de propriété sur l'environnement, généralement ils seront élevés et exigent une intervention publique. Cette dernière ne sera justifiée que si les couts de transaction imposés suite à cette politique publique sont inférieurs à ceux du marché et aux bénéfices engendrés.

Pour ce qui suit, nous partons de l'hypothèse que les couts de transaction sont nuls afin d'expliquer comment en présence des droits de propriété les externalités vont être spontanément internalisées.

- ✓ **L'échange des droits de propriété**

Pour expliquer son raisonnement, Coase est parti de l'exemple de deux firmes ''A'' et ''B'' qui sont installées tout au long d'un cours d'eau considéré ici comme la ressource naturelle commune.

L'entreprise ''A'' exerce son activité et en même temps elle pollue la rivière et oblige l'entreprise ''B'', localisée en aval à supporter les couts de dépollution. Pour arranger ce conflit d'intérêt, nous instituons des droits de propriété. La loi fixe un détenteur de droit de propriété sur ce bien collectif qui, ne peut être dans ce cas de figure que l'un ou l'autre. Les couts de transaction relatifs à l'accord entre les deux firmes, à son exécution ainsi qu'à sa surveillance sont nuls. Deux cas se présentent :

-La première hypothèse : le droit de propriété est attribué au pollueur c'est-à-dire à l'entreprise ''A'', cette dernière a le droit de polluer comme elle désire en maximisant son profit jusqu'à un niveau de production pour lequel le dommage supporté par l'entreprise ''B'' est maximal. A partir de cette situation, la diminution du niveau de production de l'entreprise ''A'' procure à l'entreprise ''B'' un avantage correspondant à la diminution de ses couts de dépollution qui est supérieure à la perte subie par l'entreprise ''A''. La firme ''B'' a intérêt à

négocier avec la firme A en lui accordant une contrepartie monétaire contre la réduction de sa production et par conséquent de ces émissions polluantes. Cette compensation doit être égale à une certaine valeur pour que l'entreprise ''A'' accepte cette offre et l'entreprise ''B'' ne sera pas perdante. Suite à cet échange, les deux entreprises se trouvent dans une situation meilleure que la situation antérieure. La négociation continue entre ces deux firmes tant qu'il existe un gain à l'échange, autrement dit tant que le cout marginal de dépollution de ''B'' est supérieur au profit marginal de ''A''. Elle s'arrête au moment où l'entreprise ''B'' n'est plus intérêt à compenser la perte de profit de l'entreprise A, ce point d'arrêt de négociation correspond à l'optimum.

- La deuxième hypothèse : la firme ''B'', qui subit la pollution se voit attribuer le droit de propriété sur le cours d'eau. Elle peut dans ce cas exiger un niveau de pollution nulle qui ne lui fait assumer aucun cout de dépollution et l'entreprise A pour produire, elle doit lui demander l'autorisation de dépolluer. Pour pouvoir exécuter son activité, la firme ''A'' doit offrir une compensation monétaire à la firme ''B'' en contre partie du dommage qu'elle va lui subir. Jusqu'au niveau de production correspondant à l'optimum, chaque unité produite par la firme ''A'' dégage un gain et son profit marginal est supérieur au cout marginal de dépollution de ''B''. L'entreprise ''A'' négocie avec l'entreprise ''B'', cette dernière a intérêt à accepter si le montant proposé est supérieur ou égale au dommage subi. Cette négociation se poursuivra jusqu'à ce qu'il n'y aura plus de gain à l'échange. Il s'agit d'un processus de négociation décentralisé qui internalise l'effet externe. Cette procédure de coopération ne nécessite pas l'intervention de l'Etat sauf au début pour fixer les droits de propriétés. Elle met l'accent sur deux critères qui doivent être respectés à savoir l'efficacité et l'équité.

- ✓ **Le principe de l'efficacité est mis en cause suite à la décision de coopération**

En réalité, un ou plusieurs pollueurs polluent un grand nombre de pollués qui peuvent être des producteurs et généralement des consommateurs. Si une entreprise s'approprie du droit de propriété sur l'environnement, elle risque de causer des dommages à un grand nombre d'individus. Ces derniers s'ils sont intéressés par la négociation, doivent subir des couts relatifs à la collecte d'informations, à l'organisation et au contrôle. Cette charge peut être un obstacle à toute décision de coopération et de transaction si elle est plus élevée que les bénéfices prévus de la baisse de la pollution. Cette contrainte rend invalide le théorème de Coase surtout qu'en pratique, lescouts relatifs aux dommages de la pollution ne sont jamais exacts et connus avec certitude et même si c'est le cas, les partis concernées peuvent présenter

un obstacle à la réalisation de l'optimum. Il peut y avoir une surestimation du profit de la part du pollueur et des dommages de la part des consommateurs ou pollués.

En plus, si le nombre de victimes est élevé et la pollution requiert le critère d'un dommage public, ceci est surtout valide pour le cas de la pollution atmosphérique, chaque pollué va être réticent pour payer au pollueur afin de réduire sa pollution et le versement monétaire sera insuffisant pour inciter ce dernier à baisser ses émissions polluantes jusqu'on atteint l'optimum. Dans le cas d'un mal public, le théorème de Coase n'est plus fonctionnel et il faut une intervention extérieure au marché tel que par exemple un organisme de tutelle afin de fixer la quantité de pollution autorisée et mettre en vente les droits y rattachés.

- ✓ **Le principe de l'équité est mis en cause suite à la décision de coopération**

D'après le théorème de Coase, la répartition initiale des droits de propriétés n'influence pas sur l'optimum de pollution, elle n'influence que sur la répartition des richesses. Toutefois, ce raisonnement n'est plus valide s'il existe des effets de revenu.

En effet, dans le cas d'une négociation entre le pollueur et le pollué, l'agrément à payer d'un agent doit correspondre au consentement à recevoir de l'autre agent. Toutefois l'existence des effets de revenu peut nuire à ce principe. Vallée. A (2002) a jouté que : « la reconnaissance d'un droit crée un effet de richesse et dans l'hypothèse où l'utilité marginale du revenu est décroissante, le consentement à payer risque d'être inférieur au consentement à recevoir ». D'où l'optimum diffère avec la répartition initiale des droits de propriété. Le raisonnement illustré est comme suit : si les pollués sont propriétaires de l'environnement, les pollueurs doivent leur verser une compensation monétaire pour avoir le droit de polluer. Le revenu des pollués augmente et tend à augmenter leur demande de qualité de l'environnement, donc leur consentement à recevoir reflète le prix d'usage de l'environnement. Puisque simultanément, le revenu des pollueurs diminue, leur consentement à payer décroit et diminue donc leur demande d'utilisation de l'environnement. Le processus de transaction aboutit à un équilibre, mais celui-ci dépend de la situation juridique initiale puisque cette dernière influe sur les consentements à payer et à recevoir. Si maintenant, les pollueurs sont propriétaires de l'environnement, cette fois-ci les pollués sont dans l'obligation de les payer pour qu'ils dépolluent. Dans ce cas, le revenu des pollueurs et par conséquent leur consentement à recevoir augmente tandis que le revenu des pollués diminue et en conséquence leur

consentement à payer diminue comme la demande de dépollution. Quand les pollueurs sont propriétaires de l'environnement, l'optimum correspond à un niveau de pollution plus élevé que dans le cas où les pollués le sont, donc l'optimum diffère en fonction de la répartition des droits initiaux. Donc, en présence des effets de revenu, les deux situations mènent à un optimum mais ce dernier diffère selon la répartition initiale des droits. En conséquence, l'allocation des droits et la répartition des richesses ne peuvent pas être indépendantes.

La deuxième contrainte est que les couts de transaction rendent invalide également la deuxième hypothèse du théorème de Coase. Selon la répartition initiale des droits de propriété, ces couts ne sont supportés que par la partie qui s'engage à la négociation pour qu'elle puisse avoir le droit d'utiliser l'environnement. En se basant sur le principe d'équité, et en ce qui concerne les droits de propriété sur un bien d'environnement, il sera plus équitable de les attribuer aux pollués et non aux pollueurs afin de garantir la justice. Bien que théorème de Coase ait certaines limites sur le plan pratique en raison de l'importance des couts de transaction ainsi que l'attribution des droits de propriété, il demeure assez important et considéré comme un incitateur dans les choix de politiques d'environnement basées implicitement sur l'affectation des droits de propriété et dans la mise en place des marchés de droits de pollution. L'analyse économique de la pollution privilégie l'efficacité économique au détriment des aspects sociaux et écologiques.

- **Les autres critiques relatives au théorème de Coase**

Parmi les critiques qui sont adressées au raisonnement de Coase, nous citons, d'une part la contrainte technique qui concerne l'appropriation des droits de propriétés pour des biens d'environnements qui ne sont pas facilement divisibles.

Les ressources naturelles communes comme la terre, les espèces végétales ou animales sont facilement divisibles, toutefois ce n'est pas le cas pour les biens communs comme l'air, les ressources halieutiques dont l'appropriation demeure assez ambigu. Le seul remède est la technologie, tel que le repérage par satellite pour fixer des droits de propriété donnant lieu à des marchés de droits dans le domaine de l'air. De plus, l'attribution des droits de propriétés privés sur les biens communs, ne mène pas nécessairement vers un usage efficace de ces ressources. Aussi le fait de priver les non propriétaires de leur usage ou pratiquer un rationnement par les prix engendre des inégalités d'usage et n'assure pas le principe de l'équité. Vallée. A (2002) a affirmé qu' il est nécessaire de combiner le principe d'efficacité et d'équité qui ne sera garanti que par l'intervention de l'autorité publique et non pas par des

agents privés vue qu'il reste toujours illusoire de compter sur la générosité des individus pour préserver un bien public. L'appropriation des droits de propriétés ainsi que le recours au marché pour les biens d'environnement a soulevé les deux critiques principales qui sont : la confiance excessive aux mécanismes du marché pour aboutir à l'optimum social, ainsi que le non-respect du principe de l'équité bien que l'appropriation publique pour certains biens d'environnement n'est pas non plus le remède. Selon les solutions pratiquées ces dernières décennies, le plus opportun est de combiner entre l'intervention de l'Etat et le marché afin de protéger les biens communs de l'environnement à travers l'internalisation des effets externes. Ces derniers sont la cause de divergence entre les couts privés et sociaux et se présentent comme un obstacle à l'allocation optimale des ressources.

1.4.1.4 Les effets externes dus à la pollution est une source de divergence entre couts privés et couts sociaux

Toute activité économique qui produit de l'utilité impose en contrepartie un sacrifice à la collectivité donc elle est socialement justifiée. La comparaison entre les couts et les avantages de toute décision constitue la base du calcul économique. Si le marché fonctionne parfaitement, dans ce cas tous les couts et les avantages sont pris en considération par le mécanisme des prix. Les prix sont des indicateurs qui reflètent correctement la rareté et l'utilité relatives des biens et aident les agents économiques à maximiser leur profit. Cependant, si la firme utilise gratuitement les biens de l'environnement, elle crée en contrepartie des dommages à cause de la pollution issue de l'activité de production et par le même fait impose à la collectivité des « couts externes » non compensés ou « déséconomies externes ». Vallée. A (2002) a stipulé que seuls les couts internes font l'objet d'une compensation monétaire. Le cout social, correspondant à l'usage des biens de l'environnement sans compensation, est supérieur au cout privé correspondant aux couts internes du processus de production. Il existe alors une divergence entre couts privés et couts sociaux reflétant l'existence d'un effet externe négatif qui échappe à l'échange marchand.

Or, la gratuité de cet effet externe est fallacieuse étant donné que la capacité de l'environnement à absorber ces dommages est limitée. Le calcul économique ne prend en compte que ce qui a une contrepartie monétaire et puisque le bien d'environnement est considéré comme limité et rare, il sera opportun d'internaliser les effets externes. Le fait de ne pas considérer un prix à ces externalités est un défaut qui inhibe l'allocation optimale des ressources. Vue que le cout social est supérieur au cout privé, alors le volume de production

qui maximise le profit privé est supérieur à celui qui maximise le profit social ou l'optimum collectif ce qui renvoie à la non coïncidence entre l'intérêt privé et l'intérêt collectif.

Afin de surmonter cette défaillance et atteindre l'optimum social, il faut internaliser les effets externes. Cette solution peut se faire à travers la fixation d'un prix à la ressource, la taxation du pollueur, l'attribution des droits de propriétés à la ressource, etc…..

1.4.1.5 La détermination de l'optimum social : la pollution optimale

Le modèle proposé par l'économiste permet de déterminer un niveau de pollution optimal qui résulte d'un arbitrage entre les avantages et les couts respectifs de la dépollution et de la pollution.

- **Représentation de l'optimum**

Certes, la pollution engendre des dommages qu'il faut chercher à les réduire, mais cette intention ne relève pas de l'unanimité de tous les acteurs de la société. Le principe est que les agents économiques réagissent afin de réduire les dommages résultants de la pollution. Les écologistes sont capables de détecter les perturbations qui touchent l'écosystème même avant qu'elles se reproduisent. Cependant, les économistes ainsi que les politiciens ne réagissent que lorsque ces dommages sont perçus par les individus et selon leur conception matérialiste.

Pour les écologistes, la pollution nulle est la seule garantie pour le bon fonctionnement de la biosphère. Toutefois, cette suggestion est considérée comme un cas extrême pour les économistes et représente le niveau de l'optimum. Il faut prendre en considération les contraintes économiques et faire recours aux arbitrages afin de déterminer le niveau de pollution acceptable qui reflète le compromis existent entre l'objectif de l'écologie et les contraintes de l'économie, c'est-à-dire la rareté des ressources. Le modèle proposé est celui de la minimisation des couts totaux supportés par la collectivité.

i. **Le modèle de minimisation des couts totaux**

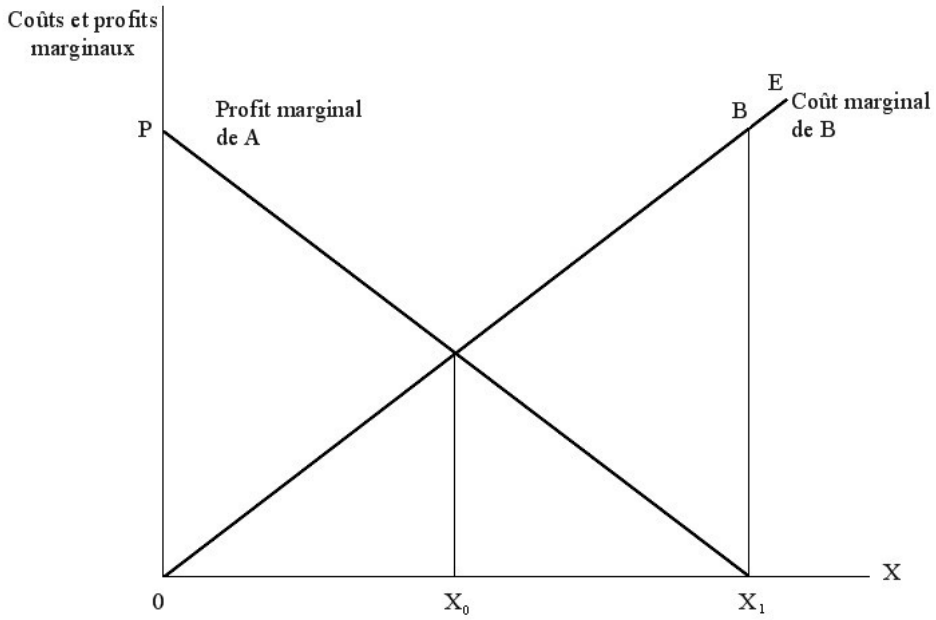
En équilibre partiel, la détermination de l'optimum est schématiquement représentée de deux manières différentes. La première fait l'hypothèse que la quantité de résidus rejetée est

proportionnelle à la quantité produite par l'entreprise polluante. La seconde suppose qu'il existe plusieurs niveaux de pollution possibles pour une quantité donnée de production et prend en considération l'existence de technologies de dépollution.

- ✓ **Illustration graphique de la première hypothèse**

A partir de la figure 2.1 ci-dessous, pour déterminer le niveau de pollution optimal selon le critère de Pareto, nous supposons une firme ''A'' située en amont d'une autre firme ''B'' et toutes les deux sont localisées autour d'une rivière d'eau. Elles utilisent cet élément naturel comme entrée dans le processus de production sous forme de prélèvement d'eau pour la firme ''B ''et sous forme de réservoir de résidus recevant les sorties du processus de production pour la firme ''A''. Nous supposons que la quantité de résidus rejetée est proportionnelle à la quantité produite par ''A'' et que le cout de dépollution supporté par ''B'' est proportionnel à la quantité de résidus déversée. La firme ''A'' émet des matières polluantes dans la rivière ce qui nuit à la production de la firme ''B'', cette dernière est obligée de dépolluer l'eau. La firme ''A'' désintéressée par tout ce qu'elle induit en aval va continuer à polluer jusqu'à un niveau correspondant à la maximisation de son profit. En présence d'externalités, le marché n'est plus capable d'aboutir à un optimum au sens de Pareto.

Figure 2.1



Source : Vallée. A (2002)

Dans notre analyse, nous utilisons les couts et profits marginaux qui représentent les suppléments de couts et d'avantages totaux délivrés par chaque unité supplémentaire produite.

En abscisse, X représente la quantité produite par l'entreprise ''A''. En ordonnée, sont indiqués les couts et les profits marginaux relatifs aux activités de ''A'' et de ''B''. La firme ''A'' située dans un marché concurrentiel a une recette marginale égale au prix du marché. Ses rendements sont décroissants et ses couts sont croissants. Le profit marginal qui représente l'écart entre le prix et le cout marginal privé de la production de X décroit avec l'accroissement de X et s'annule en X_1. La surface OP X_1 indique le profit total de l'entreprise. Le cout marginal externe, représentant le cout que doit supporter l'entreprise ''B'' du fait de la pollution causée par l'activité de ''A'', est représenté par la droite OE. Il augmente avec l'accroissement de la quantité produite X. Le calcul économique de la firme ''A'' prend en compte les couts et les avantages marchands engendrés par son activité et n'intègre pas le cout externe imposé à ''B''. La firme ''A'' produit la quantité OX_1 qui maximise son profit et impose à l'entreprise ''B'' un cout maximal représenté par la surface OB X_1. Si nous considérons l'intérêt de la collectivité, limité ici aux deux entreprises ''A'' et ''B'', le gain collectif est égal au profit réalisé par ''A'' diminué du cout supporté par ''B'', c'est-à-dire OPX_1.OBX_1 qui peut s'écrire, en supprimant la surface commune OAX_1, OPA-BAX_1. Ce gain est maximal pour la collectivité des deux entreprises quand la partie du cout supporté par ''B'' à cause de la pollution émise par ''A'', BAX_1 est réduite à zéro. Cette situation optimale intervient quand le volume de production X est égal à OX_0.

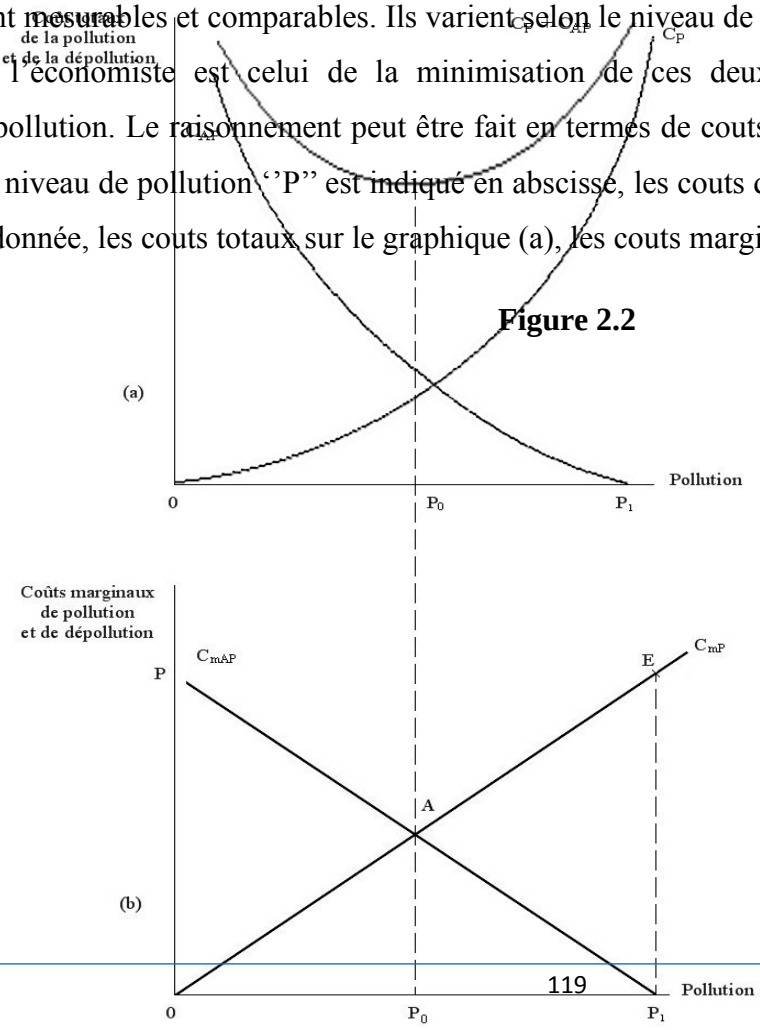
Cet optimum collectif peut être également déduit d'un raisonnement à la marge. Pour la quantité produite comprise entre O et X_0, chaque unité additionnelle de X engendre un profit marginal supérieur à son cout marginal, le gain social marginal est positif. Au-delà de X_0, chaque unité supplémentaire produite engendre un cout marginal supérieur à son profit marginal, le gain social marginal est donc négatif. Le gain social est maximal pour le niveau de production OX_0. A partir de cette analyse, nous remarquons qu'en présence d'un effet externe, l'optimum privé diffère de l'optimum collectif, le volume de la production OX_1 qui maximise le profit privé de l'entreprise polluante est supérieur à celui correspondant à l'optimum collectif OX_0. La réalisation de l'optimum collectif ne signifie pas la disparition totale de l'externalité, une partie du cout externe représentée par la surface X_0AB X_1, a été supprimée engendrant un gain social : l'externalité est dite dans ce cas « Pareto relevant ». En revanche, le fait que l'entreprise ''A'' diminue sa production au-delà de X_0 et en conséquence

réduit le cout externe OAX_0, n'engendre pas un gain social, mais une perte, puisque l'on se prive d'un profit supérieur au cout externe subi. L'externalité est dite, dans ce cas « Pareto irrelevant ». L'optimum collectif ne correspond pas à une pollution ou à un dommage nuls qui mènent à un niveau de production nul et arrêtent toute activité de la firme ''A''. Il est interprété comme étant le résultat d'une conciliation entre les avantages issus de cette activité et les dommages qu'elle fait subir. Le gain privé $OPAX_0$ demeure toujours supérieur au gain social OPA.

- ✓ **Illustration graphique de la deuxième hypothèse**

Nous procédons à la détermination de l'optimum en comparant les couts de pollution et de dépollution liés à une activité donnée. Certes, la pollution engendre des dommages mais la dépollution a également un cout. Choisir un niveau de pollution c'est aussi choisir un niveau de dépollution et accepter de supporter le cout correspondant. Toutefois, les ressources sont rares et celles qui seront consacrées à la protection ou au rétablissement de l'environnement ne le pourront pas l'être à la production d'autres biens et services. Il s'agit donc d'un problème d'allocation de ressources rares réglé en économie par une comparaison des couts et des avantages. Nous admettons l'hypothèse que les couts de la pollution et de la dépollution sont mesurables et comparables. Ils varient selon le niveau de la pollution. Le modèle proposé de l'économiste est celui de la minimisation de ces deux couts de pollution et de la dépollution. Le raisonnement peut être fait en termes de couts totaux ou de couts marginaux. Le niveau de pollution ''P'' est indiqué en abscisse, les couts de pollution et de dépollution en ordonnée, les couts totaux sur le graphique (a), les couts marginaux sur le graphique (b).

Figure 2.2



Source : Vallée. A (2002).

OP_1 représente le niveau maximal de pollution correspondant à l'optimum privé de l'entreprise ''A'', situation où elle maximise son profit sans se préoccuper du cout externe supporté par ''B''. Le cout total de la pollution, ou dommage total s'accroit avec le niveau de la pollution émise de O à P_1, il est représenté par la courbe C_P. L'entreprise peut réduire les dommages causés en dépolluant. Le cout total de la dépollution augmente avec le niveau de la dépollution de P_1 à O, il est représenté par la courbe C_{AP}. La minimisation de la somme de ces deux couts totaux (la courbe représentant cette somme est obtenue par sommation verticale des niveaux de C_P et de C_{AP} pour chaque niveau de pollution) intervient au niveau de pollution OP_0. P_0 représente le niveau optimal de pollution et de dépollution (voir graphique (a) ci-dessus). Si nous raisonnons maintenant à la marge (voir graphique (b) ci-dessus)), le cout marginal de la pollution indique le supplément de dommage engendré par chaque unité additionnelle de pollution et le cout marginal de la dépollution représente le supplément de cout total engendré par la suppression de chaque unité additionnelle de pollution. Partant de P_1, situation où le dommage total est maximal (représenté par la surface OEP_1) et le cout de dépollution nul puisque aucune action de dépollution n'est mise en place, la suppression de chaque unité de pollution existante entre P_1 et P_0 fait disparaitre un dommage supérieur au cout supporté pour obtenir ce résultat. Il y'a gain social tant que le cout marginal de pollution excède le cout marginal de la dépollution. En revanche, continuer à réduire la pollution au-delà de P_0 diminuerait le bien être de la collectivité puisque, dans ce cas, le cout de suppression de chaque unité de pollution est supérieur à l'avantage que l'on retire sous la forme de l'élimination d'un dommage. Le cout marginal de la lutte antipollution dans cette zone est supérieur au cout marginal de la pollution. Le niveau de la pollution ou de la dépollution optimale est bien OP_0. Si nous généralisons ce modèle à '' n'' agents, les

entreprises étant les pollueurs et les consommateurs étant les pollués, les hypothèses relatives aux fonctions d 'utilité et aux fonctions de production sont conformes à celle de l'économie du bien-être, mais les premières intègrent l'effet externe (l'utilité décroit quand l'externalité s'accroit) et les secondes sont source d'émissions d'externalité considérée comme un produit joint. Le fait de maximiser l'optimum social revient à maximiser l'utilité d'un consommateur sous la contrainte que les autres consommateurs ne subissent pas de pertes de bien-être et sous les contraintes relatives à la technologie et à la disponibilité des ressources. Cet optimum est réalisé si le dommage marginal social qui indique la somme des dommages engendrés par une unité de pollution et donc supportés par l'ensemble des consommateurs est égal pour chaque entreprise à son cout marginal de réduction de la pollution.

Toutefois, il faut signaler que l'optimum économique de pollution peut évoluer sous l'influence de multiples facteurs. Il dépend de l'allure des fonctions de couts de pollution et de dépollution. Tout changement de l'une de ces fonctions engendre donc une variation du niveau de la pollution optimale.

1.4.1.6 Les critiques adressés au calcul de la pollution optimale : optimum économique et optimum écologique

Le débat est largement développé entre les écologistes qui prévoient que la pollution optimale ne peut être que nulle et les économistes qui estiment qu'il y'a trop de simplification pour la réalité. Les deux concepts importants qu'il faut prendre en considération sont : la négligence des contraintes sociales et le caractère statique du modèle qui ignore les contraintes écologiques à long terme.

- **L'absence de prise en compte des effets redistributifs**

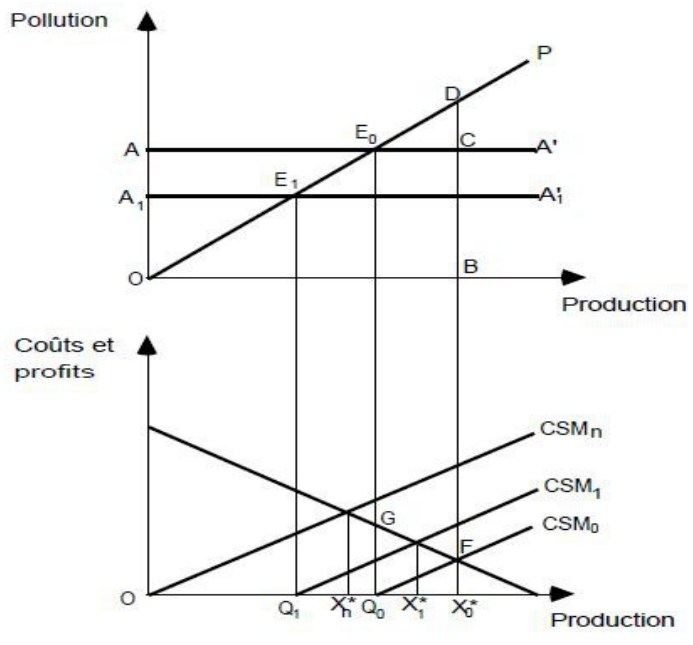
Le modèle d'allocation des ressources détermine l'allocation permettant de maximiser la satisfaction globale de la collectivité en minimisant les couts totaux qu'elle doit supporter, quelle que soit la répartition des avantages et des couts entre les individus, leurs catégories sociales ainsi que leur appartenance géographique. La séparation entre les deux objectifs d'allocation, l'efficacité et l'équité prévoit que l'on maximise tout d'abord le bien être total puis on répartit ce même bien grâce aux politiques de redistribution tels que la fiscalité et les transferts. Toutefois, ces deux décisions sont dépendantes l'une de l'autre et le plus opportun est d'analyser simultanément l'équité et l'efficacité des politiques de l'environnement.

D'abord, les individus sont inégalement touchés par la dégradation de l'environnement. Bien que cette corrélation ne soit pas toujours vérifiée, il semble que dans un grand nombre de cas de pollution, il existe une liaison négative entre le niveau de pollution et le niveau de revenu. Plus on est pauvre, moins on a les moyens de se protéger contre la pollution. Si les dépenses de protection ou de dépollution sont des dépenses privées laissées à l'initiative des ménages donc largement dépendantes de leur capacité à payer, la répartition de la qualité de l'environnement reproduira probablement la répartition des revenus et des richesses. En effet à capacité de payer égale, les préférences, la perception de dommages et donc la disposition à payer pour les éviter peuvent différer. Les politiques de lutte contre la pollution qui sont financées publiquement peuvent réduire ces inégalités puisqu'elle bénéficierait plus aux catégories défavorisées les plus touchées par la pollution. Cependant, le recours à une répartition égale des couts et des avantages procure dans certains cas plus d'avantages aux riches. En effet, si nous admettons que la satisfaction retirée d'une augmentation de la qualité de l'environnement est plus élevée pour les catégories favorisées car leur taux marginal de substitution entre le bien d'environnement et les autres biens est plus élevé, cette stratégie environnementale égalitaire sera plus bénéficiaire aux riches qu'aux pauvres. Le fait de concevoir la qualité de l'environnement comme un bien de luxe n'est plus répandu aux pays développés comme l'a été entre les années 1960 et 1970.

- **Les incompatibilités avec le principe de développement durable**

Le modèle statique utilisé pour calculer l'optimum social ne prend pas en compte la condition de la solidarité entre générations qui se manifeste dans le concept de développement durable. La détermination d'une pollution optimale non nulle pour la génération présente ne garantit pas nécessairement celui des générations futures. L'analyse économique ne prend en considération les effets externes que lorsque la capacité d'assimilation du milieu est surpassée. En plus le niveau optimal de la pollution fixé suite à une égalisation entre le cout marginal de la dépollution et les dommages engendrés par cette même pollution excède largement la capacité d'assimilation du milieu naturel. La relation entre l'optimum économique et l'optimum écologique a été analysée graphiquement par Pearce. D.W(1976).

Figure 2.3



Source : Harribey J.M (1997).

Sur le graphique, ''A'' représente le point de pollution au-delà duquel la capacité d'autoépuration ou d'assimilation de l'environnement est dépassée, il correspond au niveau de production Q_0 à partir duquel la pollution commence à constituer un coût social représenté par la courbe de coût social marginal CSM_0. L'équilibre écologique est donc représenté par le point E_0. L'optimum économique se situe au niveau de la production X^*_0 correspondant à l'égalité du profit marginal et du coût social marginal représentée par l'intersection F. La production X^*_0 déclenche une pollution mesurée par le segment BD supérieure à celle qui est supportable naturellement mesurée par le segment OA. Pearce. D.W (1976) appelle écart écologique le supplément de pollution BD - OA = CD engendré par l'écart X^*_0 - Q_0.

A la période suivante, le supplément de pollution de la période initiale déversé dans l'environnement et non assimilé par celui-ci réduit d'autant la capacité d'assimilation qui passe de OA à OA_1 ramenant l'équilibre écologique au point E_1. Dès lors, la pollution constitue un coût social à partir du niveau de production Q_1. Le nouvel optimum économique se fixe en X^*_1 provoquant une pollution supérieure à celle supportable, et ainsi de suite jusqu'à ce que la capacité d'assimilation de l'environnement ait été réduite à zéro. En définitive, Pearce. D.W (1976) montre que la recherche de l'optimum économique condamne au déséquilibre écologique ou bien, la sauvegarde de l'équilibre écologique oblige à choisir dès le départ délibérément une situation économiquement sous-optimale, c'est à dire un niveau de production Q_0 correspondant à un manque à gagner de profit égal à la surface Q_0FG. Ce processus peut continuer jusqu' à épuisement total de la capacité d'assimilation des milieux

naturels, auquel cas le cout social apparait dès la première unité produite. L'équilibre écologique n'est alors compatible qu'avec une production nulle. Les économistes tentent d'intégrer ces externalités intergénérationnelles dans les modèles de croissance, modèles de croissance endogène et modèles à générations imbriquées afin d'analyser les conditions sous lesquelles la croissance économique peut être compatible avec la préservation de la qualité de l'environnement. En absence de stratégies de dépollution, la croissance optimale durable devient impossible. Si l'utilité des activités polluantes est supérieure à la désutilité de la pollution de la collectivité, les milieux naturels seront dans ce cas complétement détruits. Heureusement qu'il existe les activités de dépollution afin de réduire les atteintes aux milieux naturels, toutefois ces dernières n'interviennent qu'après coup, il s'agit d'une approche curative et non préventive de la pollution. Les émissions polluantes peuvent ainsi diminuer mais ne disparaissent jamais, elles peuvent même endommager de façon irréversible les écosystèmes. Par ailleurs, le recours à la technologie propre avant que la pollution se produise permet de concilier l'optimum économique et l'équilibre écologique. Cependant le progrès technologique demeure insuffisant et l'effet quantité dû à la croissance de la production l'emporte sur l'effet qualité. Les émissions polluantes continuent à accroitre et même avec un niveau d'activité constant, la pollution ne sera pas nulle. La tendance à l'épuisement de la capacité d'assimilation naturelle n'est que ralentie et le stock de résidus continue à accroitre. Avec ces remèdes qui se manifestent dans les activités curatives de dépollution et le traitement préventif des émissions polluantes effectué par la recherche et la mise en œuvre de technologies propres, peut être ajoutée la solution de la croissance qualitative basée sur le développement du capital humain privilégiant la production et la consommation de biens non polluants. La loi de février 1955 sur le renforcement de la protection de l'environnement a fait la distinction entre le principe de prévention et le principe de précaution.

Dans le cas de la prévention, le risque est identifié, les dommages sont connus et peuvent être estimés en termes monétaires ou non et il est possible d'engager des actions basées sur une comparaison de couts et d'avantages, c'est-à-dire appliquer le raisonnement économique pour le calcul de la pollution optimale. La différence avec le principe de précaution est large, celui-ci s'applique quand le risque ne peut être correctement identifié, sa concrétisation ainsi que son importance sont incertaines mais que les dommages résultants sont graves et irréversibles. Face à tous ces problèmes d'environnement présentés sous l'aspect d'externalités issues de la production ou de la consommation faisant obstacle à l'allocation optimale des ressources,

l'analyse économique propose d'internaliser les effets externes afin de rétablir l'optimum social.

1.4.1.7L'internalisation des effets externes

L'internalisation consiste à ramener la production à un niveau auquel le bénéfice marginal privé et égal à la somme du cout marginal privé et du cout marginal social.

L'analyse économique a proposé deux solutions pour internaliser les effets externes : imposer une taxe Pigouvienne ou instaurer un marché d'externalités[53].

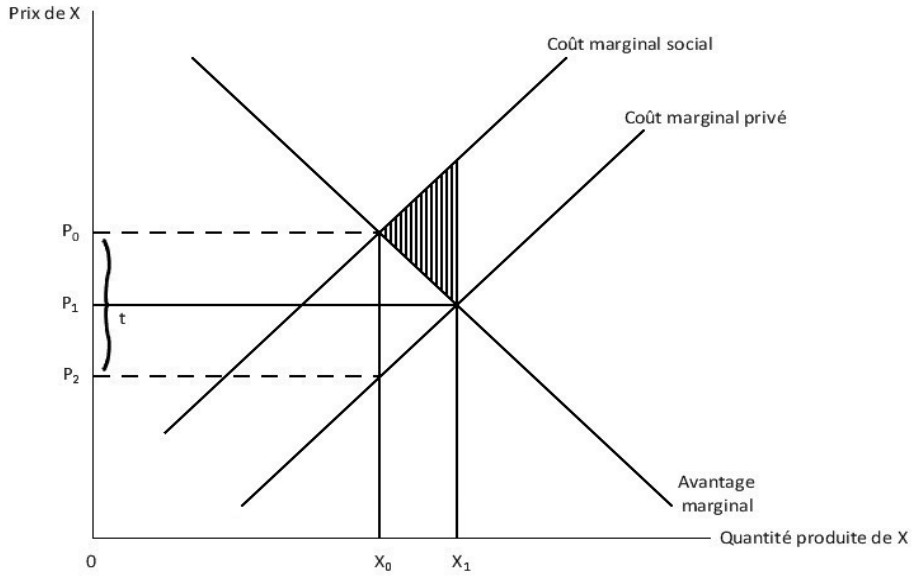
- **La taxe Pigouvienne**

Pigou. A.C (1920) a proposé dans ''Economies of welfare''une taxe au pollueur par unité de pollution produite, égale au cout du dommage environnemental provoqué. Ce type de taxe a pour objectif d'inclure dans le cout de production d'un bien ou d'un service le cout environnemental induit par la dégradation du milieu, permettant ainsi de combler l'écart entre le cout privé et le cout social. Cette taxe permet d'internaliser l'externalité négative.

L'introduction de cette taxe réduit le bénéfice privé à la mesure des externalités et ramène la production au niveau socialement désirable. Nous supposons un marché concurrentiel du bien X où il n'existe aucun prélèvement, les consommateurs égalisent l'utilité marginale issue de la consommation du bien X au prix de marché de ce bien. Les producteurs déterminent leur production optimale en égalisant leur cout marginal privé de production au prix du bien X.

Figure 2.4

53
Le marché des externalités a été bien expliqué par Coase. RH (1960) mentionné ci-dessus.



Source : Vallée. A (2002).

Selon la figure 2.4 ci-dessus, nous admettons qu'en présence d'un effet externe négatif à cause du phénomène de la pollution, le cout marginal de la production social est supérieur à son cout marginal privé. En absence d'internalisation de l'effet externe, la quantité produite et consommée est OX_1 au prix OP_1. Cette quantité produite est supérieure à celle correspondant à l'optimum collectif OX_0 qui égalise le profit marginal au cout marginal social de la quantité produite. La perte du bien-être social est présentée par la partie hachurée qui sera corrigée suite à l'application d'une taxe ''t''.

Au prix P_0 supérieur à P_1, les consommateurs ont réduit leur demande et les producteurs qui perçoivent maintenant un prix P_2 inférieur à P_1 ont réduit leur quantité offerte. Nous déduisons alors que la taxation est un mécanisme d'incitation par les prix qui, modifie le comportement des agents économiques et permet de rétablir l'optimum en ramenant le volume de la production d'OX1 à OX_0 correspondant à l'optimum social. La taxe Pigouvienne est considérée comme la source d'inspiration de la fiscalité écologique, elle a suscité plusieurs analyses et plusieurs débats qui ont concerné surtout l'application du principe de l'efficacité.

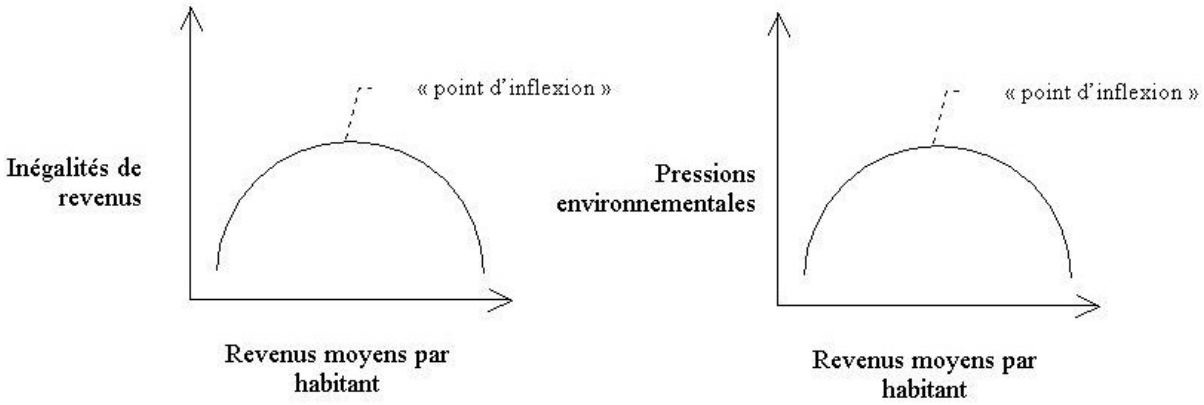
En effet, la taxation Pigouvienne suppose que la seule déformation qui touche l'économie se manifeste dans les externalités environnementales et qu'elle permet de corriger cette distorsion et procurer un gain d'efficacité sans créer une charge excédentaire ou une perte de

bien-être social comme les autres prélèvements. Cependant même si cette suggestion est validée, l'internalisation de ces effets externes demeure assez ambiguë à cause de l'incertitude qui rend difficile l'évaluation des dommages et en conséquence la détermination d'une taxe optimale. De plus, les taxes environnementales interfèrent avec les autres taxations et le gain d'efficacité potentiel devient incertain. Meade. J.E (1952) a ajouté qu'il puisse avoir un problème de financement global suite à la taxation de Pigou basée sur l'idée que l'Etat doive financer les subventions et percevoir les impôts. La taxation de Pigou a été aussi intensivement attaquée par Coase. R.H (1960) qui était à l'origine d'une nouvelle approche des effets externes.

