



**HAL**  
open science

# Green Paradox et émissions de dioxyde de carbone : les systèmes actuels de taxation du “ carbone ” sont-ils efficaces dans la lutte contre les émissions de dioxyde de carbone ?

Julien Tabourier

## ► To cite this version:

Julien Tabourier. Green Paradox et émissions de dioxyde de carbone : les systèmes actuels de taxation du “ carbone ” sont-ils efficaces dans la lutte contre les émissions de dioxyde de carbone ?. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2020. dumas-03228027

**HAL Id: dumas-03228027**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03228027>**

Submitted on 17 May 2021

**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.

Copyright

Année universitaire **2019-2020**

# *Green Paradox* et émissions de dioxyde de carbone

*Les systèmes actuels de taxation du « carbone » sont-ils efficaces  
dans la lutte contre les émissions de dioxyde de carbone ?*

---

Présenté par **Julien TABOURIER**

Voie d'approfondissement : **Environnement et Master ENM IFP School**

Sous la direction de **Olivier MASSOL**, Professeur d'économie des énergies à L'IFP School.

Mémoire présenté le 07/07/2020, devant un jury composé de :

**Bernard CLEMENT**, Directeur du Département Ville & Environnement de l'ENTPE, président du jury.

**Simon GUILLAUME**, Estimateur de projets chez GRTgaz, expert indépendant.

## Table des matières

Résumé du travail effectué : .....	4
Remerciements : .....	6
Introduction et mise en contexte : .....	7
<b>I. Introduction au modèle d’Hotelling .....</b>	<b>8</b>
1) Le modèle de concurrence pure et parfaite : .....	9
2) Modèle de Hotelling et concurrence pure et parfaite : .....	10
3) Exemple et application du modèle de Hotelling : .....	13
A. <i>Définition du modèle</i> : .....	13
B. <i>Exemple</i> : .....	15
<b>II. Construction de la thèse du <i>Green Paradox</i>, une évolution des mentalités sur la question du réchauffement climatique : .....</b>	<b>18</b>
1) Prequels, mise en évidence du réchauffement climatique et de ses conséquences : .....	18
A. <i>Le rapport Meadows : prise de conscience et prémices d’un débat</i> : .....	20
B. <i>Rapports du GIEC : évolution des mentalités</i> .....	22
C. <i>Rapport Stern : un tournant ?</i> .....	24
2) Solutions et contre sens : le Green Paradox .....	27
A. <i>Définition d’externalité économique et lien avec le dioxyde de carbone</i> : .....	27
B. <i>Illustration de l’échec d’un marché, production pétrolière et CO2</i> : .....	29
C. <i>Définition du Green Paradox : problème de considération du carbone</i> .....	31
3) Discussion autour du green paradox et des enjeux environnementaux et climatiques actuels : 33	
A. <i>Discussion autour du Green Paradox, une réalité ?</i> .....	33
B. <i>La prise en compte de deux versions du Green Paradox : strong and weak ?</i> .....	35
<b>III. Travail sur les systèmes de taxation du carbone : questionnement du <i>Green Paradox</i> : .....</b>	<b>38</b>
1) Modélisation de « taxation carbone » de J. Smith : .....	38
A. <i>Définition du modèle</i> .....	38
B. <i>Modèle à un puit</i> .....	39
C. <i>Analyse du modèle à un puit</i> .....	40
D. <i>Conclusion de l’article</i> .....	41
E. <i>Critique de l’article et ouverture</i> .....	41

2) Présentation du modèle choisi.....	42
3) Présentation des résultats et discussion .....	44
A. <i>Solutions optimales : choix stratégiques des producteurs</i> .....	44
B. <i>Analyse de sensibilité des profits des producteurs aux régimes de taxes carbone</i> .....	46
C. <i>Propositions et solution au problème du Green Paradox</i> .....	50
4) Conclusion et critique du modèle .....	53
<b>Conclusion générale :</b> .....	<b>54</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>55</b>
<b>Annexes :</b> .....	<b>57</b>

## Résumé du travail effectué :

Ce Travail de Fin d'études, réalisé sous la tutelle de Mr MASSOL, est défini comme un travail de recherche et d'analyse économique. Pour ce travail j'ai choisi d'aborder le sujet du *Green Paradox* découlant du modèle simple décrit par l'économiste H. Hotelling. Ainsi je suis parti d'un article lié à cette problématique, que j'ai analysé, tout en gardant un regard critique sur le sujet. J'ai ainsi pu caractériser les thèmes principaux, les méthodes employées et les conclusions, afin de pouvoir, in fine, mener une réflexion et une étude personnelle sur le sujet. L'article de travail est le suivant :

James L. SMITH, *Green Paradox, Hotelling Cul de Sac*, Edwin L. Cox School of Business, Southern Methodist University, Dallas, 23 Septemeber 2016.

A la suite de la lecture de cet article, j'ai choisi de définir la problématique suivante :

### **Quel est l'impact d'un système de taxation « carbone » sur la stratégie de production des entreprises pétrolières ? Ces systèmes de taxation du carbone sont-ils efficaces dans la lutte contre les émissions de dioxyde de carbone ?**

Afin de tenter de répondre à cette problématique, j'ai choisi de premièrement revenir sur l'origine et la définition du modèle économique utilisé ici. Ce schéma économique, décrit par Hotelling en 1931, permet de simuler la réaction d'un marché lié à l'exploitation et la consommation d'une ressource non renouvelable. Le but sera d'expliquer les équations et calculs liés à ce modèle, afin d'en comprendre la théorie. Nous appliquerons ensuite ces équations à un exemple afin d'en analyser l'impact sur la stratégie de production des entreprises pétrolières.

Ensuite, nous reviendrons sur l'évolution de la prise en compte du phénomène de réchauffement climatique dans l'économie. En effet, découvert et apparu dans la fin du 20<sup>ème</sup> siècle, ce phénomène climatique a entraîné une prise de conscience du monde académique, politique et des entreprise concernées.

Puis, dans ce contexte, nous reviendrons sur la théorie du *Green Paradox*, définit par H-W. SINN en 2007. Selon lui, les politiques de taxation actuelles concernant les rejets de polluants atmosphériques, entre autres le dioxyde de carbone, amènent irrémédiablement à un paradoxe ou à un « cul-de-sac ». En effet, il démontre que selon ses hypothèses, les producteurs, anticipant une baisse des revenus futurs liée à l'instauration d'une taxe, vont avoir tendance à produire plus au moment de l'instauration / annonce de la taxe, et induisant des émissions plus importantes sur le court terme afin de maximiser leurs profits et la rentabilité de leurs actifs. Cette réaction rentre donc en conflit avec l'objectif initial des décideurs qui souhaiteraient, au contraire, réduire à court terme les émissions de polluants.

Cette théorie a amené de nombreux chercheurs à discuter de sa validité, mais également à revoir leurs visions concernant les systèmes de taxation mondiaux des polluants. Nous reviendrons ainsi sur ces systèmes de taxes, et particulièrement sur le marché des émissions de CO<sub>2</sub>.

Après avoir défini le contexte d'étude, nous reviendrons plus en détails sur l'article de J. SMITH afin de résumer et d'analyser au mieux sa thèse ainsi que ses hypothèses. Cet article a pour vocation d'étudier l'effet dit de *Green Paradox* sur les politiques de production des pétroliers. Pour cela, l'auteur veut étudier l'impact de l'instauration de taxe, sur l'extraction optimale de ressources non renouvelables et rares. Il aboutit alors à la conclusion suivante :

L'introduction d'une taxe sur la production pétrolière incite les producteurs à produire plus dès l'instauration de la taxe. Le but pour le producteur étant de valoriser ses réserves tant que cela lui est rentable, plutôt que devoir les laisser sous terre. Ainsi, les taxes visant initialement à réduire la production pétrolière et donc les émissions de CO<sub>2</sub>, induisent de fait de plus fortes émissions de CO<sub>2</sub> à court et moyen terme.

Ainsi l'auteur a choisi d'analyser l'effet de différentes formes de taxes sur les stratégies des Etats et des entreprises productrices. Pour cela, il va s'appuyer sur le modèle de Hotelling associé aux ressources naturelles non renouvelables.

Enfin, la dernière partie sera axée sur une réflexion personnelle sur la problématique, en lien avec l'article précédent. J'ai choisi de redéfinir un nouveau modèle de production qui paraît plus réaliste. En effet, J. SMITH a décidé de simuler une production soumise à une contrainte en exponentielle décroissante, fonction des investissements initiaux. Toutefois, j'ai préféré utiliser un autre modèle qui semblait plus pertinent et représentatif de l'exploitation d'un champ pétrolier. Ce modèle se rapproche du modèle de NEWBERRY, plus utilisé dans l'industrie gazière et pétrolière, consistant à définir des contraintes physiques (déplétion naturelle d'un puit) et une contrainte de production (investissements du producteur). D'autres caractéristiques ont été ajoutées, comme la possibilité de réaliser un *carry-over* (ou report fiscal).

Ensuite, nous intégrerons à ce nouveau modèle, les régimes de taxes définis par SMITH, à savoir des modèles de taxes croissantes, constantes et décroissantes. L'analyse de l'impact de ces taxes sera réalisée par une analyse des solutions optimales du modèle, puis par une analyse de sensibilité aux investissements ; l'objectif principal étant de mettre en avant la présence ou non du phénomène de *Green Paradox*.

Les principaux résultats de ce travail sont les suivants : l'instauration d'une taxe sur les émissions de dioxyde de carbone a tendance à modifier les stratégies de production des entreprises pétrolières. Toutefois, les résultats sont différents selon le régime fiscal choisi. Les taxes constantes et croissantes ont tendance à décaler les investissements vers le présent, et donc une production plus importante sur le court terme. Mais, ces choix de production permettent de réduire tout de même les émissions à court et long terme, contradictoires avec un *Green Paradox*.

Puis, les régimes fiscaux décroissants tendent à décaler la production et les investissements des entreprises sur le long terme. Ce système de taxe permet également de diminuer considérablement les émissions de dioxyde de carbone à court et long terme.

Ainsi, à travers ce travail, j'ai pu revenir sur les stratégies les plus couramment utilisées par les producteurs de ressources non renouvelables et rares. Mais, ces stratégies de production, particulièrement valables au début du 20<sup>ème</sup> siècle, ne permettent plus de prendre en compte les nombreuses externalités économiques, entre autres liées aux émissions de polluants. Toutefois, à travers la théorie du *Green Paradox*, nous avons montré que les systèmes de taxation du dioxyde de carbone sont complexes à aborder, et selon moi, un système de taxe décroissante pourrait être une solution à ces problèmes.

## Remerciements :

Avec ces quelques lignes, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès dans la réalisation de ce travail de fin d'études et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce mémoire.

Je voudrais dans un premier temps rendre hommage à mes camarades Pierre Berthier et Fabien Fort, avec lesquels nous avons élaborés une partie de ce rapport. Merci à eux pour leur engagement et leur résilience.

Ensuite, je tiens à remercier mon référent d'études Mr Olivier Massol, professeur d'économie des énergies à l'IFP School, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'IFP School et les intervenants professionnels responsables de ma formation, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci, y compris en temps de crise.

Je tiens enfin à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

Mr Sébastien Bianchi, responsable du master ENM et professeur de finance d'entreprise à l'IFP School pour son engagement et sa présence pour les étudiants durant cette année et tout particulièrement durant cette crise du Covid-19.

Mr Bernard Clément, responsable de master Environnement professeur à l'ENTPE, pour sa présence et son soutien tout au long de cette année.

Mr Simon Guillaume, pour sa présence lors de la soutenance de ce mémoire, et de pour ses conseils précieux.

Mme Léa Breuillier, pour ses précieux conseils lors de la rédaction de ce mémoire.

Mes parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements.

## Introduction et mise en contexte :

En 2007 puis 2014, les rapports AR4 et AR5 du GIEC (Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'évolution du Climat) ont mis en lumière le rôle de l'Homme dans un phénomène physique et planétaire, aux conséquences désastreuses : le **réchauffement climatique**. Face à cela, les gouvernements mondiaux, à travers diverses conférences sur les vingt dernières années, ont pris conscience de l'ampleur de la catastrophe, et tentent par de multiples moyens, d'en limiter ces conséquences. Les Etats, et entre autres la France, ont ainsi mis en place de nombreuses mesures pour limiter et diminuer l'intérêt de ses citoyens pour les énergies fossiles et autres produits émetteurs de GES (Gaz à Effet de Serre). Ces mesures de diminution de la demande sont également couplées à une série de mesures sur la taxation des émissions, ou **taxation « carbone »**. Le terme de « carbone » fait ainsi référence aux GES considérés comme équivalent dioxyde de carbone (eqCO<sub>2</sub>), principal gaz responsable de l'effet de serre et du réchauffement climatique. De ce fait, à travers divers régimes fiscaux, les Etats souhaitent diminuer progressivement les émissions de CO<sub>2</sub> des entreprises particulièrement émettrices, en agissant donc sur l'offre pétrolière.

Toutefois, en 2008, H.W. Sinn a étudié les systèmes de taxes mis en place pour limiter ces émissions, et a ainsi mis en avant la théorie suivante : le **Green Paradox**. Ce paradoxe consiste à montrer que les producteurs de ressources rares, à l'instar des producteurs pétroliers, ont tendance à produire plus sur le court terme à la suite de l'instauration d'une taxe sur les émissions. De ce fait, l'auteur allemand montre que les systèmes de taxations « carbone » produisent des effets contraires aux objectifs attendus.

Ainsi, pour ce travail de fin d'études, j'ai choisi de traiter la problématique suivante :

**Quel est l'impact d'un système de taxation « carbone » sur la stratégie de production des entreprises pétrolières ? Ces systèmes de taxation du carbone sont-ils efficaces dans la lutte contre les émissions de dioxyde de carbone ?**

Pour traiter cette problématique, nous reviendrons, premièrement, sur le modèle de production de Hotelling, concernant l'utilisation de ressources non renouvelables. Cette modélisation permet à un producteur de définir une stratégie de production optimale, aux regards de sa ressource. Nous montrerons comment ce modèle, définit il y'a un siècle, est toujours utilisé par divers entreprises et économistes actuellement. Ensuite, nous traiterons de l'évolution de la prise en compte du réchauffement climatique dans l'économie mondiale. Ce cheminement montrera également le contexte dans lequel Sinn a pu rédiger son article. Enfin, à travers l'analyse d'un article de l'économiste J. Smith portant sur la confirmation ou non du *Green Paradox*, nous étudierons une modélisation que j'ai pu réaliser, sur les systèmes de taxation du dioxyde de carbone sur la production pétrolière.



Dans les années 20, de nombreux économistes se sont penchés sur les questions de théorisation du secteur de l'énergie et plus généralement des ressources. Mais c'est principalement suite à la crise de 1929, et aux politiques du *New Deal* qui ont suivi, que les questions de durabilité des ressources énergétiques se sont posées. En effet, comment assurer une disponibilité équivalente des ressources pour les générations futures, tout en permettant une croissance dynamique du pays ? C'est principalement par l'observation des secteurs miniers et énergétiques que Harold Hotelling va proposer une approche quant à ces biens de consommations.