1.4.2 Niveau de développement et qualité de l'environnement : la Courbe de Kuznets Environnementale (CKE)

L'étude de la relation entre le développement économique d'un pays et la qualité de son environnement a subi plusieurs évolutions au cours du temps et a fait l'objet d'un débat entre les économistes. Au cours des années 1950, l'économiste Américain Simon Kuznets a émis l'hypothèse selon laquelle il existe une relation en « U » entre le niveau de développement économique d'un pays et le niveau d'équité de répartition des richesses, la période d'augmentation des inégalités ne serait que provisoire et elle finit par se stabiliser si un niveau minimum de revenu est atteint. Cette hypothèse séduisante a inspiré un certain nombre d'économistes qui ont essayé d'observer si le même phénomène était valable pour les questions environnementales, en d'autres termes, un pays qui se développe crée les conditions d'une détérioration accrue de son environnement qui ne se stabilise que si un niveau minimum de développement est atteint.

Figure 2.5- Représentation des courbes de Kuznets sociales et environnementales



Source : Boutard. A et al (2004).

Le rapport de la banque mondiale basé sur les travaux de Shafik. N et Bandyopadhyay. S (1992), ne vérifie la relation de type (CKE) que pour un nombre limité d'indicateurs, donc nous ne pouvons pas admettre que la croissance économique est toujours une réponse au problème écologique. Parmi les économistes qui ont défendu l'hypothèse de la (CKE), nous citons Beckerman. W (1992), qui a affirmé que la forte corrélation entre les revenus et les mesures de protection de l'environnement démontre qu'à plus long terme, la meilleure façon d'améliorer votre environnement est de devenir riche, c'est-à-dire que la croissance économique est la meilleure façon qui garantit l'amélioration de la qualité de l'environnement. Cependant, si nous considérons le niveau de revenu comme la variable d'entrée et la qualité de l'environnement comme la conséquence, ceci s'aligne avec l'approche de la durabilité faible qui suppose qu'il existe une possibilité de substitution entre capital naturel et artificiel, ce qui légitime à son tour la dégradation voire même l'épuisement des ressources naturelles. Selon Panayotou. T (1993), l'intensification de l'industrialisation entraîne l'épuisement des ressources naturelles et l'accélération de la production de déchets. A des niveaux plus élevés de développement, l'utilisation de technologies plus efficaces et la demande accrue pour la qualité de l'environnement donnent comme résultat une baisse régulière de la dégradation de l'environnement. Arrow. K et al (1995) ont montré également qu'une diminution monotone de la qualité de l'environnement avec la croissance du revenu, demande des réglementations strictes pour protéger l'environnement et impose même des limites au développement économique afin d'assurer le soutien de la vie écologique du système. Une augmentation monotone de la qualité de l'environnement donne à penser que les politiques qui accélèrent la croissance économique conduisent à une rapide amélioration de l'environnement d'où les politiques explicites de protection de l'environnement ne sont pas nécessaires. Selden. T.M et Song. D.S (1994) ont émis l'hypothèse selon laquelle la relation

entre la croissance économique et la qualité de l'environnement, qu'elle soit positive ou négative n'est pas fixée le long d'un chemin de développement d'un pays, elle peut changer de signe selon le niveau de revenu, qui à un certain niveau atteint, incite les citoyens à augmenter leur demande pour bénéficier d'une infrastructure efficace et un environnement plus propre. Grossman.G.M et Krueger. A.B (1995) ont affirmé qu'aucune preuve ne montre que la qualité de l'environnement se détériore progressivement avec la croissance du pays, au contraire, pour la plus part des indicateurs, la croissance économique apporte une phase initiale de dégradation, suivie d'une phase d'amélioration. Dans le même ordre d'idées, Stern. D.I et al (1996) ou encore Bruyn. S.M et al (1998) ont confirmé que les émissions polluantes baissent si on atteint un seuil de revenu bien défini, c'est la deuxième phase de (CKE). Bimonte. S (2002) a montré que la croissance économique dans les pays riches est accompagnée par la dégradation de leurs milieux naturels car ces derniers ont tendance à préserver davantage leur environnement et suite à ce premier constat international, plusieurs économistes ont décidé de tester de nouveau l'hypothèse de la (CKE). Une autre critique a été avancée par les Anglo-saxons, située dans le cadre de l'hypothèse du « havre de pollution » affirmant que la délocalisation des activités très polluantes et à faible valeur ajoutée dans les pays à revenu limité et dont les politiques environnementales sont jugées comme moins strictes sont à l'origine de la baisse des émissions polluantes constatées dans les pays riches.

A partir des reproches qui ont été adressées aux études sur la (CKE), la théorie de la durabilité forte essaye de surmonter au moins une partie de ces limites, cette dernière conçoit l'environnement comme le support de toute activité humaine ou plutôt comme un capital naturel limité constitué en amont du cycle de production par un ensemble de ressources et en aval du cycle de consommation par des milieux récepteurs, d'où l'hypothèse de la durabilité faible qui constitue l'environnement comme un luxe réservé aux pays riches a été renoncée. Cette vision écosystémique a inversé les facteurs d'environnement et de développement : la variable explicative est la capacité de l'environnement à fournir des ressources et à absorber des déchets et la variable expliquée est le niveau de développement. Au milieu des années 1990 Wackernagel. M et Ress. W ont élaboré un indicateur composite appelé « l'empreinte écologique » capable de combiner les impacts d'une société en termes d'utilisation des ressources et de pollution, ces auteurs pensent à l'économie comme un métabolisme industriel qui a besoin de manger des ressources et cette consommation deviendra déchet et finira par être rejetée. Nous constatons que la principale qualité de cette empreinte est son caractère synthétique qui assure la comparaison entre les pays et permet d'attribuer systématiquement

l'impact écologique au consommateur et non au producteur, d'où la possibilité de délocalisation de la pollution des pays riches vers les pays pauvres et qui représente un problème central posé par l'hypothèse du havre de pollution est rejetée.

1.5 Les changements climatiques observés et l'influence des facteurs météorologiques

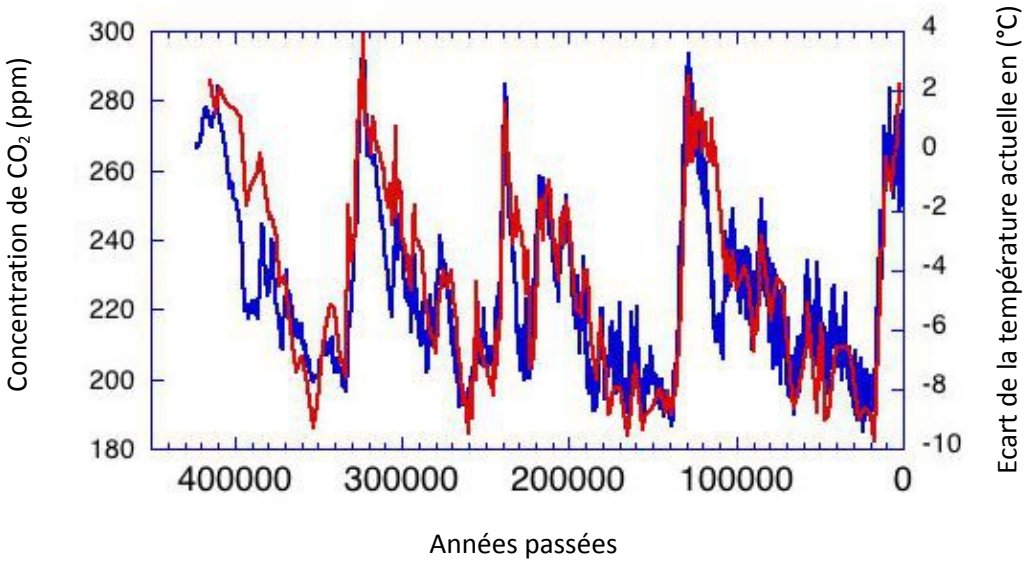
Selon le GIEC (2007), le changement climatique s'entend d'une variation de l'état du climat que l'on peut percevoir par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. Cette définition se rapporte à tout changement du climat dans le temps, qu'il soit dû à la variabilité naturelle ou à l'activité humaine. André. H (1968) a annoncé que le climat a évolué à l'échelle des temps géologiques. L'ère quaternaire est la plus récente, elle date depuis 1,8 million d'années et elle a vécu une succession de périodes glaciaires froides et de périodes interglaciaires tièdes. Les premières périodes ont été caractérisées par une expansion des calottes glaciaires et une baisse du niveau des mers jusqu'à cent mètres et plus. Tandis que les périodes interglaciaires ont vécu un recul des glaces, la hausse des niveaux marins et l'extension des forêts. Certes, le climat a vécu beaucoup de changements irréguliers au cours du temps que nous distinguons en ce qui suit.

1.5.1 Les variations de températures

Les variations observées sur les quatre cent mille années connues par l'âge des couches les plus profondes, ont montré des variations de quelques degrés par rapport à la température actuelle. Il 'y a un peu plus de cent mille ans, la température moyenne de la terre a été supérieure de 1 à 2°C par rapport à l'état actuel. Par ailleurs, entre cent mille et vingt mille ans c'est-à-dire lors de la dernière période glaciaire, la température moyenne de la terre a été moindre de 6°C par rapport à aujourd'hui (voir figure 2.6 ci-dessous). Une forte correspondance est remarquable entre la température et la concentration de CO_2 dans l'atmosphère au cours des cycles glaciers de plusieurs centaines de milliers d'années. Une partie négligeable de la correspondance est dû à la relation entre la température et la solubilité du CO_2 dans la surface de l'océan, mais la majeure partie de la correspondance est compatible avec une réaction entre le CO_2 et la température. Le rythme da variation de la température n'a jamais été si rapide que celui constaté depuis un siècle et demi et surtout dans la période récente. Le maximum de variation de la température a été atteint depuis cent trente mille ans

environ étalée sur plusieurs dizaines de milliers d'années. Ce rythme de variation a été cent fois au moins plus lent que le rythme actuel.

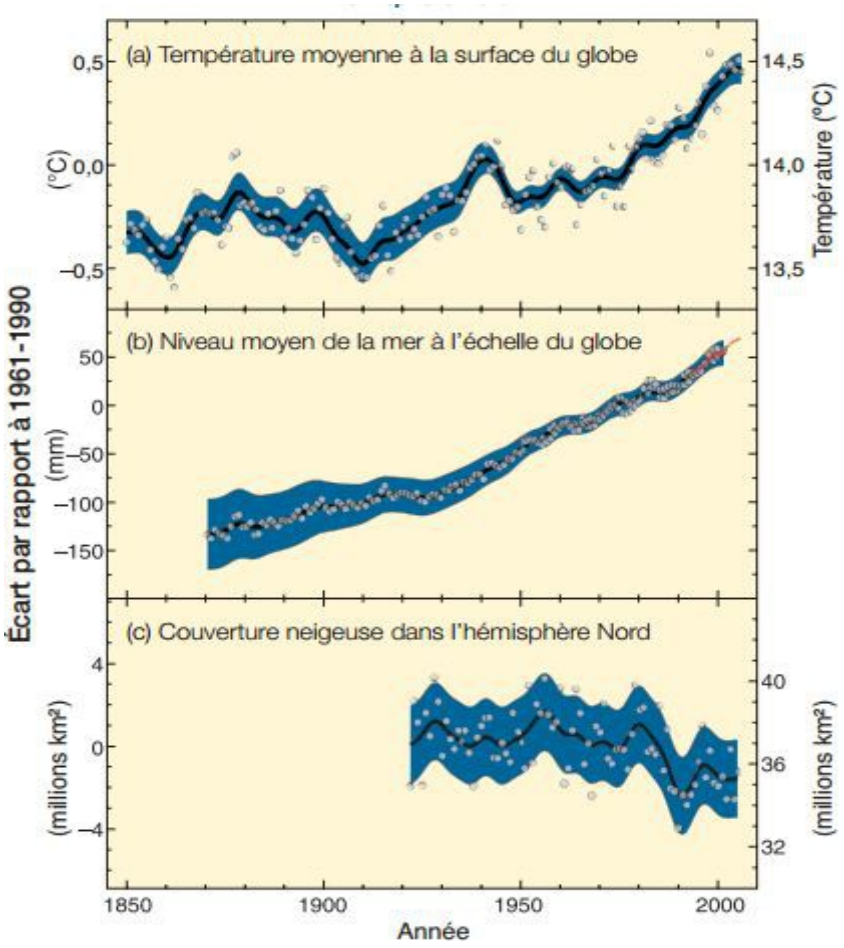
Figure 2.6- Température et concentration de CO2 dans l'atmosphère au cours des quatre cents mille dernières années



Source : NOAA-National Climatic Data Center (2010)

L'année 1850 est fixée comme la date à laquelle est initiée la saisie instrumentale de la température à la surface du globe terrestre. Cette date ne correspond pas au début de la révolution industrielle mais plutôt à sa nouvelle configuration caractérisée par une production de masse, un transport en forte expansion (substitution du roulage par le chemin de fer et les navires à voile par les navires à vapeur). La période comprise entre (1995-2006) est considérée comme la période la plus chaude. La tendance linéaire au réchauffement établie pour la période (1906-2005) a atteint 0,74 °C (voir figure 2.7 ci-dessous), elle a été sous-estimée en comparaison avec la valeur prévue (0,6°C) selon le troisième rapport d'évaluation du GIEC. Les températures ont augmenté partout dans le monde et plus sensiblement aux latitudes élevées de l'hémisphère Nord. Les températures moyennes dans l'hémisphère Nord ont été plus élevées pendant la seconde moitié du 20ème siècle que durant n'importe quelle autre période au cours des cinq derniers siècles, elles sont les plus élevées depuis 1 300 ans au moins.

Figure 2.7-Variations de la température et du niveau de la mer à l'échelle du globe et de la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord.

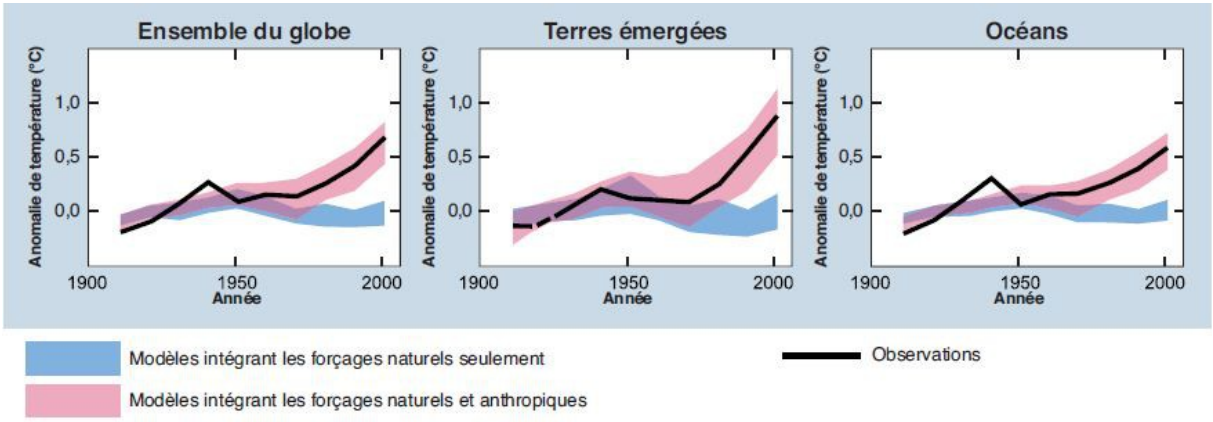


Source : Changements climatiques - Rapport de synthèse du GIEC (2007).

En se référant au figure 2.8 ci-dessous, nous remarquons que les terres émergées[54] se sont réchauffées plus rapidement que les océans et l'activité humaine à amplifié ce phénomène de réchauffement.

54
Correspond à la masse totale de la terre sur notre planète.

Figure 2.8-Variation des températures à l'échelle du globe et des continents



Source : Changements climatiques - Rapport de synthèse du GIEC (2007).

Les statistiques ont affirmé que la température moyenne au niveau du sol a été assez stable jusqu'à l'entre-deux- guerres. Elle a commencé à augmenter à cette époque et son rythme s'est accélérée dans les années 1940 pour atteindre (+0,3°C) depuis 1860. Elle s'est stabilisée vers 1980 puis elle a augmenté à nouveau rapidement (+0,5°C) de 1980 jusqu'à aujourd'hui.

Les causes de ces fluctuations ainsi que les accidents climatiques (les inondations en Europe, la sécheresse du sahel, les tempêtes, les éruptions volcaniques) qui modifient la composition de l'atmosphère ne sont pas soulevés avec certitude, mais il reste évident qu'ils sont corrélés avec les modifications du flux solaire ainsi que la composition de l'atmosphère qui déstabilisent le phénomène du rayonnement solaire et sa réflexion par la terre. L'activité anthropique est imbriquée dans cette hausse des températures à cause des rejets plus importants de GES et surtout du CO_2 suite à la dominance des énergies fossiles dans le bilan énergétique mondial. En effet, le réchauffement récent est plus important et plus rapide au moins cent fois que celui observé à l'échelle géologique. Actuellement, la fonte des glaciers et de la banquise autour du pôle Nord, la succession d'étés étouffants en Europe et aux Etats-Unis confirment avec certitude que la planète est entrée dans une phase de réchauffement qui ne peut guère être seulement la cause des seuls facteurs naturels mais plutôt expliquée par une activité humaine excessive. Merlin. P (2008) a confirmé l'idée selon laquelle l'augmentation des émissions de GES amplifie l'effet de serre et entraine en conséquence un réchauffement de l'atmosphère.

1.5.2-L'élévation du niveau des océans

Sur l'ensemble de la planète, le niveau moyen de la mer s'est élevé de 1,8 mm/an depuis 1961 et de 3,1 mm/an depuis 1993, sous l'effet de la dilatation thermique et de la fonte des glaciers, des calottes glaciaires et des nappes glaciaires polaires. Depuis quelques années, nous assistons à une accélération assez sensible de la montée du niveau des océans qui peut être expliquée récemment par le glissement de plus en plus rapide d'une partie des masses de glace des grands inlandsis suite à la dispersion progressive de la banquise qui les empêche de se diriger vers la mer et la constitution sous ses masses de semelles d'eau liquide facilitant ce glissement. Ces masses chutent par la suite dans les océans et forment des icebergs qui finissent par fondre. Depuis l'année 1975, des élévations extrêmes du niveau de la mer ont dominé le monde entier. (Voir figure 2.9 ci-dessous)

Paskopff. R (2004) a indiqué que la plupart des climatologues ont estimé pour la fin de ce siècle, si nous continuons avec ce même comportement une élévation entre [0,20m-1m] avec une forte probabilité de 45 cm du niveau des océans suite à la dilation thermique des eaux des océans et la fonte des glaciers de montagne. Ce phénomène concerne les cent millions de personnes qui sont installées au bord de la mer à moins d'un mètre au-dessus du niveau des plus hautes marrées tel que Venise, la Hollande, Bangladesh, la côte orientale de la Chine, la Camargue au sud de France, le delta du Nil. Durand. B (2007) a stipulé que si le niveau des GES continue avec le même rythme au cours des siècles suivants, cette montée du niveau des océans va continuer, elle peut même atteindre une dizaine de mètres suite à la fonte des inlandsis du Groenland[55] et de l'Antarctique-Ouest. En conséquence, beaucoup des grandes villes mondiales actuelles seraient alors submergées. En France cela engendre la disparition d'une surface de six à sept départements, la disparition presque totale de la Hollande et de Bangladesh et de presque d'un million de km^2 en Chine. Par ailleurs ce phénomène est lent permettant ainsi une adaptation progressive s'il n'y aura pas une accélération avant la fin de

55
Il est situé dans l'ile de l'Amérique du Nord, considéré comme la deuxième plus grande masse de glace sur terre après l'inlandsis de l'Antarctique.

ce siècle comme font craindre les observations les plus récentes. Ainsi, il demeure important de signaler que pendant ces derniers mois et précisément le 22 Juin 2012, le Conseil National de la Recherche aux Etats-Unis[56] a revu à la hausse les précédentes estimations de la montée du niveau de la mer au cours du 21ème siècle qui ont été publiées par le CIEG dans son dernier rapport sur les changements climatiques en 2007. D'après ces déclarations, le niveau moyen des eaux à l'échelle mondiale devrait augmenter par rapport au niveau de 2000 de 8 à 23 cm d'ici 2030, de 18 à 48 cm d'ici 2050, et de 50 à 140 cm d'ici 2100.

1.5.3 Les autres risques

Il y'a d'autres risques qui inquiètent les spécialistes du climat et qui sont difficiles à déterminer. En se plaçant à l'Europe occidentale, l'augmentation des précipitations aux hautes latitudes et la fonte des glaces du Groenland peuvent atténuer la circulation d'eau profonde dans l'Atlantique Nord parce qu'elles diminueraient la salinité superficielle et donc la densité des eaux de surface par un apport considérable d'eau douce. Le fait qu'un affaiblissement général des courants marins de surface se reproduirait et en conséquence un affaiblissement de la circulation des eaux profondes, cela entraine logiquement la diminution des écarts de température entre l'équateur et les pôles, puisque ces courants sont des courants de conduite entre zones chaudes et zones froides des océans. Le gaz carbonique dissous dans les eaux de surface serait alors plus long à gagner les profondeurs.

Durand. B(2007) a énoncé qu'à l'échelle mondiale, il existe le risque de dégagement du gaz carbonique déjà cumulé dans l'océan sous l'effet de l'augmentation de la température. Environ 40% du CO_2 rejeté dans l'atmosphère par les activités humaines se dissout actuellement dans les océans, ce qui limite d'autant la quantité accumulée dans l'atmosphère. Cependant, la solubilité du gaz carbonique dans l'eau de mer diminue avec la température. Il est alors possible que sous l'effet de l'augmentation de leur température, les eaux de surface de l'océan finissent un jour par restituer le CO_2 qu'elles sont en train d'accumuler et se transforment non plus à un puits de ce gaz comme aujourd'hui mais plutôt à une source de celui-ci. C'est ce même phénomène qui a conduit dans le passé à l'augmentation de la teneur en CO_2 de l'atmosphère lors des déglaciations et à une augmentation corrélative de l'effet de serre. Par ailleurs, l'affaiblissement des courants marins faciliterait ce phénomène ainsi que la disparition des banquises déjà signalée qui diminuerait également la quantité d'énergie solaire

56
Est un organisme public chargé de réaliser les études commandées à l'Académie des Sciences.

réfléchie vers l'espace, provoquant un réchauffement supplémentaire. Les données-satellite collectées depuis 1978 ont confirmé que l'étendue annuelle moyenne des glaces a diminué de 2,7 % par décennie dans l'océan Arctique[57], avec un recul plus marqué en été 7,4 %. Les glaciers et la couverture neigeuse occupent une superficie moins grande dans les deux hémisphères. Entre 1900 et 2005, les précipitations ont fortement augmenté dans l'est de l'Amérique du Nord et du Sud, dans le nord de l'Europe et dans le nord et le centre de l'Asie, tandis qu'elles ont diminué au Sahel, en Méditerranée, en Afrique australe[58] et dans une partie de l'Asie du Sud. Il est probable que la sécheresse a progressé à l'échelle du globe depuis les années 1970. La commission intergouvernementale de l'Unesco (COI) et le comité de Recherche Océanique du Conseil International pour la Science (SCOR) ont déclaré en 2004 qu'il existait un risque d'acidification rapide de la couche superficielle des océans pouvant conduire à de profondes modifications des écosystèmes biologiques marins.

Par ailleurs, au cours de la conférence de Nairobi sur le climat en 2006, les assureurs ont déclaré que les catastrophes climatiques pourraient avoir un cout de mille milliards de dollars par an à l'économie mondiale d'ici 2040. La Banque mondiale a ajouté à son tour que si des mesures strictes ne sont pas prises dans les dix ans à venir, les inondations et les sécheresses pourraient couter sept mille milliards de dollars, ce qui pourrait aboutir à une récession économique comparable à celle de 1929.

1.5.4 L'influence des facteurs météorologiques

L'INERIS (2009) a affirmé que le climat est considéré comme un facteur influant sur la qualité de l'air, qui agit sur le comportement des polluants dans l'atmosphère. Selon les estimations du GIEC (2007), les paramètres météorologiques ont une influence sur la dispersion des polluants notamment à travers la vitesse du vent, le phénomène de convection[59], la fréquence et intensité des situations anticycloniques[60]. La fréquence et la durée des événements de pollution atmosphérique risquent d'être profondément modifiées.

57
C'est le plus petit océan avec une surface de 13 millions de km^2, il recouvre l'ensemble des mers situées entre le pôle Nord et le nord de l'Europe, de l'Asie et de l'Amérique.

58
L'Afrique australe est constituée de l'ensemble des territoires situés au sud de la forêt équatoriale Africaine.

59
Est la variation de la masse d'un polluant suite à la variation de la température.

En effet, la diffusion des polluants peut être décomposée en quatre phases successives : l'ascension, la dispersion locale, la diffusion à l'échelle régionale et le transport sur de longues distances. Au cours des dernières phases, le temps de séjour des polluants varie en fonction de divers mécanismes météorologiques, de la géographie des lieux, de l'urbanisation et des phénomènes de dépollution naturelle. En revanche, la pollution atmosphérique n'a pas de frontières, elle agit à trois niveaux :

- Elle peut être de proximité et concerne essentiellement les polluants provenant de l'industrie des chauffages et de la circulation automobile. Dans ce cas, ses effets sont ressentis près des lieux d'émission où les concentrations sont les plus élevées.

- Elle peut agir à moyenne et à grande distance, et elle dépend du relief et de la météo. Ses effets peuvent s'étendre sur de longues distances. Les pluies acides par exemple sont dues aux transferts des polluants sur des centaines de kilomètres, favorisées par la diffusion des fumées dans des hautes cheminées.

- Elle peut également être ressentie indirectement à l'échelle planétaire, ses effets provoquent le réchauffement de la planète par l'aggravation de l'effet de serre ou encore la destruction de la couche d'ozone.

Béral-Guyonnet. I (1996) dans une analyse de l'influence des facteurs météorologiques sur la pollution atmosphérique a souligné que la dispersion des polluants industriels est commandée par les conditions d'émission (température, vitesse, structure de l'écoulement à la sortie des cheminées, hauteur de la cheminée), par la structure du vent, c'est-à dire la composante verticale du vent (l'ascendance ou la subsidence), par la vitesse d'écoulement du vent, et par la turbulence dépendant de la rugosité du sol et de la stabilité thermique dans les basses couches. Les facteurs météorologiques, tels que la pression atmosphérique et le vent, sont donc importants pour la dispersion ou le maintien des polluants.

Alary. R et al (1995) dans une étude de la pollution automobile à Paris ont souligné que les paramètres météorologiques ont une importance considérable sur les niveaux de pollution et sont à l'origine de pointes de pollution induisant des niveaux élevés. Ils ont énoncé également que grâce à sa situation géographique ainsi que sa topographie particulière (faible relief,

60

Est une zone à haute pression. L'air au-dessus d'une zone froide est froid, il tend à descendre au sol puisqu'il est alourdi par le froid, ce qui provoque au niveau du sol une zone à haute pression appelée anticyclone.

absence de brise marine[61]), Paris bénéficie dans l'ensemble de conditions météorologiques favorables à la dispersion des polluants caractérisées par des vents d'ouest dominants et un ensoleillement relativement faible. Cependant certaines situations bien connues qui se manifestent dix à quinze fois par an environ conduisent à des épisodes aigues de pollution dont la durée peut atteindre au maximum une dizaine d'heures. Azri. Ch et al (2002) dans une étude effectuée sur la ville de Sfax (Tunisie) ont montré que le niveau de pollution atmosphérique est fortement influencé par les sources industrielles, les obstacles et les facteurs météorologiques. Des pointes de pollution aiguë par le SO_2 et les poussières ont été attribuées à l'effet des inversions thermiques marquées et du vent de type sirocco. En effet, les conditions météorologiques (le vent, la température, la pression atmosphérique, la pluie) ont de nombreuses influences sur la pollution :

- Le vent : est un facteur essentiel expliquant la dispersion des émissions polluantes. Il intervient tant par sa direction pour orienter les panaches de fumées que par sa vitesse pour diluer et entraîner les émissions, il résulte du déplacement des masses d'air et dilue continuellement la pollution libérée au point d'émission. Son absence entraine la concentration des polluants. Quand il est modéré, il provoque une bonne dispersion des polluants, toutefois quand le vent est fort, il y'aura un effet de panache et la pollution sera localisée. La vitesse de vent augmente généralement avec l'altitude.
- L'inversion des températures : les mouvements des masses d'air sont dus aux différences de densité entre elles. Le gradient de température conditionne ainsi le mouvement ascendant ou descendant d'une couche ou l'absence de celle-ci. La température de l'air diminue généralement avec l'altitude de 1°C tous les cent mètres.

Le gradient vertical de la température est utilisé pour définir la stabilité de l'atmosphère. Si la température décroit trop rapidement, l'atmosphère est instable favorisant ainsi la dispersion des polluants. Toutefois, une inversion thermique suite à l'augmentation de la température en altitude entraine des niveaux élevés de pollution. Cette inversion peut se produire en hiver par temps clair suite aux différences de températures entre la nuit et le jour. L'absence de vent favorise généralement l'apparition d'une inversion thermique. En été, la température peut aussi agir sur la formation d'ozone, c'est la pollution photochimique. Un fort rayonnement solaire et des températures élevées déclenchent un ensemble de réactions chimiques complexes à partir des polluants primaires émis par les véhicules automobiles conduisant

61 Est un vent qui souffle la journée de la mer vers la terre et qui se produit principalement au printemps et en été, de préférence les jours de beau temps.

notamment à la formation d'ozone par décomposition de NO_2. L'ozone réagit ensuite avec le monoxyde d'azote pour former à nouveau le NO_2. Cependant, en milieu urbain pollué, l'équilibre est déplacé, la réaction de formation de NO_2 est prépondérante.
En été, une augmentation de température (2 à 4°C) augmente la formation d'ozone.
En hiver, une diminution de température (2 à 4°C) peut provoquer la formation d'une couche d'inversion, notamment par temps clair, et dégrader la qualité de l'air par accumulation des polluants primaires.

- La pluviométrie a un rôle de lessivage de l'atmosphère par entraînement des polluants au sol. Les précipitations sont généralement associées à une atmosphère instable, qui permet également une bonne dispersion de la pollution atmosphérique. Par ailleurs, elles entraînent au sol les polluants les plus lourds. Elles peuvent parfois accélérer la dissolution de certains polluants. Mais, globalement, les concentrations en polluants dans l'atmosphère diminuent nettement par temps de pluie notamment pour les poussières et les éléments solubles tel que le (SO_2). Par ailleurs, la topographie ainsi que l'urbanisation jouent également un rôle dans le déplacement des masses d'air.

- la pression atmosphérique : La présence d'une masse anticyclonique suite à une forte pression (avec inversion thermique, faible ventilation ou calme) est une des conditions nécessaires à une forte concentration de polluants. Plus la pression est élevée, plus l'air est lourd et stationnaire, moins les polluants sont dispersés dans l'atmosphère.

L'humidité influence également la transformation des polluants primaires émis. Nous constatons ainsi que la topographie, les obstacles naturels et les constructions sont des éléments qui modifient la circulation des vents et qui peuvent canaliser l'écoulement des polluants dans des directions privilégiées. L'agglomération constitue également un îlot de chaleur qui subsiste à la tombée du jour. L'air chaud s'élevant, provoque une dépression qui attire l'air plus frais de la périphérie, entraînant du même coup les polluants qui peuvent s'y trouver. Dahech. S (2009) a stipulé que la répartition spatiale des températures nocturnes de l'air, par temps radiatif, à l'échelle de l'agglomération est fortement liée à la distribution du bâti. Le centre-ville de Sfax et précisément la Médina enregistre les températures les plus élevées à cause de l'absence de ventilation, de l'effet de paroi en raison de l'étroitesse des rues et de la densité du bâti. L'ilot de chaleur urbain est plus intense durant la saison chaude qui coïncide avec la saison sèche (entre mai et octobre) et lorsque le temps calme est plus fréquent et plus persistent.

1.5.5 Les changements climatiques dans la région de la Méditerranée

Au cours des cinquante dernières années, les changements climatiques ont laissé leur trace sur la mer Méditerranée. Le Bassin Méditerranéen (BM) est considéré comme étant un laboratoire naturel dans lequel les changements actuels et à venir pourront être évalués. Le BM est une région fortement hétérogène où les activités naturelles et anthropogéniques interagissent de manières complexes avec les variabilités climatiques sur différentes échelles spatiotemporelles.

Selon le rapport du GIEC (2007), le Sud-Ouest de l'Europe (la péninsule ibérique, sud de la France) a connu un réchauffement de près de 2 C° depuis 1970. Ce réchauffement est également perceptible au Nord de l'Afrique même s'il est plus difficilement quantifiable du fait d'une chaine d'observations moins complète. L'augmentation de la température est plus marquée en hiver qu'en été et sur les minimales de température que sur les maximales. Concernant les précipitations, certaines régions ont vu des précipitations diminuer de 20%. La tendance est plus contrastée sur l'Afrique du Nord. D'ici la fin du siècle, l'augmentation de la moyenne annuelle des températures devrait se situer entre 2,2 C° et 5,1 C° durant la période 2080-2099 par rapport à la période 1980-1999 avec une probabilité de 50% d'un réchauffement compris entre 3 et 4C°. L'élévation prévue est variable d'une région à une autre, elle pourrait atteindre 4C° en été dans les régions subsahariennes. En revanche, sur la rive Nord, l'augmentation de la température devrait être plus marquée en hiver en restant autour de 3C°. Les précipitations dans leur ensemble ont une tendance prévisible à baisser et l'occurrence des vagues de chaleur à augmenter.

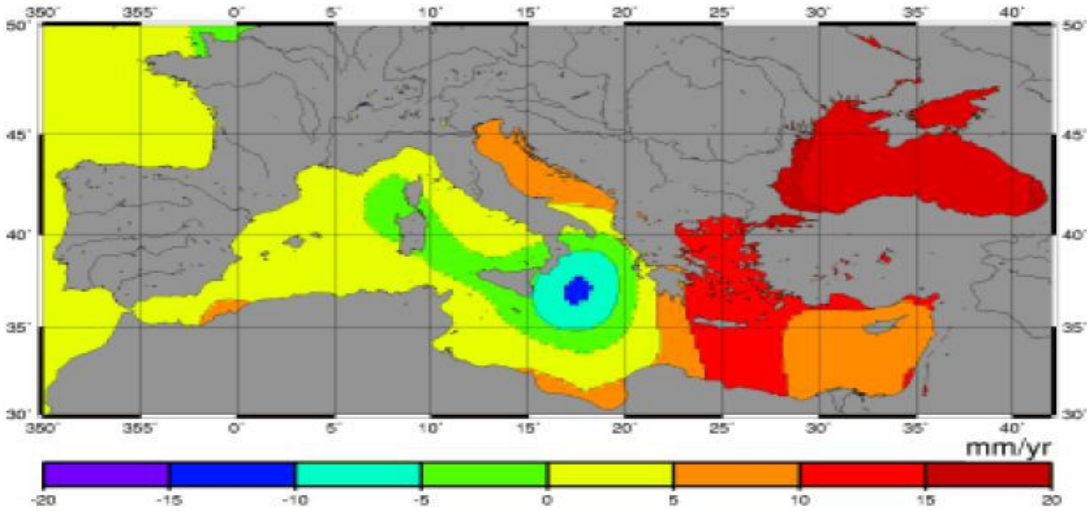
Tableau 2.3- Changements climatiques en Méditerranée en 2007.

	Variations des températures (en C°)		Variations des précipitations (en %)		Occurrence des extrêmes (en %)		
Saison	Min	Max	Min	Max	chaude	humide	Sèche
Hiver	1,7	4,6	-16	6	93	3	12
Printemps	2,0	4,5	-24	-2	98	1	31
Eté	2,7	6,5	-53	-3	100	1	42
Automne	2,3	5,2	-29	-2	100	1	21
Annuel	2,2	5,1	-27	-4	100	0	46

Source : 4ème rapport du GIEC

De même, la hausse du niveau de la mer Méditerranée s'est surtout manifesté ces dernières années sur l'Est du bassin tandis que l'Ouest a connu une tendance plutôt à la baisse.

Figure 2.9- Variations du niveau de la mer observées durant les sept dernières années



Source : LEGOS-GRGS-CNES.

La variation sur l'échelle se fait des valeurs négatives (bleu sombre au vert sombre) aux valeurs positives (du vert pâle au rouge sombre). La différence Est-Ouest est évidente, avec une tendance claire à l'augmentation du niveau de la mer de l'Est Méditerranéen.

Selon le GIEC (2007), la hausse de niveau de la mer pourrait atteindre entre 23 et 47 cm d'ici la fin du 21ème siècle et de nombreuses régions méditerranéennes seraient soumises à un risque important de submersion et d'érosion qui toucheront plusieurs zones côtières.

La hausse du niveau de la mer dans la zone Méditerranéenne accentue, d'une part la vulnérabilité des espaces deltaïques qui ont une topographie particulière surtout avec les barrages anthropiques en amont qui empêchent la circulation normale des sédiments qui renforcent le delta. C'est ainsi que les terres inondées de manière saisonnière se

transformeraient en marécage[62] puis en tourbières[63] entrainant ainsi la migration de toute vie animale, végétale et humaine et l'érosion sur les côtes puisque l'augmentation de l'épaisseur d'eau facilitera la propagation de la houle[64] vers la plage.

Cette érosion entraine à son rôle la modification du bilan radiatif et en conséquence la baisse de la productivité des écosystèmes côtiers, notamment les herbiers à posidonies qui sont nécessaires pour maintenir les océans et la mer en bonne santé et aussi de limiter le réchauffement climatique. Il est à souligner que les zones méditerranéennes les plus vulnérables seront celles de l'Afrique du Nord voisines des zones désertiques, les grands deltas (ceux du Nil, du Pô et du Rhône), les zones côtières (rive Nord comme rive Sud du bassin) ainsi que les zones à forte croissance démographique et socialement fragiles (rive Sud et Est, villes denses et banlieues).

Les pays du sud et de l'est de la Méditerranée (PSEM) apparaissent plus vulnérables au changement climatique que ceux de la rive Nord. Ils sont d'une part, plus exposés à l'accélération de la désertification et de l'aridité des sols, à l'augmentation de la raréfaction des ressources en eau et, d'autre part, ils sont dotés de structures économiques qui dépendent plus fortement des ressources naturelles ainsi que de capacités techniques et financières plus limitées pour mettre en œuvre des options d'adaptation de grande ampleur.

1.5.6 Le changement climatique en Tunisie

La Tunisie est touchée comme les autres (PSEM) par un changement climatique agressif. Ce phénomène s'amplifie lorsqu'il s'agit d'une pression anthropique qui s'exerce chaque jour sur un capital naturel limité et fragile. Hénia. L et Benzarti. Z (2006) ont ajouté que « les changements climatiques se traduiront par l'augmentation de la température, de l'évaporation, par la diminution et/ou perturbation du régime pluviométrique et ils détermineront surtout une

62
Désigne un terrain inondable où l'eau réside en permanence en cage ou pendant très longtemps et qui est recouvert d'une végétation naturelle dense.

63
Une tourbière est un écosystème particulier composé de plantes qui sont adaptées à un milieu très humide.

64
La houle est un espace de vagues régulier, de longue période, non pas généré par le vent local mais formé et ordonné par un vent soufflant sur une grande étendue de mer sans obstacles.

extension du domaine aride vers le Nord. La progression des conditions sahariennes sur la Tunisie se manifestera par la dégradation de la ressource du point de vue quantité et qualité ».

La juxtaposition de phénomènes anthropiques et naturels a provoqué la dégradation presque généralisée du patrimoine naturel Tunisien. Selon une étude effectuée par le ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques en 2007, les modèles de simulation du climat à l'échelle du pays prévoient une augmentation moyenne annuelle de la température sur l'ensemble du pays de +1.1 C° à l'horizon 2030 et + 2.1C° à l'horizon 2050. L'amplitude de cette augmentation de la température varierait d'une zone à une autre. Elle est en moyenne de 1.6C° dans la région du Nord, 2.1 C° dans le centre et 2.7C° dans la région du Sud.

Une baisse du volume annuel des précipitations, variant selon les zones de 10% du côté Nord à 30% du côté Sud par rapport à la situation actuelle, est prévue à l'horizon 2050. Cette baisse sera accompagnée très probablement par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des années extrêmes sèches. Par ailleurs avec un littoral qui s'étend sur plus de 1300 km, la Tunisie sera très vulnérable à l'élévation accélérée du niveau de la mer. Les études réalisées à ce propos estiment une augmentation moyenne du niveau de la mer de 50 cm à l'horizon 2050. Les ressources en eau sont de plus en plus sollicitées avec apparition de graves phénomènes de surexploitation des nappes souterraines entrainant une salinisation des eaux et une détérioration des terres agricoles particulièrement dans les périmètres irrigués arrosés avec des eaux chargées en sel. Les eaux fossiles du Sud oasien ne sont pas épargnées par cette menace. Plus de 38% des eaux souterraines sont en provenance de ces nappes fossiles non renouvelables. Malgré les grands efforts d'aménagement et de protection des bassins versants, le support de la production alimentaire a subi des pertes annuelles de l'ordre de 1% suite à des phénomènes de désertification de tout genre tels que : l'érosion hydrique et éolienne, la salinisation et l'urbanisation. Il est à souligner aussi que le milieu marin a affiché des signes de détérioration.

2. L'impact de la consommation d'énergie sur la dégradation de la qualité de l'environnement pour le cas du gouvernorat de Sfax

L'activité humaine est la cause essentielle des émissions de GES ou plutôt de l'augmentation de leur teneur dans l'atmosphère et en conséquence du réchauffement climatique d'origine anthropique dans le monde comme dans chaque région. Dahech. S (2009) a souligné que la majorité des pays du bassin méditerranéen ont vécu une hausse des températures de l'air au

cours des trois dernières décennies. Toutefois, la portée de cette hausse varie d'une région à autre en fonction de la latitude, de la distance par rapport à la mer et particulièrement de la tendance urbaine et démographique qui caractérisent certaines agglomérations comme Sfax, localisée au Centre-Est Tunisien. Sfax a connu pendant ces dernières années une extension urbaine et industrielle intense qui a développé le réseau du trafic routier. Par conséquent l'intensification des émissions anthropiques a provoqué une grande pression sur l'atmosphère et a développé le phénomène de la pollution atmosphérique. Cette dernière sera l'objet de notre analyse empirique, elle sera étudiée simultanément avec le secteur de l'électricité, considéré comme le premier émetteur des GES, ainsi que les facteurs météorologiques afin de relever les différentes interactions ainsi que les relations de causalités à travers le temps.