## I. Introduction au modèle d'Hotelling :

Le modèle de Hotelling a été imaginé en 1931 afin de décrire les stratégies de production et de consommation, dans l'exploitation d'une « ressource non renouvelable », ou « *exhaustible natural resource* ». L'auteur fait la distinction entre deux types de ressources naturelles :

- Les ressources dites « renouvelables », c'est-à-dire que la consommation d'une unité de ce bien n'influera pas sa disponibilité future. On peut citer de nombreux exemples tels que l'énergie solaire, les ressources halieutiques, forestières, .... Toutefois, une exploitation démesurée de ces ressources peut conduire à leur épuisement.
- Les ressources « non renouvelables », c'est-à-dire que la consommation d'une unité de bien amenuit irrémédiablement la disponibilité future de ce bien. On peut citer en exemple les ressources minières ou énergies fossiles, les réservoirs de biodiversité unique (forêts primaires entre autres) ou encore les nappes phréatiques.

Ainsi, c'est la fonction temporelle qui va particulièrement influencer l'exploitation de ces réserves. Une ressource renouvelable doit avoir suffisamment de temps pour se régénérer (spécifique à chaque ressource) ; et une ressource non renouvelable doit être gérée sur une échelle de temps large pour ne pas provoquer de rupture d'approvisionnement, ou encore de priver les générations futures de cette ressource. Par extension, régénérer une ressource renouvelable peut être considéré comme un investissement sur le long terme. A l'inverse, utiliser une ressource non renouvelable sera valorisé comme un investissement sur le court terme.

H. Hotelling s'est donc attelé à proposer un modèle pour expliquer les comportements des producteurs et consommateurs d'une ressource non renouvelable. L'auteur a particulièrement analysé le marché des ressources minières aux Etats Unies, mais explique que son raisonnement s'applique à toute ressource non renouvelable.

Son modèle consiste à définir une fonction de production de la ressource considérée, qui décroît exponentiellement au fil du temps, en lien avec une fonction de demande. Cette fonction de production tend à décroître, non par la saturation de la demande, mais par une « déplétion naturelle » (ou épuisement naturel de la ressource). Cet épuisement des ressources est inévitable, même en prenant en compte les avancées technologiques de récupération de celles-ci. Il va ainsi créer le concept de « rente de Hotelling » qui stipule que le producteur de cette ressource va percevoir une rente, égale à la différence entre le coût marginal de production et le prix de marché, qui augmente au fur et à mesure de la raréfaction de la réserve considérée.

Par la suite, nous étudierons plus en détail son modèle ainsi que les hypothèses prises en compte en fonction du type de mécanisme des marchés considérés (concurrence pure et parfaite, monopole, ...)

Lors de la définition d'un modèle économique, il est important de définir si l'on choisit de travailler :

- En temps continu : on ne considère aucune date mais plutôt des périodes de temps définies. Le temps continu permet également d'être plus précis sur le très long terme. On travaille alors avec des intégrales.
- En temps discret : on considère un pas de temps auquel on pourra associer systématiquement une valeur. Si les solutions du modèle sont finies, il peut être plus précis de travailler en temps discret. On travaille alors avec des sommes ou séries temporelles.

## 1) Le modèle de concurrence pure et parfaite :

En science économique, pour étudier la consommation/production d'un bien, il est important de définir au préalable la structure de ce marché, c'est-à-dire les mécanismes qui lient les fonctions de production et de demande. La structure la plus fréquemment utilisée est le modèle dit de Concurrence Pure et Parfaite. Ce modèle se définit par :

- Une atomicité de ses acteurs : Le marché est composé d'un grand nombre d'acheteurs et de vendeurs, variant d'un marché à l'autre.
- Homogénéité du produit vendu : L'ensemble des producteurs produit exactement le même bien, indiscernable.
- Information parfaite : les vendeurs et producteurs sont parfaitement informés des prix et des quantités vendues par les différents producteurs.

Les entreprises de ce marché sont nombreuses, ne se démarquant que par leurs coûts marginaux, ou leurs coûts de production d'une unité supplémentaire du bien. Les nombreux clients vont ainsi aller vers le producteur offrant le meilleur couple prix-quantité du bien considéré. Les entreprises sont dites ici « price takers », c'est-à-dire que les producteurs ne peuvent pas influencer le prix de marché, qui s'établira de lui-même. On représente ce marché par le schéma suivant :

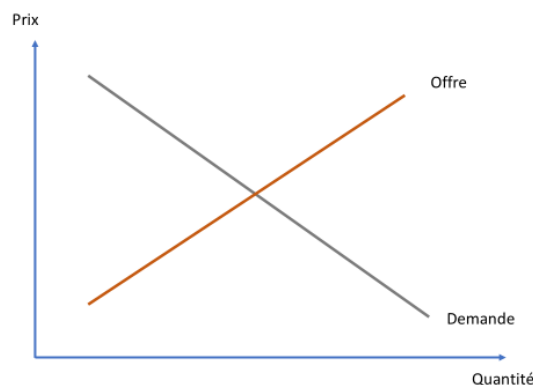


Figure 1 – Illustration des courbes d'offre et de demande dans la cadre d'un marché en concurrence pure et parfaite.

La courbe de demande représente le prix que les consommateurs sont prêts à payer pour une quantité du bien considéré. A l'inverse, la courbe d'offre représente le prix auquel le producteur est prêt à vendre une quantité de ce bien. Ainsi, on observe deux mécanismes illustrés par les schémas suivants :

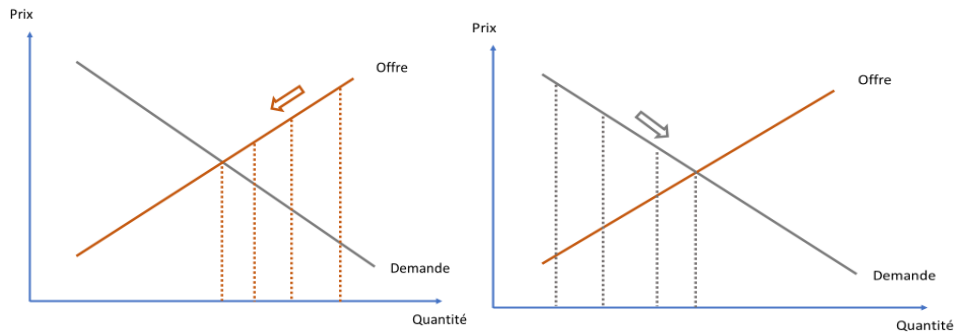


Figure 2 – Illustration du rééquilibrage du marché en concurrence pure et parfaite.

Dans le premier cas, à gauche, on voit que le couple prix quantité proposé rencontre la courbe de d'offre, mais pas celle de demande. Les prix proposés par les producteurs sont trop élevés pour la quantité proposée. Ainsi, les producteurs vont ajuster leur offre pour diminuer progressivement les prix-quantités pour rencontrer la courbe de demande. De même, pour le deuxième cas, on observe que le prix souhaités par le consommateur est haut car les stocks sont peu importants. Ainsi, de nombreux producteurs vont pouvoir tenter de satisfaire la demande, pour que les deux courbes d'offre et de demande se croisent.

Ce point de croisement des courbes d'offre et demande est appelé équilibre concurrentiel. Il est optimal au sens de Pareto, car il satisfait aussi les exigences d'offre des producteurs et de demande des consommateurs.

## 2) Modèle de Hotelling et concurrence pure et parfaite :

Pour définir son modèle, Hotelling a utilisé le marché en concurrence pure et parfaite, pour simuler la production d'une ressource non renouvelable. Il définit ainsi les différentes équations nécessaires à son raisonnement :

- La fonction de prix du bien considéré :

La fonction  $p_t = p_0 * e^{\gamma t}$ , avec  $p_0$ , le prix à  $t=0$  pour une unité d'un bien, et  $\gamma$  un taux d'actualisation évoquant la raréfaction du bien en question.

Comme dit précédemment, les productions étant homogènes, les prix des producteurs ont tendance à s'équilibrer autour d'une même valeur. Les seules caractéristiques spécifiques sont les coûts variables de chaque producteur, qui influent sur leur rentabilité.

- La fonction de production

$$q_t = f(p_t)$$

La fonction  $f$  est définie comme la fonction de demande du bien considéré.

Les ressources totales étant supposées connues, on peut définir que :

$$\int_0^T q_t dt = \int_0^T f(p_0 * e^{\gamma t}, t) dt = a$$

Avec  $a$  la quantité totale agrégée produite au cours du temps,  $T$  la période maximale d'extraction et  $f$  la fonction inverse de demande, faisant le lien entre la production du bien considéré et la demande de ce bien.

Pour trouver  $T$ , on sait que  $f(p_0 * e^{\gamma t}, T) = 0$  car à la période  $T$ , la ressource du bien considéré doit être nulle.

Ainsi, selon la forme de la fonction  $f$ , on obtient :

- Si  $f$  est de forme exponentielle :  $q_t = e^{-bp_t}$ , alors  $T$  va tendre vers l'infini, et la production va diminuer de  $b$ , un coefficient positif, par unité de temps.
- Si  $f$  est de forme linéaire :  $q_t = a - \beta p_t$ ,  $T$  sera fini. De plus, plus le prix sont hauts, et donc le taux d'extraction faible, plus  $T$  sera grand et inversement.

Avec cette forme basique, on peut comprendre la réaction d'un producteur face à l'évolution du marché du bien considéré.

- Maximiser l'utilité  $U_t$  de ce bien :

Une autre notion à laquelle s'est intéressé H. Hotelling est l'utilité totale du bien étudié. En science économique, l'utilité est un terme générique permettant de définir la satisfaction d'un besoin que ce soit du point de vue du producteur ou du consommateur. Ainsi, l'auteur définit la notion « d'utilité totale » ou « la valeur sociale de la ressource ».

De ce fait, l'utilité est selon l'auteur, la quantité de bien que le consommateur souhaite acheter selon le prix de ce bien, à un temps  $t$  fixé :

$$u_t = \int_0^{q_t} p_t(q_t) dq_t$$

L'acheteur a le choix de consommer de 0 à  $q_t$  du bien à la période de temps considérée.

Ensuite, on peut calculer l'utilité totale sur la période  $T$ , qui est actualisée avec un taux  $\gamma$ , on obtient :

$$V = \int_0^T u_t(q_t) e^{-\gamma t} dt$$

Le maximum de cette fonction, à une production définie et fixée, d'utilité totale sera donné par la formule suivante :

$$\frac{d}{dq} u_t(q_t) e^{-\gamma t} = p(q_t) * e^{-\gamma t} = cst$$

Or, le maximum doit être une constante, ce qui implique :

$$p(q_t) = p_0 * e^{\gamma t}$$

Ainsi, on retrouve bien le même résultat que dans la première partie, à savoir, que l'utilité d'un bien non renouvelable a tendance à diminuer au cours du temps selon un taux d'actualisation  $\gamma$ , et suit une fonction de prix qui elle augmente selon ce même  $\gamma$ .

Nous avons ainsi retrouvé la première conclusion de Hotelling, à savoir que, **l'acquisition d'une unité supplémentaire de ce bien, entraînerait une augmentation du prix de celui-ci, et une utilité future**

**moindre (et donc une utilité présente forte) ; selon un taux d'actualisation similaire, ici  $\gamma$ .** L'utilité marginale de l'acquisition d'un bien est donc une fonction décroissante.

De cela, Hotelling s'interroge également sur le fait que, puisque l'utilité marginale a tendance à diminuer au cours du temps, il est préférable pour les exploitants d'extraire de manière à ce que l'augmentation de l'utilité marginale présente soit comblée par une augmentation simultanée des prix de ce bien.

- Maximisation des profits :

Enfin, pour analyser plus efficacement un actif utilisé pour produire des ressources non renouvelables (mine, forêt, champ pétrolier, ...), Hotelling propose d'observer les profits actualisés, c'est à dire la différence entre les ventes et les coûts de production. Ici, nous nous intéresserons au modèle simple sans coûts de production. Les profits sont actualisés au taux d'actualisation  $\gamma$ , ce qui caractérise la préférence pour le présent (ou l'inverse de la préférence pour le futur) des producteurs face au choix de vendre ou non leur production. Ainsi on a :

$$\Pi_t = q_t p_t e^{-\gamma t}$$

De cette équation, le but sera de déterminer le plan optimal d'extraction des ressources considérées. Cela revient à résoudre un problème d'optimisation, en maximisant le profit du producteur, sous la contrainte que les quantités extraites soient inférieures ou égales à la valeur  $a$  :

$$\begin{aligned} \text{Max} \int_0^T q_t p_t e^{-\gamma t} dt \\ \text{s. t.} \int_0^T q_t dt \leq a \end{aligned}$$

Il est important de noter qu'à partir de ces équations, le producteur a le choix à chaque période de produire ou non, et donc de faire le choix entre produire  $q_t$  et vendre cette production au prix  $p_t e^{-\gamma t}$  ; et reporter sa production à l'instant  $t + 1$ . Ce report est permis par l'augmentation des prix et le calcul du profit en valeur présente, c'est-à-dire actualisée.

De ces équations, en considérant l'hamiltonien de ce problème, on en tire :

$$q_t \cdot p_t e^{-\gamma t} - \lambda \cdot q_t = cst$$

La variable  $\lambda$ , positive ou nulle, est la variable duale permettant de prendre en compte la contrainte de maximisation de la production dans notre problème.

Si l'on dérive ce résultat par la quantité souhaitée, on peut annuler l'équation (grâce à la condition de maximisation de la production). On obtient alors :

$$\begin{aligned} \frac{dp_t}{dq_t} e^{-\gamma t} - \lambda &= 0 \\ \Leftrightarrow \frac{dp_t}{dq_t} &= \lambda \cdot e^{\gamma t} \end{aligned}$$

Ainsi, on peut observer ici que la variation de production va entraîner une augmentation positive du prix. En d'autres mots, le prix marginal de vente a tendance à augmenter au fur et à mesure que les ressources diminuent. Le producteur voit donc son profit augmenter suite à l'épuisement progressif de sa réserve, et non par une amélioration de ses coûts. Nous avons ainsi retrouvé la seconde loi de Hotelling, qui indique que le **prix marginal de vente du producteur augmente selon un taux d'intérêt  $\gamma$** . Cette rente est égale à la valeur  $\lambda$ , est appelée **rente de Hotelling ou « rente de rareté »**.

En conclusion, le modèle de Hotelling concernant la production de ressources non renouvelables a permis de mettre en lumière deux phénomènes conjoints :

- Plus le producteur va produire sa ressource, plus l'utilité marginale future va diminuer, et donc son prix va augmenter ; selon un même taux d'actualisation.
- Cette augmentation du prix de vente de ses ressources va aboutir à l'émergence d'une « rente de rareté, ou augmentation des marges du producteur, selon le même taux d'actualisation.

Ces deux phénomènes permettent ainsi aux producteurs de définir une politique de production offrant des profits optimaux, tout en s'assurant d'avoir utilisé au maximum leurs ressources. Par la suite, nous nous appuyerons sur l'exemple d'une mine, afin de mettre en lumière ces phénomènes et d'observer les effets de ce modèle sur le choix d'une trajectoire de production.

### 3) Exemple et application du modèle de Hotelling :

#### A. Définition du modèle :

Dans ce cas simple, on considère une mine, qui produit un bien non substituable entre différentes autres mines (exemple : production de fer quelle que soit sa qualité). On considère également que la demande s'adapte au prix proposé par la mine. Cette hypothèse permettra d'appliquer les conclusions du modèle de concurrence pure et parfaite. Le raisonnement sera le même que présenté ci-dessus, toutefois, par choix de commodité, nous réaliserons ici les calculs en temps discret.

Cette mine possède un stock supposé connu,  $R_0$ , de tel sorte que le stock  $R_t$  restant de minerais à chaque début de période de temps est défini par :

$$R_t = R_0 - \sum_{i=0}^t q_i \quad \text{et} \quad \sum_{t=0}^T q_t = R_0$$

Avec  $q_t$ , les quantités extraites de la mine à chaque période de temps, et  $T$  la durée totale d'extraction.

Ensuite, on peut définir  $C$ , le coût de production des  $q_t$  quantités de bien extraites à chaque période de temps  $t$ .

Ici, le producteur est libre de retarder la vente de sa production, et on note donc  $p(q_t)$ . De ce fait, on peut définir le profit de la mine considérée :

$$\Pi_t = (p(q_t) - C) \cdot q_t$$

A partir de ces équations, le but est de déterminer le plan optimal de production pour cette mine, tout en considérant que ses ressources vont diminuer irrémédiablement.

On s'intéresse ensuite à la valeur actuelle nette du projet, c'est-à-dire la somme des *Cash-Flow* (différence entre les entrées et sorties d'argent) actualisées selon un taux d'intérêt  $r$ . Ce taux d'intérêt correspond à la préférence de vente pour le futur pour le producteur, ou l'inverse de sa préférence pour le présent. Ainsi, ce choix de production est équivalent à résoudre un problème d'optimisation sous contraintes de la forme suivante :

$$(1) \text{ Max } \sum_{t=0}^T \Pi_t \frac{1}{(1+r)^t}$$

$$\text{et s. t. } \sum_{t=0}^T q_t \leq R_0$$

Ensuite, on peut à écrire le lagrangien de ce problème :

$$L = \sum_{t=0}^T (p(q_t) - C) \cdot q_t \frac{1}{(1+r)^t} + \lambda \left( R_0 - \sum_{t=0}^T q_t \right)$$

Avec  $\lambda$ , la variable duale associée à la contrainte de réserve.

Pour utiliser ce résultat, on veut déterminer le plan optimal de production. Pour cela, on dérive le lagrangien obtenue par la production souhaitée, on obtient alors :

$$\frac{dL}{dq_t} = \left( \frac{dp(q_t)}{dq_t} - C \right) \frac{1}{(1+r)^t} - \lambda = 0$$

$$(2) \Leftrightarrow \left( \frac{dp(q_t)}{dq_t} - C \right) \frac{1}{(1+r)^t} = \lambda$$

On retrouve que la « rente de rareté » est donnée ici par la différence entre le prix marginal de vente de la commodité en question, et le coût de production de la mine. On voit également que,  $\lambda$  étant positive ou nulle, la rente de cette mine augmente au fur et à mesure de la production de son minerai.

On peut également définir la « règle de Hotelling » ou la «  $r$  percent rule » pour cet exemple : en suivant une trajectoire de production/extraction optimale, le produit marginal doit augmenter de manière croissante.

Ainsi, en suivant cette logique, sur deux périodes de temps adjacentes on obtient :

$$(3) \left( \frac{dp(q_t)}{dq_t} - C \right) = \frac{1}{(1+r)^t} \left( \frac{dp(q_{t+1})}{dq_{t+1}} - C \right)$$

En réarrangeant l'équation (3), on obtient ainsi la valeur du taux d'actualisation optimal  $r$  :

$$r = \frac{\left( \frac{dp(q_{t+1})}{dq_{t+1}} - C \right) - \left( \frac{dp(q_t)}{dq_t} - C \right)}{\left( \frac{dp(q_t)}{dq_t} - C \right)}$$

En général, ce taux d'actualisation est assimilé au Coût moyen pondéré du capital d'une entreprise, ou CPMC (WACC en anglais), qui varie d'un secteur à l'autre.

Ainsi, en ajoutant au modèle les coûts de production de la mine considérée, on retrouve bien les mêmes résultats que précédemment. Nous allons par la suite essayer de modéliser sur le logiciel Excel ce profil de production optimale.

### B. Exemple :

Pour expliciter les résultats obtenus précédemment, on considère les données suivantes :

- Une réserve initiale  $R_0$  de 100 tonnes de minerais.
- L'équation de prix est donnée par la formule suivante :  $p_0 * e^{rt}$ , et le prix initial  $p_0$  d'une unité de minerais est de 100\$.
- Le coût de production  $C$  est de 80\$.
- On considère un taux d'actualisation  $r$  de 8%, taux classique dans l'industrie.
- La durée de vie de la mine est de 20 ans.
- La fonction objective sera la maximisation la VAN du producteur, c'est-à-dire la somme de ses profits actualisés.
- Deux contraintes sont appliquées à ce modèle :
  - o La réserve, à la fin de la période d'utilisation doit être nulle.
  - o La production, si elle est « pertinente », ne peut pas être inférieure à 1 unité.

Ensuite, pour résoudre ce problème, nous utilisons le logiciel Excel, et entre autres sa fonction de solveur. Les résultats de production sont les suivants :

Temps	Production	Réserve	Prix de vente	Coût de production	Profit discounté	Profit marginal	Prix marginal	Rente
0	1,0 t/an	99,0 t	108 \$/t	80 \$/t	28 \$	-	-	-
1	4,79 t/an	94,2 t	117 \$/t	80 \$/t	162 \$	35 \$	2 \$	-78 \$
2	4,81 t/an	89,4 t	126 \$/t	80 \$/t	190 \$	1076 \$	368 \$	288 \$
3	4,84 t/an	84,6 t	136 \$/t	80 \$/t	215 \$	1087 \$	429 \$	349 \$
4	4,86 t/an	79,7 t	147 \$/t	80 \$/t	239 \$	1097 \$	501 \$	421 \$
5	4,88 t/an	74,8 t	159 \$/t	80 \$/t	261 \$	1106 \$	584 \$	504 \$
6	4,9 t/an	69,9 t	171 \$/t	80 \$/t	282 \$	1114 \$	682 \$	602 \$
7	4,92 t/an	65,0 t	185 \$/t	80 \$/t	301 \$	1122 \$	795 \$	715 \$
8	4,93 t/an	60,1 t	200 \$/t	80 \$/t	319 \$	1129 \$	927 \$	847 \$
9	4,95 t/an	55,1 t	216 \$/t	80 \$/t	336 \$	1136 \$	1082 \$	1002 \$
10	4,96 t/an	50,2 t	233 \$/t	80 \$/t	352 \$	1142 \$	1262 \$	1182 \$
11	4,97 t/an	45,2 t	252 \$/t	80 \$/t	366 \$	1148 \$	1471 \$	1391 \$
12	4,98 t/an	40,2 t	272 \$/t	80 \$/t	380 \$	1153 \$	1716 \$	1636 \$
13	5,0 t/an	35,2 t	294 \$/t	80 \$/t	393 \$	1158 \$	2002 \$	1922 \$
14	5,01 t/an	30,2 t	317 \$/t	80 \$/t	404 \$	1162 \$	2335 \$	2255 \$
15	5,01 t/an	25,2 t	343 \$/t	80 \$/t	415 \$	1167 \$	2724 \$	2644 \$
16	5,02 t/an	20,2 t	370 \$/t	80 \$/t	425 \$	1171 \$	3177 \$	3097 \$
17	5,03 t/an	15,1 t	400 \$/t	80 \$/t	435 \$	1174 \$	3705 \$	3625 \$
18	5,04 t/an	10,1 t	432 \$/t	80 \$/t	443 \$	1177 \$	4322 \$	4242 \$
19	5,05 t/an	5,05 t	466 \$/t	80 \$/t	451 \$	1181 \$	5041 \$	4961 \$
20	5,05 t/an	0,0 t	503 \$/t	80 \$/t	459 \$	1183 \$	5880 \$	5800 \$

<b>NPV</b>	<b>6859 \$</b>
------------	----------------

Figure 3 – Tableau descriptif des choix de production selon un modèle de Hotelling

On observe que la stratégie optimale à choisir pour que le propriétaire de la mine ait un profit maximal est de produire à chaque période une quantité légèrement supérieure à la précédente (ici autour de +0.4%), tout en assurant un profit croissant également (autour de +2.4% par période). Cette solution peut être considérée comme optimale, car au bout des 20 périodes de temps, la réserve de la mine est égale à 0.



Ensuite, on peut également observer le graphique suivant, montrant l'évolution temporelle des réserves et du profit marginales, ici calculé comme le rapport de la variation entre deux période du profit actualisé, et de la production :

$$\frac{\text{profit}_{t+1} - \text{profit}_t}{\text{production}_{t+1} - \text{production}_t}$$

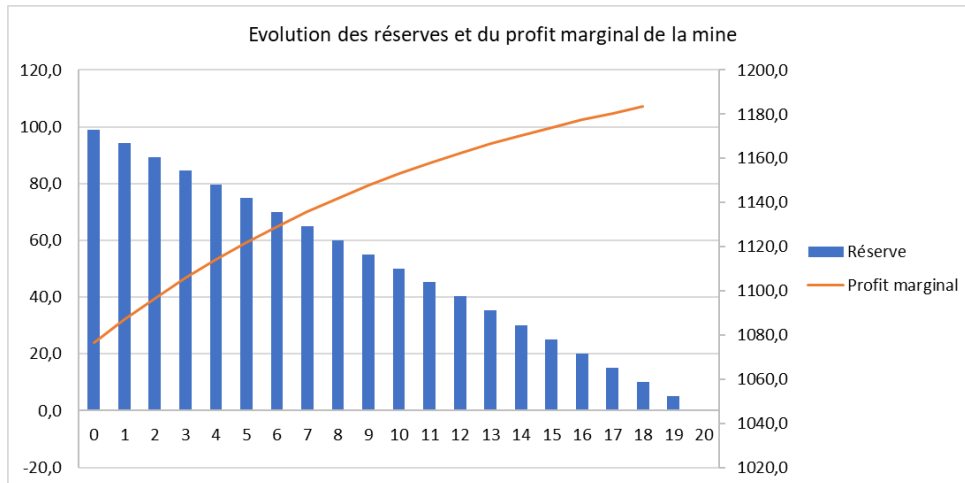


Figure 4 – Evolutions conjointes des réserves et du profit marginal.

Comme prédit par Hotelling, au fur et à mesure que les réserves diminuent (environ 10% par an), on constate bien que le profit marginal est en constante croissance. Ainsi, plus la réserve a tendance à s'épuiser, plus le profit du producteur sera important, aux vues de la rareté se créant.

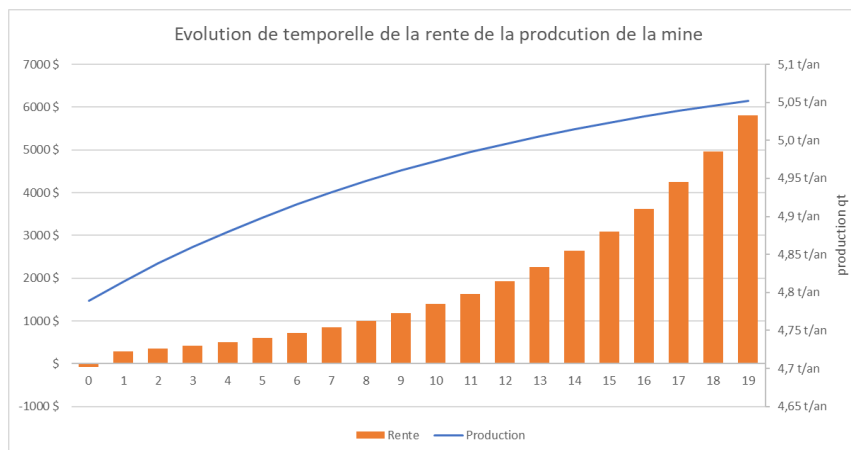


Figure 5 - Evolutions conjointes de la production et de la rente minière.

Enfin, la figure 5 montre l'évolution de la rente de la mine, c'est-à-dire la différence entre le prix marginal de vente et les coûts de production du producteur. On voit également ici que, plus la production des ressources de la mine augmente, plus la rente du producteur augmente.

Cet exemple bien que simpliste dans sa définition, permet de mettre en lumière les deux caractéristiques du modèle d'Hotelling, à savoir :

- Une utilité future réduite, se concrétisant par une augmentation des prix à chaque période d'extraction.
- Un profit marginal croissant et donc une rente liée à la rareté également croissante de cette ressource.

Ainsi, à travers l'étude du modèle de Hotelling sur les ressources non renouvelables, nous avons pu mettre en avant les stratégies des producteurs lorsque ceux-ci font face à la disparition de leur ressource. Le raisonnement de Hotelling, établi en 1931, est encore utilisé par de nombreux économistes et entreprises de nos jours. Il peut être résumé de la manière suivante : « *Hotelling (1931) pose le problème de la gestion intertemporelle d'une ressource épuisable dans les termes suivants : comment allouer une quantité donnée d'une ressource entre les différentes périodes futures, de manière à maximiser l'utilité tirée de l'extraction et de la consommation de cette ressource ?* ». <sup>1</sup> Pour cela, le producteur ne prend en compte que ses coûts de production ainsi que le prix de revente de sa réserve. De ce fait, ce raisonnement exclut les conséquences physiques et naturelles liées à l'exploitation de ces réserves. Ce raisonnement, brillant au siècle dernier, pose maintenant de nombreuses questions comme nous le verrons par la suite.

---

<sup>1</sup>Manuel d'économie environnementale, CHAPITRE IX : LA GESTION DES RESSOURCES NATURELLES

## II. Construction de la thèse du *Green Paradox*, une évolution des mentalités sur la question du réchauffement climatique :

Comme vu précédemment, le raisonnement de Hotelling permet de simuler le comportement de producteurs de ressources naturelles non renouvelables, avec ou sans système de taxes. Mais son raisonnement, instruit au siècle dernier, ne prend pas en compte une donnée importante : le réchauffement climatique. Depuis les années 90, les chercheurs du monde entier ont pu mettre en évidence l'impact de l'Homme dans l'augmentation globale de la température terrestre, notamment par l'émission démesurée de gaz à effet de serre. Les économistes se sont ainsi penchés sur le problème suivant : comment ajouter la donnée climatique dans l'économie mondiale ? Nos systèmes et modèles actuels sont-ils en capacité d'intégrer les contraintes climatiques et d'anticiper les conséquences de ces externalités ? Les modèles établis par Hotelling visant à vider des réserves, peuvent-ils être utilisés, à l'inverse, pour tenter « vider » ou du moins limiter le CO<sub>2</sub> atmosphérique ?

C'est dans ce contexte que H.W. Sinn a publié en 2008, un article intitulé « *Public policies against global warming: a supply side approach* », expliquant sa thèse du « Green Paradox ».

Ainsi, nous reviendrons premièrement sur les prémices des recherches économiques de l'impact du réchauffement climatique, puis sur la définition même du *Green Paradox*, et enfin nous analyserons les discussions actuelles autour de ce sujet.