2.1Revue de la littérature empirique

La consommation de l'électricité a augmenté rapidement partout dans le monde au cours de ces deux dernières décennies. Plusieurs spécialistes considèrent que ce phénomène est lié essentiellement à la croissance démographique, au changement du niveau de vie ainsi qu'à l'expansion du secteur des services. Par ailleurs l'accélération du rythme de la consommation de l'électricité est toujours accompagnée de l'intensification des GES émis dans l'atmosphère qui se dégagent aux différents stades du processus de l'électricité depuis l'extraction des combustibles et la production jusqu'au transport et distribution. Plusieurs économistes ont étudié le lien de causalité entre la consommation de l'électricité et les émissions des GES tel est le cas de Sahaili. K(2010) qui a analysé l'impact de l'augmentation des prix de l'électricité par la suppression des subventions sur la consommation de l'électricité elle-même et sur la pollution de l'environnement. Il affirmé que si nous ajustons le prix de l'électricité, la pollution de l'environnement causée par la consommation des carburants, du gaz, de la vapeur, du diesel par les centrales à cycle combinés diminue de 0.03% chaque année. Selon lui, il existe une relation de causalité certaine entre la consommation de l'électricité et la pollution atmosphérique en Iran. To. W.M et al (2012) dans une approche basée sur les cycles de vie des différents polluants à Hong Kong ont affirmé que la productivité croissante de l'électricité à un cout qui pèse lourd sur l'environnement. Selon eux, l'activité d'extraction, de combustion, de raffinage et de transport de l'électricité génèrent le CO_2, le SO_2, CH_4, le NO_2 et les oxydes d'azotes. Ils ont ainsi proposé que Hong Kong doive modifier son bouquet énergétique au profit du gaz naturel liquéfié (GNL), étant donné que ce dernier émet moins de GES par rapport aux autres énergies fossiles. To. W.M et al (2011) dans une étude de la

relation de causalité entre la consommation d'électricité et la croissance économique ont approuvé que les émissions polluantes liées à l'électricité importée aient contribué intensivement aux émissions totales. Chan.W.W et al (2002) dans une analyse de la contribution de l'industrie hôtelière dans les émissions polluantes à Hong Kong suite à la forte consommation de l'électricité dans ce secteur, ont soulevé que les quantités de SO_2, de NO_2, de CO_2 ainsi que les particules émises ont augmenté au fil des années et que les mesures prises à ce propos sont insuffisantes et limitées. Kaldellis. J.K et al (2005) dans une analyse des effets de l'augmentation de la consommation de l'électricité en Grèce ont indiqué que la production l'électricité est basée à concurrence de 90% sur les combustibles fossiles et suite à cette politique énergétique, ce secteur contribue intensivement aux émissions des GES notamment les oxydes d'azotes et le carbone. De plus, le pétrole et le gaz importés sont de faible qualité et considérés comme lourds et trop polluants. Ils ont également indiqué que si cette stratégie de la production de l'électricité et de sa consommation est maintenue, son effet sur la dégradation de la qualité de l'environnement sera lourd et affecte d'une façon nocive la santé des citoyens. Leam. H.H et al (2010) dans une étude du lien de causalité entre les émissions de CO_2, la consommation d'électricité et la croissance économique dans cinq pays asiatiques ont soulevé qu'il existe une association positive et significative entre la consommation d'électricité et les émissions polluantes et une relation non linéaire entre ces polluants et le revenu réel conformément à la (CKE). Ils ont insisté en outre sur la causalité de Granger unidirectionnelle partant de la consommation de l'électricité vers les GES dégagés reflétant ainsi que le processus de la production de l'électricité dans ces pays est fortement polluant et il est similaire à plusieurs pays industrialisés. Les résultats de leur analyse indiquent en revanche que la dégradation de l'environnement cause la croissance économique à long terme mais les auteurs ont indiqué que la pollution du milieu naturel ne doit pas être marginalisée et utilisée comme un prétexte pour promouvoir la croissance économique. Une baisse persistante de la qualité de l'environnement peut générer des externalités négatives pour l'économie suite à la réduction de l'état de santé des individus et en conséquence de la productivité à long terme.

2.2 Analyse descriptive

2.2.1 Une brève idée sur la climatologie de Sfax

La région de Sfax est caractérisée par un climat méditerranéen semi-aride qualifié par l'absence de relief et l'exposition maritime. Soumise à des influences opposées, continentales

et maritimes, la région se distingue par un été chaud et sec et un hiver froid relativement pluvieux. La fréquence des rosées peut atteindre 128 jours par an en moyenne. Les vents prédominants dans la région de Sfax demeurent incontestablement ceux des secteurs Est et Ouest. Sfax se caractérise par un ciel souvent dégagé avec un nombre moyen annuel d'heures d'insolation qui s'élève à 3185 heures correspondant à un indice d'insolation de 72%. Selon Azri. C (2000) dans une étude établie pour la période 1971-1980, a indiqué que l'ensoleillement dans la région de Sfax varie entre 6.1 heures/jour en Janvier et 12.3 heures/jour en Juillet. Selon Ammar. S (2010), Sfax est connu par l'alternance de deux saisons considérablement distinctes :

- Un hiver qui s'étale de Décembre à Avril avec une température moyenne qui atteint 12.3 °C (±0,09°C). La température hivernale pour Janvier et Février, considérés comme les mois les plus froids de l'année, varient entre 11.5 et 12.5 °C.

- Un été caractérisé par ses fortes chaleurs. La température moyenne estivale est de 24.9°C (±0,10°C). Cette dernière peut dépasser les 40°Cdans le cas de Chéhili suite à des advections sahariennes.

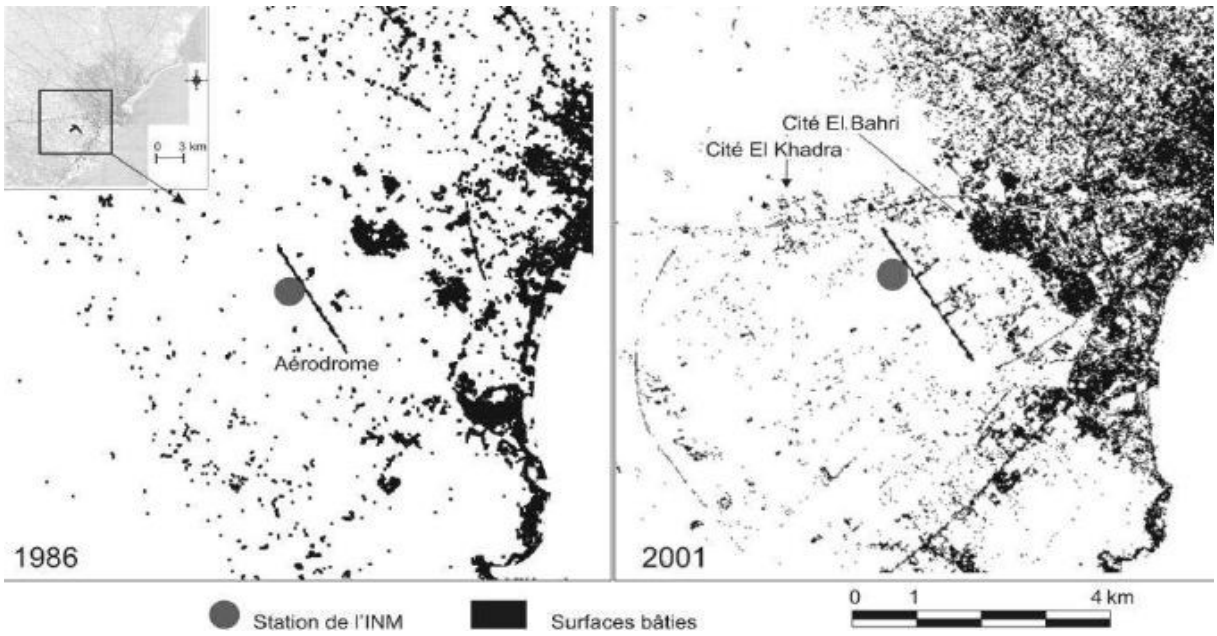
2.2.2 La Variabilité temporelle de la température au gouvernorat de Sfax

Sfax comme toutes les autres régions du Sud et de l'Est de la rive méditerranéenne n'est pas à l'abri du changement climatique constaté au cours de ces trois décennies. Dahech. S (2009) dans son étude sur la variabilité des températures à l'échelle annuelle, mensuelle et décadaire sur la période 1950-2007 pour le gouvernorat de Sfax, a indiqué que les températures moyennes de l'air mesurées dans l'aérodrome de Sfax, ont connu une nette tendance à la hausse. La température moyenne annuelle a augmenté de 0.033°C/an entre 1950 et 2007. Cette hausse est plus importante au niveau des températures minimales, elle s'élève à 0.039°C/an contre 0.027°C/an pour les températures maximales. Toreti. A et Desiato. F. (2008) ont annoncé que cette hausse thermique vécue depuis le début des années 1980 est similaire à celle repérée aux latitudes tempérées de l'hémisphère Nord et précisément dans le bassin méditerranéen. Mills. G (2007) a stipulé qu'une partie de ce réchauffement actuel à l'échelle local peut être expliquée par l'urbanisation croissante que connaissent les agglomérations. Oke. T.R (1987) a indiqué dans son analyse que les surfaces bâties ont

tendance à modifier le flux énergétique du sol. Elles conservent plus de chaleur pendant la journée et la récupèrent la nuit sous forme de rayonnement tellurique[65].

Dahech. S et Beltrando. G (2006) ont ajouté que le rythme d'urbanisation dans l'agglomération de Sfax et autour de la station météorologique s'est accentué. A 1km de la station, la construction et l'expansion du quartier populaire 'El Bahri' au Nord et 'El Khadra' au Sud-Est ont éventuellement amené à une hausse des températures à partir du début des années 1980.

Figure 2.10- Evolution des surfaces autour de la station météorologique de l'INM



65
C'est un rayonnement infrarouge thermique que la terre émet vers l'espace.

Source : Dahech. S (2009).

El Hbaïeb. A (2003) dans son étude durant la période 1986-2003 a indiqué que la variation du taux d'usage de la voiture est de 9.8% contre 0.9% pour l'usage des transports communs et 4.3% pour le mode deux roues. Le trafic est plus dense au centre de l'agglomération, en 2005, environ 4000 véhicules/heure/ rond-point sont observés au centre durant la période de pointe matinale. Ben nasr. A (2005) a affirmé qu'en raison de la défaillance du transport public, de l'ancienneté du parc automobile, de l'inadaptation du réseau routier aux besoins actuels ainsi que de l'absence des couloirs réservés aux bus et des embouteillages chroniques dans le centre-ville, les véhicules qui circulent quotidiennement dans l'agglomération sont devenus une source importante de pollution. Par temps calme, durant les heures de pointes le taux du monoxyde de carbone (CO) au centre de Sfax dépasse 15ppm.

Gargouri. I et al (2006) ont souligné qu'outre les émissions issues du trafic routier, l'activité industrielle à Sfax, demeure une source de nuisance remarquable, particulièrement l'industrie du phosphate. En effet, Sfax se trouve localisée entre deux dépôts de phosphogypse. Le premier dépôt est celui de l'unité de traitement de phosphate de la société industrielle d'acide phosphorique et d'engrais « SIAPE B » à proximité de la ville du côté nord, elle n'est plus opérationnelle depuis 2008. Le deuxième dépôt de l'unité de traitement des phosphates « SIAPE A » est installé un peu plus vers le Sud, il est encore en activité.

Dahech. S et Beltrando. G (2006) ont signalé que l'étendue considérable de l'agglomération de Sfax, la spécification de son tissu urbain et la pollution atmosphérique en hausse influencent son climat local. En effet, il existe un différentiel thermique entre le centre-ville, la zone péri-centrale et la zone des' jneins' où domine l'habitat pavillonnaire avec quelques espaces verts. Ils ont établi une classification automatique des trois canaux thermiques qui permet de distinguer schématiquement les trois classes de températures de brillance, en fonction des types de surface.

- Les surfaces les plus chaudes (26-30 °C) comprennent, en plus de la mer, le centre-ville de Sfax densément bâti et les zones industrielles littorales. La nuit, la mer, du fait de sa forte inertie thermique, accumule la chaleur durant le début de l'été. Elle est considérée comme un réservoir thermique. La nuit, la mer se refroidit légèrement en raison de sa forte chaleur spécifique. Le centre-ville est formé par des surfaces minérales proches, de même que les zones industrielles. Ces surfaces stockent la chaleur le jour et demeurent également relativement chaudes la nuit.

- Les surfaces les plus froides (inférieure à 22 °C) correspondent à la ceinture périurbaine dont l'occupation du sol est encore dominée par les plantations d'amandiers ou d'oliviers. Ces espaces ne s'échauffent pas excessivement le jour grâce au phénomène d'évapotranspiration[66]. La nuit, leur refroidissement est favorisé par l'espacement des arbres et par la faible humidité de ces champs.

- Enfin, entre les deux zones décrites ci-dessus, se trouvent des surfaces intermédiaires quant à leur comportement thermique. Il s'agit d'un tissu urbain pavillonnaire plus ou moins faible, comportant des surfaces minéralisées (voirie, habitations…), mais aussi quelques espaces végétalisés.

2.2.3 Les données environnementales relatives au gouvernorat de Sfax

La pollution atmosphérique est définie selon la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (LAURE) de 1996 comme étant "l'introduction par l'homme, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives excessives". Le contrôle de la qualité de l'air est assuré en Tunisie à l'aide d'un réseau national de surveillance de la qualité de l'air (RNSQA), constitué de plusieurs stations de mesure installées dans des zones géographiques bien ciblées. L'air ambiant est suivi d'une façon continue puis il est analysé. Chaque station est dotée d'un ou de plusieurs analyseurs permettant de mesurer chaque polluant spécifique.

Le cadre réglementaire inhérent à la surveillance de la qualité de l'air et régissant la pollution atmosphérique en Tunisie se résume par :

- La norme Tunisienne relative à la qualité de l'air ambiant : NT 106.04(1994) sur la protection de l'environnement : valeurs limites et valeurs guides pour certains polluants de l'air.
- La norme Tunisienne relative aux cimenteries NT 106.05(1995) sur la protection de l'environnement: valeurs limites d'émission des polluants des cimenteries.
- Les seuils des limites d'émissions des gaz d'échappement des véhicules de transport routier (code de la route 2004) et qui concerne le CO pour les voitures à essence et l'opacité pour les

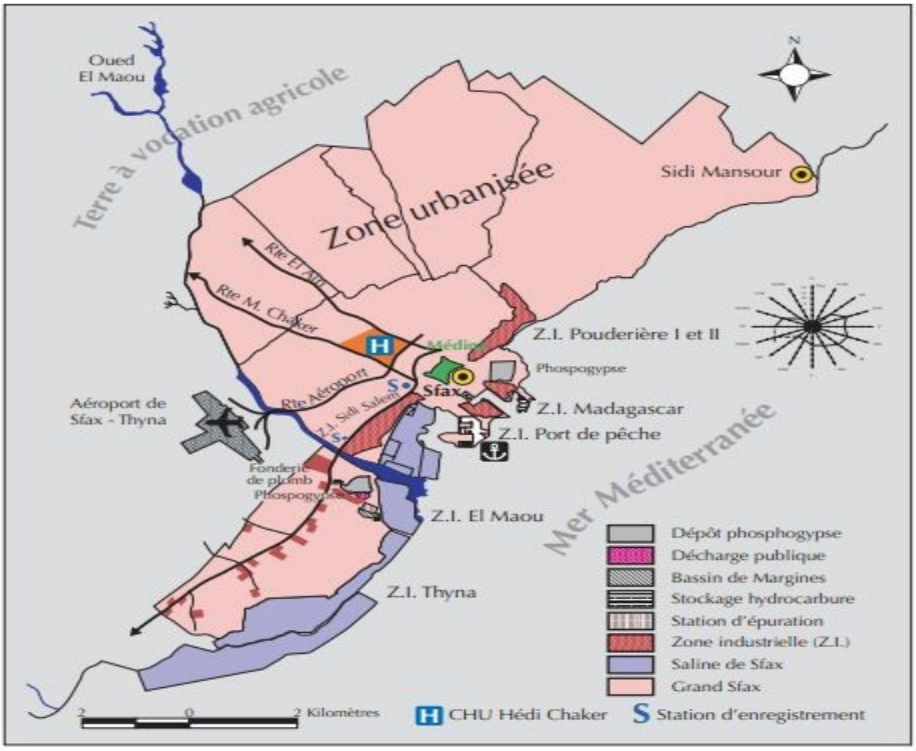
66
L'évapotranspiration correspond à la quantité d'eau totale transférée du sol vers l'atmosphère par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes.

voitures diesel prévus par le décret n°2000-147 du 24 Juin 2000 fixant les règles techniques d'aménagement.

- La loi n°2007-34 du 04 Juin 2007 sur la qualité de l'air.

La ville de Sfax est équipée de deux stations de mesure à enregistrement automatique des paramètres, la première station de proximité du trafic routier est installée en 1996 à la place du grand Maghreb, la deuxième station est celle de Sfax Banlieue de proximité industrielle à 3 km au Sud de la ville installée en 2005 au siège social du groupe chimique Tunisien. Cette dernière station est sollicitée pour collecter les données relatives aux polluants atmosphériques faisant l'objet de notre étude.

Figure 2.11- Carte de localisation des zones industrielles et des principales sources de pollution dans le grand Sfax



Source : Gargouri. I et al (2006).

La pollution de l'air à Sfax est présentée par l'intermédiaire des quatre polluants suivants : le (NO_2), le (SO_2), l'ozone (O_3) et les particules en suspension dans l'air dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres (PM_{10}). Ces polluants atmosphériques sont issus soit d'une source naturelle (roches, volcans, matières en décomposition) ou bien d'une ressource anthropique qui se divise à elle-même en sources fixes (équipements industriels, stations de traitement de déchets, unités de production énergétiques,…) ou mobiles (trafic routier, bateaux, aviations, …) selon le cas. Rothen. R (1985) a souligné que la distinction entre ressources naturelles et ressources artificielles renvoie directement à l'ampleur de l'intervention de l'être humain ainsi que sa responsabilité dans la modification de la combinaison chimique de l'atmosphère. En Tunisie, le trafic routier est le premier responsable des émissions polluantes atmosphériques.

Tableau 2.4- La part de chaque polluant dans la pollution atmosphérique

	NO_x	CO	COV	Particules	CO_2	SO_x
Sources fixes	39	42	27	91	70	95

en %						
Sources mobiles en %	61	58	73	9	30	5

Source : Groupe Chimique Tunisien (1955)

L'agence nationale de protection de l'environnement (ANPE) en 2008 a procédé à une analyse exhaustive qui relie chacun des polluants à ses origines.

Tableau 2.5- Les origines relatives à chaque polluant

Les polluants	Les origines
(SO_2)	La combustion des matières fossiles contenant du souffre (Charbon, fuel, gazole…) et les procédés industriels.
(NO_2)	Les véhicules (près de 60%) et les installations de combustion.
(PM_{10})	La sidérurgie, les cimenteries, l'incinération des déchets et la circulation automobile.
(O_3)	La transformation photochimique de certains polluants primaires dans l'atmosphère en particulier les oxydes d'azotes (NO_x) et les composés organique volatiles (COV) sous l'effet des rayonnements ultraviolets.

Les polluants sont collectés à partir de l'ANPE de Tunis, les données brutes sont fournies en heures du 01/01/2008 à 01 h jusqu'au 14/12/2010 à 23 h. Nous les avons converties en données journalières en faisant recours à la moyenne arithmétique puis en données mensuelles. Les polluants émis sont dispersés dans l'atmosphère tout en subissant des modifications physicochimiques. Le principal facteur impliqué dans ce phénomène est la météorologie qui joue par des phénomènes de turbulence et d'irradiation. Les principaux paramètres météorologiques utilisés dans cette analyse sont: le moyen journalier de la température exprimé en °C (T) et de l'humidité relative (HR) exprimée en %. La source de ces données est l'Institut National de la Météorologie (INM), subdivision de Sfax.

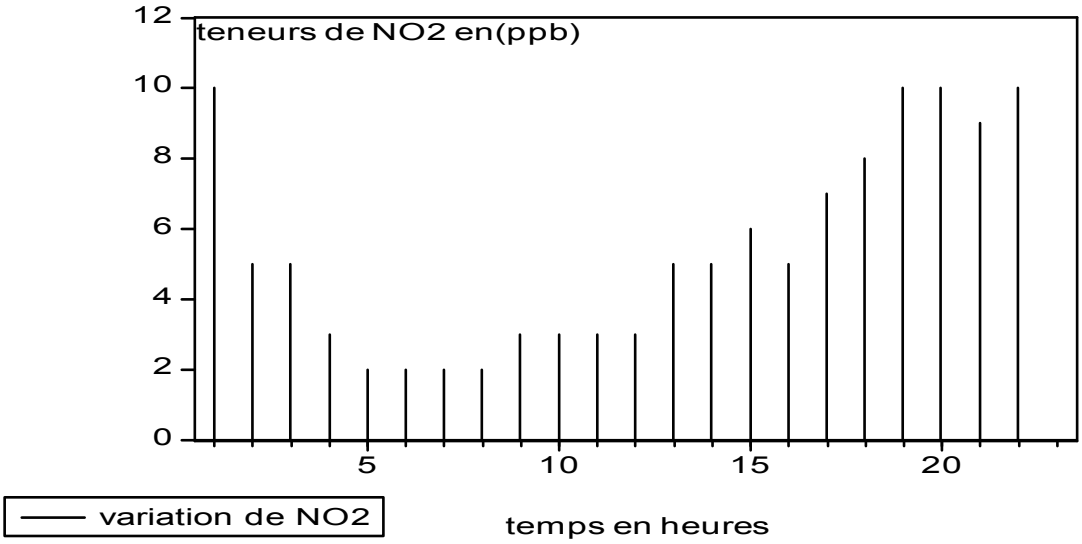
2.2.4 Distributions des différents polluants

Ci-après, nous procédons à une analyse descriptive des variations de chaque polluant et détecter à priori les interactions qui se manifestent entre eux avec l'intervention des paramètres météorologiques.

- **L'évolution de NO_2**

En se référant à la variation d'une journée type ouvrable des teneurs de NO_2, nous remarquons qu'à priori il y'a deux pics correspondants aux heures de pointe : un premier pic entre 12 h-15h et un deuxième pic entre 18 h-22 h.

Figure 2.12- Evolution de la journée type de NO2(01/01/2009)



Source : Elaboration de l'auteur sur la base des données horaires de l'ANPE (2009).

Alary. R et al (1994) ont indiqué que les teneurs de (NO_2) sont semblables à celles du monoxyde d'azote (NO) tout en signalant l'existence de deux pics correspondants aux heures de pointe. Cela affirme qu'il y'a une origine commune pour le (NO_2) et (NO), liée au trafic routier. Cependant, les teneurs de (NO_2) enregistrent des pics en dehors des heures de pointe de forte circulation, traduisant ainsi la contribution d'une autre source autre que le trafic routier qui émet le NO_2. En effet le NO_2 est jugé comme étant un polluant secondaire, il représente entre 5 et 10%[67] des oxydes d'azote rejetés par les gaz d'échappements des véhicules. Son évolution similaire à celle du (NO) explique en partie sa formation au niveau du site suite aux réactions atmosphériques à partir du(NO) et de (O_3).

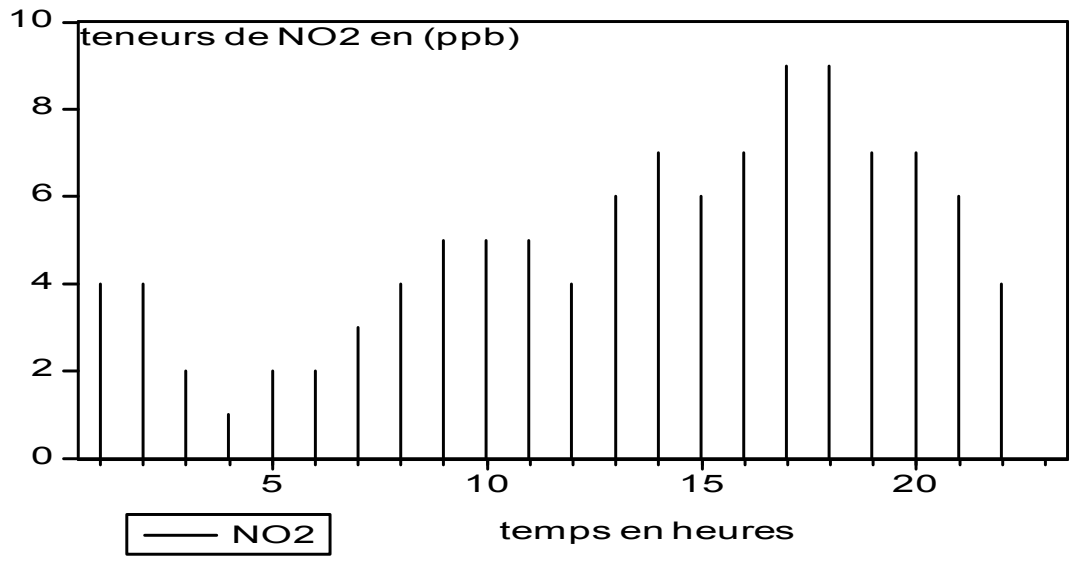
$NO+O_3 \rightarrow NO_2+O_2$ (réaction n°1)

L'idée selon laquelle le (NO_2) a une autre source que le trafic routier se confirme en observant l'évolution de ce polluant pendant un dimanche. Nous observons que les teneurs de NO_2 ont

67
ANPE (2010).

presque la même allure que pendant les jours ouvrables même si que l'activité du trafic routier baisse en quelque sorte.

Figure 2.13- Evolution de la journée type de NO_2 pendant un dimanche (11/01/2009)

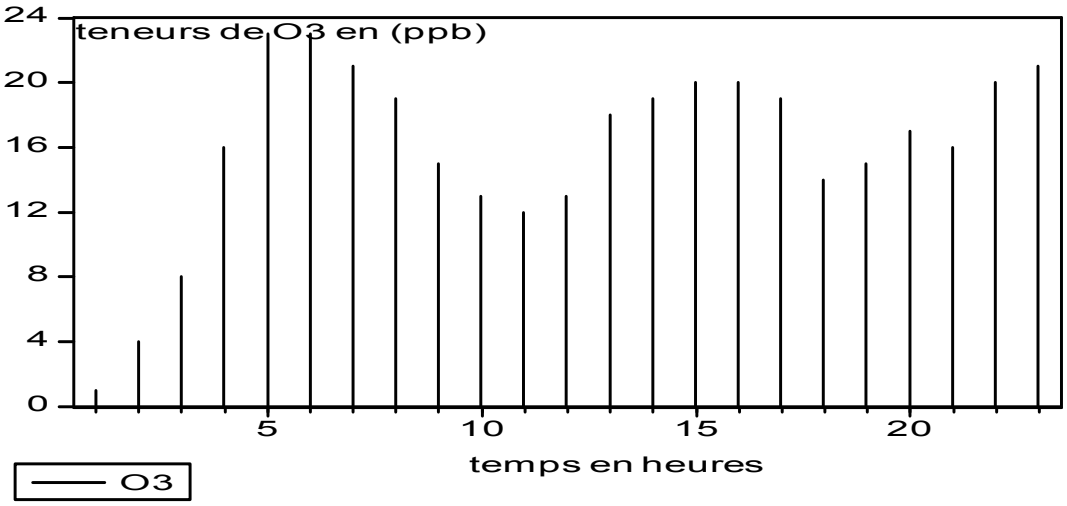


Source : Elaboration de l'auteur sur la base des données horaires de l'ANPE (2009)

- **L'évolution des teneurs en ozone (11/1/2009)**

Suite à l'examen de l'évolution des concentrations d'O_3 au cours d'un dimanche, nous observons une diminution de ses teneurs pendant les heures de pointes. Cela se comprend par le fait que l'O_3 est un polluant secondaire qui n'est pas émis par une source précise mais il est plutôt issu de la transformation photochimique de certains polluants primaires dans l'atmosphère en particulier les oxydes d'azotes (NOx) et les composés organiques volatiles (COV) sous l'effet des rayonnements ultraviolets.

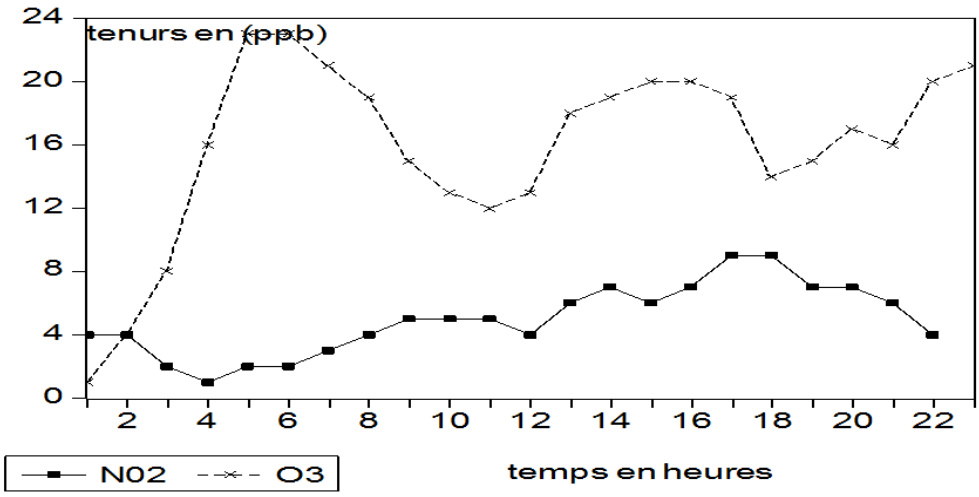
Figure 2.14-Evolution de l'ozone (11/01/2009)



Source : Elaboration de l'auteur sur la base des données horaires de l'ANPE (2009).

Si nous compilons l'évolution d'O_3 avec celle de NO_2, nous remarquons que la baisse des teneurs de l'O_3 coïncide avec les pics de NO_2. En effet, autour des heures de pointes, le piégeage chimique de l'O_3 en phase gazeuse sera favorisé par la réaction d'oxydation de NO en NO_2 (réaction n°1) ce qui entraine par conséquent une baisse de la concentration d'O_3 dans l'atmosphère. Les fortes amplitudes de concentrations d'O_3 se reproduisent juste quelques heures après l'insolation et surtout en fin d'après-midi.

Figure 2.15-Evolution alternée journalière de NO_2 et d'O_3 (11/01/2009)

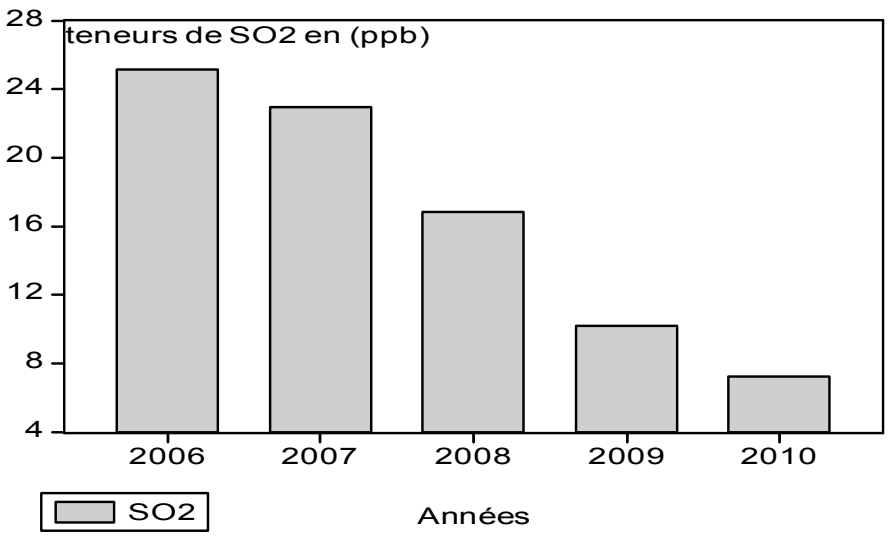


Source : Elaboration de l'auteur sur la base des données horaires de l'ANPE (2009).

- **L'évolution des teneurs de SO_2**

Le (SO_2) est émis suite à la combustion des fossiles contenant le souffre ainsi que les procédés industriels. Selon une étude effectuée par le Groupe Chimique Tunisien en 1995, la SIAPE participe à concurrence de 47. 2 % dans les émissions de SO_2 à partir de ses unités sulfuriques ainsi que le Triple Super Phosphate (TSP), de 2.5% dans les sources mobiles et de 50.3 % dans les autres sources fixes. Ammar. S (2010) a souligné également que les teneurs de SO_2 sont en diminution d'une année à une autre et que les dépassements qui ont été vécus surtout en 2006 sont dus à la forte émission de ce type de polluant par les sources fixes particulièrement la SIAPE.

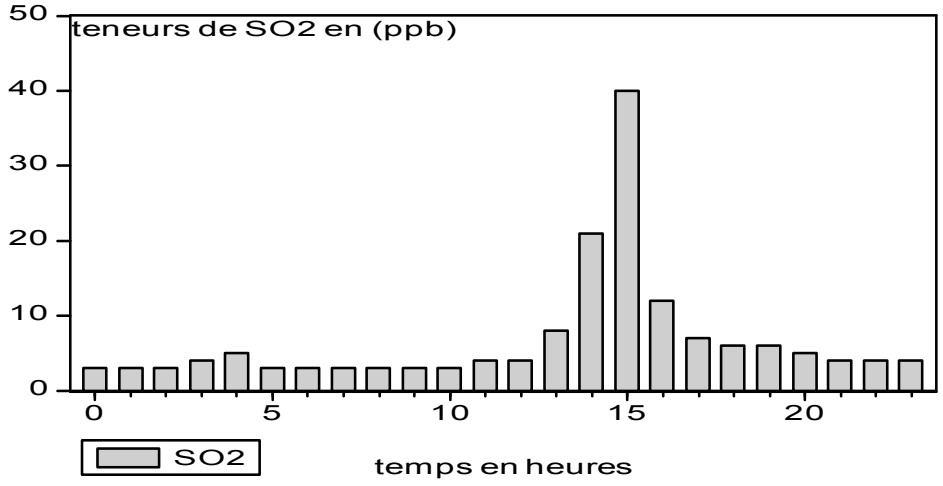
Figure 2.16- Variation des teneurs de SO_2 au fil des années



Source : Elaboration de l'auteur sur la base des données de l'ANPE (2006-2010).

De plus les facteurs météorologiques et particulièrement la direction du vent agissent intensivement sur le transport de SO_2 de la SIAPE vers le centre-ville. En se référant à la figure 2.17 ci-dessous, nous constatons que la hausse des teneurs du soufre est concentrée surtout entre 12h et 18h.

Figure 2.17- Evolution de la journée type de SO2

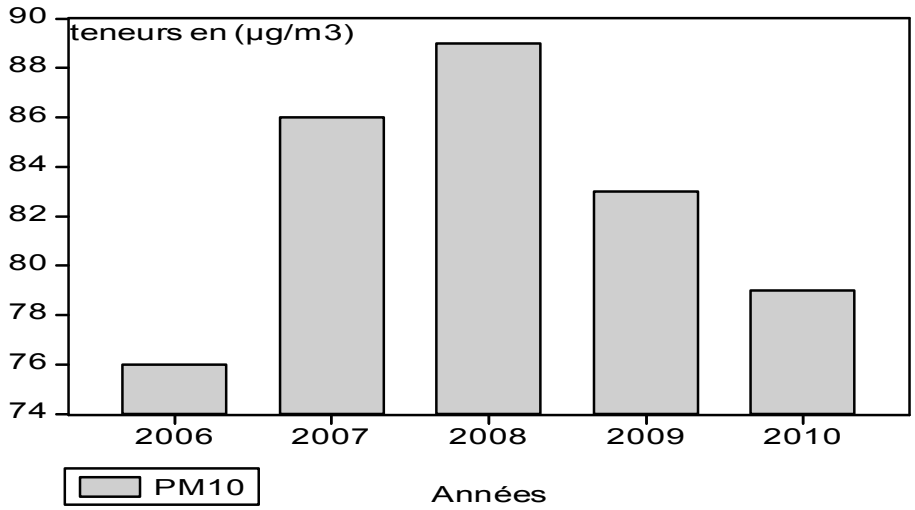


Source : Elaboration de l'auteur sur la base des données horaires de l'ANPE (2009).

- **Variations des PM_{10}**

En suivant l'évolution annuelle des PM_{10}, nous enregistrons une baisse de ses teneurs à partir de l'année 2008, ce qui concorde parfaitement avec l'arrêt de l'activité de la SIAPE qui était implantée au centre-ville et qui présentait une source fatale des émissions polluantes d'origine fixe.

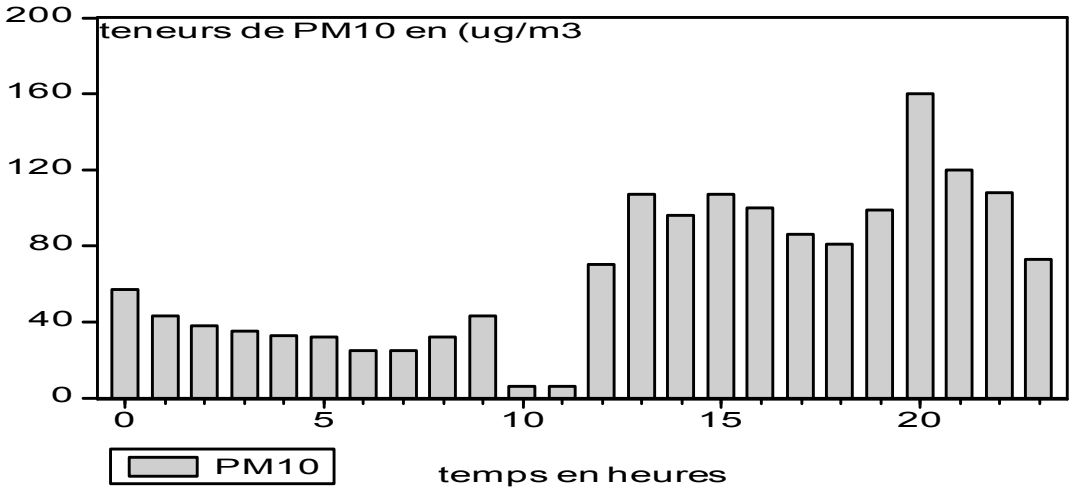
Figure 2.18- Evolution annuelle des PM_{10}



Source : Elaboration de l'auteur sur la base des données horaires de l'ANPE (2006-2010).

L'observation de la variation horaire des émissions de PM_{10} au cours de l'année 2009 fait constater que les PM_{10} ne suivent aucune allures parmi celles qui ont été détectées pour les autres polluants, cela justifie que ce type de polluant est émis à partir de plusieurs sources qui peuvent être soient fixes tels que les cimenteries, la sidérurgie et l'incinération d déchets ou mobiles subordonnées à la circulation automobile. En se référant à la Norme Tunisienne (NT 106.04 (1994)) qui présente les valeurs limites et valeurs guides Tunisiennes des polluants dans l'air ambiant fournie en Annexe 2.1, nous constatons qu'il n'y'a aucun dépassement au niveau des quatre polluants de notre analyse qui sont enregistrés à la station de Sfax Banlieue Sud pour la période [2006-2009].

Figure 2.19- Evolution au cours d'une journée des PM_{10}

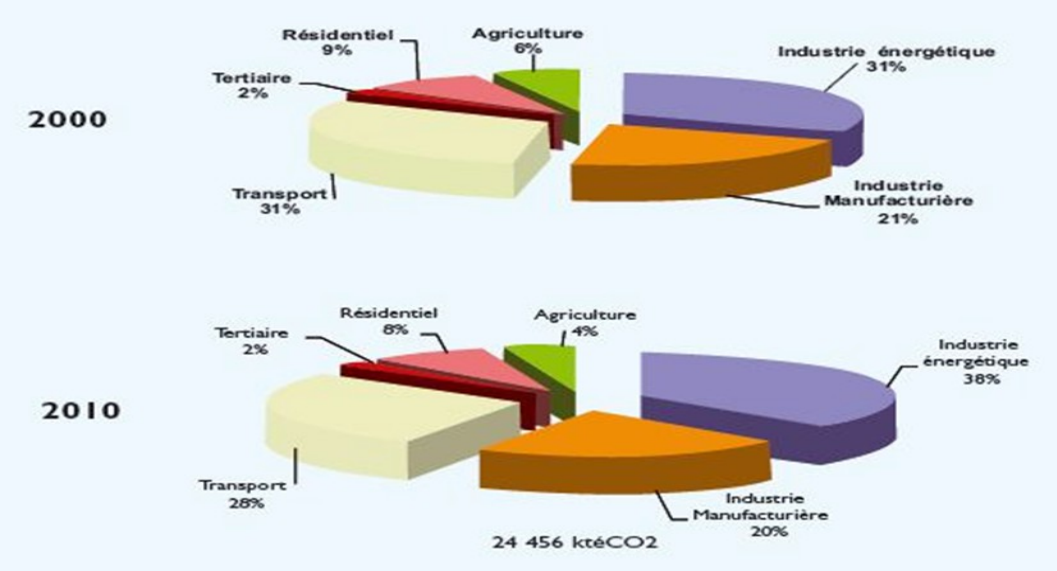


Source: Elaboration de l'auteur sur la base des données horaires de l'ANPE (2009).

2.2.5 L'électricité

Certainement, l'utilisation des combustibles fossiles particpent avec un haut niveau au dégagement des GES dans l'atmosphère et essentiellment le dioxyde de carbone (CO_2). La Tunisie comme étant un pays qui appartient au PSEM, se caractérise par l'importance du secteur de l'énergie dans les émissions de GES. L'industrie énergétique demeure la plus émettrice de GES suivie par l'industrie manufacturière et son poids dans la pollution de l'air augmente au cours du temps.

Figure 2.20- Emissions de GES dues à la combustion énergétique par secteur



Source : Chiffres clés 2011.

Le secteur électrique est considéré parmi les secteurs énergétiques les plus émetteurs de GES et surtout le CO_2 qui est en hausse continue. Ce phénomène est fortement relié à la fonction de la production de l'électricité à partir des combustibles fossiles essentiellement le pétrole, qui est en diminution au profit du gaz naturel et le charbon qui est intensivement polluant. Ce dernier occupe toujours des proportions élevées dans le processus de production de l'électricité afin de satisfaire une demande en forte de croissance. L'indicateur choisi dans cette analyse est la (CE) Mt destinée au secteur industriel manufacturier.

2.3 Méthodologie et validation empirique

Au niveau de ce chapitre, nous étudions l'impact de la consommation d'énergie sur la variabilité de la qualité de l'environnement. Nous utilisons la (CE) comme un proxy de la consommation de l'énergie et les polluants atmosphériques étudiés séparément à savoir le NO_2, l'O_3, le SO_2 et les PM_{10}comme des indicateurs de la dégradation de la qualité de l'environnement. Nous analysons également l'influence des facteurs météorologiques exprimés par la température (T) et l'humidité relative (HR) sur la dispersion des polluants et leur concentration dans l'atmosphère. Nous allons essayer de procéder dans une seconde démarche à l'analyse en composante principale (ACP) afin de constituer un indicateur synthétique, à partir des quatre polluants déjà cités, qui exprime la pollution atmosphérique. Les variables du modèle économétrique étudié sont exprimées en données mensuelles. Le but de l'emploi de ces deux stratégies dans l'analyse de l'impact de la consommation de l'énergie sur la dégradation de la qualité de l'environnement à Sfax est de contourner d'une part, le comportement élémentaire de chaque polluant agissant seul et d'autre part visualiser l'effet global ou synthétique des différents polluants agissant ensemble afin d'interpréter les résultats et visualiser les disparités dans les comportements.

2.3.1 Test de racine unitaire

La première étape dans l'analyse économétrique et qui est commune pour les deux stratégies proposées est l'étude de la stationnarité des variables constituant notre modèle économétrique afin de détecter la présence de racines unitaires et déterminer l'ordre d'intégration de chaque série temporelle[68].

Tableau 2.6-Test d'ADF

Les variables	Test d'ADF en niveau			Test d'ADF en première différence			résultat
	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	
CE		-3.86***					I(0)
NO_2	-4.01***					-4.46***	I(1)
O3	-4.02***					-4.83***	I(1)
SO_2	-4.23***						I(0)

68 La démarche ainsi que les caractéristiques de ce test ont été bien analysées au niveau du premier chapitre.

PM_{10}		-5.05***				-7.33***	I(1)
HR		-5.26***				-7.96***	I(1)
T		-7.24***				-7.99	I(1)

Tableau 2.7-Test de PP

Les variables	Test de PP en niveau			Test de PP en première différence			résultat
	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	
CE		-3.98***					I(0)
NO_2	-2.02***					-4.50***	I(1)
O3			-0.82***			-4.56***	I(1)
SO_2	-4.27***						I(0)
PM_{10}		-4.81***					I(0)
HR		-5.22***					I(0)
T		-3.28***				-3.36***	I(1)

*,** et *** dénotent la significativité au seuil de 10% , 5% et 1% respectivement.

Nous nous basons sur le test de PP (1988) et nous constatons que les variables du modèle étudié ne sont pas issues du même ordre d'intégration, d'où nous procédons à la procédure de cointégration ARDL de Pesaran et al (2001).

2.3.2 Représentation du modèle

Le modèle représentatif de la procédure ARDL est annoncé comme suit :

$$\Delta Y_t = \beta 0 + \sum_{i=1}^{n} \Delta\beta_1 X_{t-i} + \sum_{i=1}^{n} \beta_2 X_{t-1} + \mu t \quad (1)$$

Avec Y_t représente les polluants à savoir (NO_2, O_3, SO_2, PM_{10}), les X_{t-i} renferment les variables explicatives en différence retardées de ''n'' retards à savoir CE ainsi que les facteurs météorologiques HR et T et X_{t-1} envisagent les mêmes variables explicatives en niveau retardées d'une période. Le coefficient β_1 permet de saisir les effets de court terme tandis que le coefficient β_2 permet de concevoir les effets de long terme. Nous allons tester à chaque fois la relation de cointégration entre chacun de ces polluants, qui sont des indicateurs de la pollution atmosphérique et en conséquence de la dégradation de la qualité de l'environnement et la CE en insistant par la même occasion sur l'influence de l'HR et de la T.

2.3.3Le test de Wald

La seconde étape est l'application du test de Wald qui est un test paramétrique économétrique utilisé pour tester la vraie valeur du paramètre basé sur l'estimation de l'échantillon. Ce test permet de tester l'hypothèse nulle selon laquelle les coefficients des variables retardées en niveau sont nuls. L'hypothèse nulle (H_0) de non cointégration dans l'équation (1) stipule que H0 : $\beta_{21}= \beta_{22}= \beta_{23}= \beta_{24}=\beta_{25}=\beta_{26}=\beta_{27}= \beta_{28}=0$contre l'hypothèse alternative H1 :$\beta_{21}\neq\beta_{22}\neq\beta_{23}\neq \beta_{24}\neq\beta_{25}\neq\beta_{26} \neq\beta_{27}\neq\beta_{28}\neq 0$. Les résultats du test de Wald sont représentés dans le tableau 2.8 ci-dessous.

Tableau 2.8

Les variables	NO_2		O3		SO_2		PM_{10}	
La statistique du test	Valeur	probabilité	Valeur	probabilité	Valeur	probabilité	Valeur	probabilité
F-statistique	2.042	0.139	2.579	0.050*	3.920	0.010**	8.388	0.000***

-Nous remarquons que la probabilité 'p' dans le cas où NO_2 est la valeur endogène est supérieure à la valeur statistique au seuil de significativité 10%, d'où nous ne rejetons pas (H_0), donc il n'existe pas des relations de long terme entre les différentes variables du modèle et dans ce cas nous allons nous contenter d'étudier le test de causalité de Granger classique pour déterminer les causalités de court terme uniquement.

-Dans le cas où O_3 est la variable expliquée, le p-value est inférieur à la valeur critique au seuil de 10%, d'où il existe des effets de long terme et nous pouvons appliquer le test des valeurs limites de la procédure de cointégration ARDL.

- Nous constatons que dans le cas où SO_2 est la variable endogène, nous rejetons l'H_O selon laquelle les coefficients sont nuls, d'où nous pouvons appliquer les démarches de la technique ARDL.

- Dans le cas où PM_{10} est la valeur endogène, la probabilité (p) est inférieure à la valeur critique au seuil de 1%, donc nous rejetons H_0 et les coefficients des variables estimées sont non nuls d'où nous passons à l'application du test des valeurs limites d'ARDL.

2.3.4 Le test des valeurs limites d'ARDL

La logique du test des valeurs limites ARDL[69] est comme suit : si la valeur statistique calculée est supérieure à la borne supérieure, l'hypothèse H_0 est rejetée et la présence d'une relation de cointégration à long terme est confirmée. Toutefois, si la valeur statistique calculée est inférieure à la borne inférieure du test ARDL, l'hypothèse H_0 est validée d'où l'absence d'une relation de cointégration à long terme. Cependant si la valeur statistique calculée est comprise entre les deux bornes du test, dans ce cas le test de cointégration sera non significatif. Nous nous référons aux valeurs critiques asymptotiques énoncées par Narayan.P.K (2005). Les résultats du test ARDL sont rapportés dans les tableaux 2.9, 2.10 et 2.11 ci-dessous.

Tableau 2.9- Cas où O 3 est la variable endogène.

Variable avec constante et sans tendance	Nombre de retard optimal	F-statistique	probabilité	résultat
O_3 est la variable endogène	3	2.579*	0.050 (10%)	Abscence de cointégration

Les valeurs critiques asymptotiques	1%		5%		10%	
	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)
55	4.828	6.195	3.408	4.623	2.843	3.920
60	4.748	6.188	3.415	4.615	2.838	3.923

69 Les étapes de ce test ont été bien expliquées au chapitre premier.

*,** et *** dénotent la significativité au seuil de 10% , 5% et 1% respectivement.

Le nombre d'observations est 57, compris entre 55 et 60 selon le tableau des valeurs critiques asymptotiques de Narayan. P.K (2005) p. 1988.

Nous constatons que la valeur statistique calculée est inférieure à la borne inférieure au seuil de 10%, d'où l'absence d'une relation de cointégration à long terme. Dans ce qui suit, nous nous intéressons uniquement aux effets de court terme.

Tableau 2.10- Cas où SO_2 est la variable endogène

Variable avec constante et sans tendance	Nombre de retard optimal	F-statistique	probabilité	résultat
SO_2 est la variable endogène	6	3.920**	0.010 (5 %)	Test non interprétable

Les valeurs critiques asymptotiques	1%		5%		10%	
	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)
50	3.656	5.331	2.726	4.057	2.309	3.507
55	3.636	5.169	2.676	3.999	2.270	3.486

*,** et *** dénotent la significativité au seuil de 10% , 5% et 1% respectivement. Le nombre d'observations est 54, compris entre 50 et 55 selon le tableau des valeurs critiques asymptotiques de Narayan. PK (2005) p. 1988.

Nous remarquons que la valeur statistique est comprise entre les deux bornes inférieures et supérieures, donc nous ne pouvons pas interpréter le test des valeurs limites d'ARDL. Nous allons comme même estimer les variables et effectuer le test de causalité de Granger pour soulever les liens de causalité à court terme.

Tableau 2.11- Cas où PM $_{10}$ est la variable endogène

Variable avec constante et sans tendance	Nombre de retard optimal	F-statistique	probabilité	résultat
PM_{10} est la variable endogène	2	8.388***	0.000 (1 %)	Test non interprétable

Les valeurs critiques asymptotiques	1%		5%		10%	
	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)
55	7.435	8.460	5.125	6.045	4.155	4.925
60	7.400	8.510	5.125	6.000	4.145	4.950

*,** et *** dénotent la significativité au seuil de 10% , 5% et 1% respectivement. Le nombre d'observations est 59, compris entre 55 et 60 selon le tableau des valeurs critiques asymptotiques de Narayan. PK (2005) p. 1988.

La valeur statistique est comprise entre les deux bornes limites au niveau de 1%, d'où le test des valeurs limites de la procédure ARDL est non interprétable à ce niveau. Nous allons nous limiter dans ce qui suit à étudier les effets de court selon le test de causalité de Granger (1969).

2.3.5La spécification du modèle

Les tableaux 2.12, 2.13, 2.14 et 2.15 ci-dessous récapitulent les estimations effectuées pour chaque cas en relevant les coefficients ainsi que les probabilités relatifs à toutes les variables en niveau et en différence retardées et selon le nombre de retards jugé adéquat.

Tableau 2.12-NO_2 est la variable endogène

les variables	les coefficients	les coefficients normalisés	la probabilité
NO_2 (-1)	-0,40657	-1	0,0253**
CE (-1)	-45,1929	-111,1565044	0,0908
HR (-1)	-11,18756	-27,51693435	0,0236
T (-1)	18,03507	44,35907716	0,1175
C	717,8258	1765,565093	0,0972*
d CE (-1)	38,88564	95,64316108	0,0801*
d HR (-1)	9,430852	23,19613351	0,0364**
dT (-1)	-11,2556	-27,68428561	0,2573
d CE (-2)	33,6996	82,88757164	0,1305
d HR (-2)	7,595173	18,68109551	0,0592*
dT (-2)	-11,51057	-28,31141009	0,207

d CE (-3)	25,69733	63,20517992	0,1454
d HR (-3)	5,400178	13,28228349	0,107
d T (-3)	-12,21497	-30,04395307	0,1419
d CE (-4)	23,48758	57,77007649	0,195
d HR (-4)	3,971105	9,767334038	0,1541
d T (-4)	-11,79385	-29,00816588	0,098*
d CE (-5)	21,5149	52,91807069	0,2083
d HR (-5)	3,908674	9,613778685	0,0988*
d T (-5)	-6,942054	-17,07468333	0,2745
d CE (-6)	21,0789	51,84568463	0,1366
d HR (-6)	4,008588	9,859527265	0,0403**
d T (-6)	-4,055556	-9,975049807	0,4516
d CE (-7)	23,69113	58,27072829	0,0373**
d HR (-7)	4,440545	10,92196916	0,0107**
d T (-7)	-6,123038	-15,06023071	0,2013
d CE (-8)	16,94369	41,67471776	0,1146
d HR (-8)	3,713792	9,134446713	0,0073***
d T (-8)	-4,504071	-11,07821777	0,3304
d CE (-9)	12,77647	31,42501906	0,1951
d HR (-9)	2,652798	6,524824753	0,0128**
d T (-9)	0,260786	0,64142952	0,9282
d CE (-10)	5,681468	13,97414467	0,4871
d HR (-10)	1,290569	3,174284871	0,0588*
d T (-10)	1,504327	3,700044273	0,5476

R^2=91.09%

Nous constatons qu'à court terme, la CE exerce un effet positif persévérant sur les émissions de NO_2 qui peut s'étaler jusqu'au septième mois. Ce résultat s'aligne parfaitement avec l'origine de NO_2 qui provient à concurrence de 40% des installations de combustion énergétique. L'HR quant à elle à un impact positif sur les quantités de NO_2 dégagées qui demeure significatif même après dix mois expliquant ainsi son accumulation et son effet exacerbant sur la pollution de l'air. Par ailleurs, la T affecte le NO_2 et en conséquence la pollution atmosphérique mais négativement, cela peut s'expliquer par le fait que lorsque la température baisse en hiver, elle entraine la formation d'une couche d'inversion thermique provoquant l'accumulation des polluants et la dégradation de la qualité de l'air.

Tableau 2.13-Cas où O_3 est la variable endogène

Les variables	Les coeffecients	Les coeffecients normalisés	La probabilité
O_3 (-1)	-0,108968	-1	0,0459**
CE (-1)	-0,199164	-1,827729242	0,8938
HR (-1)	0,309674	2,841880185	0,0718
T (-1)	-0,68451	-6,281752441	0,0866

d CE (-1)	0,264149	2,424096983	0,8853
d HR (-1)	-0,299155	-2,745347258	0,1139
d T (-1)	-0,005202	-0,047738786	0,9911
d CE (-2)	0,704034	6,460924308	0,6991
d HR (-2)	-0,215435	-1,977048308	0,196
d T (-2)	1,07779	9,890885398	0,0888*
d CE (-3)	0,97062	8,907385655	0,5578
d HR (-3)	-0,042801	-0,392785038	0,7823
d T (-3)	0,311714	2,860601277	0,6462

R^2=38.57%

Nous remarquons que seule la T exerce un effet positif et significatif sur les émissions de l'ozone. Une augmentation de 1°C du gradient vertical de la température entraine l'augmentation de 9.89ppb les émissions de l'ozone. Cela trouve son explication par le fait que l'ozone est un polluant secondaire issu de la transformation photochimique de l'oxygène au contact avec certains polluants primaires dans l'atmosphère en particulier les oxydes d'azotes (NOx) et les composés organiques volatiles (COV) sous l'effet des rayonnements ultraviolets. Pereira. E.M et Sanford. T (2011) ont indiqué qu'un fort rayonnement solaire et des températures élevées suscitent une chaine de réactions chimiques complexes entrainant la formation de l'ozone par décomposition de NO_2. L'ozone réagit ensuite avec le monoxyde d'azote pour former à nouveau le NO_2.

Tableau 2.14- SO_2 est la variable endogène

les variables	les coeffecients	les coeffecients normalisés	la probabilité
SO_2 (-1)	-0,318336	-1	0,0166**
CE (-1)	-5,069529	-15,92508859	0,1248
HR (-1)	-0,054927	-0,172544104	0,8945
T (-1)	2,526543	7,936717808	0,1229
d CE (-1)	13,4429	42,22865149	0,0026***
d HR (-1)	0,460163	1,445526111	0,2914
d T (-1)	-0,89974	-2,8263847	0,5066
d CE (-2)	7,230197	22,71247047	0,0803*
d HR (-2)	0,354499	1,113600095	0,4292
d T (-2)	0,282622	0,887810364	0,8418
d CE (-3)	4,564117	14,33742021	0,2233
d HR (-3)	0,236704	0,743566546	0,5933
d T (-3)	-1,706175	-5,359667144	0,2286
d CE (-4)	-0,609272	-1,913927423	0,8663
d HR (-4)	0,153411	0,481915335	0,6967
d T (-4)	-3,153105	-9,904958911	0,0206**
d CE (-5)	9,146107	28,7309855	0,0087***

d HR (-5)	0,414698	1,302705318	0,2167
d T (-5)	-0,584992	-1,83765581	0,6437
d CE (-6)	9,395562	29,51460721	0,0071***
d HR (-6)	0,325089	1,021213435	0,261
d T (-6)	-0,242253	-0,760997814	0,8588

R^2=61.68%

Nous remarquons que la CE exerce un effet positif et significatif sur les émissions de SO_2, cela s'explique essentiellement par l'activité de combustion des énergies fossiles (le charbon, le fuel et le gazole) engagée au cours de l'activité de production de l'électricité par les centrales électriques ou de vapeur et qui dégage le SO_2, de plus ce polluant gazeux est rejeté quotidiennement par les installations de chauffage domestique. L'effet de la CE sur les SO_2 est déclenché à partir d'une consommation énergétique qui date depuis six mois, cela renvoie à l'impact persévérant de la CE sur la dégradation de la qualité de l'environnement qui s'accumule et ne se dégage pas facilement. La T influence également négativement les quantités de SO_2 émises, qui s'explique par le fait que la formation des couches d'inversions thermiques due à une baisse brutale du gradient vertical de la température favorisent la concentration de la pollution et empêchent sa dispersion.

Tableau 2.15- PM_{10} est la variable expliquée

Les variables	Les coeffecients	Les coeffecients normalisés	La probabilité
PM_{10} (-1)	-0,638794	-1	0.000***
CE (-1)	-5,302863	-8,301366325	0,1016
HR (-1)	-0,610809	-0,956190885	0,088
T (-1)	0,345493	0,54085198	0,3098
C	129,0664	202,0469823	0,0018
d CE (-1)	6,927915	10,84530381	0,0146**
d HR (-1)	0,128666	0,201420176	0,6492
d T (-1)	-1,018588	-1,594548477	0,0484**

R^2= 43.15 %

Suite à l'estimation de la relation entre les PM_{10} et les variables explicatives représentées dans le modèle étudié, nous constatons que la CE exerce un effet positif et significatif sur les quantités de particules en suspension émises dans l'atmosphère. Selon l'Institut Français de

l'environnement (2006), le secteur résidentiel et particulièrement la consommation domestique est à l'origine en 2004 de 20% des PM_{10} émises au niveau national du pays. Declercq. C et Prouvost. H (2007) ont souligné que les PM_{10} d'origine anthropique sont essentiellement dégagées par la combustion des combustibles fossiles, la circulation des véhicules, les activités industrielles des sidérurgies, des cimenteries et des fonderies ainsi que l'incinération de déchets. La T impacte à son tour négativement les PM_{10}, réellement, la baisse de la température et les anticyclones sont à l'origine de la stabilité de l'atmosphère, qui devient défavorable à la bonne dispersion des polluants et en conséquence amplifie la concentration des polluants autour de leur source d'émission.

2.3.6Le test de causalité de Granger (1969)

Nous nous intéressons à ce niveau à l'effet de causalité à court terme entre les variables expliquées (NO_2, O_3, SO_2, PM_{10}) et les variables explicatives représentées par la (CE) et les facteurs météorologiques. L'hypothèse nulle du test de causalité de Granger est fondée sur l'absence d'une causalité. Les résultats du test de causalité de Granger sont présentés dans les tableaux 2.16, 2.17, 2.18 et 2.19.

Tableau 2.16- cas où NO_2 est la variable endogène

Les variables	F-statistique	Probabilité
d T ⟶ d NO_2	1.985	0.089*
d HR ⟶ d CE	2.219	0.060*
d T ⟶ d CE	2.148	0.068*
d CE ⟶ d T	2.358	0.047**

Nous avons introduit toutes les variables différenciées afin de mettre l'accent sur les effets de causalités à court terme uniquement. A travers ce test, la causalité unidirectionnelle partant de la T vers les émissions de NO_2 est confirmée. L'HR cause également la CE, cela peut s'expliquer par le fait qu'un taux d'humidité trop faible (inférieur à 30%) amplifie la sensation de froid et stimule l'utilisation du chauffage, toutefois, un taux d'humidité trop élevé (supérieur à 50%) limite le refroidissement et donc développe la sensation de chaleur qui incite à l'usage de la climatisation. Dans tous les cas de figures, l'HR influence la

consommation de l'énergie et de l'électricité particulièrement. Une causalité bidirectionnelle a été soulevée entre la T et la CE, cette constatation confirme la forte liaison entre les variations de la température et la consommation de l'énergie, qui est adoptée à chaque fois pour faire fonctionner les machines et les procédés industriels dans des conditions favorables ainsi qu'atténuer la sensation de froid ou de la chaleur. De plus, nos modes quotidiens de consommation de l'énergie transforment une grande partie de l'énergie électrique en chaleur par effet de Joule qui est en réalité la manifestation thermique de la résistance électrique.

Tableau 2.17-cas où O_3 est la variable endogène

Les variables	F-statistique	Probabilité
d T ⟶ d O_3	4.234	0.009***
d O_3 ⟶ d T	2.974	0.040**
d T ⟶ d CE	3.088	0.035**

Nous constatons la présence d'une causalité bidirectionnelle entre la T et l'O_3 ainsi qu'une causalité unidirectionnelle partant de la T vers la CE. L'apport de ce test est que l'O_3 exerce un effet à court terme à son tour sur la variation de la T. En effet, l'ozone troposphérique contribue à l'effet de serre et aux pluies acides. Selon le rapport de la GIEC (2007), il s'agit d'un GES, susceptible de bloquer une partie du rayonnement tellurique et de le renvoyer vers la terre, actuellement, la part relative de l'ozone dans l'effet de serre additionnel est estimée être comprise entre 10 et 20%, de plus, il est jugé être responsable du gradient positif de la température observé dans la stratosphère entre environ 12 km à nos latitudes et 50 km. En absorbant le rayonnement solaire, l'ozone se photodissocie en dioxygène (O_2) et en oxygène atomique O. La réaction de recombinaison d'O_2 et de l'O, très rapide dans la stratosphère reforme l'ozone et libère de l'énergie dans l'atmosphère. Ce cycle photodissociation-recombinaison conduit donc à la transformation d'énergie radiative en énergie cinétique et provoque donc un réchauffement du gaz atmosphérique.

Tableau 2.18- cas où SO_2 est la variable endogène

Les variables	F-statistique	Probabilité
d CE ⟶ d SO_2	2.315	0.051*
d HR ⟶ d CE	2.452	0.060*
d T ⟶ d CE	2.148	0.068*
d CE ⟶ d T	2.358	0.047**

Nous remarquons une causalité unidirectionnelle partant de la CE vers les émissions de SO_2 ainsi qu'une causalité bidirectionnelle entre la T et la CE[70]. L'HR cause à son tour la CE[71].

Tableau 2.19- cas où PM_{10} est la variable endogène

Les variables	F-statistique	Probabilité
d PM_{10} ⟶ d T	2.787	0.022*
d PM_{10} ⟶ d HR	3.403	0.008***
d T ⟶ d CE	2.148	0.068*
d CE ⟶ d T	2.358	0.047**
d HR ⟶ d CE	2.219	0.060*

Les PM_{10} causent la T et l'HR, ce constat trouve son explication par le fait que la distribution des particules et des poussières affecte directement l'absorption et la transmission des rayonnements solaires et donc altère l'équilibre énergétique de l'ensemble de la terre. Selon le centre national d'études spatiales (2012), dans la basse troposphère, la composition atmosphérique change du fait d'une augmentation des émissions anthropiques dont les PM_{10} font partie. L'HR cause à son tour la CE et une relation de causalité bidirectionnelle est relevée entre la CE et la T[72].

2.3.7 L'analyse en composantes principales (ACP)

L'ACP est une méthode d'analyse de données qui cherche à synthétiser l'information contenue dans plusieurs variables en établissant des liaisons entre elles.

Le but de l'emploi de cette méthode de calcul est de constituer un indicateur synthétique qui représente la pollution de l'air à partir des quatre polluants disposés (NO_2, O_3, SO_2 et PM_{10}) afin d'étudier comment réagir cet indice face à la CE et aux facteurs météorologiques.

70 La relation de causalité bidirectionnelle entre la T et la CE a été bien analysée au niveau de l'interprétation relative au tableau 2.16.

71 La relation de causalité partant de l'HR vers la CE a été analysée au niveau du tableau 2.16 ci-dessus.

72 Les deux dernières relations de causalités ont été bien expliquées au niveau des interprétations relatives aux tableaux 2.16 et 2.18.

La démarche de cette procédure statistique est de visualiser en premier lieu les différentes composantes de combinaison possibles qui font expliquer chaque variable selon une proportion bien déterminée, la seconde étape est de choisir la combinaison la plus adéquate qui explique le mieux les interrelations entre les variables constituant l'indice composite et la dernière étape est de procéder au test de de Kaiser-Meyer-Oklin (KMO) afin de vérifier l'adéquation de cet indicateur et la possibilité de l'exploiter et de l'analyser.

Tableau 2.20- récapitulatif des valeurs propres

Nombre	Valeur	Différence	Proportion	Valeur	Proportion
1	1.708851	0.601054	0.4272	1.708851	0.4272
2	1.107797	0.337753	0.2769	2.816648	0.7042
3	0.770044	0.356736	0.1925	3.586692	0.8967
4	0.413308	---	0.1033	4.000000	1.0000

Nous constatons à partir du tableau 2.20 ci-dessus que la première composante offre la meilleure combinaison (soit 0.427) dans la mesure où elle explique le plus les variables constituant notre indicateur synthétique futur.

Tableau 2.21- Les vecteurs propres

Variable	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
NO_2	-0.494365	0.061743	0.865808	-0.046555
O_3	0.624997	-0.179315	0.404242	0.643283
PM_{10}	-0.087431	0.908869	-0.093390	0.396978
SO_2	0.597777	0.371472	0.279720	-0.653014

Le tableau 2.21 ci-dessus, représente la proportion relative de chaque polluant dans l'indice synthétique de la pollution de l'air. Nous nous intéressons uniquement à la (PC 1) choisie.

Tableau 2.22- Les corrélations ordinaires

Les corrélations ordinaires				
	NO_2	O_3	PM_{10}	SO_2
NO_2	1.000000			
O_3	-0.283126	1.000000		
PM_{10}	0.066124	-0.197444	1.000000	
SO_2	-0.280535	0.478104	0.157444	1.000000

En phase finale, nous procédons à effectuer le test de (KMO) qui traduit l'inter-corrélation entre les variables et en conséquence la performance de l'usage de l'ACP. La mesure de ce test pour qu'elle soit acceptable, il faut qu'elle soit supérieure à 0.60 or la valeur trouvée dans notre cas est 0.49, d'où l'ACP et en conséquence la constitution d'un indicateur composite à partir de ces quatre polluants est déconseillée dans notre cas d'étude.

Conclusion

En analysant l'impact de la consommation de l'énergie sur la dégradation de la qualité de l'environnement à Sfax, nous soulevons que la CE cause les quantités émises de $PM_{10,}$ de SO_2 et de NO_2. Ces GES proviennent essentiellement du trafic routier, des activités industrielles, des sidérurgies, des fonderies et des cimenteries et surtout de la combustion des énergies non renouvelables engagées pour la production de l'électricité à Sfax. Bien que la STEG soit basée dans sa production de l'électricité sur le gaz naturel essentiellement, les émissions des GES dus à l'activité de combustion des énergies fossiles représentent selon l'agence nationale de maitrise de l'énergie (ANME) 86% en 2010. Ce constat doit inciter la STEG, qui domine le secteur de la production de l'électricité à concurrence de 73%[73], à varier son bouquet énergétique et à promouvoir les énergies renouvelables davantage dans sa stratégie de production. Malgré que la STEG essaye d'adhérer les énergies renouvelables de plus en plus dans ses mécanismes de production, la proportion attribuée à ces énergies demeure toujours faible soit 3.4 % en 2010 bien qu'elle a quadruplé pendant cette dernière décennie.

Nous constatons également que la CE n'impacte pas l'ozone vu que ce dernier est considéré comme un polluant secondaire issue d'une chaine de réactions chimiques complexes sous l'effet des rayonnements solaires ultra-violets. Les facteurs météorologiques jouent un rôle important dans la dispersion des polluants ou bien dans leur concentration auprès de leurs sources d'émissions, de même la CE et la T sont fortement corrélées et expliquent le comportement des ménages et des industriels qui s'accommodent à chaque fois de l'énergie pour faire fonctionner les procédés industriels et machines ou bien surmonter un état défavorable de climat.

73
Rapport chiffres clés 2011.

A la lumière de ces travaux, nous avons pu répondre à notre question de recherche et constater que la consommation de l'énergie agit négativement sur la qualité de l'environnement et qu'elle est responsable de l'émission de certains polluants dans l'air considérés comme des GES. Dans ce qui suit et au niveau du troisième chapitre, nous essayons de voir jusqu'à quel degré l'être humain, qui est fortement dépendant de son milieu de vie, sera touché par ce phénomène environnemental qui se manifeste particulièrement au niveau de son état d'hygiène et de sa santé.

CHAPITRE 3 : IMPACT SANITAIRE DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE : LE CAS DE LA REGION DE SFAX

J'ai élaboré un papier à partir de ce chapitre avec ma collègue ELKADHI Hayfa intitulé

- The short term effects of air pollution on health in Sfax (Tunisia) : an ARDL cointegration procedure

On a eu the gold award of the best student paper in "international conference and utility exhibition 2014 on green energy for sustainable development"

Ce papier est publié également in the IEEE Xplorehttp://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6828950&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxpls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6828950

Chapitre 3

Impact sanitaire de la pollution atmosphérique : le cas de la région de Sfax

« Si tu es malade, recherche d'abord ce que tu as fait pour le devenir »

Hippocrate

Introduction

Les troubles sanitaires des dernières années ont explicitement mis en évidence les relations étroites entre l'homme et son environnement ainsi que les conséquences parfois dramatiques d'une mauvaise évaluation des dangers et des risques sanitaires. Il est certain que la qualité de l'environnement est l'un des principaux déterminants qui agit directement ou indirectement sur l'état de santé des populations. Cette relation de cause à effet entre l'environnement et la santé est devenue une préoccupation majeure. La dégradation de l'environnement et des écosystèmes suite aux différentes formes de pollution d'origine anthropique (pollution de l'air, du sol, de l'eau des aliments) ou naturelle (volcans, séismes, effet de serre….) est à l'origine de l'émergence progressive de la notion de la santé environnementale. Selon l'organisation mondiale de la santé (OMS) en 1994 « la santé environnementale comprend les aspects de la santé humaine, y compris la qualité de la vie, qui sont déterminés par les facteurs physiques, chimiques, biologiques, sociaux, psychosociaux et esthétiques de notre environnement. Elle concerne également la politique et les pratiques de gestion, de résorption, de contrôle et de prévention des facteurs environnementaux susceptibles d'affecter la santé des générations actuelles et futures ». La santé environnementale étudie le lien indissociable entre la biosphère et la dégradation sanitaire des populations humaines. Il s'agit d'un concept multidimensionnel touchant plusieurs domaines qui interagissent les uns avec les autres. La santé environnementale est un pilier de la santé publique, elle-même considérée comme étant un champ d'action vers lequel convergent plusieurs disciplines. Nous nous intéressons au niveau de ce chapitre à analyser les interdépendances ainsi que les relations de cause à effet entre la pollution atmosphérique constituée par la présence de certains polluants qui, eux

même réagissent avec les facteurs météorologiques et l'impact sanitaire de cette nuisance sur la population concernée en se situant dans le cadre de la santé environnementale.

Au cours de cette étude il s'avère important : de situer le concept de la santé environnementale dans le champ d'action de la santé publique, de l'épidémiologie et de la toxicologie, de considérer les dangers environnementaux qui sont corrélés à la pollution atmosphérique et qui agissent sur la santé des populations et finalement enchainer les difficultés méthodologiques qui caractérisent la démarche d'évaluation du risque sanitaire.

Au niveau de l'analyse empirique, nous essayons d'évaluer l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique dans le cas du gouvernorat de Sfax.

1- Volet théorique

1.1 Vue d'ensemble sur la pollution atmosphérique

La pollution de l'air constitue sans aucun doute la plus évidente des dégradations de l'environnement. Selon Friket. M (1931), les premières alertes de la pollution atmosphérique ont été survenues à la vallée de la Meuse en Belgique. Toutefois, la vraie prise de conscience de la pollution de l'air est envisagée au cours des années cinquante suite aux épisodes dramatiques de pollution survenues à Londres en hiver 1952 qui ont causé la mort de quatre mille personnes en deux semaines. Cet évènement a incité le Gouvernement Britannique à adopter le « Clean Air Act » qui s'est diffusé progressivement aux autres pays vers 1960. A cet époque- là, la pollution atmosphérique a été perçue comme un phénomène local due aux installations industrielles, dont les conséquences sont peu importantes et ne touchent que les populations ainsi que les animaux et les végétaux vivant à l'entourage. En conséquence, les mesures de lutte ont été destinées vers les sources industrielles et de chauffage avec la mise en place des premiers réseaux de surveillance de la qualité de l'air à proximité de ces sources et l'adoption de réglementations relatives à la qualité de l'air. Entre 1970-1990, la circulation automobile a augmenté dans les pays industrialisés. En conséquence, la part des sources mobiles dans les émissions de polluants atmosphériques et surtout les particules fines a augmenté par rapport aux sources fixes. La pollution urbaine s'est transformée en une pollution photo-oxydante[74]. Cette même période a été caractérisée par la reconnaissance des

---

74 Cette pollution est due à l'action des rayons ultra-violets émis par le soleil sur des polluants primaires, des composés organiques volatiles (COV) et des oxydes d'azote, présents dans l'atmosphère.

effets acidifiants vis-à-vis de systèmes lacustres[75] au Canada et en Scandinavie puis forestiers en Europe centrale et occidentale à cause de « la pollution transfrontalière[76] ».

Quénel. P et al (2003) ont affirmé que la prise de conscience définitive des effets globaux de la pollution s'est produite au cours de la décennie 1980 suite au développement des enjeux planétaires liés à la consommation croissante de l'énergie. Cette période a été aussi marquée par l'expansion de l'épidémiologie qui a bien analysé les risques sanitaires liés à la pollution de l'air.

Aujourd'hui, l'OMS considère la pollution atmosphérique comme un problème majeur de santé environnementale qui affecte aussi bien les pays en voie de développement que les pays développées.

1.2 Aperçu historique de l'émergence graduelle de la notion de la ''santé environnementale''

Pour parler de la santé environnementale, il faut tout d'abord passer par tous les courants historiques qui ont façonné son existence ainsi que son progrès. Les avancées en santé environnementale ont été et seront le fruit des résultats conjoints de plusieurs disciplines dont les plus importantes sont la santé publique et précisément son mouvement hygiéniste, l'épidémiologie et l'écologie.

1.2.1Le mouvement hygiéniste de la santé publique

Il est généralement réputé que les origines de la santé publique reviennent au 18 ème siècle et à l'ère préindustrielle. Toutefois, l'origine de ce mouvement s'inspire de l'un des traités d'Hippocrate (médecin Grecque) publiés à peu près 500 ans avant J.C, dans lequel il a examiné la relation entre l'environnement et la santé. La santé publique est instituée du

---

75 Ce terme désigne les bords d'un lac.

76 La pollution transfrontière est la pollution qui commence en un pays mais qui est capable de causer des dommages dans l'environnement d'un autre pays, en croisant les frontières à travers les voies comme l'eau ou l'air.

croisement de quatre courants, deux parmi eux[77] qui, se rapportent à l'hygiène publique et personnelle, ont contribué à l'émergence du concept de la santé environnementale.

1.2.1.1 L'hygiène publique et l'environnement : le contrôle des maladies transmissibles

L'hygiène publique est le courant le plus ancien à travers lequel la santé publique s'est fréquemment identifiée. Depuis le moyen âge, la surveillance des pathologies contagieuses a sollicité l'intérêt public et international. La première conférence internationale à ce propos fut à Paris en 1851. Le bureau sanitaire panaméricain a essayé de limiter la transmission des épidémies en 1902. L'industrialisation dans les pays de l'occident et surtout dans la Grande Bretagne en premier lieu a mis en évidence l'incidence des conditions d'hygiène et de vie sur quelques épidémies telles que le choléra. Chadwick. E (1842) dans son travail ''report on the sanitary condition of the labouring population of Great Britain " a insisté sur les relations entre l'impureté de l'environnement et la dégradation de l'état de santé des employés même avant la naissance des théories de germes. Il a préservé des mesures d'hygiènes collectives (collecte des ordures, assainissement, dépendance à l'eau, règlement d'habitation…) qui sont toujours d'actualité. Pasteur en 1880 a donné naissance à la bactériologie, il a expliqué les mécanismes de transmission des maladies infectieuses et a exploré les vaccins. Actuellement le risque des maladies infectieuses est intensivement lié à l'environnement bien que cette interdépendance fait appel à plusieurs disciplines.

1.2.1.2 L'hygiène individuelle et éducation pour la santé

Ce courant n'a pas distingué entre les comportements qualifiés aujourd'hui de préventifs et de curatifs. Avec l'approfondissement des connaissances en biologie et en médecine et leur propagation au public, ce champ s'élargit pour inclure l'auto-traitement et les soins pratiqués au niveau familial. Au milieu du 20 ème siècle, le déclin des maladies infectieuses en Occident, l'accroissement des maladies chroniques et dégénératives[78], l'apparition des premiers résultats

---

77 Les deux autres piliers qui ont participé à la formation de la santé publique sont : premièrement, la médecine sociale et la protection des groupes vulnérables, deuxièmement, la croissance des systèmes de soins et le rôle accru de l'Etat.

78 Ce sont des maladies souvent génétiques dans lesquelles un ou plusieurs organes sont progressivement dégradés.

des études épidémiologiques ont mis l'accent sur le rôle de certaines attitudes telle que le tabagisme, la mauvaise alimentation, l'insuffisance de l'exercice physique dans leur survenue et ont attribué un avancement important à ce courant.

1.2.2 Le développement de l'épidémiologie

L'épidémiologie est parmi les disciplines qui ont participé de façon importante aux progrès des connaissances en santé environnementale. Elle examine la relation entre l'environnement et la santé à un niveau global. L'épidémiologie ne définit pas les mécanismes d'action des expositions sur l'organisme humain mais elle quantifie leur effet intégratif sur la survenue des pathologies ou plus généralement d'évènements de santé. Et c'est le concept de la boite noire de l'épidémiologie qui a été beaucoup négocié, certes ce phénomène a entrainé des limites mais en même temps des avantages puisqu' il a surmonté les difficultés quant à la connaissance des mécanismes biologiques fins et les a rendus non indispensables à l'évolution du savoir autour des effets de l'environnement sur l'homme. L'épidémiologie est considérée être proche des conditions réelles d'exposition mais a parfois du mal à séparer les effets d'expositions survenant de façon conjointe. Il s'agit d'une discipline récente qui a commencé à avoir le jour au 19 ème siècle particulièrement en Angleterre et en France et elle s'est véritablement développée au 20 ème siècle à l'aide des statisticiens et de la révolution informatique.

1.2.3Le courant écologiste

Parallèlement aux interactions conçues récemment entre la santé et l'environnement, un nouveau concept s'est émergé c'est celui de l'écologie. Cette dernière étudie toutes les interdépendances entre les organismes vivants, les flux d'énergie et les cycles biogéochimiques. Son champ d'analyse s'est continuellement agrandi pour englober depuis les années 1960, le déséquilibre apparu entre l'environnement naturel et les activités anthropiques qui se manifeste dans la pollution de l'environnement. L'approche écosystémique de la santé humaine est une nouvelle approche qui met l'être humain au cœur de la problématique du développement tout en considérant la durabilité de l'écosystème dont il fait partie. Elle examine les impacts des changements environnementaux sur la santé des êtres humains. Pour la majorité, la santé est l'absence de maladies. Toutefois, les spécialistes de la santé publique ont annoncé qu'il s'agit plutôt d'un processus dynamique de bien-être physique et mental (OMS, 1948). Forget. G et al (2003) ont indiqué que l'étude des interactions de la santé humaine avec le milieu naturel a été inspirée des épreuves vécues dans

le domaine biomédical et celui des maladies infectieuses où la théorie des germes de koch[79], qui a été méditée à la fin du 19 ème siècle, a été estimée comme le premier modèle écologique dans lequel les interactions entre un seul agent infectieux et son hôte sont influencées par les conditions environnementales. Les écologistes ont présenté une stratégie de gestion intégrée des ressources qui réunit les activités humaines et les spécificités biophysiques de l'écosystème afin de garantir son utilisation optimale.

1.3 Les dangers liés aux changements de la qualité de l'environnement

Le fait de respirer de l'air pur est supposé être une nécessité pour la santé et le bien-être de l'individu. Toutefois, la pollution de l'atmosphère ne cesse pas de menacer le domaine sanitaire dans toutes les régions du monde. Selon une évaluation élaborée par l'OMS en 2005, plus de 2 millions de décès prématurés peuvent chaque année être attribués aux effets de la pollution de l'air extérieur dans les villes et de l'air à l'intérieur des habitations à cause des combustibles solides. Plus de la moitié de cette charge de mortalité est supportée par les populations des pays en développement. L'examen des risques relatifs à la santé humaine, liés aux changements climatiques et environnementaux vécus de nos jours, est considéré comme une préoccupation majeure de la société contemporaine. Toutefois, il s'avère important de distinguer entre la notion de danger et de risque. Chevalier. P et al (2003) qualifient le danger comme étant le potentiel que possède un agresseur quelconque (biologique, chimique, physique…) d'exercer un impact négatif sur la santé. Tandis que le risque représente la probabilité que des effets néfastes sur la santé humaine surviennent à la suite d'une exposition à un danger ou à un agresseur. Host. S et al (2006) définissent le danger d'une substance chimique, d'un phénomène physique ou d'un agent biologique comme étant la capacité intrinsèque à produire des effets sanitaires indésirables pour une voie d'exposition donnée (ingestion, inhalation ou contact cutané). Il peut être infectieux, toxique cancérogène ou physique. Concernant le risque, il est définit comme la probabilité de survenue d'un problème (expression de danger) soulevé au sein d'une population donnée pendant une période déterminée. Les dangers peuvent être affectés selon leur nature (biologique, chimique, physique….), selon le vecteur d'exposition (air intérieur, air extérieur, alimentation…) ou

79
Est l'un des fondateurs de la bactériologie. Il a découvert la bactérie responsable de la tuberculose qui porte son nom « bacille de koch» et reçoit suite à son exploit le prix Nobel de médecine et de physiologie en 1905.

selon le lieu d'exposition (résidence, travail, école, hôpital…). Dans le contexte de la santé environnementale, les dangers sont pris en considération selon leur nature.

1.3.1Les dangers biologiques

Le danger biologique est issu de l'exposition à toutes les formes de vie et à leurs sous-produits tels que les toxines[80]. La notion de danger biologique fait partie de la notion d'hygiène publique. Les dangers qui font partie d'une exposition microbienne sont le sujet d'une attention spécifique en santé publique tels que les bactéries, les virus et les parasites.