### 1) Prequels, mise en évidence du réchauffement climatique et de ses conséquences :

Le réchauffement climatique, au sens de « dérèglement climatique », est un phénomène observé et analysé depuis la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle. Ce phénomène met en avant la forte augmentation des températures mondiales, causant de nombreuses transformations climatiques et écologiques : fonte des calottes glaciaires, augmentation du niveau des océans, destructions de certains espaces naturelles fragiles, ... Les scientifiques ont ainsi mis en cause l'action humaine dans cette hausse globale des températures mondiales via l'augmentation constante des émissions de gaz à effet de serre, et particulièrement le dioxyde carbone. Mais pour mieux comprendre ce phénomène, nous pouvons nous aider de quelques chiffres :

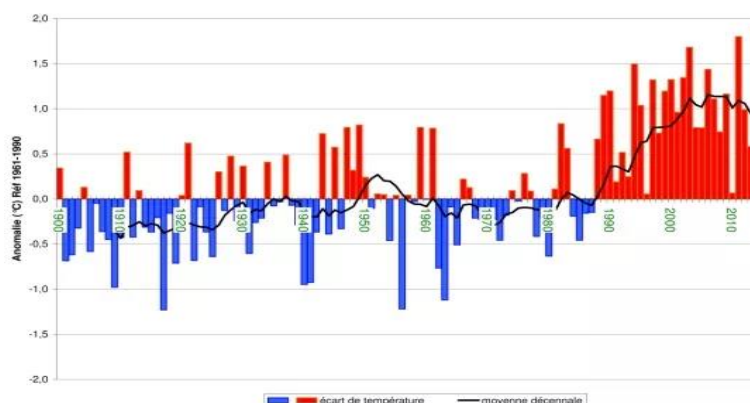


Figure 6 – Evolution de la température moyenne annuelle en France, entre 1900 et 2019.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Source : <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-rechauffement-observe-a-l-echelle-du-globe-et-en-france>

Grace à ce graphique, on voit que la température moyenne en France a augmenté de plus de 1°C au cours du XXème siècle, et on dénombre **six des dix dernières années faisant parties des années des plus chaudes enregistrées en France.**

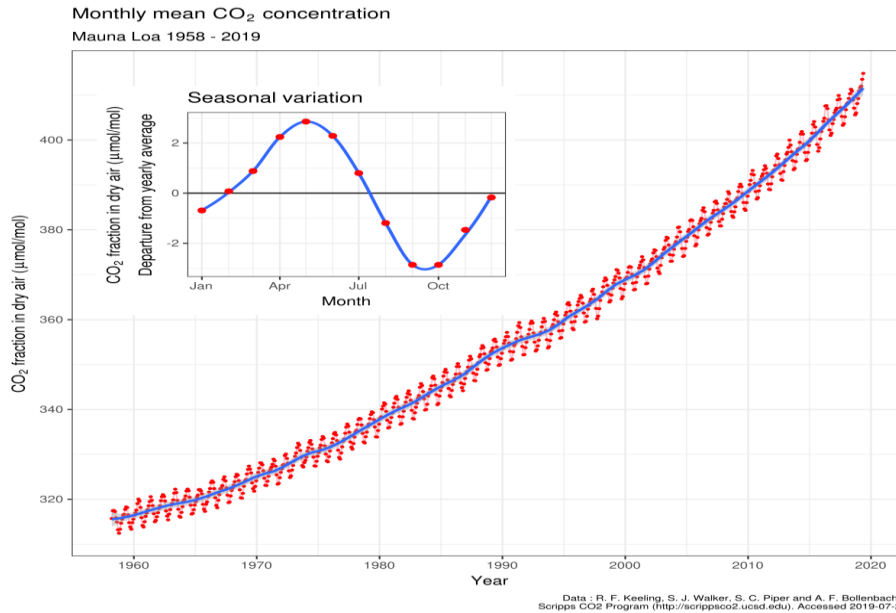


Figure 7 – Evolution temporelle de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone en ppm.

Ensuite, la figure 7 illustre bien que **l’augmentation de la concentration en CO2 de l’atmosphère augmente de façon linéaire chaque année**, tout en variant de façon infra-annuelle. Cette variation positive est particulièrement corrélée à l’augmentation de la hausse des températures.

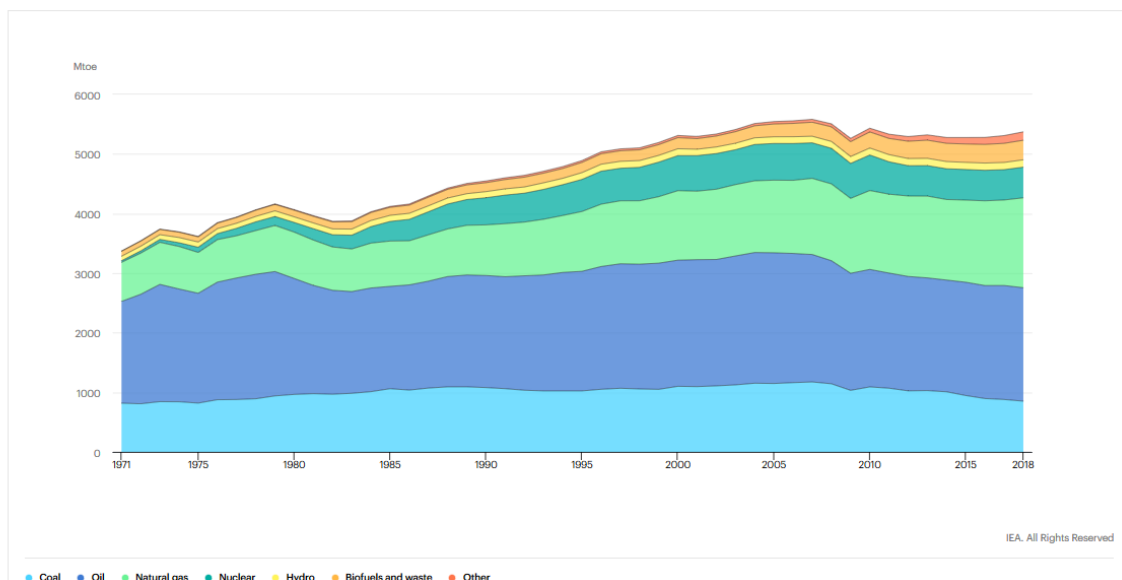


Figure 8 – Evolution du mix énergétique mondial entre 1975 et 2018<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Source : <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/oecd-total-primary-energy-supply-tpes-by-source-1971-2018>

Enfin, en analysant la figure 8, on s'aperçoit que le **mix énergétique mondiale est composé en majeure partie d'énergies fossiles** (près de 80%), à l'origine de l'émission massive de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Ainsi, à l'aide de ces chiffres, quelques-uns parmi une multitude possible, nous ne pouvons que accepter et assumer le rôle dans l'Homme dans le réchauffement climatique. Toutefois, si en 2020 nous sommes absolument persuadés de ce phénomène, cette reconnaissance fut longue et de nombreux économistes et scientifiques se sont insurgés sur l'indifférence mondiale durant des dizaines d'années.

### A. Le rapport Meadows : prise de conscience et prémices d'un débat :

Publié en 1972, ce rapport a été rédigé par un ensemble de chercheurs de l'université américaine MIT (Massachusetts Institute of Technology) et financé par un groupe de pensée, le Club de Rome, réunissant divers chercheurs et fonctionnaires de différents pays. Également intitulé « Halte à la croissance ? », cet ouvrage a connu un grand succès, bien que suscitant des débats animés. Après avoir constaté que la croissance économique était devenue supérieure à la croissance démographique (7% de croissance du GDP sur les années 1960, contre 2% pour la croissance de la population mondiale), les auteurs ont ainsi voulu montrer qu'en regard des choix effectués par l'Homme pour continuer sa « croissance », cela aboutirait irrémédiablement à une impasse.

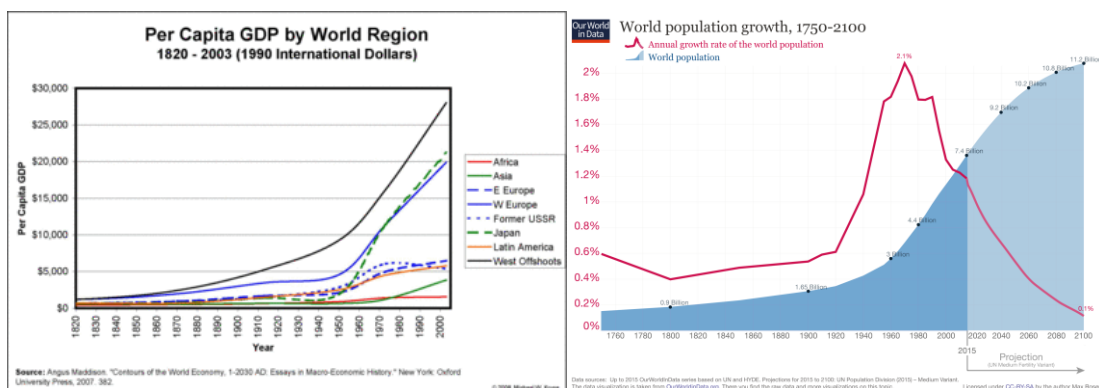


Figure 9 – Graphiques montrant, respectivement, l'évolution de la croissance économique et de la population mondiale entre le 19<sup>ème</sup> et le 20<sup>ème</sup> siècle.

Les auteurs se sont principalement appuyés sur les travaux de Forrester sur la dynamique des systèmes en observant cinq grands indicateurs : la population mondiale, la production alimentaire, l'industrialisation, la pollution et l'utilisation des ressources non renouvelables. A ces indicateurs, ils appliquent alors un raisonnement de croissance dite exponentielle, ou de croissance dynamique. Ils créent ainsi un système de boucle de rétroaction, où les indicateurs vont varier selon :

- Un effet positif : c'est-à-dire que la variation (augmentation ou diminution) d'un indicateur à un instant  $t$  va augmenter de façon exponentielle sur les périodes futures, et entraîner de la même manière les indicateurs qui lui sont reliés. On peut associer ce phénomène à un « cercle vicieux » qui se trouve difficilement arrêtable.
- Un effet négatif : c'est-à-dire que l'indicateur va avoir tendance à demeurer constant d'une période à l'autre, et donc annuler sa variation. Cet effet est dit régulateur.

Les interactions entre les indicateurs sont résumées à travers le schéma de fonctionnement suivant :

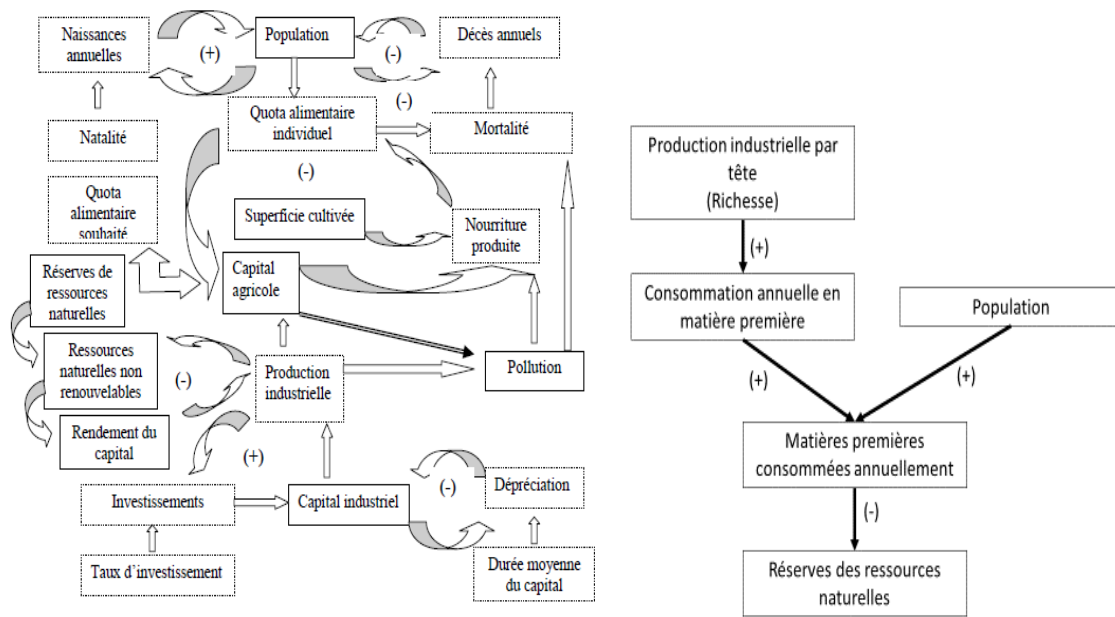


Figure 10 – Boucles de rétroactions générales et appliquées aux réserves naturelles<sup>4</sup>.

Le schéma de gauche propose le résumé des différentes boucles du modèle. On voit que les deux données d'entrées, et influant le déroulé du modèle, sont le taux d'investissement et la durée moyenne du capital. On remarque ainsi que, premièrement, les ressources non renouvelables et renouvelables sont traitées de manières distinctes, mais il a été implémenté qu'une ressource renouvelable puisse devenir non renouvelable en cas d'utilisation déraisonnée. On note également la présence d'une variable de pollution. Cette variable est calculée par un pourcentage de la production industrielle et influe sur l'espérance de vie moyenne des individus.

La conclusion de ce rapport est la suivante : si l'Homme continue de vouloir assurer à tout prix une croissance économique basée sur des modes de production polluants et énergivores, alors il court à « l'effondrement ». Cet effondrement sera dû à :

- **La disparition des matières premières** : comme expliqué sur le schéma de droite ci-dessus, mais également inspiré du modèle de Hotelling ; la croissance économique et démographique nécessite une production industrielle elle-même en constante augmentation. Ainsi, le besoin en matière première augmentera lui aussi, jusqu'à l'épuisement des réserves. Le rapport annonce également la fin des énergies fossiles pour les années 2000.
- **Des taux de polluants mortels** : en continuant ce raisonnement, l'augmentation des productions industrielles aboutit à une augmentation des émissions de polluants. Or, la résilience terrestre ne permettra pas d'empêcher une baisse de l'espérance de vie humaine.

Ce rapport possède certaines failles, notamment sa focalisation sur des boucles positives et négatives qui par conséquent affecte son efficacité dans l'anticipation des crises ; ou encore l'omission du facteur de changement et d'évolution technologiques. Mais le rapport Meadows a été précurseur. En effet, il a permis de démontrer que les mécanismes de consommation des années 1960 à 1970, époque signant

<sup>4</sup> Source : DUEDD-UE2-Fondamentaux dans le cadre du développement durable – module 1: Economie – dossier3 Economie des ressources naturelles DIEMER Arnaud

la fin des 30 glorieuses, n'étaient pas viables à long terme, et qu'un changement significatif était nécessaire.

Le rapport a été reçu de manière assez mitigée par le monde académique. En effet, que ce soit via l'article de Robert Solow « *The economics of Resources* », paru en 1974 ou encore G. Haberler dans son article « *Economic Growth and Stability* » paru la même année ; ses détracteurs réfutent l'idée que la croissance économique soit responsable, dans un futur proche, du déclin de l'humanité. Pour eux, la croissance à long terme est un objectif, mais également une source de stabilité car permettant de survoler les crises potentielles, et assurant toujours un revenu à minima constant à chacun.