Les infections engendrées par les facteurs biologiques pathogènes peuvent être transmises par voie directe suite à un contact direct entre humains ou par voie indirecte suite à une transmission par voie aérienne, alimentaire, hydrique ou par l'intermédiaire de vecteurs (animaux ou insectes). Selon Chevalier. P et al (2003), le risque lié au danger biologique peut notamment être amplifié suite aux déplacements aériens qui transportent sur une longue distance en quelques heures les virus et les bactéries pathogènes. La transmission par voie aérienne laisse circuler les microorganismes qui sont responsables d'infections respiratoires comme le rhume, la tuberculose, l'influenza, la pneumonie. Ces infections respiratoires (en excluant la tuberculose) sont responsables actuellement de la plus grande cause de mortalité par maladies infectieuses, étant la cause de quatre millions de décès par an à peu près. Les infections d'origine hydrique constituent un grand problème particulièrement dans les zones tropicales ainsi que dans les pays en voie de développement. Elles sont le résultat de l'accroissement démographique ainsi que de la dégradation des services sanitaires. Cependant, dans les pays industrialisés, la charge polluante des activités de production animale est de plus en plus responsable de la contamination de l'eau de surface ou des nappes phréatiques. Par ailleurs, les groupes d'aliments tels que les produits carnés et laitiers constituent un milieu favorable pour la prolifération microbienne. Le sol peut être aussi à l'origine de certaines infections pour les enfants surtout dans les régions où les déchets animales et humains ne sont pas gérés d'une façon adéquate.

1.3.2 Les dangers chimiques

Les êtres humains étaient exposés jusqu'à la révolution industrielle à un nombre limité de substances toxiques telles que les gaz et les fumées engendrés suite à la combustion et des substances pétrolières ou minérales naturellement formées dans l'eau ou dans le sol de

80
Est une substance toxique produite par un organisme vivant.

certaines régions. Au début du 20ème siècle, les dangers issus de l'exposition aux agresseurs chimiques sont liés directement à l'industrialisation et à l'activité humaine d'une façon générale, impliquant ainsi l'utilisation de plus de 10 millions de produits de synthèse. Ces substances chimiques sont divisées en deux sous-groupes : les substances inorganiques et les substances organiques. Parmi les substances inorganiques les plus dangereuses pour la santé publique, nous

citons les métaux, les agents corrosifs[81] et les composés halogénés. Le tableau 3.1 ci-dessous présente les substances inorganiques ainsi que l'effet sanitaire correspondant.

Tableau 3.1

Les substances inorganiques		
Les métaux	Les agents corrosifs	Les composés halogénés
Le Cadmium, le chrome, le cuivre, le manganèse, le mercure, le nickel, le plomb et l'arsenic	Sont constitués d'acides et de bases fortes	le fluor, le Chlore, le Brome et l'iode.
L'impact sanitaire		
Le cuivre, le chrome et le manganèse sont physiologiquement essentiels pour le fonctionnement de certaines enzymes mais en très petite quantité seulement. Les autres n'ont aucune fonction physiologique connue et sont généralement toxiques à faibles concentrations. L'arsenic et le cadmium sont cancérogènes alors que le mercure et le plomb sont neurotoxiques et	Suite à leur concentration, ils causent de graves irritations cutanées, oculaires et respiratoires par leurs vapeurs et brouillards.	Le fluor et le chlore sont des gaz qui causent de sévères irritations du système respiratoire. Plusieurs composés halogénés comme les fluorures et les acides fluorhydriques et chlorhydriques sont également toxiques. Le risque relié aux halogènes peut également découler de leur incorporation dans des molécules organiques.

81
La corrosion est l'interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications des propriétés du métal et pouvant conduire à une dégradation significative de la fonction du métal, du milieu environnant ou du système technique dont ils font partie.

peuvent causer des lésions permanentes		

Source : Chevalier .P et al (2003).

En ce qui concerne les substances organiques, elles sont très nombreuses. Notre intérêt est focalisé uniquement sur les hydrocarbures et leurs dérivés.

Tableau 3.2

Les hydrocarbures et leurs dérivés		
Les hydrocarbures simples et linéaires	Les hydrocarbures aromatiques	Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)
Il s'agit d'une molécule composée seulement d'atome de carbone et d'hydrogène, les plus petites molécules sont : le méthane, l'éthane, le propane, le butane.	Ces hydrocarbures ont une molécule de benzène à la base de leur structure. Certains ont une structure formée de plusieurs molécules de benzène auxquelles se greffent diverses chaines linéaires ou des anneaux non benzéniques.	Ils sont engendrés par la combustion de toute matière organique (le pétrole, le bois, le charbon).
L'impact sanitaire		
Ces gaz ont la capacité de s'enflammer ou d'exploser,	Ils ont un effet cancérogène chez l'être humain.	Ils persistent dans l'environnement, sont cancérogènes et peuvent

certains parmi eux (le propane et le butane) ont un effet dépresseur sur le système nerveux.	Certains parmi eux ont des propriétés neurotoxiques qui irritent les muqueuses.	s'accumuler dans la chaine alimentaire.

Source :Chevalier .P et al (2003)

1.3.3Les dangers physiques

Les dangers physiques proviennent de l'exposition à des sources d'énergie d'origine anthropique ou naturelle. Les effets peuvent être immédiats (brulures) ou intervenir à long terme comme le cancer.

Tableau 3.3- Les dangers et l'impact sanitaire correspondant

Les dangers physiques		
Bruit et vibration	Rayonnements ionisants et non ionisants	Les extrêmes de température

C'est un son indésirable et potentiellement nuisible dont l'intensité est mesurée en décibels (dB). Les différents bruits ont une intensité sonore différente dont le seuil maximal tolérable par l'oreille humaine est de 140 dB.	Ils incluent le rayonnement électromagnétique et les divers éléments radioactifs d'origine naturelle ou médicale.	Ces dangers sont inhérents aux pays ayant des hivers très froids ou dans les grandes villes durant les vagues de chaleur estivales.
L'impact sanitaire		
Un bruit de trop forte intensité ou d'une intensité moindre qui s'étale sur une longue période peut endommager les cellules ciliées situées dans l'oreille interne. Un bruit ambiant et constant en milieu résidentiel près des autoroutes et des industries engendre des problèmes psychosociaux comme l'insomnie, le stress et une diminution de la qualité de vie.	Une exposition à une trop forte intensité de rayonnement ionisant ou durant une trop longue période peut engendrer des lésions de la cellule d'ADN entrainant potentiellement un cancer.	-L'exposition à de basses températures durant une trop longue période entraine des lésions de la peau et l'hypothermie qui peut même causer la mort. -L'exposition à une température trop élevée est responsable du coup de chaleur qui se produit lorsque la température et l'humidité relative sont élevées ce qui réduit le débit sanguin dans la peau.

Source : Chevalier .P et al (2003)

Il y'a d'autre types de dangers tels que les catastrophes naturelles : les inondations, les tornades, les ouragans, les tempêtes dont la fréquence a notablement augmenté depuis 1980.

1.4 L'impact sanitaire de la pollution atmosphérique

L'air est indispensable pour la vie de l'être humain. Nous respirons en moyenne 15 m^3 par jour. L'appareil respiratoire constitue une voie d'exposition favorisée pour des aéro-contaminants biologiques ou chimiques qui peuvent avoir des effets nocifs à court ou à long terme. Quénel. P et al (2003) ont ajouté que la question aujourd'hui n'est plus celle d'une toxicité aiguë liée à des doses importantes de polluants, mais celle d'une toxicité chronique en rapport avec des doses d'exposition faibles mais répétées. Les réactions des différents polluants dans l'atmosphère sont de gravité limitée à l'exception des individus qui souffrent d'une certaine sensibilité. Toutefois, certains de ces effets peuvent apparaitre à long terme tel est le cas du cancer et des affections chroniques. De plus, les facteurs environnementaux ne sont pas toujours les seuls responsables, tel est le cas du cancer et des maladies cardio-vasculaires qui sont également associées aux habitudes de vie ainsi qu'aux facteurs

héréditaires. L'analyse de ces mécanismes fait appel nécessairement à plusieurs disciplines telles que l'épidémiologie et la toxicologie.

1.4.1 Les propriétés toxicologiques des principaux polluants atmosphériques

Détecter la toxicité respective de certains polluants tels que le NO_2, le SO_2, l'O_3 et les PM_{10} est considérée comme une affaire un peu délicate étant donné qu'on respire tous ces polluants en même temps. Toutefois, grâce aux analyses effectuées au laboratoire sur l'homme dans certains cas et parfois sur les animaux, nous avons pu constater certains effets certains.

1.4.1.1 L'effet sur l'appareil respiratoire

Selon les déclarations de l'OMS (1997), certains polluants comme le SO_2 sont intensivement solubles dans l'eau, ce qui explique qu'ils sont absorbés rapidement par les voies respiratoires hautes, précisément les muqueuses du nez et l'oropharynx. Néanmoins, une petite fraction de ces polluants peut se fixer sur des particules fines absorbées et arrive jusqu'aux voies respiratoires inférieures. Suite à son exposition à des concentrations relativement élevées en SO_2, l'individu réagit en quelques minutes et des symptômes apparaissent rapidement tels que la toux et les sifflements. Ces effets peuvent encore être aggravés suite à l'exercice physique.

En se référant à la Société Française de Santé Publique (SFSP, 1996), le NO_2 est un gaz peu soluble qui peut arriver aux bronchioles et aux alvéoles. Ce polluant a des propriétés irritantes et oxydantes. Il amplifie la fréquence et la rigidité des crises chez les asthmatiques et favorise les infections pulmonaires chez l'enfant et chez l'animal. Cependant, en se référant aux résultats expérimentaux sur l'être humain, nous avons pu déduire que l'appareil respiratoire résiste aux faibles doses. L'ozone quant à lui peut provoquer des altérations biologiques chez l'homme et chez l'animal à cause de sa capacité à oxyder diverses molécules biologiques. Selon l'OMS (1997) et le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHP, 1996), il existe une grande variabilité de réponses à la toxicité de l'ozone chez des sujets semblables, ce qui renvoie à la possibilité de l'existence d'une sous-population[82] particulièrement sensible à de faibles concentrations d'ozone.

Wilson. R et Spengler. J (1996) ont annoncé que la gravité des particules fines dépend de leur composition chimique ainsi que de leur taille qui détermine leur capacité de pénétrer plus au

---

82 En statistique, il s'agit d'une population que l'analyste isole au sein d'une population plus large afin d'en étudier les caractéristiques propres.

moins loin dans l'arbre bronchique. Plus elles sont fines, plus elles restent en suspension dans l'air et plus leur temps de séjour dans les poumons est long. Avec un diamètre de 10µm elles sont filtrées par le nez et sont absorbées. De 3 à 10 µm, elles s'implantent dans la trachée et les bronches. Inférieures à 3 µm, elles atteignent en grand nombre les alvéoles pulmonaires où se font les échanges gazeux avec le sang. Il est certain que les particules participent à l'agression de la muqueuse respiratoire bien que les connaissances restent plus au moins certaines. Suite à une exposition prolongée aux particules, une inflammation se traduit, elle se manifeste par une altération des systèmes de défense de l'appareil respiratoire et une succession des réactions cellulaires et biochimiques aussi bien dans les poumons que dans le sang. L'OMS (1997) a signalé que les études épidémiologiques et toxicologiques attestent que les particules sont considérées aujourd'hui comme un indicateur majeur de risque sanitaire de la pollution atmosphérique. La SFSP (1996) a considéré que les (HAP) sont classés parmi les hydrocarbures les plus lourds qui se fixent à la surface des particules et qui ont des effets irritants et peuvent dans certains cas déclencher des processus cancéreux. L'OMS (1997) a déclaré que le (CO) a des effets aigus résultants de sa grande sensibilité pour les protéines transportant l'oxygène. A faible dose le (CO) peut provoquer des troubles cardiaques, des perturbations de la vigilance et des maux de tête. A forte dose, le (CO) entraine des troubles généraux tels que les nausées, le vertige et la fatigue. Burnett. R.T et al(1997) ont ajouté qu'une association peut être envisagée entre le (CO) et les admissions hospitalières pour asthme chez les personnes de moins de 65 ans.

1.4.1.2 L'effet sur l'appareil cardiovasculaire

Selon l'OMS (2010), les maladies cardio-vasculaires représentent l'ensemble de troubles affectant le cœur et les vaisseaux sanguins. Elles renferment : les infarctus, les maladies cérébrovasculaires (accidents vasculaires cérébraux), l'hypertension, les artériopathies périphériques, les cardiopathies rhumatismales, les malformations cardiaques congénitales et l'insuffisance cardiaque. Les maladies cardiovasculaires ne sont pas uniquement influencées par les phénomènes de pollution atmosphérique tels que les températures extrêmes, mais elles dépendent aussi de certains facteurs tels que les habitudes de vie (le tabagisme, le manque d'exercice physique, l'alcoolisme, la mauvaise alimentation) et le caractère héréditaire. Les réactions de certains polluants tels que le CO, le NO et le NO_2 atténuent la capacité de l'hémoglobine à transporter l'oxygène et à le distribuer aux tissus périphériques. Morris. R.D et Naumova. E.N (1998) ont énoncé que le CO est corrélé positivement aux admissions

hospitalières pour insuffisance cardiaque congestive[83] chez les individus de plus de 65 ans. Cet effet s'intensifie avec la baisse de la température. Peters. A et al (1999) ont stipulé que chez l'homme comme chez l'animal, les phénomènes inflammatoires engendrés par certains polluants atmosphériques tels que les particules peuvent accroitre la viscosité du sang, amplifier le risque d'infarctus et modifier la fréquence cardiaque. Les particules qui entrainent une diminution relativement rapide de l'oxygénation périphérique pourraient expliquer les associations observées avec les admissions pour infarctus ou troubles du rythme cardiaque.

1.4.1.3Le Cancer

Chevalier. P et al (2003) ont proclamé que l'apparition d'un cancer résulte de l'exposition à divers agresseurs de l'environnement et du milieu du travail, des habitudes de vie ainsi que des facteurs héréditaires. A l'échelle planétaire, le cancer est responsable de six millions de décès annuellement. Ce sont surtout les cancers de poumons, de l'estomac, du colon, du foie, de l'œsophage, de la prostate de la bouche, de pharynx et du système lymphatique qui sont jugés les plus coupables de la mortalité à l'échelle mondiale. Ces estimations varient d'une région à une autre. Par ailleurs, de nombreux agresseurs environnementaux (biologiques, chimiques et physiques) sont difficilement contrôlables et sont reconnus comme des agents cancérogènes, citons l'exemple des aflatoxines qui sont des toxines cancérogènes produites par certaines moisissures et qui peuvent se retrouver dans les aliments à base d'arachides ou de certaines céréales. En effet, plusieurs études épidémiologiques se rattachant au milieu de travail ont proclamé que les composés chimiques ainsi que certains rayonnements sont reconnus comme cancérogènes pour l'humain. Le cancer de poumons est supposé être fortement lié à la pollution de l'air. Les HAP sont les substances les plus impliquées dans l'apparition de cette maladie. Le radon résidentiel qui est un gaz radioactif issu de la désintégration de l'uranium qu'on retrouve en plus au moins concentrations dans plusieurs minerais est également impliqué dans un grand nombre de cancers pulmonaires.

En ce qui concerne l'eau potable, l'arsenic d'origine géologique et les nitrates provenant des fertilisants peuvent être associés à certains types de cancers.

---

83 Est l'accumulation du sang dans un organe.

1.4.2Les effets de la pollution atmosphérique à court terme

L'étude des effets de la pollution de l'air a suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs qui se sont engagés dans des études épidémiologiques concernant la pollution urbaine acido-particulaire[84] et photo-oxydante[85] ainsi que les effets sanitaires correspondants.

La majorité de ces études ont analysé la relation à court terme entre l'exposition à la pollution de l'air (limitée à cinq jours) et les indicateurs de santé. En revanche, les recherches liées à l'impact à long terme de la pollution atmosphérique demeurent encore beaucoup moindres et lacunaires. Cet impact sanitaire peut être analysé en termes de mortalité qui signifie le nombre de décès rapporté dans une population pour un temps donné ou bien en termes de morbidité signifiant la quantité d'individus malades au sein d'un groupe durant un certain temps.

1.4.2.1 La mortalité

L'analyse de la relation de causalité entre mortalité et pollution atmosphérique à court terme est actuellement envisagée comme un raisonnement possible. Ces études permettent d'estimer dans une population donnée le nombre de décès attribuables à la pollution de l'air. Les différentes études menées à ce propos ont montré que, l'impact sanitaire collectif demeure non négligeable en termes de santé publique, malgré un risque individuel faible. Plusieurs réflexions ont établi un lien à court terme entre la mortalité toutes causes en écartant les morts violentes et accidentelles et différents polluants atmosphériques gazeux et particulaires. Biggeri. A et al (2005) ainsi que le programme Français de l'Institut de Veille Sanitaire l'INVS (2002) ont confirmé l'existence d'un lien entre les niveaux ambiants de NO_2 et la mortalité à court terme selon les études épidémiologiques réalisées dans plusieurs pays. Concernant les niveaux d'ozone, l'INVS (2008) a montré une association significative avec la mortalité toutes causes, pendant la période estivale (du mois d'avril à septembre). Ce lien positif et significatif a été aussi interprété par des études multicentriques[86] et des méta-

---

84
Elle associe le SO_2 et les particules en suspension.

85
La pollution photo-oxydante est due à l'action des rayons ultra-violets émis par le soleil sur des polluants présents dans l'atmosphère.

86
Ce sont des études scientifiques qui sont faites avec des volontaires en provenance de plusieurs centres médicaux différents. Elles permettent ainsi de réunir un nombre plus grand de patients et donc d'obtenir des données médicales plus précises.

analyses tel est le cas de Bell. M.L et al (2005) qui ont étudié le lien inter-temporel entre l'ozone et la mortalité en comparaison avec les études nationales engagées dans ce contexte. Toutefois, Saez. M et al (2002) ont retrouvé une association non significative et Lee. J.T et al (2000) ont abouti à une association négative selon une analyse portant sur les sept principales villes de la Corée. Wilson. R et Spengler. J (1996) ont avoué que l'étude de la mortalité issue de la pollution de l'air s'est vraiment développée avec le début des années 90 avec des chercheurs américains qui ont fait recours à de nouvelles méthodes d'analyse des séries temporelles. Ces derniers ont détecté l'existence des risques faibles mais statistiquement significatifs même dans le cas où il n'y avait pas eu un dépassement des valeurs limites recommandées pour chacun des différents polluants. Samet J.M et al (2000), Saez. Et al (2002), Biggeri. A et al (2005) ont étudié le lien à court terme entre les polluants atmosphériques et la mortalité pour cause cardiovasculaire, ils ont prélevé une association positive et souvent significative entre ces deux indicateurs pour le cas des Etats-Unis et de l'Italie. Goldberg M.S et al (2001) ont déduit une association non significative entre la mortalité journalière de la pollution particulaire au Montréal et une association négative entre la mortalité et les concentrations d'ozone. Les excès de risque relatif [87] obtenus pour la mortalité cardiovasculaire sont globalement plus élevés que ceux obtenus pour la mortalité toutes causes. Selon une étude effectuée par l'INVS en 2002, les excès de risques de décès cardiovasculaires associés à une exposition cumulée sur six jours étaient proches de ceux associés à une exposition cumulée sur deux jours, mettant ainsi en évidence un effet plutôt immédiat des différents polluants sur la mortalité cardiovasculaire.

L'étude de l'INVS (2008) qui a analysé les liens à court terme entre la pollution atmosphérique urbaine et la mortalité dans cinq villes Françaises a montré des associations significatives avec le NO_2. Ce même résultat a été confirmé dans l'étude de Samoli. E et al (2006). Ballester. F et al (2002) ont soulevé également une relation de causalité significative entre le taux de mortalité en Espagne et le SO_2. Le projet Air Pollution and Health European Approach APHEA (1996) qui a concerné 15 villes Européennes ayant des contextes économiques, géographiques, sociaux et culturels différents avait comme objectif d'estimer l'impact à court terme de la pollution urbaine sur la mortalité. Ce projet avait l'avantage d'effectuer des analyses étalées sur une longue période et s'est appuyé sur des données

---

87

Le risque relatif (RR) est une mesure statistique souvent utilisée en épidémiologie, mesurant le risque de survenue d'un événement dans un groupe par rapport à l'autre.

disponibles et recueillies de façon standardisée et routinière, cependant il est soumis au problème de contrôle parfait des variables, pouvant influencer en même temps les niveaux de pollution et les risques sanitaires. D'une manière générale, les résultats ont confirmé l'existence d'un effet pathogène pour le SO_2 et notamment pour les particules en suspension. Cryparis. A et al (2004) et Goldberg .M.S (2001) ont prouvé un rapport positif entre la mortalité et les maladies respiratoires mais cette relation n'est pas toujours significative. Selon l'INVS (2002), les relations sont plus souvent significatives lorsque l'exposition à la pollution atmosphérique jusqu'aux cinq jours précédents est prise en considération. Cette même étude a montré que pour une augmentation de 10 mg/m^3 des niveaux de polluants du jour et de la veille, les risques de décès respiratoire variaient de 1,1% pour le SO_2à 1,3% pour le NO_2. Les excès de risques de décès pour cause respiratoire associés à une exposition cumulée sur six jours étaient trois fois plus élevés. Ces résultats étaient similaires à ceux observés par les études du programme Européen APHEA(1996). Pascal. L(2009) a affirmé que l'exposition à la pollution de l'air semble donc avoir un effet plus retardé sur la mortalité respiratoire que sur la mortalité totale ou cardiovasculaire.

1.4.2.2La morbidité

L'étude de l'impact de quelques polluants sur la morbidité à court terme a soulevé beaucoup de débats dans l'économie environnementale et surtout en épidémiologie. En termes de morbidité, les hospitalisations pour motifs respiratoires et, de plus en plus, pour causes cardiovasculaires constituent l'indicateur le plus fréquemment utilisé, suivi par les symptômes respiratoires et la fonction respiratoire. L'étude des consultations aux urgences et en médecine ambulatoire[88] est moins répandue, toutefois elle se développe, de même que les ventes de médicaments. Quénel. P et al (2003) ont affirmé qu'en dépit des raisons méthodologiques, il demeure assez difficile d'étudier l'effet à court terme de la pollution de l'air sur l'incidence des maladies. En effet les données demeurent plus disponibles quand 'il s'agit d'analyser le phénomène d'aggravation des maladies déjà existantes que ce soit respiratoires ou cardiovasculaires surtout avec des teneurs faibles de polluants. Sunyer. J et al (1997) ont soulevé que dans le projet APHEA qui a concerné quatre villes (Barcelone, Londres, Paris et Helsinki), les données utilisées étaient les admissions d'urgence à l'hôpital pour cause d'asthme. Burnett. R.T et al (1998) ont affirmé qu'il existe une association entre les variations

88
L'unité de médecine ambulatoire permet au patient d'être pris en charge et de recevoir les soins au cours de la journée, ayant ainsi la possibilité de regagner son domicile le jour même.

journalières de pollution et les admissions hospitalières pour affections respiratoires et cardiovasculaires. Selon Pope. C.A (2000), les PM_{10} sont les polluants qui ont exprimé une association avec l'asthme aux Etats-Unis. Généralement, les particules en suspension surtout celles d'un diamètre inférieur à 10 µm sont les plus souvent associées à différents effets sanitaires. Cependant, Lipfert. F.W (1994) a souligné que l'interprétation de l'effet des particules sur la santé aux Etats-Unis est compliqué étant donné que ce type de polluant peut interagir avec les facteurs météorologiques et biaiser la relation qui est lui attribuée et qui le relie avec la maladie concernée. Pope. C.A (1996) dans une étude pour le cas des Etats-Unis et dans laquelle il a analysé l'effet de la fermeture d'une sidérurgie suite à une grève sur la fréquence des maladies respiratoires chez les enfants, a attesté que la baisse des teneurs de PM_{10} de 90µg/m^3 à 50 µg/m^{3}a entrainé une diminution des hospitalisations à la même période pour les années précédentes. Ceci prouve que cette usine est responsable de l'émission des polluants particulaires qui agissent seuls ou entrent en réaction avec les facteurs météorologiques. Nous constatons que la majorité des études ont indiqué que les particules constituent un important facteur de risque pour la santé bien que les mécanismes biologiques de leur action demeurent mal compris. L'OMS (1994) a considéré comme acquis le risque à court terme lié aux particules fines. En ce qui concerne la pollution photo-oxydante, il a été justifié que l'exposition à court terme de quelques minutes à quelques heures à l'ozone à partir de 100µg/m^3 engendre une complication de la fonction pulmonaire, une augmentation de la résistance des bronches et une réaction inflammatoire. Cette dernière touche surtout les asthmatiques qui représentent une population particulièrement sensible aux effets d'O_3, et pour cette raison nous enregistrons une augmentation de la fréquence et de la gravité des crises. L'Administration Territoriale de Santé (ATS, 1996) a affirmé que l'accroissement des teneurs quotidiennes d'O_3 de 100 µg/m^3 est associé à un risque de mortalité accru de 50%. L'exposition à ce polluant a été aussi reliée à une augmentation des admissions hospitalières pour motif respiratoire aux Etats-Unis. Desqueyroux. H et Momas. I (2001) ont montré dans une étude épidémiologique et écologique que les particules, l'O_3, le SO_2 et parfois le NO_2 ont un effet sur la bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) et que les individus qui souffrent déjà d'une maladie respiratoire et notamment le (BPCO) sont considérés comme les plus sensibles à la pollution atmosphérique.

1.4.3 Les effets de la pollution atmosphérique à long terme

L'analyse des effets à long terme de la pollution de l'air est plus difficile que les effets à court terme vue que l'estimation de l'exposition à la pollution sur de longues périodes (plusieurs

années) soulève certaines difficultés. En effet, cette démarche nécessite des ressources importantes (une longue période de suivi et un échantillon d'étude étendu).Pourtant, ces études sont importantes parce que les effets à long terme d'un polluant ne peuvent pas être modélisés dans une étude de type expérimental (études en chambres ou sur l'animal). Généralement, à long terme ce sont les études de cohorte[89] et parfois transversales qui sont les plus utilisées. C'est surtout l'épidémiologie qui s'est spécifiée dans ce genre d'analyses. Toutefois, certaines études telle est le cas de Chestnut. L.G et al (1991) et Raizenne. M.E et al (1996) ont indiqué que l'exposition prolongée à la pollution urbaine pouvait diminuer de façon durable la fonction respiratoire. Dockery. D.W et al (1996) quant 'à eux ont montré que les effets à long terme de la pollution atmosphérique augmentent la fréquence des symptômes respiratoires bronchitiques chez l'enfant. Dockery. D.W et al (1993) dans une étude de six villes américaines dont lesquelles ils ont fait un suivi pour 8000 adultes durant seize années, ont déduit une association forte entre les émissions de $PM_{2.5}$ et le risque de mortalité. Ce dernier augmente de 26% entre les villes les plus polluées et les moins polluées à facteurs de risque individuels égaux. Berson,W.L et al (1998) ont souligné que l'étude Adventists Health Study on Smog (ASHMOG) a permis d'analyser la relation entre l'histoire de l'exposition à la pollution de l'air et l'incidence du cancer bronchique pour 6000 adultes non-fumeurs dans 12 zones du sud de la Californie. Cette analyse a justifié l'existence d'une relation de causalité entre la teneur moyenne des particules et la morbidité pour motif de cancer bronchique.

Pop, C.A et al (1995) ont indiqué, dans l'étude de la Cohorte de l'American Cancer Society (ACS) qui a suivi plus de cinq cent mille de sujets âgés de plus de 30 ans durant huit années dans 151 villes, que le risque de mortalité augmente de 17% dans les villes les plus polluées à facteurs de risque individuels égaux et que l'excès de risque de décès pour cause cardio-pulmonaire est de 31%.

1.4.4 Les populations sensibles

Certaines personnes appartenant à certains sous-groupes de la population peuvent être plus vulnérables que d'autres aux effets des polluants. Quénel. P et al (2003) ont affirmé qu'avec les niveaux de pollutions quotidiennement émis dans les milieux urbains, la plus part des individus ne ressentent rien d'anormale. Cependant, certaines personnes même avec des

89

On appelle étude de cohorte toute étude de type longitudinale qui est généralement fondée sur deux groupes de sujets (les cohortes), un groupe témoin et un groupe soumis à la condition d'intérêt.

niveaux modestes de pollution peuvent avoir une gêne qui altère leur santé, soit parce que qu'elles ont un terrain sensible, soit parce qu'elles sont d'autant exposées à d'autres facteurs de risques qui les rendent sensibles. Nous citons le cas des personnes âgées, les enfants, les personnes qui souffrent de maladies respiratoires (asthmatiques ou sujets ayant une bronchite

chronique) ou cardio-vasculaires chroniques et les personnes défavorisées sur le plan socio-économique.

1.4.4.1 Les enfants

Schwartz. J (2003) a affirmé que les enfants sont les plus sensibles à la pollution atmosphérique étant donné que leur système immunitaire est encore immature et leur croissance pulmonaire n'est pas encore bien achevée. De plus, ils sont plus exposés à la pollution extérieure. Toutefois, le nombre d'études qui a discuté les effets à court terme de la pollution sur la mortalité des enfants est considéré limité. Cela revient essentiellement au fait que la mortalité infantile est considérée comme un phénomène non répandue aux pays développés. Les quelques études annoncées ont concerné la mortalité à différentes périodes de l'enfance : néonatale (de la naissance aux 28 jours), post néonatale (de 28 jours à 1 an), infantile (de la naissance à 1 an), enfants moins de cinq ans. Lin.C.A et al (2004) ont étudié la mortalité néonatale à Sao-Paulo, ils ont soulevé un lien significatif entre la mortalité néonatale et les niveaux de certains polluants comme les PM_{10} et le SO_2. Saldiva. P.H et al (1994) et Conçeicao. G et al (2001) qui ont ciblé également les enfants de moins de cinq ans de Sao-Paulo au Brésil, ont souligné qu'il existe une relation de court terme entre la mortalité pour causes respiratoires et différents polluants tels que le NO_2, le CO, le SO_2 et les PM_{10}.

Glinianaia.S.V et al (2004) ont déclaré que les études qui ont analysé l'impact à court terme de la pollution sur la mortalité chez les enfants ne sont pas toujours cohérentes, notamment pour la mortalité néonatale et infantile. De plus, les décès de la période néonatale sont fortement dépendants des évènements survenant au cours de la période périnatale notamment la prématurité. Ritz. B et al(2006) dans une étude Californienne ont indiqué qu'il n'existe pas de relation significative entre la pollution atmosphérique et la mortalité néonatale. Cependant, il existe une association entre la mortalité post-néonatale toutes causes et les niveaux de NO_2, de CO et des PM_{10} qui sont émis deux mois au paravent. Une autre étude a été réalisée à Seoul par Ha. E. H et al (2003), selon laquelle ils ont démontré un lien entre les PM_{10} et la mortalité post-néonatale toutes causes et pour causes respiratoires. Loomis. D et al (1999) ont mis en

évidence une corrélation entre la pollution urbaine et la mortalité infantile à Mexico avec un excès de risque de 6,9% pour une augmentation de 10µg/m^3 des teneurs des particules fines de 3 à 5 jours précédents. Cette relation est aussi validée pour l'ozone et les oxydes d'azotes. Cependant, selon une étude plus récente qui a été effectuée par Romieu. I et al (2004), pour le même endroit Mexico, aucune association entre mortalité toutes causes ou respiratoire et les PM_{10} ou ozone n'a été justifiée pour la totalité de la population d'enfants. Ce résultat s'aligne parfaitement avec l'étude réalisée en Grande Bretagne par Hajat. S et al (2007), selon laquelle ils n'ont soulevé aucun lien entre mortalité infantile et pollution atmosphérique sauf pour le SO_2. A partir de ces quelques études, nous remarquons que la relation de cause à effet entre la pollution de l'air et la mortalité toutes causes ou respiratoires chez les enfants selon leur classification d'âge n'est pas soulevée avec certitude et nous trouvons parfois des résultats divergents même au sein du même pays.

1.4.4.2Les personnes âgées

Les effets sanitaires de la pollution sur les personnes âgées de 65 ans et plus ont été largement étudiées. Les personnes âgées sont considérées comme les plus vulnérables à cause de la présence de plusieurs pathologies à cet âge-là en plus de la diminution de leurs défenses immunitaires. Kelly. F.J et al (2003) ont ajouté que le stress oxydant qui, consiste à l'oxydation de notre organisme suite à un excès de molécules particulièrement nocives et qui viennent de l'oxygène que nous respirons pour vivre, dénature les protéines, les lipides, les sucres et même l'ADN et en conséquence les membranes cellulaires et les cellules. Ce phénomène qui provoque l'agression des cellules est la cause essentielle du vieillissement et de la vulnérabilité des personnes âgées. Le projet APHEA, a montré également dans une étude multicentrique que le risque relatif de décès toutes causes des personnes âgées augmentait de 0.7% pour une augmentation de 10µg/m^3 des teneurs des particules et des fumées noires et cet excès de risque de décès était plus important que celui déterminé pour la population générale. Ainsi, toutes les études ont mis en évidence une plus grande sensibilité des personnes âgées à la pollution de l'air et cette vulnérabilité semble augmenter avec le vieillissement. En revanche, les causes de cette plus grande fragilité sont encore lacunaires et demandent plus d'exploration.

1.4.4.3Les personnes souffrant de pathologies aigues ou chroniques

Schwartz. J (1994) a stipulé que le risque de décès associé à la pollution atmosphérique est jugée être plus élevé chez les personnes souffrant déjà d'une maladie cardiovasculaire ou respiratoire. Beaucoup d'études ont soulevé que les personnes souffrant de pathologies respiratoires, cardiovasculaires ou de diabète possèdent un risque plus élevé à décéder que la population générale. De Leon. S.F et al (2003) dans leur analyse, ont justifié que pour une population âgée de soixante-quinze ans et plus, le taux de mortalité pour cause cardiovasculaire ou respiratoire associé à la pollution de l'air augmente chez les agents qui souffraient déjà d'une pathologie respiratoire associée ou infectieuse quand les niveaux de polluants émis dans l'air s'intensifient également. Ce résultat n'est pas observé pour les personnes qui sont âgées de moins de soixante-quinze ans, ce qui revoie au fait que l'âge ainsi l'existence des maladies associées sont des facteurs qui amplifient le risque de décès. Sunyer. J et al(2000) dans une étude destinée aux agents souffrant d'une BPCO, ont observé une association positive entre les niveaux de polluants ainsi que la mortalité pour toutes causes et respiratoire. En revanche, ils ont soulevé que ce même risque est important pour les femmes âgées et les patients souffrant d'une BPCO sévère qui ont nécessité plusieurs passages aux urgences ou une hospitalisation en soins intensifs. Enfin, ils ont montré que les sujets qui ont souffert, peu de temps avant le décès, d'une pathologie aigue des voies respiratoires inférieures affichaient une augmentation de risque de mortalité toutes causes confondues en lien avec la pollution de l'air. Baterson. T.F et Schwartz. J (2004) ont ajouté que les personnes âgées de plus de soixante-cinq ans souffrant d'une coronaropathie chronique ou d'un antécédent d'infarctus du myocarde constituent un sous-groupe plus sensible que d'autres vis-à-vis de la pollution de l'air. Goldberg. M.S et al (2001) ont aussi détecté des associations positives et significatives entre la mortalité toutes causes et différents polluants pour les individus ayant, peu de temps avant la mort, souffert d'une insuffisance cardiaque. Les personnes diabétiques sont évidemment considérées comme une population à risque vue qu'elles sont plus favorables au risque de décès pour motif cardiovasculaire. Goldberg M.S et al (2006) dans une étude plus récente ont montré que le risque de décès suite à une exposition quotidienne à la pollution de l'air est considéré plus élevé pour les sujets diabétiques soufrant d'une complication cardiovasculaire que pour ceux ne présentant pas de pathologie importante associée à leur diabète. D'une façon générale, nous remarquons que les personnes affaiblies par une pathologie respiratoire, cardiovasculaire ou par un diabète sont soumis à plus de risque de décès à court terme dans le cas de l'intensification des niveaux de pollution que les gens normaux.

1.4.4.4Les inégalités socio-économiques

L'impact des inégalités socioéconomiques en termes de mortalité et de morbidité a été surtout étudié en Europe, aux Etats-Unis ou en Amérique Latine. En effet, les populations pauvres ont tendance à vivre dans des zones intensivement polluées. Toutefois, beaucoup de difficultés résident dans la définition même du statut socioéconomique et le présenter par un indicateur adéquat. Gouveia. N et al (2000) ont affirmé que globalement le niveau socioéconomique n'influence pas la relation entre la mortalité et la pollution atmosphérique, et dans certains cas, nous trouvons même une relation inverse de celle attendue avec une augmentation du risque de décès chez les personnes ayant un niveau socioéconomique élevé. D'autres, ont soulevé un effet faible, nous citons le cas de Romieu. I et al(2004) qui ont souligné qu'il existe une relation significative entre la mortalité et différents polluants chez les enfants des familles défavorisées socialement. Martins.M.C et al (2004) dans une étude réalisée dans différentes régions de Sao-Paulo au Brésil ont conclu que le niveau socioéconomique modifie l'impact des PM_{10} sur la mortalité respiratoire des personnes âgées. Les sujets qui touchent un faible revenu et qui ont un niveau d'éducation bas sont les plus risqués. Jerrett. M et al (2004) ont indiqué également dans une étude effectuée sur plusieurs zones de la ville de Hamilton au Canada, que l'augmentation des décès liée à l'exposition à la pollution atmosphérique est plus souvent significative et positive dans les zones caractérisées par un niveau d'éducation bas et une population plutôt ouvrière. De même, Forastière. F et al (2007) ont soulevé que l'effet des particules sur la mortalité est jugé être plus important pour les personnes défavorisées à Rome en Italie. Cela peut être expliqué par le fait que cette catégorie de population est en état de santé moindre que les autres et une forte proportion d'eux souffraient d'une maladie chronique. Laurent. O et al (2007) ont souligné que les études qui utilisent des mesures individuelles des caractéristiques socioéconomiques ont montré que la pollution affecte davantage les personnes défavorisées, par contre cet effet n'est pas toujours vérifié dans le cas d'études standards destinées à une zone géographique large telle que le cas des départements et des agglomérations.

1.5 La démarche d'évaluation des risques sanitaires

Le processus d'évaluation des risques sanitaires (ERS) est soumis à plusieurs ambiguïtés et incertitudes. Host. S et al (2006) ont souligné que les expositions aux facteurs dangereux de l'environnement sont nombreuses et variées. Elles sont souvent chroniques et sauf situations accidentelles, de faible niveau. D'une manière générale il demeure difficile de les quantifier

précisément et de prendre en considération toutes les interactions possibles. Ces expositions sont aussi liées à d'autres facteurs tels que les comportements des individus ainsi que les antécédents génétiques qui peuvent participer à l'apparence de certaines maladies qui lui sont généralement attribuées. De plus, ces maladies se manifestent après une longue période d'exposition aux agents dangereux, donc il n'est pas facile de déterminer avec certitude le facteur environnemental et l'impact sanitaire qui lui est attribué. En dépit de ces incertitudes qui entourent les expositions et les risques, il est nécessaire de faire parvenir des outils d'aide à la décision tels que l'ERS permettant ainsi d'organiser les connaissances selon une démarche standardisée, cohérente et transparente.

1.5.1 Un aperçu historique sur l'émergence de la méthode d'évaluation des risques sanitaires

La méthode d'évaluation des risques sanitaires trouve ses inspirations aux Etats-Unis en 1940. A cet époque-là, le but était d'établir suite à une méthode à deux étapes (identification des dangers et définition des relations dose-réponse) des seuils d'exposition en dessous des quels aucun effet toxique n'était apte de se manifester. Les premiers domaines ciblés étaient le milieu professionnel et les denrées alimentaires. C'est dans les années 1960 que l'approche sans seuil pour les substances cancérogènes apparait et avec elle la notion de quantification et d'acceptabilité des risques. Par la suite, cette méthode de quantification de risque a été utilisée pour les substances radioactives puis pour les substances chimiques. Par ailleurs, le rapport publié par le Conseil National de la Recherche (NRC) aux Etats-Unis en 1983 constitue le premier document de base qui a introduit la méthode d'ERS. Cette dernière a été définie comme étant « l'utilisation de faits (scientifiques) pour définir les effets sur la santé d'une exposition d'individus ou de populations à des matériaux ou à des situations dangereuses ». Les postulats de la méthode et les recommandations de mise en pratique de la démarche étaient énoncés plus tard dans les guides méthodologiques de l'Agence de Protection Environnementale aux Etats-Unis (US-EPA) en 1985. Au début, la démarche d'ERS a été adoptée pour estimer les risques sanitaires des populations liées à l'exposition à des substances dangereuses, principalement cancérogènes. Aux Etats-Unis, elle a été appliquée pour fixer les seuils réglementaires dans les aliments ou en milieu professionnel, c'est-à-dire dans le cadre de la population générale. Par la suite, elle a été adoptée au cas des sites et sols pollués et notamment incluse dans le processus de restauration de ces sites. En 1989, l'US-EPA a appliqué la méthode d'ERS au cas des sols pollués par des déchets dangereux dans le cadre du programme de dépollution « Superfund » afin d'avoir une idée sur les risques sanitaires pour la population vivante sur les sites pollués et à proximité.

1.5.1.1 Les étapes de la méthode d'évaluation des risques sanitaires

La méthode d'ERS a été constituée de quatre étapes qui se présentent comme suit : l'identification des dangers, la définition des relations dose-réponse, l'estimation des expositions et la caractérisation des risques.

- **L'identification des dangers**

Selon le NRC (1983), l'identification des dangers consiste à déterminer de quelle manière l'exposition à une substance peut être à l'origine d'effets sanitaires et quels sont ces effets sanitaires. Cette étape peut se baser sur des données épidémiologiques sur les animaux, des données collectées des études à court terme et enfin par comparaison avec les propriétés physico-chimiques d'autres substances similaires dont les effets sont connus. Host. S et al (2006) ont indiqué que les différents types de dangers sont déterminés selon l'intensité et la durée du contact. Ils peuvent être à l'origine des effets aigus ou effets chroniques. Les effets aigus apparaissent soudainement et évoluent rapidement, ils sont généralement liés à une exposition courte mais à forte dose et disparaissent spontanément suite à l'arrêt de l'exposition. Ils peuvent se présenter sous forme de toux, d'irritations des muqueuses, de diarrhées et des troubles neurologiques. Les effets chroniques quant' à eux correspondent à des manifestations cliniques persistantes qui se développent lentement et sont liés souvent à une exposition faible mais prolongée. Ils peuvent survenir après une longue période d'exposition parfois des décennies et sont habituellement irréversibles en absence de traitement. Parmi les effets chroniques, nous citons les cancers, les hémopathies[90] et les atteintes organiques. L'identification de dangers se fait globalement à partir d'études expérimentales et épidémiologiques ayant permis d'établir une relation causale entre l'exposition à cet agent et la survenue d'un ou de plusieurs effets sur un organisme vivant.

Cependant, les données disponibles peuvent être nombreuses et divergentes, pour cela il est jugé nécessaire de les analyser afin d'identifier les dangers les plus probables. Pour cette raison que les données obtenues chez l'homme sont préférables à celles obtenues chez l'animal et les études épidémiologiques concernant la population générale sont privilégiées aux études réalisées en milieu professionnel où les niveaux d'exposition sont beaucoup plus élevés.

- **La définition de la relation dose-réponse**

---

90 Elles désignent les maladies de sang.

Selon les déclarations de l'NRC (1983), cette étape consiste à caractériser la relation entre la dose d'une substance administrée ou reçue[91] et l'incidence d'un effet néfaste dans la population exposée. Cette étape implique en général une extrapolation des fortes doses vers les faibles doses et peut impliquer une extrapolation de l'animal à l'homme. Le choix des modèles d'extrapolation utilisés doit être justifié et les incertitudes statistiques et biologiques doivent être bien soulevées. Host. S et al (2006) ont défini les valeurs toxicologiques de référence (VTR) qui représentent les indices caractérisant la relation entre l'exposition de l'homme à une substance toxique et la gravité d'un effet nocif observé. Les VTR sont principalement déterminées par les institutions nationales ou internationales. Il y' a des substances pour lesquelles existent un seuil en dessous duquel aucun effet n'est détecté appelés effets à seuil ou déterministes et des substances pour lesquelles les effets apparaissent dès les niveaux d'exposition les plus faibles appelés effets sans seuil ou probabilistes. Cette distinction montre qu'il existe des mécanismes d'action différents.

- ✓ **Les effets à seuil**

Dans ce cas de figure, la gravité de l'effet est relative à la dose. Nous citons l'exemple des effets non cancérogènes et cancérogènes non génotoxiques[92]. Les VTR sont déterminées à partir des études épidémiologiques ou à défaut de l'expérimentation animale. Elles sont établies à partir de la dose sans effet adverse observée qui représente le plus fort niveau d'exposition n'ayant pas provoqué d'effet observable. Un facteur de sécurité est appliqué à cette dose pour tenir compte d'incertitudes liées à la variabilité intra-espèces et inter-espèces, ou bien à l'inadéquation des données ou à des insuffisances méthodologiques. Selon Host. S et al (2006), ce facteur de sécurité peut varier de 10 à 10000. Par la suite, des doses de références sont établies permettant ainsi de définir des normes ou des standards. Ces derniers se manifestent dans des doses journalières admissibles (DJA) ou tolérables (DJT) pour les expositions par voie orale, exprimées en mg/kg/j et des concentrations atmosphériques admissibles (CAA) pour les expositions par voie respiratoire, exprimées en $\mu g/m^3$. D'une façon générale, la (DJA) ou (CAA) définit la quantité maximale théorique d'agent toxique qui

---

91 Est définie par la quantité de substance qui entre en contact avec les barrières de l'organisme humain par une voie d'exposition (inhalation, ingestion, contact cutané).

92 Qui participent au processus de cancérogenèse (stade de promotion ou progression) sans induire d'augmentation du taux de mutation.

peut être absorbée par un individu sans provoquer un effet nocif. Ces doses admissibles ne correspondent pas nécessairement à des seuils toxicologiques car elles peuvent être modifiées par le choix qui est fait concernant le facteur de sécurité, qui prend en compte également des contraintes d'ordre social ou économique.

- ✓ **Les effets sans seuil**

Selon Host. S et al (2006), les effets sans seuil apparaissent dès les niveaux d'exposition jugés faibles. Les VTR dans ce cas sont déterminées à partir de l'extrapolation des données expérimentales ou épidémiologiques. Cette extrapolation consiste à définir les risques liés à de faibles doses alors qu'ils sont déterminés pour les fortes doses. La principale difficulté réside dans le fait d'extrapoler le domaine observé au domaine non observé sans pouvoir vérifier la validité de ces hypothèses. A partir de ces VTR, nous déterminons les excès de risque unitaire (ERU) pour une voie d'exposition et pour un effet. Les (ERU) représentent la probabilité supplémentaire pour un individu de développer cet effet par rapport à un sujet non exposé, sachant que l'exposition étant considérée pour la vie entière. Pour la voie orale, l'ERU est exprimé en $(mg/Kg/j)^{-1}$ et pour la voie respiratoire, elle est exprimée en $(\mu g/m^3)^{-1}$.

En pratique, ces VTR figurent dans des bases de données spécialisées telle que celles de l'OMS ou de l'US-EPA. Plusieurs valeurs peuvent être proposées et les critères de choix doivent être explicites.

- **Estimation des expositions**

Selon l'NRC (1983), cette étape est le processus de mesure ou d'estimation de l'intensité, de la fréquence et de la durée de l'exposition humaine à une substance déjà présente dans l'environnement ou l'estimation des expositions potentielles pouvant apparaitre avec la mise en circulation de nouvelles substances chimiques dans l'environnement. Host. S et al (2006) ont indiqué que l'estimation des expositions est confrontée à plusieurs difficultés : les polluants sont nombreux et de natures diverses, en faibles quantités et en faibles concentrations, à des niveaux variables dans le temps et dans l'espace en plus des micro-environnements qui peuvent influencer le devenir de l'agent. Cette étape consiste à identifier les milieux contaminés, les populations exposées (type, taille), les voies d'exposition (ingestion, inhalation, contact direct) et enfin les durées et les niveaux d'exposition. Il faut donc connaitre le comportement du polluant dans l'environnement et la forme sous laquelle il peut se présenter. La prise en compte de ces paramètres individuels et environnementaux permet alors de calculer une dose journalière d'exposition (DJE) qui représente la dose reçue

par l'individu pour une substance dans un milieu et pour une voie d'exposition. La formule de l'évaluation quantitative du risque se présente comme suit :

$DJE= C_i*Q_j*F/P$

Avec C_i est la concentration dans le milieu, Q_j est la quantité de milieu pollué entrant en contact avec l'organisme, F est la fréquence d'exposition (fraction des jours par an ou bien fraction d'heures par jour) et P est le poids corporel moyenné sur la période d'exposition.

- **Caractérisation du risque sanitaire**

L'NRC (1983) a souligné que cette étape consiste à estimer dans la démarche d'ERS l'incidence des effets sanitaires dans la population en fonction des conditions d'expositions définies dans l'étape précédente. Host. S et al (2006) ont stipulé que cette dernière étape synthétise les étapes précédentes, elle exprime le risque attendu en fonction des expositions.

Pour les effets avec seuil, un ratio de danger (RD) est calculé : RD=DJE/DJA, il représente le rapport de la DJE par rapport à la DJA. Si le ratio de danger est supérieur à 1, dans cas nous pouvons affirmer la présence des effets susceptibles de se produire parmi la population exposée. Pour les effets sans seuil, nous calculons l'excès de risque individuel (ERI) qui se présente comme suit : ERI=DJE*(T/Tp)*ERU

Avec T est la durée d'exposition et Tp est le temps de pondération (la vie entière généralement égal à 70 ans). L'ERI est une probabilité, il est théoriquement compris entre 0 et 1 et sur le plan pratique il reste inférieur à 0,01 car les risques sont faibles. Cet indicateur peut être rapporté à l'effectif de la population exposée afin d'examiner l'impact. Ce calcul sera utile pour examiner la pertinence d'une prévention, d'une étude épidémiologique ou bien d'une prise en charge médicale.

2. Analyse empirique de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique pour le cas de la région de Sfax

L'objectif de cette analyse est d'étudier les liens de cause à effets à court terme entre les différents polluants atmosphériques en milieu urbain dans l'agglomération de Sfax et la fréquence des maladies cardiovasculaires et respiratoires tout en insistant sur l'influence des facteurs météorologiques dans l'intensification de l'action nocive de ces polluants.

2.1 Revue des travaux empiriques

Depuis les années quatre-vingt-dix, l'examen des effets à court terme de la pollution atmosphérique sur la mortalité et la morbidité aux niveaux actuellement observés ont fait l'objet de nombreuses recherches en santé publique et en toxicologie. Plusieurs études épidémiologiques ont établi une corrélation à court terme entre la mortalité toutes causes et pour pathologies plus spécifiques cardiovasculaires ou respiratoires et différents polluants atmosphériques. La plus part des recherches ont été fondées sur des essais multicentriques Français, Européens et Américains ainsi que sur des méta-analyses. Eilstein. D (2010) a indiqué, que la pollution atmosphérique augmente le risque relatif de nombreuses affections pulmonaires, que les enfants sont très exposés aux dangers de cette pollution en raison de l'immaturité de leur appareil respiratoire et que les particules $PM_{2.5}$ et PM_{10} amplifient la mortalité chez le nourrisson de moins d'un an. Pascal. L (2009) a affirmé que les particules fines représentent l'impact le plus élevé notamment en termes de mortalité cardiovasculaire. De plus, il existe des sous-groupes de population qui sont plus vulnérables aux effets de la pollution tels que les enfants, les personnes âgées et les personnes souffrant de pathologies aigues ou chroniques. Jusot. J.F et al (2006) ont ajouté dans une autre étude l'impact sanitaire de neuf villes Françaises, bien que ces agglomérations respectent déjà la norme à atteindre déjà en 2005 fixée à 40 $\mu g/m^3$pour les polluants en moyenne annuelle, une réduction minime du niveau des PM_{10} serait susceptible de procurer des bénéfices en termes de décès évitables aussi bien pour la mortalité toutes causes que pour la mortalité pour causes spécifiques (cardiovasculaires et respiratoires). Guillois-Becel.Y et al (2007) ont indiqué la démarche mis en œuvre à Nantes pour quantifier l'impact à long terme de la pollution atmosphérique en nombre d'années de vie perdues, ils ont confirmé l'existence d'un impact sanitaire non négligeable de la pollution atmosphérique et ont réaffirmé le rôle essentiel des expositions chroniques dans la manifestation de cet impact. L'INVS (2003), dans une analyse actualisée pour les neuf villes Françaises spécifique aux relations entre pollution, température et mortalité, a approuvé que le risque de mortalité à court terme lié à l'ozone soit légèrement augmenté en moyenne par rapport aux estimations antérieures, obtenues en l'absence de vague de chaleur. Cette étude a montré également que les excès de risque locaux sont par ailleurs plus hétérogènes entre les différentes villes et que les résultats quantitatifs de l'évaluation d'impact sanitaire doivent être considérés avec prudence. Néanmoins, il existe un impact non négligeable des niveaux de pollution photochimique observés pendant l'été 2003 sur la mortalité, par rapport aux niveaux de cette pollution observés les années précédentes. En Tunisie, les travaux relatifs à l'impact des polluants atmosphériques sur la santé humaine sont trop limités. Les études effectuées au cours des années 1990 se sont focalisées plutôt sur

la pollution et ses effets environnementaux. Nous citons le cas de Maalej. A et Rossert. A. (1997) qui ont indiqué que la région de Sfax a connu ces dernières années un développement industriel et urbain intense le long de ses zones côtières et que l'atmosphère est soumis à de fortes émissions anthropiques. Selon eux, la pollution de l'air à Sfax découle d'une interaction complexe de nombreux phénomènes de nature différente, en particulier les conditions météorologiques (vent, température, humidité, pression, nébulosité...) et les phénomènes physico-chimiques. Azri. C et al(2000) dans une étude chimique des principaux constituants de l'aérosol urbain dans trois secteurs à activités différentes de la ville de Sfax ont insisté sur l'influence des sources proches, des conditions météorologiques et de l'étendue du relief terrestre. L'étude de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique dans la région de Sfax a été établie par Gargouri. I et al (2006) qui ont discuté la faisabilité des enquêtes d'évaluation d'impact sanitaire de la pollution urbaine. Ils ont énoncé qu'il existe un lien significatif entre la pollution acido-particulaire (SO_2 et PM_{10}) et la morbidité hospitalière même si les niveaux de la pollution ne sont pas élevés, notamment les hospitalisations cardio-vasculaires et les PM_{10} et les hospitalisations respiratoires et le SO_2. Par ailleurs, Ils ont indiqué qu'il est indispensable qu'un réseau de surveillance de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique à court terme doive s'implanter dans les autres hôpitaux de Sfax et que les données météorologiques soient fournies par un grand nombre de stations afin de mieux refléter les multiples sources de la pollution de la ville. Au moment où ces données ont été collectées, il avait une seule station de mesure des polluants, aujourd'hui l'agglomération de Sfax est équipée de deux stations de mesure à enregistrement automatique des paramètres[93].

2.2 Les données sanitaires

Les données sanitaires faisant l'objet de notre étude sont les admissions hospitalières journalières pour motif cardiovasculaire (AHC) et pour motif respiratoire (AHR) de plus de 24 heures. Ces données sont recueillies à partir du service de la pneumophysiologie/ pneumo-allérgologie et du service de la Cardiologie fournies par le service de gestion des admissions hospitalières du Centre Universitaire Hospitalier (CHU) Hédi Chaker de Sfax selon une démarche administrative hiérarchisée allant de la direction de l'hôpital jusqu'au gestionnaire du service informatique. Nous avons choisi ces deux indicateurs sanitaires, parce qu'en se

93

La description des deux stations de mesure ainsi que leur emplacement géographique a été bien expliquée au niveau du deuxième chapitre précisément dans l'analyse descriptive des données environnementales relatives au gouvernorat de Sfax.

référant aux travaux empiriques antérieurs déjà réalisés, nous remarquons que la majorité des auteurs ont confirmé l'existence d'une liaison entre ces derniers et la pollution atmosphérique, particulièrement la pollution acido-particulaire (SO_4 et PM_{10}) même dans le cas de faibles doses. Les données sont fournies à l'état brute sous forme de fiche incluant, le numéro d'admission, l'index ou le numéro d'identification, le nom et prénom, la date et l'heure d'admission, le service concerné et le régime de prise en charge. Ces données sont traitées tous âges confondus à cause de l'indisponibilité des données classifiées selon la tranche d'âge et obéissant en même temps aux autres critères majeurs de l'étude à savoir les hospitalisations d'urgence pour motif cardiovasculaire ou respiratoire de plus de 24 h. Les sujets d'étude sont en majorité originaires de Sfax à concurrence de 81.38 % en 2009 et légèrement différente en 2010 soit 81.56%. En effet le CHU de Sfax est sollicité par toutes les régions du pays et surtout ceux qui sont résidents à Sidi-Bouzid, Gafsa, Kairouan et Médenine.

2.3 Les données environnementales et météorologiques

La pollution atmosphérique urbaine de l'agglomération de Sfax est représentée par : le NO_2, le SO_2, l'O_3 et les PM_{10}. Ces données sont exprimées en parties par billion (ppb) sauf les PM_{10} qui sont affichées en $\mu g/m^3$. Elles sont fournies par l'ANPE de Tunis. Les polluants émis dans l'air subissent des transformations physicochimiques à cause de l'intervention des facteurs météorologiques. Ces derniers sont essentiellement la température moyenne journalière (T) exprimée en °C, l'humidité relative (HR) en % et la vitesse de vent(VV) en m/s. Ces données sont collectées de l'INM, précisément la subdivision de Sfax à partir de la station météorologique localisée à proximité de la cité el Bahri[94]. Les polluants atmosphériques, les facteurs météorologiques ainsi que les indicateurs sanitaires sont exprimées en données journalières.

2.4 Modèle, méthodologie et résultats empiriques

Pour analyser l'impact sanitaire de la pollution atmopshérique à Sfax, nous allons procéder à l'approche de modélisation ARDL introduite par Pesaran et Shin (1999) et prolongée par Pesaran et al. (2001) en se limitant uniquement aux effets à court terme. Nous avons choisi cette procédure de cointégration parce que les variables constituant le modèle étudié ne sont pas issues du même ordre d'intégration et sont I(0) ou I(1)[95].

94

La localisation géographique de cette station de mesure a été également bien décrite au niveau du second chapitre.

2.4.1Le test de stationnarité

La première étape de la démarche économétrique est l'étude de la stationnarité des variables afin d'investiguer les propriétés stochastiques des séries suivantes : AHC, AHR, NO_2, SO_2, O_3, PM_{10}, T, HR et VV en analysant leur ordre d'intégration**.** Pour rendre stationnaires les séries ci-dessus, nous faisons recours au test de Dickey-Fuller Augmenté (ADF, 1981) et de Phillips-Perron (PP, 1988).

Tableau 3.4- Test d'ADF

Les variables	Test d'ADF en niveau			Test d'ADF en première différence			résultat
	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	
AHC		-4.89***					I(0)
AHR		-2.72***					I(0)
NO_2			0.89***			-19.97***	I(1)
SO_2	-5.11***						I(0)
O_3		- 4.42***					I(0)
PM_{10}		-5.86***				-18.71***	I(1)
T		-2.48**				-15.45***	I(1)
HR	-9.62***						I(0)
VV		-11.75***					I(0)

*, **, ***, signifient la significativité au seuil de 10%, 5% et 1% respectivement.

Tableau 3.5- Test de PP

Les variables	Test de PP en niveau			Test de PP en première différence			résultat
	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	
AHC	-20.18***						I(0)
AHR	-15.56***						I(0)
NO_2	-2.13***					-33.81***	I(1)
SO_2	-13.55***						I(0)

L'explication de cette procédure ainsi que les conditions de son emploi ont été bien expliquées au premier et deuxième chapitre.

O_3			0.15^{***}			-44.13^{***}	I(1)
PM_{10}		-12.76^{***}					I(0)
T		-2.58^{**}				-28.74^{***}	I(1)
HR	-9.63^{***}						I(0)
VV		-11.80^{***}					I(0)

*, **, ***, signifient la significativité au seuil de 10%, 5% et 1% respectivement.

Nous constatons que la majorité des variables sont stationnaires en niveau, en revanche il y'a trois variables selon le test d'ADF et de PP qui sont I(1).

2.4.2 Représentation du modèle

Le modèle générique de la procédure ARDL se présente de la façon suivante ci-dessous pour les deux cas, c'est-à-dire où nous étudions l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique sur les maladies cardiovasculaires et sur les maladies respiratoires.

$$\Delta Y_t = \beta 0 + \sum_{i=1}^{n} \Delta\beta_{1i} X_{t-i} + \sum_{i=1}^{n} \beta_{2j} Z_{t-j} + \mu t \quad (1)$$

Avec Y_t représente les AHC ou bien les AHR selon le cas, les X_{t-i} représentent les variables explicatives en différence retardées de ''n'' retards à savoir les polluants NO_2, SO_2O_3, PM_{10}, ainsi que les facteurs météorologiques T, HR et VV et Z t-j représentent les mêmes variables explicatives en niveau retardées de 'j' périodes (soit j=1) afin de mettre l'accent sur les effets des polluants sur la santé humaine à court terme uniquement. Les coefficients β_{1i}permettent de capturer les effets à court terme tandis que les coefficients β_{2j} permettent de saisir les effets de long terme.

2.4.3 Le test de Wald

Le test de Wald est un test paramétrique économétrique utilisé pour tester la vraie valeur du paramètre basé sur l'estimation de l'échantillon. Ce test permet de tester l'hypothèse nulle selon laquelle les coefficients des variables retardées en niveau sont nuls. Les résultats du test de Wald sont représentés dans le tableau 3.6 ci-dessous.

Tableau 3.6

	AHC est la variable endogène	AHR est la variable endogène	AHC est la variable endogène	AHR est la variable endogène

La statistique du test	valeur		Probabilité	
F-statistique	47.45	19.97	0.000	0.000

Nous remarquons que la probabilité 'p' dans les deux cas est inférieure à la valeur statistique au seuil de significativité 1%, d'où nous rejetons (H_0) et nous déduisons qu'il existe des relations de long terme entre les différentes variables du modèle.

2.4.4 Le test de valeur limite d'ARDL

Au niveau de ce test, nous faisons référence aux valeurs critiques asymptotiques énoncées par Narayan. P.K (2005). Les résultats du test ARDL sont rapportés dans les tableaux 3.7 et 3.8 ci-dessous.

Tableau 3.7- Cas où AHC est la variable endogène

Variable avec constante et sans tendance	Nombre de retard optimal	F-statistique	probabilité	résultat
AHC est la variable endogène	6	47.45***	0.000 (1%)	cointégration

Les valeurs critiques asymptotiques	1%		5%		10%	
	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)
>80	3.457	4.943	2.627	3.864	2.236	3.381

Tableau 3.8- Cas où AHR est la variable endogène

Variable avec constante et sans tendance	Nombre de retard optimal	F-statistique	probabilité	résultat
AHR est la variable endogène	6	20.296***	0.000 (1%)	cointégration

Les valeurs critiques asymptotiques	1%		5%		10%	
	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)
>80	3.457	4.943	2.627	3.864	2.236	3.381

*,** et *** dénotent la significativité au seuil de 10% , 5% et 1% respectivement.

Les valeurs critiques asymptotiques sont obtenues à partir de Narayan.PK (2005), p. 1988

Nous constatons que dans les deux cas de figure, la valeur statistique calculée est supérieure à la borne supérieure au seuil de 1%., d'où la présence d'une relation de cointégration à long terme.

2.4.5La spécification du modèle

Les tableaux 3.9 et 3.10 ci-dessous récapitulent toutes les variables en niveau et en différence retardées ainsi que les coefficients correspondants.

Tableau 3.9- Cas où AHC est la variable endogène

	Les coeffecients	les coefficients normalisés	probabilité
AHC (-1)	-1,028967	-1	0.0000***
d HR (-1)	0,011525	0,011200554	0.7166
d T(-1)	-0,011108	-0,010795293	0.9216
d VV (-1)	0,197533	0,191972143	0.5031
d NO_2 (-1)	-0,006468	-0,006285916	0.8628
dO_3 (-1)	-0,049551	-0,048156063	0.4449
dSO_2 (-1)	0,135705	0,131884696	0.0096***
dPM_{10} (-1)	-0,004479	-0,004352909	0.6462
C	8,96457	8,712203598	0.0047***
d HR (-2)	0,008102	0,007873916	0.7876
d T(-2)	0,020568	0,019988979	0.8539
d VV(-2)	0,094145	0,091494674	0.7394
d NO_2 (-2)	0,0206	0,020020078	0.6097

d O3(-2)	-0,028526	-0,027722949	0.6639
d SO_2 (-2)	0,171484	0,166656462	0.0008***
d PM_{10} (-2)	-0,013376	-0,012999445	0.1556
d HR(-3)	0,010897	0,010590233	0.7130
dT(-3)	-0,10557	-0,102598043	0.3619
d VV(-3)	-0,237879	-0,231182341	0.3657
d NO_2 (-3)	0,049919	0,048513704	0.2270
d O_3 (-3)	0,086691	0,084250515	0.1889
d SO_2 (-3)	0,10494	0,101985778	0.0251**
d PM_{10} (-3)	-0,012144	-0,011802128	0.1897
d HR(-4)	0,023145	0,022493433	0.4173
dT(-4)	-0,044051	-0,042810897	0.7016
d VV(-4)	-0,07988	-0,077631255	0.7402
d NO_2 (-4)	0,016346	0,015885835	0.6916
d O_3 (-4)	0,001336	0,00129839	0.9837
d SO_2 (-4)	0,113336	0,110145418	0.0064***
d PM $_{10}$(-4)	-0,01487	-0,014451387	0.0879*
d HR (-5)	0,005228	0,005080824	0.8453
dT (-5)	-0,032693	-0,031772642	0.7647
dVV(-5)	-0,103355	-0,100445398	0.6314
d NO_2 (-5)	0,011141	0,010827364	0.7939
d O_3 (-5)	0,056618	0,055024116	0.3566
d SO_2 (-5)	0,099633	0,096828178	0.0042***
dPM_{10} (-5)	-0,002024	-0,001967021	0.7943
d HR (-6)	-0,014447	-0,014040295	0.5614
dT (-6)	-0,080878	-0,07860116	0.4580
dVV(-6)	-0,201149	-0,195486347	0.2877
d NO_2 (-6)	0,023606	0,022941455	0.5519
d O_3 (-6)	0,042173	0,040985765	0.4571
d SO_2 (-6)	0,035749	0,034742611	0.2318
d PM_{10} (-6)	-0,004178	-0,004060383	0.5184

R^2=0.55

Le coefficient de la variable expliquée retardée AHC (-1) est négatif et fortement significatif, donc cela vient de confirmer qu'il y'a un retour à l'équilibre à long terme. A partir du tableau 3.9 ci-dessus, nous constatons que les quantités de SO_2 émises avant une journée commencent à avoir un effet nocif sur la santé des patients à Sfax, l'absorption d'une unité de SO_2 la veille entraine l'augmentation de 0.131 les AHC. Cet impact est persistent et les quantités inhalées de ce polluant même avant cinq jours participent significativement à la manifestation des maladies cardiovasculaires. Ce constat montre que le SO_2 à un effet persévérant sur les maladies cardiovasculaires qui ne se dégage pas facilement.

Tableau 3.10- Cas où AHR est la variable endogène

les variables	les coeffecients	les coeffecients normalisés	la probabilité
AHR(-1)	-0,629053	-1	0,000
HR (-1)	-0,022628	-0,035971532	0,4576
T(-1)	-0,061824	-0,098281067	0,2695
VV(-1)	0,28062	0,446099136	0,3796
NO_2(-1)	-0,0268	-0,042603723	0,0435
SO_2(-1)	-0,142609	-0,226704268	0,0124
O_3(-1)	-0,028379	-0,045113846	0,5144
PM_{10}(-1)	0,017546	0,027892721	0,0782
C	6,671197	10,60514297	0,0484
d H(-1)	0,016494	0,026220366	0,6265
d T(-1)	0,017837	0,028355321	0,8823
d VV(-1)	-0,253299	-0,402667184	0,4211
d NO_2(-1)	0,02299	0,036547	0,5659
d SO_2(-1)	0,151743	0,241224507	0,0072
dO_3(-1)	0,043864	0,069730214	0,5244
dPM_{10}(-1)	-0,020079	-0,031919409	0,0549
dH(-2)	0,045814	0,072830111	0,1538
dT(-2)	0,12064	0,191780343	0,3121
dVV(-2)	0,011027	0,017529525	0,9709
d NO_2(-2)	-0,003278	-0,005211008	0,9394
dSO_2(-2)	0,137962	0,219316973	0,0117
dO_3(-2)	0,013326	0,021184225	0,849
d$PM_1$0(-2)	-0,020055	-0,031881256	0,0477
dH(-3)	0,027927	0,044395305	0,3777
dT(-3)	-0,108394	-0,172312985	0,381
dVV(-3)	-0,10986	-0,174643472	0,6952
dNO_2(-3)	0,002094	0,003328813	0,9621
dSO_2(-3)	0,057667	0,091672721	0,2495
dO_3(-3)	0,162814	0,258823978	0,0211
dPM_{10}(-3)	-0,016827	-0,026749733	0,0906
dH(-4)	0,023495	0,037349794	0,4406
dT(-4)	-0,050991	-0,081059942	0,6776
dVV(-4)	-0,01096	-0,017423015	0,966

$dNO_2(-4)$	-0,010639	-0,016912724	0,8086
$dSO_2(-4)$	0,082595	0,131300542	0,0621
$dO_3(-4)$	0,03383	0,053779252	0,6275
$dPM_{10}(-4)$	-0,010077	-0,016019318	0,2802
dH(-5)	0,005311	0,00844285	0,8526
dT(-5)	0,0753	0,119703745	0,5184
dVV(-5)	-0,474819	-0,754815572	0,0395
$dNO_2(-5)$	0,072699	0,115568958	0,1111
$dSO_2(-5)$	0,016464	0,026172675	0,6555
$dO_3(-5)$	0,089943	0,142981593	0,1706
$dPM_{10}(-5)$	-0,005032	-0,007999326	0,5436
dH(-6)	0,028786	0,04576085	0,2784
dT(-6)	-0,031714	-0,050415466	0,7852
dVV(-6)	-0,075621	-0,120214036	0,7086
$dNO_2(-6)$	-0,025904	-0,04117936	0,5428
$dSO_2(-6)$	-0,006377	-0,010137461	0,8405
$dO_3(-6)$	0,028992	0,046088326	0,6322
$dPM_{10}(-6)$	-0,005785	-0,009196363	0,4023

R^2= 38.05%

*,** et *** dénotent la significativité au seuil de 10% , 5% et 1% respectivement.

A partir du tableau 3.10 ci-dessus, nous remarquons que le SO_2 a un effet positif et significatif sur la fréquence des maladies respiratoires. Cet impact commence à se manifester après une journée de l'absorption des quantités plus au moins importantes de SO_2et la nocivité de ce polluant peut subsister même quatre jours dans le corps et affecter les voies respiratoires et pulmonaires. En effet, le SO_2 est rapidement absorbé par les surfaces humides de la bouche, du nez, du pharynx et seule une très faible fraction parvient aux poumons. L'absorption d'une unité de SO_2 entraine l'augmentation de 0.241 cas les AHR à partir de vingt-quatre heures et de 0.131 cas des AHR après quatre-vingt-seize heures, donc la réaction du corps vis-à-vis de ce polluant s'atténue avec le temps. Nous remarquons également que l'ozone met trois jours pour intervenir dans l'intensification des maladies respiratoires. De même, les facteurs météorologiques et précisément la vitesse de vent agit négativement sur les AHR, cela trouve son explication par le fait que lors d'un vent à une faible vitesse, les polluants stagnent engendrant une stabilisation et concentration de la pollution voire une dégradation de la qualité de l'air. Un vent à vitesse dérisoire qui domine pendant cinq jours consécutifs amplifie les AHR de 0.754.

2.4.6 Test de causalité de Granger

Le test de causalité de Granger (1969) considère qu'une variable est causée par une autre dès lors qu'il existe des informations dans le passé de l'une qui soient utiles dans la prévision de

l'autre et qui ne sont pas déjà contenues dans son passé. Nous insistons à ce niveau sur l'effet de causalité à court terme entre les variables expliquées (AHC, AHR) et les différentes émissions polluantes ainsi que les interactions entre les facteurs météorologiques et les différents polluants et finalement entre les polluants eux-mêmes. L'hypothèse nulle du test de causalité stipule l'absence d'une causalité. Nous avons introduit toutes les variables différenciées afin d'éliminer l'effet de long terme et se focaliser uniquement sur l'effet de court terme.

Tableau 3.11- Les résultats du test de causalité de Granger dans le cas où les AHC est la variable expliquée

Les variables	F-statistique	Probabilité
d T ⟶ d AHC	2.04	0.028
dSO_2 ⟶ d AHC	2.17	0.018
d H R ⟶ d NO_2	2.90	0.001
d H R ⟶ d O_3	2.01	0.031
dvv ⟶ d NO_2	3.02	0.001
dvv ⟶ d O_3	2.15	0.019
dvv ⟶ d PM_{10}	2.20	0.016
dO_3 ⟶ d NO_2	1.69	0.080
d NO_2 ⟶ d O_3	1.71	0.074

L'analyse de la causalité de Granger a montré que la température agit sur la fréquence de l'apparition des maladies cardiovasculaires. De même, la vitesse de vent et l'humidité relative interviennent dans la dispersion de NO_2 et O_3. Nous constatons également la présence d'une causalité bidirectionnelle entre O_3 et NO_2 qui est conforme à la réaction chimique de piégeage de l'ozone entre ces deux facteurs[96].

Tableau 3.12- Les résultats du test de causalité de Granger dans le cas où les AHR est la variable expliquée

Les variables	F-statistique	Probabilité
d O_3 ⟶ d AHR	2.17	0.028

96
Ce phénomène chimique a été bien expliqué au chapitre 2.

d VV ⟶ d HR	1.97	0.048
d H R ⟶ d NO_2	3.52	0.000
d H R ⟶ d PM_{10}	2.15	0.029
dvv ⟶ d NO_2	3.59	0.000
dvv ⟶ d O_3	2.40	0.0154
dvv ⟶ d PM_{10}	2.62	0.008
dO_3 ⟶ d NO_2	1.98	0.047
d NO_2 ⟶ d O_3	2.00	0.044
d SO_2 ⟶ d O_3	3.55	0.000
dO_3 ⟶ d SO_2	4.56	$2.5 * 10^{-5}$
d PM_{10} ⟶ d SO_2	15.14	0.000
d SO_2 ⟶ d PM_{10}	3.05	0.002

Selon le tableau 3.12 ci-dessus, nous constatons que le test de causalité vient confirmer l'importance relative de l'ozone dans la manifestation des maladies respiratoires et également sur les autres polluants atmosphériques. En effet, il existe une causalité bidirectionnelle entre l'ozone et le NO_2, ce phénomène chimique trouve son explication par la réaction de l'ozone avec les composés azotés où il oxyde le monoxyde d'azote (NO) en NO_2 qui, à son tour oxyde l'ozone en nitrate (NO_3)[97]. Nous constatons également la présence d'une causalité bidirectionnelle entre l'ozone et le SO_2 expliquant ainsi que l'ozone réagit avec les composés soufrés. En effet, en phase gazeuse, l'ozone réagit avec le sulfure d'hydrogène pour former le SO_2[98]. Une causalité bidirectionnelle est détectée également entre les PM_{10} et le SO_2. Selon l'INERIS (2009), les effets sanitaires des particules en suspension sont souvent associés à ceux de SO_2 dont la transformation peut engendrer des sulfates, ces derniers contenus dans les particules sous forme de sels et d'acides sont des irritants respiratoires actifs qui entrainent une altération de la fonction respiratoire, des crises d'asthme et des bronchites chroniques à long terme. Nous nous apercevons également que les facteurs météorologiques et

97
(NO_{+} O_{3} = NO_2+O_2) et (NO_2+$O_{3=}$ NO_3+O_2)
98
(H_2S+$O_{3=}$ SO_2+H_2S)

essentiellement la vitesse de vent et l'humidité relative causent significativement la distribution de NO_2, de PM_{10} et d'O_3.

Conclusion

L'analyse de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique dans le gouvernorat de Sfax a montré l'évidence de l'association entre les émissions de $S0_2$ et d'O_3et la morbidité pour motif cardiovasculaire et pour motif respiratoire. Les maladies cardiovasculaires sont affectées spécialement par le SO_2 tandis que les maladies respiratoires sont corrélées avec le SO_2 et l'ozone également. Ce résultat s'aligne en partie avec l'étude de Liang. W.M et al (2009), qui ont examiné les effets des polluants émis dans l'atmosphère sur la mortalité. Ils ont indiqué qu'il existe une association significative entre l'ozone et les maladies respiratoires sans différenciation d'âge. Ils ont déduit également que la mortalité pour motif cardiovasculaire en période froide est corrélée avec les niveaux de SO_2, de CO et de NO_2 tous âges confondus et avec les PM_{10} pour le groupe de personnes âgés de plus de soixante-cinq ans. Pascal. L(2009) a indiqué que l'ozone inhalé entraine l'inflammation des voies respiratoires qui s'accompagne d'une hyperréactivité bronchique et d'une libération de médiateurs pouvant provoquer des lésions du tissu pulmonaire. Spannhake. E.W et al (2002) ont souligné que l'ozone peut augmenter l'inflammation des voies respiratoires provoquée par une infection virale et favorisant la libération de cytokines pro-inflammatoires[99] par les cellules infectées. Gryparis. A et al (2004) dans une analyse d'expositions contrôlées à l'ozone ont mis en évidence une baisse réversible et un changement de la sensibilité individuelle. L'exposition à l'ozone peut entrainer plusieurs symptômes respiratoires, accroitre la fréquence des crises d'asthme et amplifier une maladie respiratoire chronique. Nous constatons par ailleurs que la vitesse de vent affecte la distribution des polluants particulièrement le NO_2, le SO_2 et les PM_{10}. La température influence à son tour les admissions hospitalières pour motif cardiovasculaire. Une interdépendance est détectée entre l'O_3 et le NO_2 qui peut être expliquée par le phénomène chimique de piégeage de l'ozone. Nous remarquons ainsi que les résultats empiriques dans ce contexte sont mitigés et parfois non significatifs. Cela peut être expliqué par le fait que la manifestation de maladies jugées corrélées avec la pollution atmosphérique tels que les maladies respiratoires et cardiovasculaires ne dépend pas uniquement de la dose de polluant

99

La cytokine pro-inflammatoire est une molécule sécrétée par un grand nombre de cellules, en particulier les lymphocytes (globules blancs intervenant dans l'immunité cellulaire) et les macrophages (cellules de défense de l'organisme chargées d'absorber des particules étrangères) et impliquée dans le développement et la régulation des réponses immunitaires.

inspiré généralement faible mais aussi de l'interdépendance d'autres facteurs tels que les habitudes de la vie quotidienne (l'alcool, le tabac, le régime alimentaire, le lieu de travail fortement pollué), la saison de l'étude (froide ou chaude) et l'âge de la population concernée. De plus, lorsque nous considérons les populations sensibles telles que les enfants, les personnes âgées ainsi que les personnes souffrant déjà de maladies particulières, nous aboutissons également à des résultats différents. Salines. G (2009) a ajouté à ce propos qu'il demeure exceptionnel qu'un facteur environnemental soit, comme dans le modèle infectieux, la seule cause d'une maladie particulière. L'exception selon lui est le mésothéliome[100] dû à l'exposition aux fibres d'amiante, plus souvent rencontrée en milieu de travail que dans l'environnement général. Il est même rare qu'un facteur environnemental soit une cause largement dominante comme dans le modèle tabac-cancer du poumon. La situation la plus fréquemment rencontrée est celle de maladies chroniques causées par une multiplicité de facteurs de risque peu spécifiques, contribuant pour une part modeste à l'incidence. De même, il existe une difficulté à connaître avec précision les expositions environnementales tout au long de la vie des personnes, expliquant ainsi que le domaine de la santé environnementale est toujours dominé par l'incertitude. Il est certain que la surveillance en santé environnementale est jugée de plus en plus indispensable de nos jours. Cette dernière à l'encontre d'autres surveillances de santé publique n'a pas pour objectif de contrôler l'occurrence de maladies d'un certain type (maladies chroniques, maladies infectieuses) ou survenant dans une catégorie particulière de la population (populations défavorisées, travailleurs), mais elle dérive d'un domaine complexe faisant appel à deux disciplines différentes à savoir l'environnement et la santé.

C'est ainsi que les autorités Tunisiennes et évidemment les organismes concernés tels que le ministère de l'environnement à travers ses organismes notamment ; l'ANPE, l'agence nationale de gestion des Déchets (LANGED), l'Observatoire tunisien de l'environnement et du développement durable (OTEDD), le centre international des technologies de l'environnement de Tunis (CITET) et le ministère de la santé, doivent intervenir pour l'établissement d'un réseau de surveillance des effets sanitaires à court terme de la pollution atmosphérique dans tous les hôpitaux des différents gouvernorats et à l'hôpital de Sfax également.

---

100 Est une forme rare et virulente de cancer qui affecte le revêtement des poumons, la cavité abdominale ou l'enveloppe du cœur.

Cette procédure doit faire appel à des spécialistes de domaines multidisciplinaires tels que les épidémiologistes, les toxicologues, les météorologistes, les écologistes et les économistes afin de déceler et de prévenir les effets sanitaires à court terme de la pollution de l'air en milieu urbain et préurbain et implanter des systèmes de prévention capables d'atténuer ou plutôt de maitriser les effets pervers de cette pollution sur la santé humaine. Actuellement, il existe en Tunisie l'observatoire national des maladies nouvelles et émergentes (ONMNE) qui a démarré son activité en 2008 dont la mission principale est la veille sanitaire épidémiologique, parmi ses objectifs figure la veille environnementale mais elle n'est pas encore bien concrétisée sur le plan réel. Par ailleurs, Un rapport a été élaboré en 2010 en collaboration entre l'ANPE et l'INS dont le but est d'échanger les informations de nature environnementale afin de les explorer pour l'introduction d'un système d'information environnementale partagé et élargi (SEIS) en Tunisie. Ce rapport a été fondé sur les trois thématiques fixées au cours de la réunion de consultation tenue à Bruxelles en Novembre 2010 et notamment : l'eau fraiche et marine et eaux usées, la gestion des déchets et les émissions industrielles. Ce réseau favorise notamment l'échange d'informations entre les différentes institutions et précisément le ministère de la santé ainsi que l'ANPE dans le cadre de la lutte contre la pollution de l'air.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Cette thèse répond à un double objectif, elle s'est concentrée d'une part sur le rôle joué par l'énergie dans le développement industrielle et économique de l'humanité et d'autres parts sur les retombées de son usage sur l'environnement et l'état de santé des individus. Elle a mobilisé une approche multidisciplinaire qui fait appel à plusieurs disciplines en même temps telles que l'économie de l'énergie, l'économie de l'environnement et la santé. Elle a élaboré et exploité une base de données diversifiée, objective relative à la région de Sfax, qui a été utilisée pour l'analyse empirique et microéconomique adoptée à chaque niveau.

Le cheminement suivi pour argumenter cette thèse nous a amenés à constituer trois chapitres. Dans chaque chapitre, nous avons essayé de prouver dans un premier temps le positionnement théorique de chaque axe de recherche et fonder nos hypothèses de recherches. Dans un deuxième temps nous avons analysé empiriquement ces dites assomptions.

L'énergie a certes joué un rôle important dans la progression de l'humanité et reste toujours un facteur crucial pour son développement, mais les dommages qu'elle a engendrés sur l'environnement et la santé des individus sont innombrables et difficile à identifier.

Au niveau du premier chapitre, nous avons particulièrement apprécié le rôle que l'énergie a préoccupé dans le développement économique des nations. Suite à notre analyse empirique, deux résultats principaux sont annoncés, d'abord, la présence d'un effet de long terme entre la consommation de l'énergie et le développement économique dans la région de Sfax impliquant ainsi sa dépendance économique à l'énergie, ensuite, l'existence d'une relation de causalité unidirectionnelle partant de la consommation de l'énergie vers la croissance économique renvoyant à l'importance de la politique énergétique fixée à chaque stade étant donné que son impact sera immédiat et irréversible. Cependant les perturbations qui peuvent se produire parfois dans la chaine de la production de l'énergie peuvent à leur tour inhiber cette croissance.

Dans un deuxième chapitre, nous nous sommes intéressés à étudier l'autre face de la consommation de l'énergie c'est-à-dire les implications de son usage sur la détérioration de la qualité de l'environnement. Trois points sont mis en valeur, premièrement, la ville de Sfax a connu pendant ces dernières années une extension urbaine et industrielle intense qui a développé le réseau du trafic routier. Par conséquent l'intensification des émissions anthropiques a provoqué une grande pression sur l'atmosphère et a développé le phénomène

de la pollution atmosphérique. Deuxièmement, la consommation de l'énergie provoque l'émission des polluants suivants : $PM_{10,}$ SO_2 et NO_2. Ces GES proviennent essentiellement du trafic routier, des activités industrielles, des sidérurgies, des fonderies et des cimenteries et surtout de la combustion des énergies non renouvelables. Ces dernières sont engagées pour la production de l'électricité à Sfax bien que la STEG se sert en grande partie du gaz naturel, qui n'est pas trop polluant en comparaison avec les autres énergies fossiles. De même, la part des énergies renouvelables dans la production de l'électricité est jugée toujours faible. Toutefois, la présence de l'O_3 troposphérique dans l'air n'est pas subordonnée à la consommation de l'énergie mais plutôt aux réactions photochimiques impliquant le NO_2 et l'oxygène sous l'effet des rayons solaires ultra-violets. Finalement, les facteurs météorologiques et surtout la température et l'humidité relative agissent sur la dispersion des polluants et leur accumulation autour de leurs sources d'émissions.