Papier divisant et sujet à débat, le rapport « Halte à la croissance ? » restera un pionnier dans la lutte contre le réchauffement climatique et l'instauration d'un développement plus durable. La vision d'économiste sur le réchauffement climatique ainsi explicitée, nous allons nous concentrer maintenant sur une vision plus physique de ce phénomène.

## B. Rapports du GIEC : évolution des mentalités

Créé en 1988, le GIEC, ou Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'évolution du Climat, est un ensemble de chercheurs issus de la quasi-totalité des pays du monde, dans le but de synthétiser et de regrouper les travaux des laboratoires du monde entier sur la question climatique. On y retrouve ainsi des scientifiques issus de diverses disciplines : climatologues, géologues, écologues, ... Ces derniers sont réunis afin d'apporter une expertise objective et sans parti pris.

Les conclusions de ces experts réunis chaque année sont réunis au sein de divers rapports :

- Les rapports AR, ou rapports d'évaluations : ces rapports ont pour but de faire un état de l'art de la question climatique globale. Ce document de 1500 pages a une particularité : avant toute publication, ce rapport doit subir une évaluation des états participants. Ces derniers ont ainsi la possibilité de demander la modification de certains passages. Un résumé d'une dizaine de pages est ensuite adressé aux *décideurs*, pour les aiguiller sur leurs décisions à venir. La spécificité de ces rapports est l'établissement de scénarios.
- Les rapports méthodologiques : Plus courts, ces rapports ont vocation à expliquer les méthodes et systèmes utilisés par les experts du GIEC pour, comme les calculs des émissions de CO<sub>2</sub>.
- Les rapports spéciaux : Comparés aux rapports d'évaluations, ces rapports s'attèlent à répondre à une problématique spécifique ou à expliquer plus spécifiquement un thème.

Il est ainsi intéressant de revenir sur l'historique des conclusions des rapports d'évaluations :

Premier rapport, **FAR en 1990** : Dans ce premier rapport, le GIEC met en évidence deux faits : premièrement, que l'augmentation de la concentration en GES (Gaz à Effet de Serre) est bien causée par la main de l'Homme, avec une forte corrélation entre la croissance économique et la croissance des émissions. Ensuite, cette surconcentration en GES aboutit à un réchauffement de l'atmosphère terrestre, phénomène ayant de lourdes répercussions sur le climat : augmentation de la température moyenne, augmentation du niveau des mers et océans, ... Face à ce constat, les scientifiques proposent ainsi certains scénarios couplés à des recommandations, axés principalement sur les pays occidentaux et très industrialisés. Ce rapport a été la base des calculs et prédictions du premier sommet sur la question, le sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992.



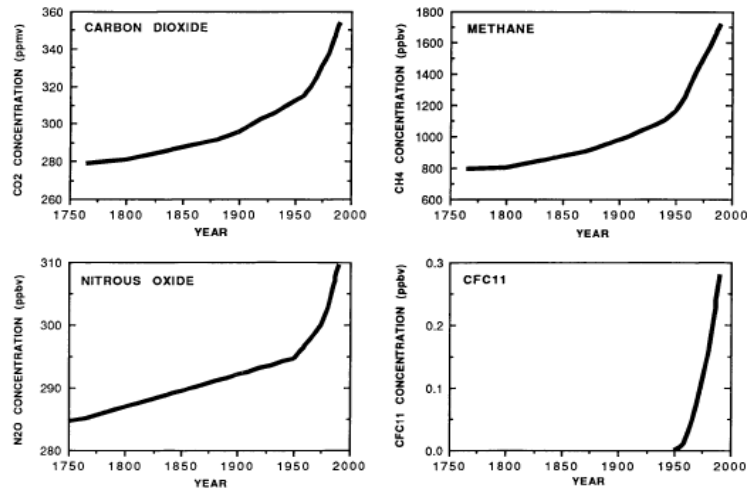


Figure 3: Concentrations of carbon dioxide and methane after remaining relatively constant up to the 18th century, have risen sharply since then due to man's activities. Concentrations of nitrous oxide have increased since the mid-18th century, especially in the last few decades. CFCs were not present in the atmosphere before the 1930s.

Figure 11 – Evolution des concentrations atmosphérique de différents gaz à effet de serre entre 1750 et 2000.

En 1995, le GIEC publie le **SAR**, second rapport sur le changement climatique. Cet ouvrage se concentre principalement sur la distinction entre les émissions d'origines naturelles et anthropiques. Le rapport apporte ainsi une précision accrue sur le calcul et la comptabilité des émissions de GES, tout particulièrement sur le CO<sub>2</sub>. Ces calculs seront la base du protocole de Kyoto, marquant la première étape pour une prise en compte du CO<sub>2</sub> au sein du marché mondial.

Puis, le **TAR** sera publié en 2001, et comprend pour la première fois trois sections issues de divers groupes de recherches : une section sur la méthodologie employée dans les différents calculs, une autre sur les conséquences, l'adaptions et la vulnérabilité ; et enfin une dernière section sur les mesures d'atténuation envisageables. Selon ces experts, la décennie 1990 aura été la plus chaude période enregistrée depuis 1850. Les scientifiques revoient également leurs scénarios, en expliquant que la température terrestre pourrait augmenter de 1.8°C à près de 5.8°C si aucune action concrète n'est entreprise. Auparavant peu médiatisés, ce rapport marque un changement des mentalités dans de nombreux pays sur la question du développement durable et des conséquences de nos actions sur le climat en étant le premier à réellement susciter une vive réaction du grand public.

Particulièrement attendu, le rapport **AR4 publié en 2007**, établit de manière définitive que le réchauffement climatique est d'origine anthropique, et ce dérèglement climatique a et aura des conséquences sans précédents. Il établit cette fois-ci deux scénarios : un scénario dit tendanciel, dans le cas où aucune action n'est mise en œuvre pour limiter les émissions mondiales de GES ; et un scénario alternatif, où les états investissent dans des portefeuilles énergétiques moins carbonés. Ce rapport eu un impact assez important par l'instauration, entre autres, du *Paquet Energies et Climat* pour l'Union Européenne en 2008.

Le dernier rapport en date, le rapport **AR5 sorti en 2014**, est le rapport qui a connu le plus grand succès et qui a réellement marqué les esprits du public. En effet, ce rapport, bien qu'alarmiste sur l'avenir de l'Homme, montre qu'il n'est pas encore trop tard. Quatre scénarios sont émis, regroupés dans le graphique suivant :



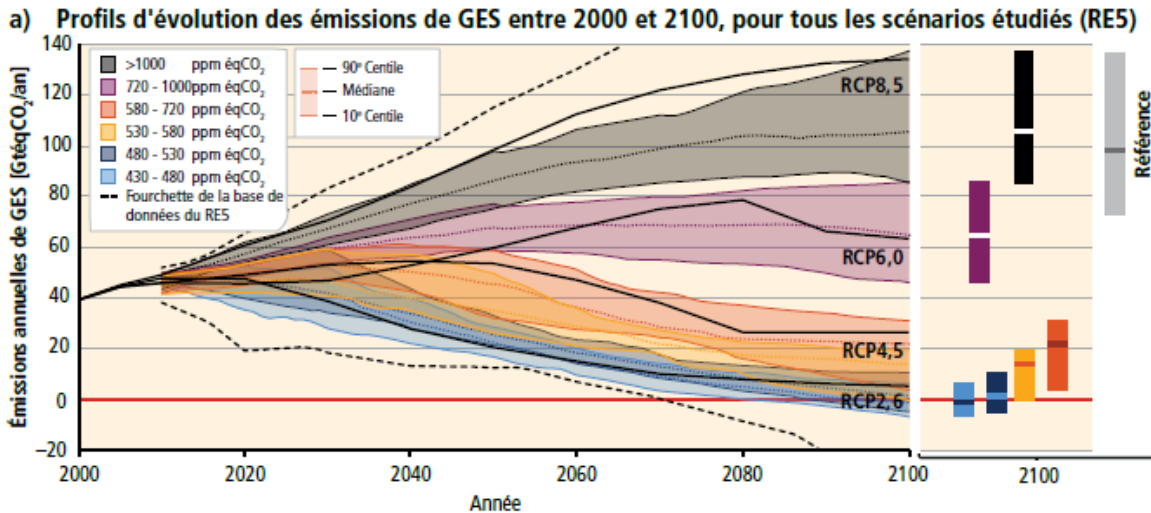


Figure 12 – Estimation et scénarii d'augmentation de la teneur en eqCO<sub>2</sub> dans l'atmosphère terrestre entre 2000 et 2100<sup>5</sup>.

Les scénarios RCP8.5 et RCP6.0 évoquent des estimations dans le cas où les émissions de GES ne subissent pas de baisse drastique. En revanche, les scientifiques du GIEC estiment qu'un objectif de maximum +2°C d'ici à 2100 (scénario RCP2.6) permettrait à l'Homme de limiter grandement l'impact du réchauffement climatique, et de protéger la biodiversité terrestre. Ce rapport fut la base des discussions de la COP21 de Paris en 2015 qui, bien que critiquable par son absence de mesures restrictives et punitives, marqua le premier virage unanime et mondial pour une lutte contre le réchauffement climatique et l'instauration d'un développement durable.

Comme dit précédemment, chacun de ces ouvrages a contribué à la reconnaissance du phénomène de réchauffement climatique et à la lutte contre celui-ci, et leurs conclusions sont unanimes : la consommation actuelle de ressources carbonées n'est pas viable à long terme, une transition énergétique est nécessaire. C'est dans ce contexte, que l'économiste Nicholas Stern publie un rapport éponyme, présentant les effets du réchauffement climatique du point de vue économique.

### C. Rapport Stern : un tournant ?

Dans les années 2000, en pleine prise de conscience, La Grande Bretagne décida de financer une vaste étude sur les impacts économiques et sociaux du réchauffement climatique. Mené par le professeur Nicholas Stern, chaire à l'institut Grantham sur le changement climatique de la London School of Economics ; et assisté par divers économistes du ministère des finances britanniques, ces chercheurs ont pour objectifs de repérer quelles pourraient être les implications économiques du changement climatique, et analyser comment stabiliser les émissions de gaz à effet dans l'atmosphère, entre autres, par une transition technologique et énergétique bas-carbone.

Les grands points de ce papier sont les suivants :

- Les impacts du réchauffement climatiques pourraient être irréversibles :

La concentration en gaz à effet de serre est passé d'une concentration de 250ppm CO<sub>2</sub>eq (équivalent CO<sub>2</sub>, c'est-à-dire appliquer un coefficient multiplicateur aux autres GES par rapport au CO<sub>2</sub>) durant la période préindustrielle, à près de 400ppm CO<sub>2</sub>eq dans les années 2000. Cette valeur pourrait atteindre

<sup>5</sup> Source : Rapport AR5, p.37

750ppm d'ici à 2050 si l'on suit un scénario dit de BAU, *Business-As-Usual*, décrit dans la figure 13. Le rapport évoque ainsi divers scénarios associant des valeurs d'augmentation de la température moyenne terrestre au taux de GES dans l'atmosphère.

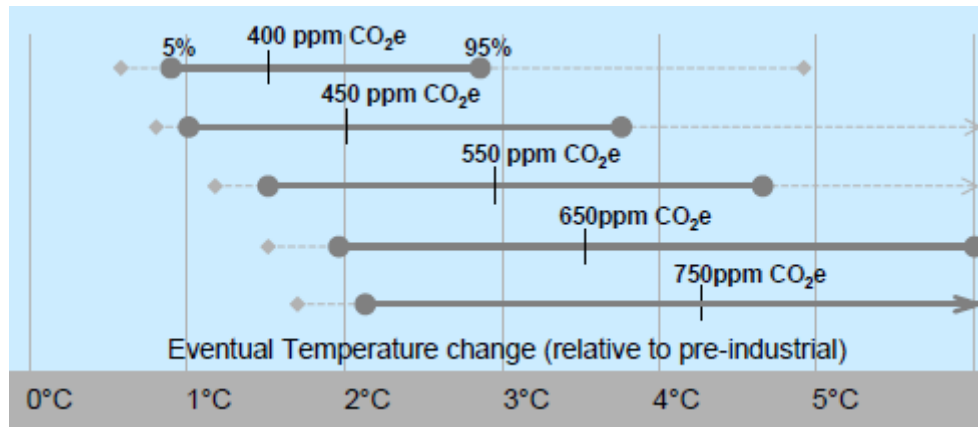


Figure 13 -Evolution de la température moyenne mondiale selon les scénarios de concentration en eqCO2 atmosphérique estimés. <sup>6</sup>

Leurs résultats évoquent ainsi la probabilité que la **température moyenne augmente de plus de 3 à 5°C d'ici à 2050** si aucune mesure n'est prise. Ce scénario aboutirait à **une perte de près de 10% du PIB mondial**, coûts principalement encaissés par les pays les plus pauvres.

- Stabilisation des émissions de GES :

Ainsi, tout en proposant une nouvelle comptabilité du CO2, Stern évoque le fait que les émissions de GES soient poussées par la croissance économique : tant que la croissance continue, et que l'émission de GES est faisable, alors elles augmenteront selon le scénario BAU. Le but serait ainsi de limiter ces émissions autour d'une valeur seuil, qu'il fixe à 550ppm CO2eq d'ici à 2050. Les différents scénarios pour atteindre cet objectif sont évoqués à travers la figure 14 :

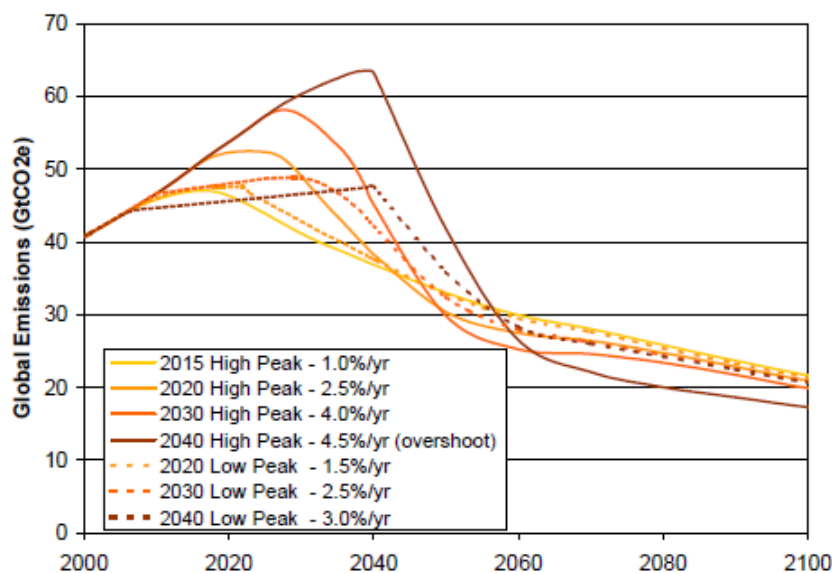


Figure 14 – Evolution temporelle des émissions de eqCO2 selon différents scénarios et stabilisation de ces émissions. <sup>7</sup>

<sup>6</sup> Source : Executive\_Summary STERN REVIEW, p.5

<sup>7</sup> Source : Executive\_Summary STERN REVIEW, p.5

Stern laisse ainsi la possibilité qu'un pic de production est lieu, mais à la condition qu'il soit suivi de règles et de politiques strictes de réduction des émissions. Il propose alors de fixer un **coût à ces émissions : 1% du PIB mondial annuel jusqu'en 2050**. Ce coût, serait tourné vers des politiques bas-carbone, et dans le remboursement des dégâts climatique, permettant un développement plus durable.