Le dernier chapitre s'est focalisé sur l'analyse de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique. Adapté au contexte de la région de Sfax, trois constats principaux sont détectés. Tout d'abord, une association est relevée entre les émissions de $S0_2$ et les maladies cardiovasculaires ainsi que les maladies respiratoires d'une part, et entre l'ozone et les maladies respiratoires d'autre part.

Ensuite, une corrélation est justifiée entre l'ozone te le NO_2 qui confirme la réaction chimique de piégeage de l'ozone déjà indiquée. Enfin, nous avons déduit que la vitesse de vent impacte la distribution des polluants principalement le NO_2, le SO_2 et les PM_{10}. La température affecte à son tour les admissions hospitalières pour motif cardiovasculaire. Nous avons également remarqué au niveau de ce chapitre que les aboutissements dans ce domaine sont assez diversifiés, cela est dû essentiellement à l'influence d'autres facteurs tels que les comportements habituels de la vie quotidienne, la saison d'étude, ainsi que la sensibilité de la population étudiée.

D'où le fait de ne pas considérer au niveau de la constitution de notre base de données la population sensible, particulièrement les personnes âgées ou souffrant d'une autre maladie ou encore les enfants, peut être considérée comme une limite et rend l'information moins exhaustive. Nous avons également espérer décortiquer les séries chronologiques relatives à ce dernier chapitre en saison d'étude, c'est-à-dire en faisant la différence entre la période chaude et la période froide pour mettre en relief l'importance de la variation du climat sur la manifestation de certaines maladies sanitaires. Ces insuffisances ne sont pas volontaires, mais

sont plutôt liées à la non disponibilité de telles données surtout lorsqu'il s'agit d'un contexte régional bien ciblé comme le nôtre.

Ces trois chapitres ont abouti à des conclusions qui restent exclusives à leurs contextes spécifiques mais cela n'empêche pas également de reconstituer ces résultats pour affirmer une réalité selon laquelle, l'énergie est un élément essentiel à la croissance et l'expansion économique de toutes les nations qui se justifie à chaque stade des processus de production industrielle ou énergétique, sa présence occupe tous les domaines et secteurs sans exception. Cependant, cette forte exploitation de l'énergie depuis des décennies et particulièrement des énergies fossiles épuisables et fortement polluantes a ancré sa trace sur le climat régional et mondial et a engendré des effets néfastes qui ont envahi tous les compartiments de la planète terre. Le changement climatique actuel et futur est sans équivoque, il est caractérisé par ses fortes nuisances présentes et anticipées qui touchent toute la chaine de subsistance de l'être humain y compris sa santé et son bien-être. La situation se complique encore quand il s'agit d'évolutions relativement rapides qui rendent l'acclimatation ainsi que l'adaptation progressive des écosystèmes et des sociétés encore plus aigües. La seule issue aujourd'hui est d'agir rapidement pour éviter le pire et sauvegarder l'environnement pour les générations futures. Les associations et organisations mondiales et régionales doivent doubler leurs efforts pour au moins ne pas amplifier cette nuisance universelle. Il ne faut plus penser à l'environnement propre comme un atout ou un luxe réservé aux pays riches et que les pays à revenus moyens et faibles n'ont pas le droit de jouir d'une vie saine dans un environnement sain comme l'annonçait la théorie de la durabilité faible. Aujourd'hui, l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé des citoyens est une certitude. Qu'ils vivent en milieu urbain ou en milieu rural, personne n'est à l'abri. Ces constatations mènent à penser que le recours aux énergies renouvelables est une priorité mondiale et que le principe de développement durable est une nécessité pour tous les pays et toutes les régions.

Mais la question qui se pose à ce niveau : est ce que les énergies renouvelables sont toujours propres et ne sont pas émetteurs des GES ?

Certains scientifiques et dirigeants européens ont exprimé leur profonde préoccupation au sujet des émissions de CO_2 provenant de l'utilisation des énergies renouvelables et surtout de la biomasse. Le Parlement européen en 2011 a déclaré que les règles de calcul des émissions de carbone provenant de la biomasse devraient être révisées.

Cette controverse mérite d'être mieux approfondie afin de déceler les différents enjeux et risques dissimilés derrière l'usage des énergies renouvelables considérées jusqu'à présent comme le meilleur remède aux énergies fossiles épuisables et à forte pollution.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- Abosedra, S. et Baghestani,H., (1991),"New evidence on the causal relationship between United states energy consumption and gross national product ",Journal of Energy and Development, vol14, pp.285-292.
- Adelman,M.A., (1986), "Scarcity and world oil Prices, The Review of Economics and Statistics", vol 68, pp.387-397.
- Adelman, M.A., (1990), "Mineral depletion with special reference to petroleum", The Review of Economics and Statistics, vol 72, pp.1-10.
- Afroz, A., Hassan, M. N. et Ibrahim, N.A., (2003), "Review of air pollution and health impacts in Malaysia, Environmental Resaearch, vol 92, pp.71-77.
- Aga, E., Samoli, E., Touloumi, G. et al., (2003), "Short term effects of ambient particles on mortality in the elderly: results from 28 cities in the APHEA2 project", European Respiratory Journal, vol 21, pp.28-33.
- Akarca, A.T. et Long, T.V., (1980), "On the relationship between energy and GNP: a reexamination", Journal of Energy and Development, vol 5, pp. 326-331.
- Alary, R., Donati, J. et Viellard, H., (1994), "La pollution automobile à Paris: influence du trafic et des conditions météorologiques", Revue de la Pollution Atmosphérique, vol 141, pp.55-65.
- Altinay, G. et Karagol, E., (2004),"Structural break, unit root, and the causality between energy consumption and GDP in Turkey", Energy Economics, vol 26, pp.985-994.
- Altinay, G. et Karagol, E., (2005), "Electricity consumption and economic growth: evidence from Turkey", Energy Economics, vol 27, pp.849–856.
- Ambapour, S. et Massamba, C., (2005),"Croissance économique et consommation d'énergie au Congo : une analyse en termes de causalité ", Bureau d'application des méthodes statistiques et informatiques DT 12/2005 BAMSI.
- Ammar, S.(2010). ''Etude de l'influence de l'interaction des polluants atmosphériques d'origines fixe et mobile sur la qualité de l'air : Cas de Sfax ''. Mémoire de Mastère : Géologie. Sfax : Université de Sfax,84 p.
- Anderson, H.R., (2009), "Air pollution and mortality: a history", Atmospheric Environment, vol43, pp.142-152.
- Ang, J.B.,(2007),"Emissions, energy consumption, and output in France, Energy Policy", vol 35, pp. 4772-4778.
- Ang, J.B., (2008), "Economic development, pollutant emissions and energy consumption in Malaysia", Journal of Policy Modeling, vol 30, pp. 271–278.
- Araujo, C., Brun, J.F et Combes, J. L. (2008). Econométrie. France : Bréal, 312 p.
- Arrow, K., Bolin, B., Costanza, R. et al., (1995),"Economic growth, carrying capacity and the environment", Science, vol 128, pp.520-521.
- Asafu-Adjaye, J., (2000),"The relationship between energy consumption, energy prices and economic growth: time series evidence from Asian developing countries", Energy Economics, vol 22, pp.615–625.

- Azri, C., (2000). Contribution des sources mobiles et fixes à la pollution atmosphérique dans la région de Sfax (Tunisie). Thèse de doctorat. Tunis : université de Tunis II, 239 p.
- Azri, C., Mallej, A. et Medhioub, K., (2000),"Etude de de la variabilité des constituants de l'aérosol dans la ville de Sfax (Tunisie) ", Pollution Atmosphérique, vol 165, pp.121-129.
- Ballester, F., Saez, M., Perez-Hoyos, S. et al., (2002), "The EMECAM project: a multicentre study on air pollution and mortality in Spain: combined results for particulates and for sulfur dioxide", Occupational and Environmental Medicine, vol 59, pp.300-308.
- Baterson, J.F., et Schwartz, J., (2004),"Who is sensitive to the effects of particulate air pollution on mortality? A case crossover analysis of effects modifiers", Epidemiology, vol 15, pp.143-149.
- Barnett, H.J. et Morse, C.(1963). Scarcity and growth: the economics of natural resource availability. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Barnett, H.J. (1979). Scarcity and Growth Revisited. In Scarcity and Growth Reconsidered. Baltimore: Johns Hopkins University Press for Resources for the Future, pp. 163–217.
- Baumol, W., and Oates, W. (1975). The theory of environmental Policy: externalities, Public outlays and the quality of life, Prentice-Hall, Engelwood Cliffs.
- Baumol, W., (1982), "Contestable Markets: an Uprising in the Theory of Industry Structure", American Economic Review, vol 72, pp. 1-15.
- Baumol, W., Panzar, J., et Willig, R. (1982). Contestable Markets and the Theory of Industry Structure. New York: Harcourt Brace Jovanovich, 510 p.
- Beckerman, W., (1992), "Economic growth and the environment: Whose? Whose environmental?", World Development, vol 20, pp.481-496.
- Belloumi, M., (2009), "Energy consumption and GDP In Tunisia: cointegration and causality analysis", Energy Policy, vol 37, pp.2745-2753.
- Bell, M.L., Dominici, F. et Samet, J.M, (2005)," A meta-analysis of time-series studies of ozone and mortality with comparison with the National Mortality -Morbidity Air Pollution Study", Epidemiology, vol 16, pp 436- 445.
- Bennasr, A., (2005), "Aménagement urbain durable et gouvernance: Le cas de Sfax". Colloque international: Les villes au défi du développement durable: quelle maitrise de l'étalement urbain et des ségrégations associées ?, Université de Sfax (Tunisie), le laboratoire SYFACTE et l'université du Maine, l'UMR 6590 ESO CNRS Le Mans., 24-25/11/2005, Sfax (Tunisie), 15 p.

- Béral-Guyonnet, I., (1996), “Influence des facteurs météorologiques sur la pollution atmosphérique. Le cas de l’agglomération Lyonnaise“, Revue de géographie de Lyon, vol71, pp.71-77.
- Biggeri, A., Baccini, M., Bellini, P. et al., (2005),“Meta-analysis of the Italian studies of short-term effects of air pollution 1990–1999 (MISA)”, International Journal of Occupational and Environmental Health, vol11, pp.107-122.
- Bimonte, S., (2002),“Information acces, income distribution, and the environment Kuznets Curve“, Ecological Economics, vol 41, pp.145-156.
- Boutard, A., Brodhag, C., et Gondran, N., (2004),“Lorsque le développement perd le Nord !courbes de Kuznets environnementales : l’apport des indicateurs alternatifs de type empreinte écologique dans la réflexion sur le développement durable“, Colloque international Francophone : Développement Durable : leçons et perspectives, Agence universitaire de la Francophonie, Agence intergouvernementale de la Francophonie et Université de Ouagadougou, 01-04/ 06/2004, Ouagadougou (Burkina Faso), 34p.
- Bouyer, J, Cordier, S. et Levallois, P., (2003). Epidémiologie. In : Gérin,M.,Gosselin,P., Cordier, S., et al. Environnement et Santé Publique-Fondements et pratiques. Paris : Edisem/ Tec& Doc, Acton Vale, pp.89-118.
- BP. (2010). Review of world Energy. Full report 2011. (https://www.bp.com/statisticalreview)
- Braeutigam, R.R., (1980),” An analysis of fully distributed cost pricing in regulated industries”, The Bell Journal of Economics, vol 11, pp.182-196.
- Bramoullé, G., (1997). Théorie de la connaissance et vérité scientifique. In : Leube, Petroni & Sadowsky Editions, pp.47-65.
- Brendt, E.R., (1976), “Reconciling alternative estimates of the elasticity of substitution “, Revue Economique Statistique, vol 58, pp.59-68.
- Brendt, E.R. et Wood, Do., (1979), “Engineering and econometric interpretations of energy –capital complementarity”, The American Economic Review, Vol 69, pp.342-354.
- Browne, R. (1907). Working Costs of the Witwatersrand, Johannesburg.
- Bruyn, S.M., Van den Bergh, J.C.J.M. et Opshoor, J.B., (1998), “Economic growth and emissions: reconsidering the empirical basis of environmental Kuznets curves”, Ecological Economics, vol 25, pp. 161-175.

- Buchanan, J.M. et Stubblebine, W.C., (1962), “Externality“, Economica, vol29, pp.371-384.

- Buchanan, J.M., (1969), “External diseconomies, corrective taxes and market structure”, The American Economic Review, vol 59, pp.174-177.

- Burnett, R. T., Cakmak, S. et Brook, J.R., (1998),"The effect of the urban ambient air pollution mix in daily mortality rates in 11 Canadian cities", Canadian Journal of Public Health, vol 89, pp.152-156.
- Chadwick, E. (1842). Report on sanitary condition. In: Report from the poor law commissioners on in inquiry into the sanitary conditions of the labouring population of Great Britain, London, pp.369-372. (http://codesproject.asu.edu/sites/default/files/code_pdfs/Chadwicks%27sreport.pdf)
- Chan, W.W., et Lam, J.C., (2002). "Prediction of pollutant emission through electricity consumption by the hotel industry in Hong Kong". Hospitality Management, vol 21, pp.381-391.
- Chanel, A., (1993), '' De l'émergence de la question environnementale aux recherches en économie de l'environnement'', DEES, n°94, pp.5-16.
- Cheng, B. S., (1996),"An Investigation of Cointegration and Causality between Energy Consumption and Economic Growth". The Journal of Energy and Development, vol 21, pp.73-84.
- Cheng, B. S., (1997), "Energy consumption and economic growth in Brazil, Mexico and Venezuela: a time series analysis", Applied Economics Letters, vol 4, pp. 671–674.
- Cheng, B.S. et Lai, T.W., (1997), ''An investigation of cointegration and causality between energy consumption and economic activity in Taiwan", Energy Economics, vol 19, pp.435-444.
- Cheng, B.S., (1998), "Energy Consumption, Employment and Causality in Japan: A Multivariate Approach", Indian Economic Review, vol 33, pp.19-29.
- Cheng, B.S., (1999), "Causality between Energy Consumption and Economic Growth in India: An Application of Cointegration and Error-Correction Modeling", Indian Economic Review, vol 34, pp.39-49.
- Chestnut, L.G., Schwartz, J., Savitz, D.A. et al., (1991), "Pulmonary function and ambient particulate matter: epidemiological evidence from NHANES I", Archives of Environmental Health, vol 46, pp.135-144.
- Chevalier, P., Cordier, S., Dab, W. et al, (2003). Santé environnementale. In : Gérin, M.,Grosselin, P., Cordier, S., Viau, C., and Quénel, P., Dewally, E. Environnement et santé publique- Fondements et Pratiques, Paris, pp.59-86.
- Chevalier, J.M. (2004). Les grandes batailles de l´énergie. Paris : Gallimard, 430 p.
- Chevalier, J.M. (2009). Les nouveaux défis de l'énergie : climat-économie-géopolitique. Editions : Economica, 300 p.
- Chiou-Wei, S.Z., Chen, C.F et Zhu, Z., (2008), "Economic Growth and Energy Consumption: Evidence from Linear and Nonlinear Granger Causality". Energy Economics, vol 30, pp.3063–3076.
- Christian, F. (2001). L'évolution du prix des ressources naturelles : test d'une version stochastique de la règle d'Hotelling. Rapport de recherche. Université de Montréal.

- Chontanawat, J., Hunt, L.C. et Pierse, R., (2006). Causality between energy consumption and GDP: Evidence from 30 OECD and 78 non-OECD countries. Surrey Energy Economics Discussion Papers, SEEDS No. 113.
- Chouaibi, N. et Abdessalem, T., (2011),"Causality between electricity consumption and economic growth In Tunisia: policy implications", International Journal of Economic Policy in Emerging Economics, vol 4, pp.211-226.
- Clapham, J.S., (1922), '' of empty boxes ''. Economic Journal, vol 32, pp.305-314.
- Climent, F.J. et Pardo, A., (2007), ''Decoupling factors on the Energy-output linkage: The Spanish case". Energy Policy, vol35, pp.522-528.
- Coase, R.H., (1937), "The nature of the firm. Economica", New Series, vol 4, pp.386-405.
- Coase, R.H., (1946), "The marginal Coast Controversy", Economica, New series, vol 13, pp.169-182.
- Coase, R.H., (1960),''The Problem of Social Cost ''. Journal of Law and Economics, vol 3, pp.1-44.
- Combes. Motel, P. (2011). Cours d'économie des ressources naturelles : chapitre premier : exploitation des ressources naturelles épuisables, CERDI, Clermont-Ferrand (France).
- Conceicao, G., Miraglia, S., Kishi, H.S.et al, (2001), "Air pollution and child mortality: a time series study in Sao-Paulo, Brazil", Environmental Health Perspectives, vol 109, pp.347-350.
- Crabbé, P. H., (1977), ''L'exploration des ressources extractives non renouvelables : théorie économique, processus stochastique et vérification'', L'actualité économique, vol 53, p.559-586.
- Curtiss, P.S. et Rabl, A, (1996), "Impacts of air pollution: general relationship and site dependence", Atmospheric Environment, vol 30, pp.3331-3347.
- Dahech, S. et Beltrando, G., (2006), ''Variabilité du climat de Sfax (Tunisie) entre 1970 et 2002 : exemple des températures et du vent''. Actes du XIXe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 06-09/10/2006, Epernay, pp 184-190.
- Dahech, S., (2009), ''Aggravation du réchauffement en milieu urbain à Sfax (Tunisie)''. Fifth Urban Resaerch Symposuim, 27 Juin-01 Juillet/2009. Marseille (France).
- Dales, J.H. (1968). Pollution, proprety and prices, an essay in policy making and economics. University of Toronto, Toronto (Canada): Edward Elgar Pub, 117 p.
- Dasgupta, P. et Heal, G.M., (1974), "The optimal depletion of exhaustible resources", Review of Economic Studies, Symposium, pp.3-28.
- Dasgupta, P. et Stiglitz, J.E., (1976). Uncertainty and the rate of extraction under alternative institutional arrangements. Technical Report No. 179, Institute for Mathematical Studies in the Social Sciences, Stanford University.

- Declercq, C. et Prouvost, H. (2007). Effets des particules en suspension sur la santé respiratoire des enfants, intérêt et faisabilité de l'étude d'un panel d'enfants lillois. Rapport d'un conseil régional Nord-Pas-de-Calais.
- Desqueyroux, H. et Momas, I., (2001),''Impact à court terme de la pollution atmosphérique urbaine sur l'insuffisance respiratoire par broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO), synthèse des études publiées de 1962à Janvier 2000. Revue d'épidémiologie et Santé publique, vol 49, pp.61-76.
- De Leon, S.F., Thurston, G.D et Ito, k., (2003), ''Contribution of respiratory mortality associations with air pollution'', American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, vol 167, pp.1117-1123.
- Demsetz, H. (1967). Toward a Theory of Property Rights. The American Economic Review, Vol. 57, Papers and Proceedings of the Seventy-ninth, Annual Meeting of the American Economic Association, pp. 347-359.
- Devarajan, S. et Fisher, A.C., (1981),"Hotelling's economics of exhaustible resources fifty years later". Journal of economic literature, vol19, pp.65-73.
- Devarajan, S. et Fisher, A.C., (1982). Exploration and Scarcity. Journal of Political Economy, vol 90, pp. 1279-1290.
- Dockery, D.W., Cunninghamm, J., Damokosh, A.I. et al, (1996), "Health effects of acid aerosols on North American children: respiratory symptoms", Environmental Health Perspectives, vol 104, pp.500-505.
- Dockery, D.W., Pope, C.A., XU, X., et al, (1993), "An association between air pollution and mortality in six US cities", The New England Journal of Medecine, vol 329, p.1753-1759.
- Durand. B. (2007). Energie et environnement : les risques et les enjeux d'une crise annoncée. Grenoble (France): EDP Science, 324 p.
- Eilstein, D., (2010), "Exposition prolongée à la pollution atmosphérique et mortalité par pathologies respiratoires '', Revue Française d'allergologie, vol50, pp.51-61.
- El Hbaieb, A., (2003). Les transports et la circulation. Stratégies de Développement du Grand Sfax. (SDGS), rapport de la phase diagnostic. (http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1256566800920/6505269-1268260567624/Dahech.pdf)
- Ellis, H. et Fellner, W., (1943),''External Economies and Diseconomies''. American Economic Review, vol 23, pp. 493-511.
- Engle, R.F. et Granger, C. J., (1987). ''Cointegration and error-correction-representation, estimation and testing''. Econometrica, vol 55, pp. 251–278.
- Erdal, G., Erdal, H. et Esengun, K., (2008), ''The causality between energy consumption and economic growth in Turkey", Energy Policy, vol 36, pp. 3838-3842.
- Erol, U. et Yu, E.S.H., (1987),"On the causal relationship between energy and in-come for industrialized countries", Journal of Energy Development, vol 13, pp.113-122.

- Falque, M., et Massenet, M.(1997). Droits de propriété et environnement, Paris, Dalloz, p.372.
- Faucheux, S. (1990). Le rôle des fonctions de production dans les politiques de rationalisation énergétique: une analyse critique. Université de Paris1Panthéon Sorbonne. (http://www.akademia.ch/~sebes/textes/1993/93SFaucheux.html)
- Faucheux, S., et Noel, J.F. (1995). Economie des ressources naturelles et de l'environnement. Paris, Armand Colin, 215 p.
- Fisher, F.M., (1964). Supply and Costs in the US Petroleum Industry. Washington, Johns Hopkins Press for Resources for the Future, p283.
- Fisher, P., Hock, G., Brunekreef, B. et al, (2003), "Air pollution and mortality in the Netherlands: are elderly more at risk?", European Respiratory Journal, vol21, pp.34-38.
- Forastiere, F., Stafoggio, M., Tasco, C. et al, (2007), "Socioeconomic status, particulate air pollution and daily mortality: differential exposure or differential susceptibility", American Journal of Industrial Medicine, vol 50, pp.208-216.
- Fournier, P. (2003). L'art de la science de la santé publique. In : Environnement et santé publique - Fondements et pratiques. Paris : Edisem /Tec & Doc, Acton Vale, pp.39-57.
- Forget, G. et Lebel, J. (2003). Approche écosystémique à la santé humaine. In : Environnement et santé publique - Fondements et pratiques. Paris : Edisem / Tec & Doc, Acton Vale, pp.593-638.
- Friket, M., (1931), '' Sur les causes des accidents survenus la vallée de la Meuse lors des brouillards de décembre 1930'', Bulletin of the New York Academy of Medicine, vol11, p. 683-731.
- Furfari, S. (2007).Le monde et l'énergie enjeux géopolitique, Tome1 : les clefs pour comprendre. Paris, Editions Technip, p.446.
- Ghali, K.H. et El-Sakka, M.I.T., (2004), "Energy Use and Output Growth in Canada: A Multivariate Cointegration Analysis", Energy Economics, vol 26, pp. 225-238.
- Gargouri, I., Rebai, A., Khadhraoui, M., et al, (2006), ''Impact sanitaire des variations quotidiennes de la pollution atmosphérique urbaine: étude de la faisabilité dans la ville de Sfax (Tunisie)'', Environnement, Risques et Santé, vol 6, pp.467-475.
- Germaine, V.V., (1965), ''L'accroissement de la population mondiale 1920-1960. Types d'accroissement naturel et Essai d'interprétation'', Revue de la géographie Alpine, vol 53, pp. 525-559.
- Gérin, M. et Band, P., (2003). Cancer.In : Environnement et santé publique - Fondements et pratiques. Paris : Edisem / Tec & Doc, Acton Vale, pp.669-686.
- Geweke, J., Masee, R. et Dent, W., (1983)," Comparing alternative tests of causality in temporal systems: analytical results and experimental evidence", Journal of Econometrics, vol 21, pp.161–194.
- Gilbert, R. (1976). Optimal depletion of an uncertain stock. Technical Report No. 107, Institute for Mathematical Studies in the Social Sciences, Stanford University.

- Gilbert, R.,(1978),” Firm pricing in a market for an exhaustible resource”, The Bell Journal of Economics, vol 9, pp 385-395.
- Gilbert, T.F. (1978). Human competence: Engineering worthy performance. New York: McGraw-Hill Book company, 376 p.
- Gilbert, R., (2005),” 10 questions sur l’avenir du charbon ‘’, Académie des technologies Commission Energie Environnement, pp.3-10.
- Girod, J., et Perçebois. J. (1981). Energie : Fonctions de production et modèles de demande. Communication 2ème journées internationales d’études de l’Association d’Econométrie appliquée, Aix-en- Provence.
- Glasure, Y.U. et Lee, A.R., (1997), “Cointegration, error-correction, and the relationship between GDP and energy: The case of South Korea and Singapore”, Resource and Energy Economics, vol20, pp. 17-25.
- Glasure, Y.U., (2002), “Energy and national income in Korea: Further evidence on the role of omitted variables”, Energy Economics, vol 24, pp. 355-365.
- Glinianaia, S.V., Rankin, J., Bell, R. et al, (2004), “Does particulate air pollution contribute to infant death? A systematic review”, Environmental Health Perspectives, vol 112, pp.1365-1371.
- Goldberg, M.S., Burnett, R.T., Bailar, J.C. et al, (2001).” The association between daily mortality and ambient air particle pollution in Montréal (Québec) Cause-specific mortality”, Environmental Research, vol 86, pp.26-36.
- Goldberg, M.S., Burnett, R.T., Bailar, J.C. et al, (2001), “Identification of persons with cardiorespiratory conditions who are at risk of dying from the acute effects of ambient air particles”, Environmental Health Perspectives, vol 109, pp.487-494.
- Goldberg, M.S., Burnett, R.T., Yale, J.F., et al, (2006). Association between ambient air pollution and daily mortality among persons with diabetes and cardiovascular disease. Environmental research, vol 100, pp.25-267.
- Gold, D.R., Litonjua, A., Schwartz, J. et al, (2000), “Ambient pollution and heart rate variability”, Circulation, vol 101, pp.1267–1273.
- Gouveia, N. et fletcher, T., (2000), “Times series analysis of air pollution and mortality effects by cause, age and socio-economic status”. Journal of Epidemiology and community Health, vol 54, pp.750-755.
- Granger, C.W.J., (1969),”Investigating causal relations by econometric models and cross spectral methods”, Econometrica, vol 3, pp.424-438.
- Granger, C.W.J., (1988),” Some recent developments in a concept of causality”. Journal of Econometrics, vol 39, pp.199– 212.
- Griffin, J.M., (1977),“Long- run production modeling with pseudo data: electric power generation”, The Bell Journal of Economics, vol 8, pp.112-127.

- Grossman, G.M. et Krueger, A.B., (1995),"Economic growth and the environment". Quarterly Journal of Economics, vol 110, pp.353-377.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat : lignes directives du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre- version révisée 1996 volume 2. Manuel simplifié pour l'inventaire des gaz à effet de serre http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/pdfiles/frencov.pdf
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat 2004. http://www.ipcc.ch/pdf/ipcc-faq/ipcc-who-is-who-fr.pdf
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2007). Bernstein.L, Bosch.P, Ganziani.O. Climate change 2007: synthesis report. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf
- Gryparis, A., Forsberg, B., Katsouyani, K. et al, (2004), "Acute effects of ozone on mortality from the «Air Pollution and Health: A European approach''project". American Journal of Respirtory and Critical Care Medicine, vol170, pp.1080–1087.
- Guillois-Becel, Y., Eilstein, D., Glorennec, P., et al, (2007), ''Quantification des années de vie perdues attribuables aux expositions chroniques à la pollution atmosphérique urbaine : le cas de Nantes'', Environnement, Risques et Santé, vol 6, pp.189-197.
- Guilkey, D.K. et Salemi, M.K., (1982), "Some sample properties of three tests for Granger causal ordering in a bivariate stochastic system", The Review of Economics and Statistics, vol 64, pp. 668-80.
- Ha, E. H., Lee, J.T., Kim, H.et al, (2003), "Infant susceptibility of mortality to air pollution in Seoul, South Korea", Pediatrics, vol 111, pp.284-290.
- Hajat, S., Armstrong, B., Wilkinson, P., et al, (2007), "Outdoor air pollution and infant mortality: analysis of daily time-series data in 10 English cities", Journal of Epidemiology Community Health, vol 61, pp.719-722.
- Halicioglu, F., (2009), "An econometric study of CO2 emissions, energy consumption, income and foreign trade in Turkey", Energy Policy 37, pp.1156-1164.
- Hall, D.C. et Hall, J.V., (1984), "Concepts and mesures of natural resources scarcity with a summary trends", Vol11, pp.363-379.
- Hardin, G., (1968), "The Tragedy of the Commons", Science, vol 162, pp.1243-1248.
- Harribey, J. M., (1997), ''La prise en compte des ressources naturelles dans le modèle néoclassique d'équilibre général : éléments de critique'', Economie et sociétés, vol 35,4, pp.57-70.
- Helden, J.V. (2005). Loi de Malthus ou théorie de la population. Enjeux sociaux et écologiques de la biologie.
- Herfindahl, O.G. (1959). Copper costs and prices: 1870-1957. Johns Hopkins.Press for Resources for the Future.
- Hédoin, C. (2011). L'économie selon Carl Menger. La vie des idées. (http://www.laviedesidees.fr/IMG/pdf/20110315_menger.pdf)

- Hénia, L., et Benzarti, Z. (2006). Changements climatiques et ressources en eau en Tunisie. Actes du XIXe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 6-9 septembre/2004, Epernay, pp.15-20.
- Ho, C.Y. et Siu, K.W., (2007), "A dynamic equilibrium of electricity consumption and GDP in Hong Kong: and empirical investigation", Energy Policy, vol 35, pp. 2507-2513.
- Hondroyiannis, G., Lolos, S. et Papapetrou, E., (2002), "Energy Consumption and Economic Growth: Assessing the Evidence from Greece", Energy Economics, vol 24, pp.319-336.
- Hoover, H.C., Rickard, T.A., Ingalis, W.R et al, (1905). The economics of mining. New York : The engineering and mining journal, p.403.
- Hoover, T.J. (1948). Economics of Mining, Stanford University Press, 3e éd.
- Hoover, H.C. (1909).Principles of Mining. McGraw-Hill.
- Host, S., Camard, J.P., Franconi, A.et al. (2006). L'évaluation des risques sanitaires : principe et méthode. Observatoire Régional de Santé d'ile de France.
- Hotelling, H., (1931), ''The economics of exhaustible resources''. The Journal of Political Economy, vol 39, pp.137-175.
- Hufty, A., (1968), Le roy Ladurie. Histoire du climat depuis l'an mil, Paris, Flammarion, 1967, nouvelle bibliothèque scientifique. Cahiers de géographie du Québec, vol 12, pp.170-171.
- Hwang, D. et Gum, B., (1991), ''The causal relationship between energy and GNP: the case of Taiwan'', Journal of Energy Development, vol 16, pp 219 226.
- Institut National de l'environnement industriel et des risques (2009): Rapport d'étude 17/03/2009 N° DRC-08-94380-11776c : point sur les valeurs toxicologiques de référence (VTR)-mars 2009 (http://www.ineris.fr/centredoc/vtr.pdf)
- Institut de veille sanitaire Saint Maurice. (2002). Programme de surveillance air et santé 9 villes : Surveillance des effets sur la santé liés à la pollution atmosphérique en milieu urbain -Phase II, 184 pages. (http://www.invs.sante.fr)
- Institut de veille sanitaire. octobre 2003. Impact sanitaire de la vague de chaleur d'aout 2003 en France ; Bilan et perspectives-Octobre 2003. (http://www.invs.sante.fr/publications/2003/bilan_chaleur_1103/vf_invs_canicule.pdf)
- Institut de veille sanitaire Saint Maurice. (2008). Programme de surveillance air et santé. : Analyse des liens à court terme entre pollution atmosphérique urbaine et mortalité dans neuf villes françaises, 41 pages. (http://www.invs.sante.fr)
- Jerrett, M., Burnett, R.T., Brook, J. et al, (2004), " Do socioeconomic characteristics modify the short term association between air pollution and mortality? Evidence from a zonal time series in Hamilton, Canada". Journal of Epidemiology and Community Health, vol 58, pp.31-40.

- Jobert, T. et Karanfil, F., (2007), ‘’Sectoral energy consumption by source and economic growth in Turkey’’, Energy Policy, vol35, pp.5447-5456.
- Johansen, S. et Juselius, K., (1990), “Maximum likelihood estimation and inference on cointegration with applications to the demand for money”. Oxford Bulletin of Economics and Statistics, vol 52, pp.169–210.
- Johansen, S., (1991), “Estimation and hypothesis testing of cointegration vectors in Gaussian vector autoregressive models”. Econometrica, econometric Society, vol 59, pp.1551-1580.
- Jorgenson, D.W.(1973). Production Structure, chapter. 3 in Dale W. Jorgenson et al., eds., U.S. Energy Resources and Economic Growth, final report to the Ford Foundation Energy Policy Project, Washington.
- Jusot, J.F., Lefranc, A., Cassadou, S. et al, (2006), ‘’Estimation de la mortalité attribuable aux particules (PM_{10}) dans les 9 villes Françaises participant au programme Européen Aphesis’’. Santé publique, vol 18, n°1, pp.71-84.
- Kaldellis, J.K., Vlachos, G.T.H., Paliatsos, A.G. et al, (2002), ‘’Detailed examination of the Greek electricity sector nitrogen oxides emissions for the period 195-2002’’, Environmental Science and Policy, vol 8, pp.502-514.
- Karanfil, F., (2008), “Energy consumption and economic growth revisited: does the size of unrecorded economy matter?”, Energy Policy, vol 36, pp.3029-3035.
- Karl, M. (1867). Le Capital. Critique de l’économie politique. Livre premier. Tome1, Paris. Editions Sociales, 317.p.
- Kelly, F.J., Dunster, C. et Mudway, I., (2003), “Air pollution and the elderly: oxidant/antioxidant issues worth consideration”, European Respiratory Journal, vol 21, pp.70-75.
- Kelly, F.J., (2004), “Oxidative stress: its role in air pollution and adverse health effects”, Lancet, vol 363, pp.95–96.
- Kemp, M.E., (1976), “Three topics in the theory of international trade”, North-Holland, vol 23, pp. 297-308.
- Kraft, J. et Kraft, A., (1978), “On the relationship between energy and GNP”, Journal of Energy Development, vol 3, pp.401–403.
- Krautkraemer, J.A. (2005) Economics of Natural Resource Scarcity: the state of the debate .Resource for the future. Discussion Paper 05-14.
- Laffont, J.J., ‘’(1975)’’. Note historique sur les effets externes, L’actualité économique, vol 51, pp.420-433.
- Laffont, J.J. (1977). Effets externes et théorie économique, monographies du séminaire d’économétrie, 13, Paris, Centre National de la Recherche Scientifique.
- Landis Mackellar, F., Daniel, R. et Vining, J.R., (1989), “Measuring natural resource scarcity”. Social Indicators Research, vol.21, pp.517-530.
- Leam, H.H. et Smyth, R., (2010), “CO2 emissions, electricity consumption and output in ASEAN”. Applied Energy, vol87, pp.1858-1864.

- Ledo, P.M., (1965),''Les Etats-Unis et leur voisins d'Amérique latine, trois études de cas : la nationalisation du pétrole au Mexique'', Revue Française de science politique, vol 15, pp.1145-1153.
- Lee, C.C., (2005), "Energy consumption and GDP in developing countries: a cointegrated panel analysis", Energy Economics, vol 27, pp.415–427.
- Lee, C.C., (2005), "The causality relationship between energy consumption and GDP in G-11 countries revisited". Energy Policy, vol 34, pp.1086–1093.
-
- Lee, J.T., Kim, H., Hong, Y.C. et al, (2000)," Air pollution and daily mortality in seven major cities of Korea, 1991–1997", Environmental Research, vol 84, pp.247-254.
- Lee, C. et Chang, C., (2007), ''Energy consumption and GDP revisited: A panel analysis of developed and developing countries'', Energy Economics, vol 29, pp.1206–1223.
- Legali, P. Théorie de l'économie politique : livre de William Stanley Jevons. Encyclopaedia Universalis, p1. (http://www.universalis.fr/encyclopedie/theorie-de-l-economie-politique/)
- Les notes du Plan Bleu : environnement et développement Méditerranée, n°13 Novembre 2009.
- Lipfert, F.W. (1994). Air pollution and community health: a critical review and date sourcebook. New York: John Wiley &Sons, p.556.
- Liang, W.M., Wei, H.U. et Kuo, H.W., (2009), "Association between daily mortality from respiratory and cardiovascular diseases and air pollution in Taiwan", Environemental Research, vol 109, pp.51-58.
- Lin, C.A., Pereira, L.A.A., Nishioka, D.C. et al, (2004)," Air pollution and neonatal deaths in Sao-Paulo, Brazil", Brazilian Journal of Medical and Biological Research, vol 3, pp.765-770.
- Lise, W. et Van Montfort, K., (2007), ''Energy consumption and GDP in Turkey: is there a co-integration relationship?'', Energy Economics, vol 29, pp.1166–1178.
- Loomis, D., Caastillejos, M., Gold, D.R. et al,(1999), '' Air pollution and infant mortality in Mexico City'', Epidemiology, vol10, pp.118-123.
- Loury, G.G. (1976). The optimum exploitation of an unknown reserve. USA: Center for Mathematical Studies in Economics and Management Science, Northwestern University, DP No. 255.
- Maalej, A., et Rossert, A. (1997). Modélisation couplée dynamique-physicochimie de la pollution atmosphérique dans la région de Sfax(Tunisie). Travaux universitaires, bib réf83, pp. 1-265.
- Magazzino, C., (2011), "Energy consumption and aggregate income in Italy: cointegrtaion and causality analysis". MPRA Paper n°28494.
- Mahadevan, R. et Asafu-Adjaye, J., (2007),''Energy consumption, economic growth and prices: A reassessment using panel VECM for developed and developing countries'', Energy Policy, vol 35, pp.2481-2490.
- Marshall, A. (1890). Principles of Economies. NewYork : Macmillan,328 p .

- Martins, M.C., Fatigati, F.L., Vespoli, T.C. et al, (2004), ‘’Influence of socioeconomic conditions on air pollution adverse health effects in elderly people: an analysis of six regions in Sao-Paulo, Brazil’’, Journal of Epidemiology and Community Health, vol 58, pp.41-46.
- Masih, A.M. et Masih, R., (1996), ‘’Energy consumption, real income and temporal causality: results from a multi-country study based on cointegration and error-correction techniques’’, Energy Economics, vol18, pp. 165–183.
- Masih, A.M. et Masih, R., (1997), ‘’On the causal relationship between energy consumption, real income prices: some new evidence from Asian NICs based on multivariate cointegration/vector error correction approach’’, Journal of Policy Modeling, vol 19, pp. 417–440.
- Meade, J.E., (1952),” External Economies and diseconomies in a competitive situation”, Economic Journal, vol 62, pp.54-67.
- Meade, J.E., (1973),”The theory of economic externalities. The control of environmental pollution and similar social costs”, International Economies Series, vol 2, pp.180-187.
- Meadows, D. et Jorgen, D.R. (2004). Limits to growth: the 30-year update. USA: Chelesa green Publishing, 368p.
- Mehra, M., (2007),” Energy consumption and economic growth: the case of oil exporting countries”, Energy Policy, vol 35, pp. 2939-2945.
- Michel, R., (1990),” La question charbonnière de William Stanley Jevons ‘’, Revue économique, vol41, pp.369-394.
- Mills, G., (2007), “Cities as agents of global change”, International Journal of Climatology, vol 27, pp.1849-1857.
- Ministère de l’agriculture et des ressources hydrauliques. (2007). Stratégie nationale d’adaptation de l’agriculture Tunisienne et des écosystèmes aux changements climatiques.(http://www.giz.de/Themen/de/dokumente/fr-strategie-nationale-adaptation-changements-climatiques-tunisie.)
- Mishra, V., Smyth, R. et Sharma, S., (2009),” The energy-GDP nexus: Evidence from a panel of Pacific Island countries”, Resource and Energy Economics, vol 31, pp.210-220.
- Missemer, A. (2011). Reconsidérer l’épuisement des ressources naturelles dans la tradition économique à partir des travaux de W.S Jevons. Colloque francophone international : le développement durable : débats et controverses, IUFM Auvergne, 15-16/12/2011, Clermont-Ferrand.
- Morley, B., (2006), ‘’Causality between economic growth and migration: an ARDL bounds testing approach’’, Economics Letters, vol 90, pp. 72-76.

- Morris, R.D. et Naumova, E.N., (1998),"Carbon monoxide and hospital admissions for congestive heart failure: evidence of an increased effect at low temperature", Environmental Health Perspectives, vol 106, pp.649-653.
- Narayan, P.K., (2005),"The saving and investment nexus for China: evidence from cointegration tests", Applied economics, vol 37, pp.1979-1990.
- Narayan, P.K. et Narayan, S., (2006), "Savings behaviour in Fiji: an empirical assessment using the ARDL approach to cointegration", International Journal of Social Economics, vol33, pp. 468-480.
- Nordhaus, W.D., Houthakker, H. et Solow, R., (1973), "The allocation of energy resource", Brookings papers on economic activity, vol 3, pp. 529-576.
- Nordhaus, W.D. et Tobin, J. (1973). Is Growth Obsolete? NBER Chapters in: The Measurement of Economic and Social Performance. National Bureau of Economic Research, Inc, pp. 509-564.
- Norgaard, R.B., (1990), "Economic indicators of economic scarcity: a critical essay", Journal of Environment Economics and Management, vol.19, pp.19-25.
- Nordhaus, W.D. (1992). Lethal models 2: The limits to growth revisited. Papers on Economic Activity 2.Washington, D.C.: Brookings Institute.
- Odell, P.R. (2004). Why, carbon fuels will dominate the 21 the century's global energy economy. (www.multi- science.co.UK).
- Odhiambo, N.M., (2004), "Is financial development still a spur to economic growth? A causal evidence from South Africa", Savings and Development, vol 28, pp.47–62.
- Odhiambo, N.M., (2009), "Energy consumption and economic growth nexus in Tanzania: An ARDL bounds testing approach", Energy Policy, vol 37, pp.617-622.
- Oke, T.R., (1987), "The surface energy budgets of urban areas", In modelling the urban boundary layer, AMS, pp. 1-52.
- OMS. (2005). Synthèse de l'évaluation des risques. Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air : particules, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre.
- ONU habitat-le droit à un logement convenable : Fiche d'information n° 21 (http://www.ohchr.org/Documents/Publications/FS21_rev_1_Housing_fr.pdf)
- Ouslati, H., Marzouki, Y., Chiha, M., et Karim, S. (2010). Rapport Pays Tunisie : Instrument Européenne de voisinage et de partenariat vers un système de partage d'informations sur l'environnement « SEIS ». Agence Européenne pour l'Environnement.
- Paish, F.W., (1938), "Causes of changes in gold supply", Economica, vol. 5, pp. 379-409.
- Panayotou, T. (1993). Empirical Tests and Policy Analysis of Environmental Degradation at Different Stages of Economic Development, ILO Technology and Employment Programme, WP238 (Geneva).
- Pascal, L., (2009),''Effets à court terme de la pollution atmosphérique sur la mortalité '', Revue Française d'allergologie, vol 49, pp. 466-476.

- Paskoff, R. (2004). Cotes en danger. Paris: l'Harmattan, 250 p.
- Payne, J.E., (2009),"On the dynamics of energy consumption in the US", Applied Energy, vol 86, pp. 575–577.
- Paul, S. et Bhattacharya, R.N., (2004)," Causality between Energy Consumption and Economic Growth in India: A Note on Conflicting Results", Energy Economics, vol 26, pp. 977-983.
- Pearce, D.W. (1976). The limits of cost-benefit analysis as a guide to environmental policy, Kyklos. Réimprimé dans Pearce. DW. (1999). Economics and environment: essays in ecological economics and sustainable development, Cheltenham: Edward Elgar.
- Perçebois, J., (1978), " Energie, croissance et calcul économique", Revue économique, Vol 29, pp.464-493
- Perçebois, J., (1991), ''Economie de l'énergie '', Bibliothèque des matières premières, pp. 122-124.
- Perçebois, J. (1999). L'apport de la théorie économique aux débats énergétiques page 7. (www.creden.univ-montp1.fr/downloads/cahiers/cc-99-11-15.pdf)
- Pereira, A.M. et Pereira, R.M., (2010), "Is fuel-switching a no-regrets environmental policy? VAR evidence on carbon dioxide emissions, energy consumption and economic performance in Portugal», Energy Economics, vol 32, pp.227-242.
- Pereira, E.M. et Sanford, T., (2011), ''Rising temperatures, worsening ozone pollution", Union of Concerned Scientists, p 28.
- Perron, P. et Vogelsang, T.J., (1992), ''Nonstationarity and Level Shifts with an Application to Purchasing Power Parity'', Journal of Business and Economic Statistics, vol 10, pp. 301–320.
- Pesaran, M.H., and Pesaran, B. (1997).Working with Micro¯t 4.0: An interactive econometric software package (DOS and Windows versions), (Oxford University Press, Oxford).
- Pesaran, M., and Shin, Y. (1999). An autoregressive distributed lag-modeling approach to cointegration analysis. In: Strom, S. (Ed.), Econometrics and Economic Theory in the 20th Century: The Ragnar Frisch centennial Symposium. Cambridge University Press, Cambridge.
- Pesaran, M., Shin, Y. et Smith, R., (2001), "Bounds testing approaches to the analysis of level relationships", Journal of Applied Econometrics, vol 16, pp. 289–326.
- Peters, A., (2005), "Particulate matter and heart disease: evidence from epidemiological studies", Toxicology and Applied Pharmacology, vol 207, pp.477-82.
- Peters, A., Perz, S., Doring, A. et al, (1999),"Increases in heart rate during an air pollution episode", American Journal of Epidemiology, vol150, pp.1094-1098.

- Pindyck, R.S. (1977). Interfuel Substitution and the Industrial Demand for Energy: An International Comparison. Working paper no. MIT-EL 77-026WP, M.I.T. Energy Laboratory.
- Ponroy, Y. (2010). Démocraties en péril : déclin de l'occident. France : Editions l'Harmattan, 188 p.
- Pope, C.A., Thun, M.J., Namboodiri, M.M. et al, (1995), " Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of US adults", Journal of Respiratory and critical Care Medicine, vol 151, pp.669-674.
- Pope, C.A., (1996), "Adverse health effects of air pollutants in a nonsmoking population", Toxicol, vol 111, pp.149-155.
- Pope, C.A., (2000), "Epidemiology of fine particulates air pollution and human health: biologic mechanisms and who's at risk", Environmental Health Perspectives, vol108, pp.173-723.
- Quénel, P., Dab, W., Festy, B. et al, (2003). Qualité de l'air ambiant. In : Environnement et santé publique. Fondements et pratiques. Paris : Edisey Tec & Doc, Acton vale, pp.291-315.
- Rapport de Santé Canada. (2004). Effets de l'ozone sur la santé humaine : mise à jour en appui aux standards Pancanadiens relatifs.
- Rapport de Santé Canada. (2006). La démarche d'évaluation des risques sanitaires pour les substances chimiques: origine, objectifs et postulats aux Etats-Unis. N° INERIS-DRC-06-75999/DESP-RO3a.
- Report of a WHO. (2004). World Health Organization: Meta-analysis of time-series studies and panel studies of particulate matter and ozone.
- Ricardo, D. (1817). Des principes de l'économie politique et de l'impôt. Collection : Les Classiques des Sciences Sociales, 140 p. (http://www.uqac.uquebec.ca/zone30/Classiques_des_sciences_sociales/index.html)
- Ritz, B., Wilhelm, M. et Zhao, Y., (2006), "Air pollution and infant death in Southern California, 1989-2000", Pediatrics, vol 118, pp.493-502.
- Romieu, I., Ramirez-Aguilar, M., Moreno-Macias et al, (2004), "Infant mortality and air pollution: modifying effect by social class", Journal of occupational environmental medicine, vol 46, pp.1210-1216.
- Rotillon, G. (2005). Economie des ressources naturelles. Paris : Editions la découverte, collection Repères, 123 p.
- Rothen, R. (1985).les émissions de polluants atmosphériques en Suisse : proportions, évolution et mesures prises jusqu'à présent. Bulletin OFPE, vol 1,p.17-24.
- Rothschild, M. et Stiglitz, J., (1976)," Equilibrum in competitive insurance markets: an essay on the economics of imperfect information", The Quaterly Journal of Economics, vol 90, pp.629-649.

- Saez, M., Ballester, F., Barcelo, M.A. et al., (2002), "EMECAM: A combined analysis of the short-term effects of photochemical air pollutants within the EMECAM project",Environmental Health Perspectives, vol 110, pp.221-228.
- Sahaili, K., (2010), "Analysis of electricity subsidies removing in Iran on air pollution by using of VECM", Procedia Environmental Science, vol 2, pp.252-255.
- Salant, S.W., (1976),"Exhaustible resources and industrial structure: a Nash- Cournot approach to the world oil market", The Journal of political Economy, volume 84, pp 1079-1094.
- Saldiva, P.H., Lichtenfels, A.J., Paiva, P.S. et al., (1994), ''Association between air pollution and mortality due to respiratory diseases in children in Sao-Paulo, Brazil: preliminary report", Environmental Research, vol 65, pp.218-225.
- Salines, G., (2009), " Surveillance en santé environnementale, discipline méconnue et indispensable. Institut de Veille Sanitaire, Saint-Maurice (France) '', Bulletin épidémiologique hebdomadaire, vol n°27-28, 281 p.
- Salvi, S., (2007), " Health effects of ambient air pollution in children", Paediatric Respiratory Reviews, Vol 8, pp.275-280.
- Samoli, E., Aga, E., Touloumi, G. et al., (2006), "Short-term effects of nitrogen dioxide on mortality", European Respiratory Journal, vol 27, pp.1129-1138.
- Samoli, E., Touloumi, G., Schwartz, J. et al., (2007), "Short term effects of carbon monoxide on mortality: an analysis within the APHEA project". Environmental Health Perspectives, vol115, pp.1578-1583.
- Samet, J.M., Dominici, F., Curriero, F.C. et al., (2000),"Fine particulate air pollution and mortality in 20 US Cities, 1987–1994", New England Journal of Medicine, vol 343, pp.1742-1749.
- Schwartz, J., (1994)," What are people dying of on high air pollution days?", Environmental respiratory, vol 64, pp.26-35.
- Schwartz, J., (2004),"Air pollution and children's health", Pediatrics, vol 113, pp.1037-1043.
- Servet, J.M. (2006). J.B. Say, manuscrits inédits sur la monnaie, la banque et la finance précédé d'un Essai de biographique sur JB. Say. Cahier Monnaie et financements.halshs-00117641, version1, 227 p.
- Shiu, A. et Lam, P.L., (2004), "Electricity consumption and economic growth in China", Energy Policy, vol 32, pp.47–54.
- Slade, M.E., (1982), "Trends in Natural-Resource Commodity Prices: An Analysis of the time Domain", Journal of environmental Economics and Management, vol 9, pp. 122-137.
- Smith, A. (1776). Recherches sur la nature et les causes de la richesse des nations. Collection : Les Classiques des Sciences Sociales, 208 p. (http://www.uqac.uquebec.ca/zone30/Classiques_des_sciences_sociales/index.html). (1867).

- Smith, N., (1979), “Toward a Theory of Gentrification. A Back to the City Movement by Capital, not People”, Journal of the American Planning Association, vol 4, pp 538-548.
- Spannhake, E.W., Reddy, S.P., Jacoby, D.B. et al., (2002), “Synergism between rhinovirus infection and oxidant pollutant exposure enhances airway epithelial cell cytokine production”, Environmental Health Perspectives, vol 110, pp.665–70.
- Soytas, U., Sari, R. et Ozdemir, O., (2001), ‘’Energy Consumption and GDP relations in Turkey: A Cointegration and Vector Error Correction Analysis. Economies and Business in Transition: Facilitating Competitiveness and Change in the Global Environment Proceedings, pp. 838-844.
- Soytas, U. et Sari, R., (2003), “Energy consumption and GDP: causality relationship in G-7 countries and emerging markets”, Energy Economics, vol 25, pp.33-37.
- Soytas, U. et Sari, R., (2006), “Energy Consumption and Income in G-7Countries”, Journal of Policy Modeling, vol 28, pp.739-750.
- Soytas, U et Sari, R., (2007), “Energy Consumption, Economic Growth, and Carbon Emissions: Challenges Faced by an EU Candidate Member”, Working Paper No. 2007-02.
- Soytas, U. et Sari, R., (2009), ‘’Energy Consumption, Economic Growth, and Carbon Emissions: Challenges Faced by an EU Candidate Member’’, Ecological Economics, vol 68, pp.1667-1675.
- Squalli, J., (2007), “Electricity consumption and economic growth: bounds and causalityanalyses of OPEC countries”, Energy Economics, vol 29, pp.1192–1205.
- Stern, D.I., (1993), “Energy use and economic growth in the USA, a multivariate approach”, Energy Economics, vol 15, pp. 137–150.
- Stollery, K.R., (1983), “Mineral depletion with costs as the extraction limit: a model applied to the behaviour of prices in the nickel industry”, Journal of Environmental Economics and Management, vol 10, pp.151-165.
- Stollery, K.R., (2000), “A multivariate cointegration analysis of the role of energy in the U.S. Macroeconomy”, Energy Economics, vol 22, pp. 267– 283.
- Sullivan, D.E., Sznopek, J.L et Wagner, L.A, (2001). 20th Century U.S. Mineral Prices Decline in Constant Dollars. Open File Report 00-389. Washington, DC: U.S. Geological Survey.
- Sunyer, J. et Basagana, X., (2001), “Particles and not gases are associated with the risk of death in patients with chronic obstructive pulmonary disease”, International Journal of Epidemiol, vol 30, pp.1138-1140.
- Sunyer, J., Schwartz, J., Tobias, A. et al., (2000), ‘’Patients with chronic obstructive pulmonary disease are at increased risk of death associated with urban particle air pollution: a case-crossover analysis’’, American Journal of Epidemiology, vol 151, pp.50-56.

- Sunyer, J., Spix, C., Quénel, P. et al., (1997), “Urbain air pollution and emergency admissions for asthma in four European cities: The APHEA Project”, Thorax, vol 52, p.760-765.
- Sweeney, J. (1974). Economics of Depletable Resources: Market Forces and Intertemporal Bias. Mimeo. Stanford University.
- Takaendesa, P et Odhiambo, N.M., (2007), “Financial sector development and economic growth: an empirical analysis of two southern African countries”,Studies in Economics and Econometrics, vol 31, pp.61-80.
- The APHEA project. (1996). Short term effects of air pollution on health: a European approach using epidemiology and community health. Vol50, 80p.
- Thoma, M., (2004), “Electrical energy usage over the business cycle”, Energy Economics, vol 26, pp.363–385.
- Tietenberg, T.H. (1984).Environmental and natural resource economics, published by Scott. Foresman in Glenview.
- Touloumi, G., Katsouyanni, K., Zmirou, D. et al., (1997), “Short-term effects of ambient oxidant exposure on mortality: a combined analysis within the APHEA project”, American Journal of Epidemiology, vol 146, pp.177-185.
- To, W.M., Lai, T.M., LO, W.C. et al., (2012), “The growth pattern and fuel life cycle analysis of the electricity consumption of Hong Kong”, Environmental Pollution, vol165, pp.1-10.
- To, W.M., Lai, TM et Chung, W.L., (2011), “Fuel life cycle emissions for electricity consumption in the world’s gaming center-Macao SAR, China”,Energy, vol 36, pp.5162-5168.
- Tremblay, J.M. (1963).Thomas-Robert MALTHUS(1798) : Essai sur le principe de de population. Paris: Editions Gonthier, 153 p.
- Tsani, S.Z., (2010), ‘’Energy consumption and economic growth: a causality analysis for Greece’’, Energy Economics, vol32, pp.582-590.
- Vallée, A. (2002). Economie de l’environnement. France : Editions du Seuil, Collection : Points economie, 344 p.
- Van Duysen, J.C et Jumel, C. (2008). Le développement durable. France : Editions l’Harmattan, 174 p.
- Wackernagel, M., et Rees, W. (1996). Notre empreinte écologique, Montréal : éditions écosociété.
- Wang, X. et Mauzerall, D.L., (2005), “Evaluating imapcts of air pollution in China on public health: implications for future air pollution and energy policies”, Atmopsheric environment, vol 40, pp. 1706-1721.

- Walras, L. (1874). Eléments d'économie politique pure ou théorie de la richesse sociale. L. Corbaz and Cie, p.208.
- Williamson, O.E. (1975). Markets and Hierarchies: Analysis and Antitrust Implications, Free Press, a division of Macmillan, Inc., New York.
- Willig, R.D., (1978)," Pareto-Superior Nonlinear outlay schedules", The Bell Journal of Economics, vol 9, pp.56-69.
- Wilson, R. et Spengler, J. (1996). Particles in our air: concentrations and health effects. Boston Havard University Press.
- Wolde-Rufael, Y., (2004), "Disaggregated industrial energy consumption and GDP: the case of Shanghai, 1952–1999", Energy Economics, vol 26, pp.69– 75.
- Wolde-Rufael, Y., (2009), "Energy consumption and economic growth: the African experience revisited", Energy Economics, vol 31, pp. 217–224.
- World Bank. (1992). World Development Report 1992: development and the environment, The World Bank.
- Yang, H.Y., (2000), "A note on the causal relationship between energy and GDP in Taiwan", Energy Economics, vol 22, pp.309–317.
- Yu, E.S.H et Hwang, B.K., (1984),"The relationship between energy and GNP: further results", Energy Economics, vol 6, pp. 186–1990.
- Yu, E.S.H. et Choi, J.Y., (1985), "The causal relationship between energy and GNP: an international comparison", Journal of Energy and Development, vol 10, pp.249-272.
- Yu, E.S.H et Jin, J.C., (1992), "Cointegration tests of energy consumption, income, and employment", Resources and Energy, vol 14, pp. 259-266.
- Yuan, J.H., Kang, J.G., Zhao, C.H et al, (2008)," Energy consumption and economic growth: Evidence from China at both aggregated and disaggregated levels", Energy Economics, vol30, pp.3077-3094.
- Yu, E.S.H., Choi, P.C.Y et Choi. J.Y., (1988), "The relationship between energy and employment: a reexamination", Energy Systems Policy, vol 11, pp. 287-295.
- Zachariadis, T., (2007), "Exploring the relationship between energy use and economic growth with bivariate models: new evidence from G-7 countries", Energy Economics, vol 29, pp.1223-1253.
- Zamani, M., (2007), "Energy consumption and economic activities in Iran", Energy Economics, vol 29, pp.1135–1140.
- Zhang, X.P et Cheng, X.M., (2009),"Energy consumption, carbon emissions and economic growth in China", Ecological Economics, vol 68, pp.2706-2712.
- Zheng, M., (2011),"Hong Kong: Particulate air pollution and health imapcts", Encyclopedia of Environmental Health, pp.56-61.
- Zivot, E. et Andrews, K., (1992), ''Further Evidence on The Great Crash, The Oil Price Shock, and The Unit Root Hypothesis", Journal of Business and Economic Statistics, vol 10, pp. 251–270.

ANNEXES

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1.1 : Sommaire des travaux qui étudient la relation de causalité entre la consommation d'énergie et la croissance ……p 252

Annexe 2.1 : Norme Tunisienne NT 106.04 de l'air ambiant……...p 255

Annexe 1.1 : Sommaire des travaux qui étudient la relation de causalité entre la consommation d'énergie et la croissance

Auteurs	Pays	Période d'étude	Causalité
Thoma (2004)	USA	1973-2000	CE---Y
Wolde-Rufael (2004)	Shanghai	1952-1999	
Soytas et Sari (2003)	La France, l'Allemagne, Japon et Turquie	1950-1992	
Asafu-Adjaye (2000)	Inde, Indonésie	1971-1995	
Stern (2000)	USA	1947-1994	
Masih et Masih (1996)	Inde	1955-1990	
Stern (1993)	USA	1947-1990	
Wolde-Rufael (2009)	La Tunisie et la Zambie	1971-2004	Y---CE
Zhang, Cheng (2009)	Chine	1960-2007	
Ang (2008)	Malaysia	1971-1999	
Lee, Chang (2007b)	18 pays en voie de développement	1971-2002	
Lise, Van Montfort (2007)	Turquie	1970-2003	
Mehrara (2007)	Les pays exportateurs de pétrole	1971-2002	
Zamani (2007)	Iran	1967-2003	
Soytas et Sari (2006)	Allemagne	1960-2004	
Lee (2006)	France, Italie et Japon	1960-2001	
Soytas et Sari (2003)	Italie et Corée du Sud	1950-1992	
Aqeel, Butt (2001)	Pakistan	1955-1996	
Soytas et al (2001)	Turquie	1960-1995	
Cheng (1999)	Inde	1952-1995	
Cheng (1998)	Japon	1952-1995	
Cheng, Lai (1997)	Taiwan	1955-1993	
Masih et Masih (1996)	Indonésie	1955-1990	

Abosedra, Boghestani (1989)	USA	1947-1987	
Kraft et Kraft (1978)	USA	1947-1974	
Belloumi (2009)	Tunisie	1971-2004	Y↔CE
Mishra, Smyth et Sharma (2009)	Les pays des iles du Pacifique	1980-2005	
Wolde-Rufael (2009)	Gabon, Ghana, Togo, Zimbabwe	1971-2004	
Erdal et al (2008)	Turquie	1970-2006	
Mahadevan, Asafu-Adjaye (2007)	Les pays importateurs de pétrole en voie de développement	1971-2002	
Zachariadis (2007)	France, Allemagne, Italie et Japon	1960-2004	
Lee (2006)	Suède, USA	1960-2001	
Soytas et Sari (2006)	Canada, Italie, Japon, UK	1960-2004	
Ghali el Sakka (2004)	Canada	1961-1997	
Oh, Lee (2004a, 2004b)	Corée du Sud	1970-1999	
Paul, Bhattacharya (2004)	Inde	1950-1996	
Hwang, Gum (1991)	Taiwan	1961-1990	
Halicioglu (2009)	Turquie	1960-2005	neutre
Payne (2009)	USA	1949-2006	
Soytas et Sari (2009)	Turquie	1960-2000	
Karanfil (2008)	Turquie	1970-2005	
Yuan et al (2008)	Chine	1963-2005	
Jobert, Karanfil (2007)	Turquie	1960-2003	
Zachariadis (2007)	Les pays G-7 et USA	1960-2004	
Lee (2006)	Allemagne, UK	1960-2001	
Soytas et Sari (2006)	France	1960-2004	
Altinay, Karagol (2004)	Turquie	1950-2000	

Fatai et al (2002)	New Zélande	1960-1999	
Cheng (1995)	USA	1947-1990	
Yu, Jin (1992)	USA	1974-1990	
Erol, Yu (1987)	Japon	1950-1982	
Yu, Choi (1985)	Corée du Sud	1954-1976	
Yu, Hwang (1984)	USA	1947-1979	
Akarca, Long (1980)	USA	1950-1970	

Source : Elaboration de l'auteur sur la base de l'article de Magazzino. C. (2011)

Annexe 2.1 : Norme Tunisienne NT 106.04 de l'air ambiant

Polluant	Type de moyenne	Autorisation de dépassement	Valeur limite relative à la santé		Valeur guide relative au bien-être	
			ppmv	µg/m³	ppmv	µg/m³
CO	8 H	2 fois/mois	9	10.000	9	10.000
	1 H	2 fois/mois	35	40.000	26	30.000
NO_2	annuelle	-	0.106	200	0.08	150
	1 H	1 fois/mois	0.350	660	0.212	400
O_3	1 H	2 fois/mois	0.12	235	0.07-0.10	150-200
P.S	annuelle	-	-	80	-	40-60
	1 journée	1 fois/an	-	260	-	120
SO_2	annuelle	-	0.03	80	0.019	50
	1 journée	1 fois/an	0.12	365	0.041	125
	3 H	1 fois/an	0.50	1300	-	-
Pb	annuelle	-	-	2	-	1-0.5
H.S	1 H	1 fois/an	0.14	200	-	-

NB : les concentrations de différents GES sont exprimées soient en (µg/m³) ou en (mg/m³). Ils peuvent être exprimés en rapport de volume en des parties par million (ppm) ou en parties par billion (ppb). Pour les convertir de ppb en (µg/m³), il faut multiplier par un facteur F spécifique pour chacun des polluants. (Voir tableau 01 ci-dessous)

Tableau 01 : Les facteurs de conversion (Martin et Yves Maystre, 1988)

Polluant	Facteur (F)
NO_2	1.86
SO_2	2.59
O_3	1.95

LISTE DES ACRONYMES ET DES ABREVIATIONS

Liste des acronymes et des abréviations

ADF : Augmented Dickey Fuller

ACS : American Cancer Society

ACP : analyse en composante principale

AHC : Admissions hospitalières pour motif cardiovasculaires

AHR : Admissions hospitalières pour motif respiratoires

AIOC : Anglo Iranian Oil Compagny

AIE : l'Agence Internationale de l'énergie

ANPE : Agence national de protection de l'environnement

AP: l'Anglo Persian

APHEA : Air Pollution and Health Europeen Approach

API : Agence de Promotion de l'industrie

ARDL : Autoregressive distributed lag approach

ASHMOG : Adventists Health Study on Smog

ASPO : Association pour l'étude des pics de production de pétrole et de gaz naturel

ATR : l'accès des tiers au réseau

ATS : l'administration territoriale de santé

BM : Bassin méditerranéen

BCTI: Baltic Exchange Clean Tanker Index

BP: British Petroleum

BPCO : bronchopneumopathie chronique obstructive

BT : basse tension

CAA : Concentrations atmosphériques admissibles

CE : consommation d'électricité destinée au secteur industriel

CECA : La communauté Européenne du charbon et de l'acier

CEDIGAZ : Centre International d'information sur le gaz naturel et tous les hydrocarbures gazeux.

CEE :la commission des communautés Européennes

CFP : la Compagnie Française des Pétroles

CHU : Centre Hospitalier Universitaire

CKE : Courbe de Kuznets environnementale

CME : Conseil Mondial de l'énergie

CO : monoxyde de carbone

COV : composés organiques volatils

CPC : Carthage Power Compagny

CIRC : le Centre International de recherche sur le cancer

CITET : Centre international des technologies de l'environnement de Tunis

CSHP : Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France

DJA : Doses journalières admissibles

DJT : Doses journalières tolérables

EDF : électricité de France

ENI : l'Ente Italiano Idrocarburi

EPIC : établissement public à caractère industriel ou commercial

ERI : L'excès du risque individuel

ERS : Evaluation du Risque Sanitaire

FTC: the Federal Trade Commission

FIPOL : Fonds international d'indemnisation pour les dommages dus à la pollution par les hydrocarbures.

GDF : Gaz de France

GES : Gaz à effet de serre

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

GNL : gaz naturel liquéfié

HAP : les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

HR : humidité relative

H_2S : hydrogène sulfuré

HT : hausse tension

INM : Institut National de la météorologie

INERIS : Institut national de l'environnement industriel et des risques

INVS : l'Institut de Veille Sanitaire

INM : Institut national de la météorologie

IPP : producteur indépendant d'électricité

KMO : Kaiser-Meyer-Oklin

LANGED : Agence nationale de gestion des déchets

LAURE : loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie

Mt : moyenne tension

NCR: National Research Council

NEDC: Near East Development Corporation

NO: monoxyde d'azote

NOAEL: No Observed Adverse Effect Level

NOAA: National oceanic and atmospheric administration

NO_x: Oxydes d'azotes

NO_2: dioxyde d'azote

NIOC: National Iranian Oil Compagny

O: oxygène

O_2: dioxygène

O_3 : ozone troposphérique

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

ONME: Observatoire national des maladies nouvelles et émergentes

ONU: Organisation des Nations-Unis

OPEP : l'Organisation des pays exportateurs de pétrole

OTED : Observatoire Tunisien de l'environnement et de développement durable

PFC_s : Chlorofluores de carbones

PM_{10} : Particules en suspension dont le diamètre est inférieur à 10 microns

$PM_{2.5}$: Particules en suspension dont le diamètre est inférieur à 2.5 microns

PNM : Pays du Nord de la méditerranée

PP : Phillips Perron

PSEM : Pays du sud et de l'est de la méditerranée

RD: Royal Deutsch

RD : Ratio de danger

RDS: la Royal Deutsch Shell

RNE : ressource naturelle épuisable

RNSQA : réseau national de surveillance de la qualité de l'air

RPI : le retail price index

SEEB : Société d'électricité Elbibane

SEIS : système d'information environnementale partagé et élargie

SFSP : la Société Française de Santé Publique

S_6F_6 : Hexa fluore de soufre

SIAPE : Société industrielle d'acide phosphorique et d'engrais

SO : Standard-Oil

SO_2: le dioxyde de soufre

T: température

Tec : tonnes d'équivalent charbon

Tm^3 : trillion de mètres cubes

TPC : Turkish Petroleum Company

TSP : triple super phosphate

TWh : Térawatt- heure

ULCC: Ultra Large Crude Carriers

USGS: United States Geological Survey

UE : l'Union-Européenne

US-EPA : l'Agence de Protection Environnementale aux Etats-Unis

VTR : Valeurs toxicologiques de référence

WEO : the World Energy Outlook

LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES

Liste des tableaux

Liste des figures

Table des matières

Tables de Matières

L'énergie entre les opportunités de développement et les risques de dégradation de la qualité de l'environnement : cas du gouvernorat de Sfax (Tunisie)....1

INTRODUCTION générale....2

Introduction générale....1

CHAPITRE 1 : IMPACT DE LA CONSOMMATION DE L'ENERGIE SUR LE DEVELOPPEMENT ECONOMIQUE : VALIDATION EMPIRIQUE POUR LE CAS DU GOUVERNORAT DE SFAX....2

Chapitre 1....7

Impact de la consommation de l'énergie sur le développement économique : validation empirique pour le cas du gouvernorat de Sfax....7

« On dit que l'argent n'a pas d'odeur : le pétrole est là pour le démentir. »....7

Pierre Mac Orlan....7

Introduction....7

1-Volet théorique....7

1.1Les aspects historiques et factuels de la consommation d'énergie dans le monde....7

1.1.1 La croissance démographique....7

1.1.2 Les facteurs historiques qui ont contourné l'énergie....7

1.1.2.1 La première conquête du pétrole du Moyen-Orient....7

1.1.2.2 La guerre 1914-1918 et la naissance de Total....7

1.1.2.3 L'accord de la ligne rouge et la création du cartel....7

1.1.3 Le pétrole est le moteur de la guerre....7

1.1.4 Les premiers affrontements pour une indépendance pétrolière....7

1.1.5 La genèse de l'OPEP et la période avant choc....8

1.1.6 Les deux chocs pétroliers de 1970....8

1.1.6.1 Le premier choc pétrolier....8

1.1.6.2 Le second choc pétrolier....8

1.1.6.3 Le contre choc des années 80....8

Figure 1.1- Les quotas de la production de l'OPEP en milliers de baril par jour....8

Figure 1.2- Evolution des prix de pétrole brut en $ Américain par baril....9

1.2Les disparités au niveau de la distribution des réserves entre les continents et son impact sur la politique énergétique....9

1.2.1 La répartition des réserves énergétiques entre les pays....9

1.2.1.1 Le pétrole....9

Figure 1.3-Les réserves prouvées en % en 2010....9

Figure 1.4- les réserves prouvées de pétrole exprimées en billion de baril....9

1.2.1.2 Les réserves en gaz naturel.....10
Figure 1.5- Evolution des réserves mondiales prouvées de gaz naturel exprimées en Tm3.....10
Figure 1.6- Les réserves prouvées du gaz naturel en 2010.....10
Tableau 1.1- Les exportations de gaz naturel et du GNL pour l'année 2010 exprimées en %.....10
1.2.1.3 Les réserves en charbon.....11
Figure 1.7- La répartition des réserves de charbon par catégorie et par pays en % (en 2010).....11
1.2.1.4 L'énergie nucléaire.....11
Figure 1.8- Production de l'électricité à partir de l'énergie nucléaire en % en 2003.....11
1.2.2 Le transport des hydrocarbures et la sécurité d'approvisionnement.....12
1.3. Les premières controverses autour de l'émergence des ressources naturelles dans l'économie.....12
1.3.1 L'école Physiocratique.....12
1.3.2 L'école classique.....12
1.3.3 L'école Néoclassique.....12
1.3.4 La reconnaissance des ressources naturelles par la théorie économique.....12
1.3.4.1 Le principe de la règle d'Hotelling.....12
1.3.4.2 Les extensions du modèle d'Hotelling.....13
Figure 1.9- Mouvement des prix selon les trois cas de figures de marché des RNE.....13
Figure 1.10- Evolution non linéaire du prix de marché suite à une baisse continue de Cm.....14
Figure 1.11.....14
Figure 1.12.....15
1.4Le débat théorique autour de la relation énergie-croissance.....15
1.4.1 Typologie des fonctions de production de type K.L.E.M.....16
1.4.2 Les fonctions de demande d'énergie issues des fonctions de production.....16
1.4.3 Le débat autour de la relation énergie-progrès technique.....16
1.4.3.1 La prise en compte de l'énergie comme origine dans l'analyse du progrès technique 16
1.5 Les spécificités de l'industrie de réseau.....17
1.5.1 La dérégulation des industries de réseau.....17
1.5.1.1 La théorie des couts de transaction.....17
1.5.1.2 La théorie des marchés contestables.....17
1.5.2 La tarification optimale des entreprises concessionnaires de service public.....17
1.5.3 La tarification des charges d'accès au réseau en cas d'ATR.....17
2. Contexte de la région de Sfax, données et analyse économétrique.....17
2.1 Présentation du gouvernorat de Sfax.....17

Figure 1.13 - Cartographie de Sfax.....18
2.1.1 Le gouvernorat de Sfax : quelques aspects économiques.....18
Tableau 1.2 - Répartition des entreprises par type et par secteurs en pourcentage.....18
2.1.2 L'électricité en Tunisie et à Sfax.....18
Figure 1.14- Evolution de la répartition de la production d'électricité par producteur.....18
Figure 1.15- Ressources et consommation d'énergie primaire en Ktep.....19
Figure 1.16-Variation de la consommation d'électricité MT pour le gouvernorat de Sfax (district Sfax ville).....19
Figure 1.17-Evolution des entreprises industrielles à Sfax.....19
Figure 1.18- Variation du nombre des abonnées MT pour le gouvernorat de Sfax (district de Sfax ville) 19
2.2 Revue de la littérature empirique.....19
2.3 Les techniques d'estimation.....20
2.3.1 Le test de stationnarité.....20
2.3.2 La technique de cointégration ARDL.....20
2.3.3 Le test de Causalité de Granger.....20
2.4 Résultats empiriques.....21
2.4.1 Le test de stationnarité.....21
Tableau 1.3.....21
2.4.2 Le test de cointégration.....21
Tableau 1.4- Détermination du nombre de retards optimal.....22
Tableau 1.5- Détection de la relation de long terme.....22
Tableau 1.6- Estimation de la relation de long terme.....22
2.4.3 Analyse de la causalité à court et à long termes.....23
Tableau 1.7- Test de la causalité de Granger.....23
Tableau 1.8- Récapitulatif du test de la causalité.....23
Conclusion.....23
CHAPITRE2 : IMPACT DE LA CONSOMMATION DE L'ENERGIE SUR LA DEGRADATION DE LA QUALITE DE L'ENVIRONNEMENT : VALIDATION EMPIRIQUE POUR LE CAS DU GOUVERNORAT DE SFAX.....24
Chapitre 2 90
Impact de la consommation de l'énergie sur la dégradation de la qualité de l'environnement : validation empirique pour le cas du gouvernorat de Sfax.....90
Introduction.....90
1-Volet théorique.....90
1.1 La croissance démographique et la dégradation de l'environnement.....90

1.2 Une vue d'ensemble du bilan énergétique mondial.....90

Tableau 2.1- Les émissions de CO2 dans le monde en pourcentage en millions de tonnes (année 2010) 90

1.3 La pollution.....90

1.3.1 Les différents types de pollution.....90

1.3.1.1 La pollution atmosphérique.....91

1.3.1.2 La pollution des eaux continentales.....92

1.3.1.3 La pollution des mers.....92

1.3.1.4 La pollution des sols.....92

1.3.2 La pollution d'origine énergétique.....92

1.4 Analyse théorique du phénomène de la dégradation de la qualité de l'environnement.....92

1.4.1 Analyse de la pollution selon le concept d'effets externes : une vue historique.....92

1.4.1.1 Les différents types d'externalités.....93

1.4.1.2 L'environnement naturel en tant que bien collectif.....93

Tableau 2.2.....93

1.4.1.3 Le concept de droits de propriété.....94

1.4.1.4 Les effets externes dus à la pollution est une source de divergence entre couts privés et couts sociaux.....94

1.4.1.5 La détermination de l'optimum social : la pollution optimale.....95

Figure 2.1.....95

Figure 2.2.....95

1.4.1.6 Les critiques adressés au calcul de la pollution optimale : optimum économique et optimum écologique.....96

Figure 2.3.....96

1.4.1.7L'internalisation des effets externes.....96

Figure 2.4.....97

1.4.2 Niveau de développement et qualité de l'environnement : la Courbe de Kuznets Environnementale (CKE).....97

Figure 2.5- Représentation des courbes de Kuznets sociales et environnementales.....97

1.5 Les changements climatiques observés et l'influence des facteurs météorologiques.....97

1.5.1 Les variations de températures.....97

Figure 2.6- Température et concentration de CO2 dans l'atmosphère au cours des quatre cents mille dernières années.....97

Figure 2.7-Variations de la température et du niveau de la mer à l'échelle du globe et de la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord.....98

Figure 2.8-Variation des températures à l'échelle du globe et des continents.....98

1.5.2-L'élévation du niveau des océans....98
1.5.3 Les autres risques....98
1.5.4 L'influence des facteurs météorologiques....98
1.5.5 Les changements climatiques dans la région de la Méditerranée....99
Tableau 2.3- Changements climatiques en Méditerranée en 2007....99
Figure 2.9- Variations du niveau de la mer observées durant les sept dernières années....99
1.5.6 Le changement climatique en Tunisie....99
2. L'impact de la consommation d'énergie sur la dégradation de la qualité de l'environnement pour le cas du gouvernorat de Sfax....100
2.1Revue de la littérature empirique....100
2.2 Analyse descriptive....100
2.2.1 Une brève idée sur la climatologie de Sfax....100
2.2.2 La Variabilité temporelle de la température au gouvernorat de Sfax....100
Figure 2.10- Evolution des surfaces autour de la station météorologique de l'INM....100
2.2.3 Les données environnementales relatives au gouvernorat de Sfax....100
Figure 2.11- Carte de localisation des zones industrielles et des principales sources de pollution dans le grand Sfax....101
Tableau 2.4- La part de chaque polluant dans la pollution atmosphérique....101
Tableau 2.5- Les origines relatives à chaque polluant....101
2.2.4 Distributions des différents polluants....102
Figure 2.12- Evolution de la journée type de NO2(01/01/2009)....102
Figure 2.13- Evolution de la journée type de NO2 pendant un dimanche (11/01/2009)....102
Figure 2.14-Evolution de l'ozone (11/01/2009)....102
Figure 2.15-Evolution alternée journalière de NO2 et d'O3 (11/01/2009)....102
Figure 2.16- Variation des teneurs de SO2 au fil des années....102
Figure 2.17- Evolution de la journée type de SO2....102
Figure 2.18- Evolution annuelle des PM10....103
Figure 2.19- Evolution au cours d'une journée des PM10....103
2.2.5 L'électricité....103
Figure 2.20- Emissions de GES dues à la combustion énergétique par secteur....103
2.3 Méthodologie et validation empirique....103
2.3.1 Test de racine unitaire....103
Tableau 2.6-Test d'ADF....103
Tableau 2.7-Test de PP....104
2.3.2 Représentation du modèle....104

2.3.3Le test de Wald.....104
Tableau 2.8.....104
2.3.4 Le test des valeurs limites d'ARDL.....104
Tableau 2.9- Cas où O 3 est la variable endogène.....105
Tableau 2.10- Cas où SO 2 est la variable endogène.....105
Tableau 2.11- Cas où PM 10 est la variable endogène.....105
2.3.5La spécification du modèle.....106
Tableau 2.12-NO2 est la variable endogène.....106
Tableau 2.13-Cas où O3 est la variable endogène.....107
Tableau 2.14- SO2 est la variable endogène.....107
Tableau 2.15- PM10 est la variable expliquée.....110
2.3.6Le test de causalité de Granger (1969).....110
Tableau 2.16- cas où NO2 est la variable endogène.....110
Tableau 2.17-cas où O3 est la variable endogène.....110
Tableau 2.18- cas où SO2 est la variable endogène.....111
Tableau 2.19- cas où PM10 est la variable endogène.....111
2.3.7 L'analyse en composantes principales (ACP).....111
Tableau 2.20- récapitulatif des valeurs propres.....111
Tableau 2.21- Les vecteurs propres.....111
Tableau 2.22- Les corrélations ordinaires.....112
Conclusion.....112
CHAPITRE 3 : IMPACT SANITAIRE DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE : LE CAS DE LA REGION DE SFAX 90
Chapitre 3.....173
Impact sanitaire de la pollution atmosphérique : le cas de la région de Sfax.....173
« Si tu es malade, recherche d'abord ce que tu as fait pour le devenir ».....173
Hippocrate.....173
Introduction.....173
1- Volet théorique.....173
1.1 Vue d'ensemble sur la pollution atmosphérique.....173
1.2 Aperçu historique de l'émergence graduelle de la notion de la ''santé environnementale''.173
1.2.1Le mouvement hygiéniste de la santé publique.....173
1.2.1.1 L'hygiène publique et l'environnement : le contrôle des maladies transmissibles. .173
1.2.1.2 L'hygiène individuelle et éducation pour la santé.....173

1.2.2Le développement de l'épidémiologie.....173
1.2.3Le courant écologiste.....173
1.3 Les dangers liés aux changements de la qualité de l'environnement.....173
1.3.1Les dangers biologiques.....173
1.3.2 Les dangers chimiques.....173
Tableau 3.1.....174
Tableau 3.2.....174
1.3.3Les dangers physiques.....174
Tableau 3.3- Les dangers et l'impact sanitaire correspondant.....175
1.4 L'impact sanitaire de la pollution atmosphérique.....175
1.4.1Les propriétés toxicologiques des principaux polluants atmosphériques.....175
1.4.1.1 L'effet sur l'appareil respiratoire.....175
1.4.1.2 L'effet sur l'appareil cardiovasculaire.....175
1.4.1.3Le Cancer.....175
1.4.2Les effets de la pollution atmosphérique à court terme.....175
1.4.2.1 La mortalité.....175
1.4.2.2La morbidité.....175
1.4.3 Les effets de la pollution atmosphérique à long terme.....175
1.4.4 Les populations sensibles.....176
1.4.4.1 Les enfants.....176
1.4.4.2Les personnes âgées.....176
1.4.4.3Les personnes souffrant de pathologies aigues ou chroniques.....176
1.4.4.4Les inégalités socio-économiques.....176
1.5 La démarche d'évaluation des risques sanitaires.....176
1.5.1Un aperçu historique sur l'émergence de la méthode d'évaluation des risques sanitaires 176
1.5.1.1 Les étapes de la méthode d'évaluation des risques sanitaires.....176
2. Analyse empirique de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique pour le cas de la région de Sfax.....177
2.1 Revue des travaux empiriques.....177
2.2 Les données sanitaires.....177
2.3Les données environnementales et météorologiques.....177
2.4 Modèle, méthodologie et résultats empiriques.....177
2.4.1Le test de stationnarité.....177
Tableau 3.4- Test d'ADF.....177

Tableau 3.5- Test de PP....178
2.4.2 Représentation du modèle....178
2.4.3 Le test de Wald....178
Tableau 3.6....178
2.4.4 Le test de valeur limite d'ARDL....178
Tableau 3.7- Cas où AHC est la variable endogène....178
Tableau 3.8- Cas où AHR est la variable endogène....179
2.4.5La spécification du modèle....179
Tableau 3.9- Cas où AHC est la variable endogène....179
Tableau 3.10- Cas où AHR est la variable endogène....185
2.4.6 Test de causalité de Granger....192
Tableau 3.11- Les résultats du test de causalité de Granger dans le cas où les AHC est la variable expliquée....192
Tableau 3.12- Les résultats du test de causalité de Granger dans le cas où les AHR est la variable expliquée....192
Conclusion....193
CONCLUSION GENERALE....173
Conclusion générale....215
BIBLIOGRAPHIE....215
ANNEXES....219
LISTE DES ACRONYMES ET DES ABREVIATIONS....241