- Politiques bas carbone et adaptation de la société :

Ce rapport a une vocation internationale. En effet, le réchauffement climatique est un phénomène global qui nécessite l'appui et la considération de toute la communauté mondiale. Ainsi, le but est de concentrer les efforts sur 3 points essentiels. Premièrement, donner une valeur et in fine, un prix au dioxyde de carbone. La détermination d'une valeur au CO2 pourrait passer par l'établissement d'un prix commun, d'une taxe, d'un système de transaction ou encore par une régulation. Selon l'auteur, des politiques de taxes pourraient permettre d'établir un signal de prix pour les GES et donc permettre aux entreprises et états d'anticiper leurs actions. Un système d'échange ou de régulation est en vigueur depuis le protocole de Kyoto en 1997, mais sans réel engouement. Toutefois, le récent système d'échange européen, ou système EU ETS (Emission Trading Système), représente une opportunité car plus complet dans ses actions. Deuxièmement, l'établissement d'une finance du CO2 créerait des ressources afin de financer et d'encourager le développement durable, et des technologies bas-carbone. Enfin, le dernier point évoqué est le changement des mentalités : du grand public aux décideurs, et bien qu'il nous reste du temps pour changer les choses, tout le monde doit s'accorder sur le fait que la transition écologique ne se fera pas sans efforts.

Publié en 2006, le rapport Stern fut le premier rapport d'un économiste financé par des pouvoirs publique et ayant pour sujet l'impact du réchauffement climatique. Il fut ainsi particulièrement médiatisé par l'état britannique, mais fut reçu de manière mitigée par les académiques. En effet, certains économistes vont saluer les efforts du groupe de N. Stern sur le fait qu'il est urgent d'agir et de manière presque radicale. Leurs travaux sur la création d'un signal de prix à long terme sur le dioxyde de carbone, à l'origine de la faillite du marché du carbone pour certains, ont été agréablement reçus. Néanmoins, ce sont principalement En effet, Stern est accusé d'avoir délibérément surestimé la valeur du coût du changement climatique, afin d'en tirer la conclusion suivante, exprimée par Bjørn Lomborg, responsable d'un groupe de pensée et ancien directeur de l'Agence d'évaluation environnemental danois, dans son article paru en 2006, « *Stern Review*. « *The dodgy numbers behind the latest warming scare* » : « *Mr. Stern's core argument that the price of inaction would be extraordinary and the cost of action modest [...] falls apart when one actually reads the 700-page tome. Despite using many good references, the Stern Review on the Economics of Climate Change is selective and its conclusion flawed. Its fear-mongering arguments have been sensationalized, which is ultimately only likely to make the world worse off.* » C'est ainsi l'ensemble de ses hypothèses économiques qui sont critiquées : traitement de l'incertitude future, valeurs des taux de marché et d'actualisation, calcul des coûts et dommages sociaux, ... Enfin, il a été particulièrement reproché à Stern de ne pas avoir engagé de scientifiques spécialistes du changement climatique. En effet, ces derniers ont été embauchés comme consultants, et n'ont donc pas participé aux calculs et conclusions finales du rapport.

Ainsi, bien que fortement critiqué pour ses hypothèses (voir partis pris) le rapport Stern reste une base de pensée pour de nombreux économistes par la suite. Il sera également à la base de certains calculs et base de données pour le rapport AR4 du GIEC.

Après un demi-siècle de discussions et de constations de plus en plus alarmistes, le réchauffement climatique et ses conséquences, tant physiques que économiques et sociales, ne sont plus à démontrer. Toutefois, le débat s'est maintenant décalé dans la manière de réagir à cette évidence. Ainsi, des politiques étatiques aux divers rapports, de nombreuses solutions ont été émises pour résoudre la question des émissions de dioxyde de carbone. C'est dans ce fourmillement d'idées, qu'en 2007, H.W. Sinn va publier une sorte d'avertissement sur manière de réguler ces émissions.

## 2) Solutions et contre sens : le Green Paradox

Dans la recherche d'une solution aux problèmes des émissions de dioxyde carbone, Hans-Werner SINN va analyser la problématique posée par cette molécule, le *Green Paradox* : mêlant des notions aussi bien économiques, politiques que sociétales, Sinn veut ainsi démontrer que les actions de lutte contre le réchauffement climatique, ne peuvent pas être simplement appliquées, mais doivent être intégrées pour permettre une transition et non une rupture. Ainsi, pour étudier cette thèse, nous nous intéresserons à l'article de Sinn, *Public policies against global warming: a supply side approach*, CESifo Working Paper No. 2087, August 2007 and NBER Working Paper 13454, September 2007.

### A. Définition d'externalité économique et lien avec le dioxyde de carbone :

En science économique, une notion importante à définir pour appréhender un marché quel qu'il soit, est l'externalité. Une externalité se manifeste par l'effet secondaire suscité par la consommation ou la production d'un bien, qu'il soit physique ou immatériel. Cet effet secondaire peut se manifester de deux manières possibles :

- Externalité positive : le bien produit ou consommé permet aux consommateurs ou à son environnement de bénéficier d'avantages. Par exemple la conquête spatiale a permis de créer de nombreux biens utiles au quotidien de tout le monde (couverture de survie, nourriture lyophilisée, ...)
- Externalité négatives le bien produit ou consommé va entraîner des répercussions sur eux même ou sur leur environnement. On peut citer par exemple, une usine rejetant des produits polluants dans les eaux locales.

Ces externalités, lorsqu'elles sont prises en compte dans un marché, faussent ainsi les hypothèses classiques de concurrence pure et parfaite, et aboutissent alors à une vision erronée de ce marché. Cette vision erronée est due au fait que les externalités offrent des opportunités aux producteurs et consommateurs, pour augmenter leurs bénéfices ou réduire leurs coûts. Cette différence entre le prix de marché théorique de ce bien et le prix observé est appelé coût d'opportunité. Mais ce coût peut être comblé, entre autres via les états. En effet, ces derniers peuvent « influencer » sur le marché en appliquant, par exemple, des règles ou des quotas d'émissions : encourager les externalités positives en facilitant les synergies entre marchés/industries, limiter les externalités négatives en appliquant des règlements techniques, des taxes ou des quotas.

C'est ainsi que Sinn s'attèle à **redéfinir le dioxyde de carbone** non plus comme une donnée climatique, mais **comme une externalité économique** à part entière, car provoquant des dégâts environnementaux et sociaux. Il qualifie alors le CO<sub>2</sub> de : « *The greatest externality ever* ». L'avantage de cette redéfinition, est que cette molécule peut ainsi être transformée en une donnée économique,

et il est ainsi possible d'apposer une valeur monétaire à ces émissions, comme nous avons vu précédemment avec le rapport Stern, ouvrage qui a particulièrement inspiré Sinn. Les états peuvent ainsi se doter d'instruments financiers pour tenter d'imposer au maximum que l'externalité du carbone soit prise en compte par les émetteurs, sur le modèle du « pollueur = payeur ». Ce genre de politiques ont déjà été appliquées dans divers pays, dans le cadre de campagnes de lutte pour limiter l'impact de certains polluants.

Par exemple, aux Etats Unies en 1990, le gouvernement fédéral a imposé un vaste programme de lutte contre les pluies acides. Dû à des industries lourdes particulièrement émettrices de soufre, la prise en compte de cette pollution comme une externalité, a permis de changer la vision des entreprises face à cette pollution. En effet, des normes techniques associés à des quotas d'émissions de soufre ont obligé ces industries à prendre en compte ces rejets comme un coût à part entière, et donc à le limiter (voir figure 15).

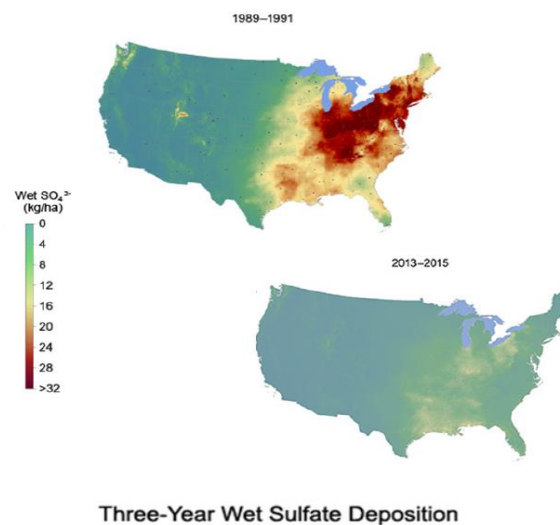


Figure 15 – Evolution spatiale et temporelle de l'acidité des eaux de pluie aux Etats Unies avant et après l'instauration des taxes «Nox/VOC EAs ». <sup>8</sup>

Mais dans le cas des émissions de CO<sub>2</sub>, Sinn montre que les états, et tout particulièrement les signataires des traités de Rio en 1992 et de Kyoto en 1997, ne se sont pas axés sur la lutte contre les émissions de façon directe. En **prenant l'exemple de la production pétrolière**, l'auteur évoque le fait **les états ont choisi de limiter la Demande**, entre autres sur la demande en produits pétroliers : subvention pour des véhicules électriques, développement de l'autoconsommation électrique, taxes accrues sur le carburant, ... Toutes ces politiques ont pour objectif de faire changer les mentalités des citoyens en leur offrant ou leur permettant d'accéder plus facilement à certains équipements moins polluants, mais également de faciliter le *fuel switch* (changement de sources d'énergie, exemple passage d'une chaudière au fuel à une chaudière à gaz ou électrique) . Or, comme le dit Sinn : « *How the CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere changes depends on extraction, and extraction is the result of both demand and supply.* » Ainsi, plus la demande est faible moins les émissions seront importantes. Mais, l'offre s'adaptera et baissera également ses prix pour s'adapter à la demande restreinte. Ainsi, selon lui, le succès d'une politique de restriction des émissions de CO<sub>2</sub> est de faire payer le producteur, l'offre, et non le consommateur, la demande. Ainsi, dans la cadre de la production pétrolière, une taxe

<sup>8</sup> Source : Cour délivré à l'IFP School par Roger Raufer, professeur d'économie environnementale à l'université de Hopkins-Nanjing

basée sur les émissions directes et indirectes, avec un prix du carbone déterminée, serait une bonne solution selon l'auteur.

Sinn résume finalement la situation actuelle par le passage suivant : « *The calculations show that with regard to the use of fossil carbon, humans face an extremely difficult choice problem that involves the **simultaneous reduction of the stock underground and accumulation of the stock above ground**. The carbon problem is serious enough that the limited absorption capacity of the air may constrain resource extraction more than the scarcity of the resources itself.* » L'auteur va ainsi analyser si le marché actuel est en capacité de réaliser une production de ressources fossiles respectant les contraintes d'émissions.

## B. Illustration de l'échec d'un marché, production pétrolière et CO<sub>2</sub> :

Ensuite, Sinn veut montrer que les politiques mises en place depuis les années 1990 ne sont pas efficaces, et aboutissent à l'échec des marchés considérés (principalement dans le milieu pétrolier). Cela amène les entreprises et les gouvernements à penser de manières irrationnelles. Pour étudier ce phénomène, l'auteur va émettre trois arguments en faveur d'un échec des marchés, en se basant dans **le cadre d'un modèle d'Hotelling**, vu précédemment. Toutefois, l'objectif n'est plus de diminuer le stock de réserve souterraine, mais de limiter les émissions de CO<sub>2</sub> en considérant la réserve atmosphérique. Son modèle d'analyse des producteurs pétrolier possède les caractéristiques suivantes :

- $S$ , le stock de ressources carbonées encore en terre.
- $R = -\dot{S}$ , la quantité de ressources produites à chaque période de temps.
- $g(S)$ , le coût unitaire de production d'un baril, avec  $g'(S) < 0$  (les coûts unitaires sont décroissants au fur et à mesure que l'on produit).
- $P(t)$ , le prix de marché d'un baril.
- $i$ , le taux de retour sur investissements, ou taux d'actualisation.

Ainsi, le cash-flow du producteur est le suivant :

$$CF = [P(t) - g(S(t))] \cdot R$$

Ensuite, le producteur est libre de produire à un instant  $t$ , et donc de récupérer  $CF$  plus  $i \cdot CF$ , le retour sur son investissement. Le profit du producteur à un instant  $t$  est le suivant :

$$\Pi_t = (1 + i)[P(t) - g(S(t))]R$$

Sinn laisse la possibilité au producteur de retarder sa production à la période  $t + 1$  ou de produire à la période  $t$ . Ainsi, en réutilisant les conclusions de Hotelling, on obtient le taux d'actualisation  $i$  doit être de la forme suivante :

$$i = \frac{P(t+1)}{P(t) - g(S(t))} > 0 \quad (4)$$

Dans le cas spécifique où  $g(S)$  est égal à zéro, on retrouve alors la « règle de Hotelling » (l'augmentation du prix de vente est égale au taux d'actualisation). A partir de l'équation (4), Sinn ajoute une autre notion, celle de bien-être social ou de *Welfare*. Cette notion est importante en économie car elle permet, entre autres, de juger des effets sociaux d'un modèle économique (par exemple les externalités). Ainsi, pour quantifier ce bien être, il faut prendre en compte l'utilité future



d'un bien pour les générations d'après, et son utilité de consommation présente. De nombreux économistes se sont ainsi posés la question de l'actualisation de ce *Welfare*. Ici, Sinn considère que ce bien-être doit quantifier via le taux d'actualisation  $i$  :

$$i = \rho + \eta \hat{c}$$

Avec  $\rho$ , le taux d'actualisation d'utilité pour les futures générations, et  $\eta \hat{c}$  la diminution relative de l'utilisation marginale résultant de l'augmentation de la consommation temporelle. Ainsi, si les populations retiennent un **taux d'actualisation de la forme ci-dessus**, elles éliront des responsables politiques qui proposeront des politiques environnementales elles même actualisées, ce qui diminue forcément leurs impacts (le fait d'actualiser diminue légèrement la valeur temporelle d'un bien ou d'un bénéfice). Ainsi, **aucune politique d'envergure sur l'allocation temporelle des ressources fossiles ou du CO2 ne se réalisera**, ce qui constitue un premier signe d'échec du marché.

Toujours selon l'équation (4), Sinn considère qu'une autre source d'échec du marché est l'expropriation possible des producteurs des pays dans lesquels ils sont implantés. Ainsi, face à ce risque, Sinn montre que les producteurs pétroliers, ajoutent une valeur  $\pi$ , au taux d'actualisation  $i$ , afin d'anticiper cette éviction et donc de maximiser leurs profits le plus rapidement possible. Dans ce cas, on a :

$$i + \pi = \frac{P(t+1)}{P(t) - g(S(t))} \quad (5)$$

Ainsi, cette **aversion au risque des entreprises pétrolières** est le signe du second échec pour ce marché. En effet, le taux d'actualisations  $i + \pi$  étant devenu supérieur, les trajectoires de prix vont devenir de plus raide (croissance rapide) et aboutissant à une **surexploitation des réserves** des producteurs sur le court terme.

Ensuite, Sinn décide d'ajouter à son modèle une fonction de consommation des réserves fossiles, de la forme suivante :

$$f(K, R, S, t) \quad (6)$$

Avec  $K$  le capital à investir ou non dans la production des réserves. Ici, on considère également les flux :  $f_K$ , le flux de capital investit entre deux période de temps,  $f_R$  consommation par rapport à la production  $R$  (c'est donc le prix d'achat du bien) et  $f_S$  représente le flux additionnel de dommage causé par l'extraction de ressource (et donc l'augmentation du carbone atmosphérique).

De ce fait, sans prendre en compte  $f_S$ , le marché consomme  $R \cdot (f_R - g(S))$ , c'est-à-dire la qualité produite multiplié par le prix de marché moins les coûts. A cela, il faut également ajouter le retour sur investissement  $R \cdot f_K (f_R - g(S))$ . Or, Sinn montre que, lorsque le producteur soustrait également la **notion de dégâts environnementaux**,  $f_S$ , alors le marché est mis en défaut.

$$\Pi = R \cdot [(1 + f_K) \cdot (f_R - g(S)) - f_S] \quad (7)$$

A partir de l'équation de profit (7), Sinn va montrer que  $f_K$ ,  $f_S$  et le taux d'actualisation du producteur sont nécessairement liés. Ainsi, puisque  $f_S > 0$ , le taux d'actualisation du producteurs,  $i$ , devrait être supérieur à la valeur  $\frac{P(t+1)}{P(t) - g(S(t))}$ , et donc marquer une préférence pour le futur. Or, d'après l'équation (5), puisque le taux d'actualisation est donné par la valeur  $i + \pi$ , nécessairement on aboutit à ce que

la valeur  $i$  est inférieure à  $\frac{P(t+1)}{P(t) - g(S(t))}$ , ce qui marque ainsi une préférence pour le présent, et donc une **exploitation plus importante dans le présent**.

Ainsi, à l'aide de ces trois arguments, Sinn a réussi à montrer que le marché pétrolier, de manière général, n'agit pas de manière rationnelle et ne parvient à prendre en compte au sein même de ses mécanismes économiques, l'externalité que sont devenues les émissions de gaz à effet de serre. Par la suite, Sinn va se concentrer sur les causes de cet échec : le *Green Paradox*.

### C. Définition du Green Paradox : problème de considération du carbone

A la suite de la mise en défaut des marchés pétroliers, l'auteur va montrer que, selon la stratégie et le « niveau d'échec » du marché considéré, les producteurs vont connaître des chemins d'extraction différents. Les quatre chemins que Sinn envisage sont résumés dans le graphique suivant :

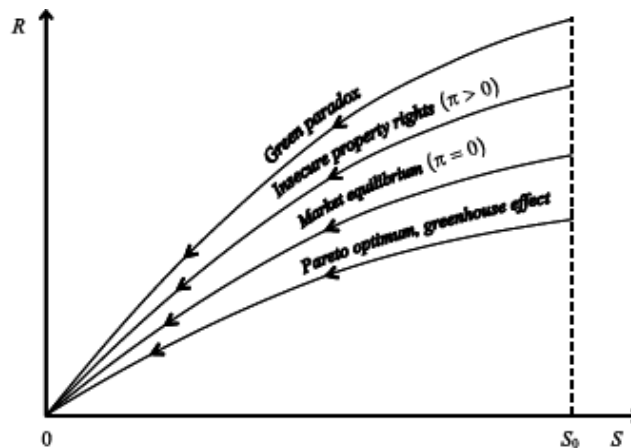


Figure 16 – Evolution de la production pétrolière selon le scénario de marché envisagé.

- *Pareto optimal, greenhouse effect* : Ce chemin de production est considéré lorsque le marché n'a pas intégré l'externalité économique des émissions de dioxyde de carbone. Aucune restriction n'est faite sur les émissions de GES. Dans ce cas, la production a tendance à être étalée sur le temps, et permet de répondre aux exigences de production du modèle de Hotelling.
- *Market equilibrium* : Ce chemin de production montre une trajectoire plus raide que le chemin précédent. Ce scénario correspond au premier argument de Sinn pour un échec du marché du pétrole, à savoir actualisation des utilités futures. Ce scénario aboutit à une préférence de consommation pour le présent et non future. Dans ce cas, aucune action des réductions ne sera entreprise, et les producteurs ont intérêt à produire sur le court terme.
- *Insecure property rights* : Ce chemin de production montre que l'aversion au risque des entreprises pétrolières, particulièrement liée au risque d'expropriation (avec  $\pi > 0$ ), va entraîner une actualisation plus importante, et donc une préférence pour une extraction sur le court terme. Ce scénario correspond au premier et deuxième argument de Sinn.
- *Green Paradox* : Ce chemin de production amène à une surexploitation très importante de la ressource du pétrolier sur le court terme, notamment dû à la prise en compte des dommages environnementaux liés aux émissions. En anticipant l'augmentation des prix des émissions, le producteur est amené à produire plus et rapidement.



Ce dernier chemin de production, que Sinn a nommé *Green Paradox*, ou *Paradoxe vert*, est la principale thèse de l'auteur, que nous allons étudier par la suite.

Pour cela, l'auteur part du constat suivant : les politiques de limitation des émissions de gaz à effet de serre ne peuvent pas uniquement être des actions de diminution de la demande (rénovation énergétique, subvention de nouveaux véhicules, ...), mais doivent passer par une **réduction de l'offre**. Or, pour diminuer la volonté de surproduction, les régulateurs ou états peuvent jouer sur l'imposition d'une taxe sur ces émissions. Mais, l'application de cette taxe augmentera la préférence pour le présents des producteurs, en diminuant les opportunités futures (puisque le prix est censé croître à chaque période d'extraction). Pour montrer cela, l'auteur ajoute au modèle précédent un régime fiscal, de tel sorte que la fonction de profit (7) est légèrement modifiée :

$$\Pi = \theta.R.P(t) - g(S(t)).R = R.P(t) - \frac{g(S(t)).R}{\theta} \quad (8)$$

Avec  $\theta = (1 - \tau)$ , et  $\tau$  étant le taux de taxe à payer par le producteur, considérée constante. Cette taxe s'applique uniquement sur sa production de CO<sub>2</sub>, et non sur sa production de barils ou sur les ventes en résultants. Ainsi, on peut en tirer que le taux d'actualisation  $i + \pi$  du producteur est également modifié par la prise en compte de la taxe comme un coût à part entière :

$$i + \pi = \frac{P(t + 1)}{P(t) - \frac{g(S(t))}{\theta}}$$

Ainsi, à  $i$ ,  $\pi$  et  $P(t)$  fixés, on observe que les prix de  $P(t + 1)$  s'en trouvent amenuisés. Ainsi, dans ce cas, les perspectives de prix sont nettement réduites, et de ce fait la volonté de production est moindres, que ce soit à court ou à long terme. L'instauration d'une telle taxe permettrait donc de limiter considérablement les quantités de CO<sub>2</sub> rejetées. Ce raisonnement est particulièrement proche du raisonnement du rapport Stern.

Or, comme l'évoque Sinn, ce raisonnement n'aboutit qu'à l'augmentation des coûts marginaux d'extraction des pétroliers, ce qui ne représente finalement que 15% des coûts d'un baril brut de pétrole sur le marché SPOT (en 2006). Ainsi, ce raisonnement n'entraînerait qu'une diminution réduite des émissions de GES. Pour aller plus loin, Sinn va alors observer **l'impact de taxes croissantes**, qui sont préconisées dans le milieu des économistes environnementaux (mais également pour des nécessités sociales et politiques). En effet, classiquement, la taxe croissante doit réduire la volonté de polluer sur le long terme des entreprises. Pour cela, on introduit un nouveau calcul fiscal :

$$\theta^*(t) = \theta^*(0).e^{\alpha.t}$$

Avec cette fonction, si  $\alpha > 0$ , la taxe est considérée croissante, et si  $\alpha = 0$ , alors la taxe est constante. Ainsi, le taux d'actualisation du producteur est de nouveau modifié pour intégrer ce taux de croissance de la taxe  $\alpha$  :

$$i + \pi - \alpha = \frac{P(t + 1)}{P(t) - \frac{g(S(t))}{\theta}}$$

Si l'on considère que la taxe est croissante, et donc  $\alpha$  étant positif, nécessairement,  $P(t + 1)$  devra être supérieur à un cas sans taxe. De ce fait, **le chemin de production en cas de taxe croissante sera bien plus raide** que sans taxe ou avec une taxe constante, ce qui marque une surexploitation des réserves et donc des **émissions court termes plus importantes**. En analysant plus précisément l'impact d'une taxe croissante, l'auteur va également montrer que plus le taux de croissance de la taxe  $\alpha$  est important, plus les entreprises vont anticiper leurs productions et les déplacer vers le présent. De plus,

si l'augmentation de la taxe est plus importante que le retour sur investissement ( $\alpha > f_K$ ), cet effet est amplifié car il n'est plus rentable d'attendre.

C'est de cette ambiguïté économique qu'est née la thèse de Sinn, le **Green Paradox**, qu'il définit comme suit : « This possibility is called the green paradox, because it shows that good intentions do not always breed good deeds. Environmentalists often argue that carbon taxes are needed to reduce the demand for carbon and slow down global warming, and they advocate increasing the tax rate over time so as to give the economy time to adjust and fight global warming more aggressively as it evolves and damages increase. **The green paradox implies that such a policy is likely to backfire and create even more harm for the environment by speeding up global warming.** »

En d'autres mots, le *Paradoxe vert* peut se résumer de la sorte : **l'instauration d'une taxe sur les émissions de dioxyde carbone entraîne un décalage de la production des entreprises pétrolières vers le présent, et donc une augmentation des émissions à court termes.**

Face à cette conclusion, Sinn évoque alors deux mécanismes :

- Si les mesures de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> aboutissent à diminuer la trajectoire de prix des producteurs, tel que, la valeur actualisée de cette diminution de prix est constante ; alors les producteurs devraient, comme selon l'objectif de la taxe, maintenir leur production en place : La taxe appliquée n'est pas assez dissuasive.
- Or, si les mesures de réductions des émissions aboutissent à une réduction du prix du baril, de tel que le prix futur du baril est inférieur au prix actuel ; alors dans ce cas, les pertes futures seront compensées par une surproduction à court terme.

A travers ce paradoxe, H.W. Sinn a su mettre en avant un problème, plus profond qu'il n'y paraît. En effet, les régulateurs et pays taxant les émissions n'ont pas réussi, au contraire des entreprises pétrolière, à correctement prendre en compte le dioxyde de carbone dans leurs systèmes fiscaux. De ce fait, selon l'auteur, le problème du réchauffement climatique ne peut se résoudre uniquement en appliquant un prix au carbone, et en appliquant les classiques taxes croissantes ou constantes qui sont appliquées depuis un siècle. Cette théorie du *Green Paradox*, a instauré et créé un réel débat entre les économistes et états, et cette théorie est toujours discuté, comme nous le verrons par la suite.

### 3) Discussion autour du *Green Paradox* et des enjeux environnementaux et climatiques actuels :

A la suite de son article, Sinn a mis en avant un paradoxe dans la manière de taxer et donc de prendre en compte les émissions de dioxyde de carbone au sein des modèles économiques actuels. Le *Green Paradox* a ainsi été une première étape dans la discussion des taxation « carbone », dont nous allons étudier deux exemples par la suite.

#### A. Discussion autour du *Green Paradox*, une réalité ?

En 2010, les économistes F. Ploeg et C. Withagen vont publier un article intitulé, « *Is there really a Green Paradox ?* ». Ces deux auteurs veulent savoir, premièrement, si le *Green Paradox* est une réalité ou biais théorique de H.W. Sinn ; mais également savoir si une solution est envisageable à ce paradoxe. Pour cela, ils reprennent les même hypothèses que Sinn, c'est-à-dire considérer à la manière de Hotelling, un modèle de production des ressources non renouvelables (en particulier le pétrole et le

gaz naturel) avec un ou sans taxe sur les émissions de CO<sub>2</sub>. Ensuite, leur ajout majeur va être de considérer un *fuel switch*, ou en d'autres mots, considérer que la production de gaz et de pétrole rentre en compétition avec d'autres sources d'énergies, et ces différentes sources d'énergies peuvent cohabiter. Dans leur article, les auteurs s'intéressent aux technologies des renouvelables, et tout particulièrement du solaire et de l'éolien, qui ont connu de grandes avancées techniques et une diminution importante de leurs prix depuis les années 2000. Ainsi, le but sera d'analyser si le travail de Sinn sur l'offre pétrolière peut-il être observé dans le cadre d'un financement massif des énergies renouvelables.

Le modèle de Ploeg et Withagen prend la forme suivante :

- Un producteur dont l'activité principale est d'extraire du pétrole ou du gaz naturel, dans un système sans taxes sur ses émissions de dioxyde de carbone.
- Un « filet de sécurité » ou « backstop ». Cette notion correspond à un portefeuille d'actifs économiques, permettant la continuité d'approvisionnement des clients du producteur. Ces portefeuilles peuvent ainsi être composés de diverses technologies énergétiques, selon les choix du producteur (nucléaire, solaire, fossiles, schistes bitumineux, ...). Ainsi, les producteurs peuvent choisir d'investir dans la production d'énergies fossiles, ou dans ce « filet de sécurité », selon sa stratégie.

A travers l'élaboration de ces portefeuilles d'actifs secondaires, les auteurs veulent déterminer si l'apposition d'une taxe entraîne une surexploitation sur le court terme ; mais également déterminer vers quels types de technologies les entreprises vont se tourner par la suite.

Ainsi, grâce à leur modèle, les deux auteurs montrent qu'il est socialement optimal et bénéfique de retarder l'épuisement des ressources gazières et pétrolières. De plus, toujours dans une optique sociale et environnementale, il serait plus intéressant d'investir dans les technologies solaires et éolien car n'émettant qu'une quantité insignifiante de dioxyde de carbone. Or, si le gouvernement veut augmenter l'utilisation de ces énergies renouvelables, au détriment des énergies fossiles, les auteurs montrent que la situation sera similaire à celle proposée dans la thèse du *Green Paradox*. En effet, les politiques des états devraient passer par une taxe sur les énergies fossiles et une subvention des énergies renouvelables. Toutefois, ces **énergies renouvelables sont encore moins rentables économiquement que les énergies fossiles**. Un changement d'une énergie à l'autre n'est ainsi pas rentable. De ce fait, pour assurer des profits maximums ou du moins constants, les entreprises pétrolières vont produire tant qu'il est possible sur le court terme, pour investir plus tard dans d'autres énergies.

Pour répondre à ce problème, les auteurs vont analyser principalement le contenu de ces « filets de sécurité ». En effet, selon eux, ce changement d'une énergie à une autre est la clé pour réduire les émissions de gaz à effet de serre des producteurs pétroliers. L'objectif serait de pousser les producteurs à orienter leurs investissements vers des « filets de sécurité » les plus propres possibles (énergies renouvelables) pour limiter leurs productions d'énergies fossiles. Pour cela, il faudrait que **les subventions des états fassent en sorte que les énergies renouvelables deviennent plus compétitives que les énergies fossiles, ou les autres technologies de substitutions** (nucléaire, charbon, ...). Dans ces cas-là, le producteur pétrolier n'aurait aucun intérêt à produire plus sur le court terme, car l'effet combiné de la taxe et de la subvention des énergies renouvelables suffirait à ne pas modifier sa préférence pour le futur.

Ainsi, avec leur article, Ploeg et Withagen ont montré, que le *Green Paradox* est une réalité et qu'il faudrait dorénavant prendre en compte ce phénomène dans les calculs économiques. Ces derniers ont également montré que ce phénomène pouvait être « combattu » ou du moins que des solutions existent afin d'en atténuer ses effets.

## B. La prise en compte de deux versions du Green Paradox : strong and weak ?

Dans la continuité de la discussion autour du sujet du *Green Paradox*, les économistes R. Grafton et T. Kompas ont élaboré un article portant sur la confirmation de ce paradoxe, mais en l'observant de deux manières différentes : un **Weak Green Paradox** et un **Strong Green Paradox**. Pour cela, les auteurs ont utilisé le sujet des biocarburants aux Etats Unies, afin de démontrer la présence de ce double phénomène.

La technologies des biocarburants, issue de la transformation de matière végétal en éthanol pour complément ou pour création de carburants à part entière ; est considérée comme une alternative intéressante aux carburants d'origine fossiles par de nombreux pays. L'Europe mais principalement les Etats Unies ont ainsi instauré des programmes subventions importants aux producteurs de biocarburants depuis les années 1980. Entre 1978 et 2007, les Etats Unies ont ainsi créé quatre programmes de soutiens aux producteurs de biocarburants (exemption de taxe si les carburants contiennent plus de 51% d'éthanol, des crédits de 1\$/gallon si le carburant est un biodiesel, ...) avec comme ambition de réduire drastiquement l'utilisation des carburants d'origine fossile. Or, comme nous l'avons vu à l'aide de Ploeg et Withagen, le financement de solutions alternatives aux énergies fossiles peut entraîner l'apparition du *Green Paradox*, et donc produire plus d'émissions de CO<sub>2</sub>, effet inverse qu'espéré. De ce fait, pour analyser si cet effet est observable par le prisme des biocarburants, les auteurs vont utiliser deux notions :

### - *Weak Green Paradox* :

Ce phénomène s'observe selon eux lorsque le régulateur ou pays concerné (ici les Etats Unies) augmente les subventions accordées au secteur des biocarburants, et entraînant une baisse des prix futures des énergies fossiles. Ainsi, cette subvention entrainerait les producteurs à augmenter leurs taux d'extractions sur le court terme pour compenser les pertes futures. Pour prouver cet effet, les auteurs ont utilisés une méthode d'économétrie, qui diffère des méthodes vues précédemment. En effet, leurs objectif est de montrer que, par le passé, cet effet a déjà pu s'observer.

Leur méthode d'analyse consiste observer les variations retardées d'une période de la production de pétrole, du prix du baril, de la production de biocarburants (agrégée) et du prix du charbon (alternative au carburants et biocarburants) ; et déterminer s'il existe une relation entre ces variables explicatives et la production de pétrole brut aux Etats Unies. Ils utilisent ensuite une analyse en régression linéaire.

**Table 1**  
Dynamic linear regression model of US oil production.

Variable	US oil production	
	Coefficient	p Value
Ln(oil production(-1))	0.54	0.010
Ln(oil price(-1))	0.07	0.008
Ln(biofuels production(-1))	0.04	0.050
Ln(coal price)	-0.12	0.080
Time trend	-0.02	0.011
Year 2010 Dummy	0.10	0.013
Year 2011 Dummy	0.11	0.009
Intercept	6.89	0.023
R_squared	0.9907	
F_statistic	336 (p=0.000)	
LM test for AR(4)	F=1.67 (p=0.200)	
Ljung-Box test for AR(12)	Q=10.04 (p=0.613)	

Figure 17 – Résultats de l'analyse en régression linéaire du modèle de Grafton et Kompas.<sup>9</sup>

A l'aide de ces résultats présentés dans la figure 17, les auteurs montrent, que l'augmentation de la production des biocarburants aux Etats Unies est totalement corrélée avec l'instauration des subventions. De ce fait, si la production de biocarburant a un impact sur la production de pétrole, alors les subventions de ces biocarburants en auront également.

Ensuite, la figure 17 illustre également le fait que premièrement, la production de pétrole aux Etats Unies entre 1980 et 2012, varie de manière linéaire par rapport à la production de biocarburants, et donc des subventions accordées à ces derniers. Ces résultats sont vérifiables par une p-value très faible. Deuxièmes, en analysant les coefficients de régression linéaires (autrement dit les élasticités), on observe qu'une variation de +1% de la production de biocarburant va augmenter la production de pétrole américain de +0.04% à court terme et de +0.09% à long terme. Ainsi, à l'aide de ces résultats, les auteurs ont bien montré la présence d'un effet de *Green Paradox*, qu'il nomme *Weak* : **la subvention d'alternatives au pétrole entraîne une hausse de la production actuelle de cette ressource.**

- *Strong Green Paradox* :

Le second effet que les auteurs analysent est le *Strong* paradoxe. A la suite d'un *Weak* paradoxe, si les subventions des pays réduisent suffisamment les prix des alternatives, alors les producteurs vont décaler de manière encore plus importante leur production de pétrole vers le présent et donc augmenter leurs émissions de CO<sub>2</sub> sur le court terme. Dans ce cas, il sera également mis en cause que les subventions des biocarburants sont à l'origine de ces émissions supplémentaires.

Pour montrer cela, les auteurs définissent un modèle de prévision, dans lequel ils considèrent 1000 barils de pétrole (contenant 430 tonnes de CO<sub>2</sub>) et évaluent l'analyse du cycle de vie de cette production. Ils prennent en compte un facteur *X* de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> résultant de la production et de la consommation de ces barils. Ce facteur *X* prend des valeurs de 10 à 80%, ce qui correspond au remplacement de *X*% des barils de pétrole par des barils de biocarburant. Les résultats sont présentés dans la figure ci-dessous :

<sup>9</sup> Source : *US biofuels subsidies and CO2 emissions: An empirical test for a weak and a strong green paradox*, R. Quentin Grafton a,n, Tom Kompas a, Ngo Van Long b, Hang To a; p.3

**Table 2**  
US biofuels production and effect on US CO<sub>2</sub> emissions, 2011 data.

	1% Increase in biofuels production (thousand barrels)	Increase in oil production due to 1% increase in biofuels production (thousand barrels)	Change in CO <sub>2</sub> emission due to 1% increase in biofuels production (metric tons CO <sub>2</sub> )								
			X=0.1	X=0.2	X=0.26	X=0.3	X=0.5	X=0.57	X=0.6	X=0.7	X=0.8
Short-run	3248	827	215860	76110	0	-63210	-342710	-439890	-482460	-622210	-761702
Long-run	3248	1860	660050	520300	436450	380980	101480	0	-38270	-178020	-317512
Change in CO <sub>2</sub> emission relative to total US CO <sub>2</sub> emissions from energy use (%)		Short-run	0.004	0.0014	0	-0.0012	-0.006	-0.008	-0.009	-0.011	-0.014
		Long-run	0.012	0.009	0.008	0.007	0.002	0	-0.0007	-0.003	-0.006

1. A positive number in terms of the change in CO<sub>2</sub> emission is consistent with the hypothesis of a Strong Green Paradox while a negative number is not.

Figure 18 - Tableau récapitulatif des quantités d'émissions de CO<sub>2</sub> selon le facteur de remplacement X.<sup>10</sup>

Ainsi, grâce à la figure 18, les auteurs montrent que si l'on substitue moins de 26% de la production de pétrole par des biocarburants, alors la production de biocarburant aux Etats Unies entrainera une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> à court terme. Par exemple, si l'on ne remplace que 10% de la production de pétrole par des biocarburants, alors les émissions de CO<sub>2</sub> à court terme vont augmenter de 215 860 tonnes par rapport à des émissions « normales », c'est-à-dire sans production de biocarburants. Ces remarques sont également visibles à long terme : si le taux de remplacement de pétrole est inférieur à 57%, alors les émissions de CO<sub>2</sub> vont augmenter (si X=10%, on observe une augmentation de 660 050 tonnes de CO<sub>2</sub> sur le long terme).

Ces remarques permettent ainsi à Grafton et Kompas de montrer que **les subventions (ou production de biocarburants) peuvent être à l'origine de la surexploitation des réserves pétrolières à court et long terme**. Ce phénomène, qu'ils prénomment *Strong Green Paradox*, est donc la continuité du *Weak* vu précédemment.

A travers cet article, les deux auteurs ont confirmé la présence du phénomène de *Green Paradox* défini par Sinn en 2008, mais en apportant une nuance : un effet dit *faible*, qui apparait lorsqu'un état augmente les subventions des alternatives au pétrole ; et un effet *fort*, qui apparait lorsque un état ne parvient pas à concrétiser et accélérer les changements de technologies énergétiques.

A travers cette seconde partie, nous avons pu mettre en lumière la chronologie et les principales thèses qui entourent la prise en compte du réchauffement climatique au sein des systèmes économiques. Ce phénomène a mis de nombreuses années à être reconnu puis étudié, mais amène maintenant son lot de travaux et de débats. C'est dans ce contexte qu'en 2008, H.W. Sinn, en analysant les systèmes de taxation « carbone », a théorisé son paradoxe : le *Green Paradox*. En effet, depuis les années 1990, le problème des émissions de dioxyde de carbone (et eqCO<sub>2</sub>) est considéré comme l'enjeu majeur de notre siècle, à savoir, limiter la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique en dessous d'une limite pour ne pas dépasser les +2°C de réchauffement planétaire ici à 2100. L'auteur allemand a ainsi montré que, dans la lutte contre ces émissions, l'instauration de systèmes de taxes croissantes ou constantes aboutissaient à une surexploitation à court terme des entreprises pétrolières, qui se basent sur des modèles de production de Hotelling. Par la suite, des débats se sont organisés autour de cette thèse, et entres autres confirmés par les articles de Ploeg-Withagen et Grafton-Kompas. Ainsi, afin de continuer la discussion de cette théorie, nous nous concentrerons sur la vision d'un autre économiste, J. Smith et de la mise en place d'un nouveau modèle de production.

<sup>10</sup> Source : *US biofuels subsidies and CO<sub>2</sub> emissions: An empirical test for a weak and a strong green paradox*, R. Quentin Grafton a,n, Tom Kompas a, Ngo Van Long b, Hang To a; p.4



### III. Travail sur les systèmes de taxation du carbone : questionnement du *Green Paradox* :

Cette partie sera consacrée à l'analyse d'un article de l'économiste, J. Smith portant sur la confirmation ou non du *Green Paradox* : *Green Paradox, Hotelling Cul de Sac*, James L. SMITH, Edwin L. Cox School of Business, Southern Methodist University, Dallas, 23 Septemeber 2016. A l'inverse de ses collègues cités précédemment, Smith doute de l'apparition systématique de ce *Green Paradox*, ou du moins dans le cadre d'une analyse par un modèle de Hotelling. Ainsi, à partir de l'analyse de cet article, nous étudierons un modèle complémentaire à celui imaginé par Smith, afin de répondre à la question suivante : Le paradoxe vert est-il une réalité ?

#### 1) Modélisation de taxation « carbone » de J. Smith :

L'article de James L. Smith, publié en 2012, étudie l'effet dit de *Green Paradox*, qui stipule que l'instauration d'une taxe sur la production pétrolière incite les producteurs à valoriser leurs réserves plus tôt. En d'autres termes, « *les taxes, visant initialement à réduire la production pétrolière et donc les émissions de CO<sub>2</sub>, induisent en fait de plus fortes émissions de CO<sub>2</sub> à court et moyen termes* ». <sup>11</sup>

Smith a ainsi choisi d'analyser l'effet de différentes formes de taxation sur les stratégies des Etats et des entreprises productrices. Pour cela, il cherche à enrichir le modèle de Hotelling associé aux ressources naturelles non renouvelables. L'auteur suppose notamment que les investissements fixent, le profil de production. Ainsi, contrairement au modèle d'Hotelling qui ne prenait pas en compte de contrainte de déplétion (phénomène physique et naturel de diminution de la pression dans un puit de pétrole), la production à l'instant  $t$  est ici limitée par la capacité de l'installation, déterminée grâce à l'investissement initial, et ne pourra être augmentée que si l'exploitant décide d'investir plus pour son champ.

Dans ce modèle, l'Etat producteur peut ainsi choisir d'appliquer une taxe ou non, appelée ici *royaltie*. On considère un ou plusieurs puits pétroliers, produits par une entreprise. Le prix du baril est fixé à 100\$. Par ailleurs, les coûts d'investissement par unité de production gagnées sont les mêmes sur l'ensemble de la durée de vie du projet.

#### A. Définition du modèle

Le profil de production retenu est le suivant : la production  $q_t$  à l'instant  $t$  est de la forme :

$$q_t = q_0 \times e^{(-a(K)*t)} \quad (9)$$

Avec  $q_0$  le niveau de production initial ;  $a(K)$  le coefficient de déclin naturel du puits mesurant la « vitesse » à laquelle la ressource utilisable diminue ; et  $K$  le niveau de développement.

Le coefficient  $\lambda > 1$ , ( $\lambda = 2,5$ ) est considéré comme l'augmentation des réserves du puits par suite d'un investissement en production. Par ailleurs, on considère un coût variable,  $VC = 20\$ \times Q + 0.02 * K$ .

A partir de ces variables, l'auteur est capable de simuler le comportement de production d'un pétrolier sans intervention de l'Etat. Ensuite, il va donc ajouter un modèle de taxation, calibré de telle sorte que

<sup>11</sup> Source : *Green Paradox, Hotelling Cul de Sac*, James L. SMITH, Edwin L. Cox School of Business, Southern Methodist University, Dallas, 23 Septemeber 2016

les montants de taxes soient égaux à 50% du coût social de production ou dommages causés par les émissions de CO<sub>2</sub>.

Trois régimes fiscaux sont utilisés :

- Taxe constante dès le début du projet
- Taxe croissante
- Taxe décroissante

Enfin, l'auteur va comparer les différents projets possibles afin d'observer l'impact de ces taxes sur plusieurs variables :

- La NPV, ou Net Present Value du projet (Valeur Actuelle Nette en français), c'est-à-dire la somme d'argent que peut rapporter le projet.
- La production initiale et finale du puits.
- Les dates de fin de production et de rentabilité du projet.
- La quantité de CO<sub>2</sub> émise tout au long du projet.

Dans son article, Smith intègre deux modèles différents : un producteur possédant un puits, ou un producteur ayant un portefeuille de puits. Nous ne nous intéresserons dans ce travail qu'au premier modèle.

## B. Modèle à un puit

**La production à la date  $t$  est déterminée par une courbe exponentielle décroissante (9)**, modélisant le déclin naturel de la production dans un puits. La valeur  $a(K)$  dépend du niveau de développement  $K$  ainsi que du type de forage. Par exemple,  $a(K)$  sera plus élevée pour les sources non-conventionnelles.

L'auteur ajoute une possibilité d'investissement, qui consiste à augmenter le taux de recouvrement des réserves, à travers des EOR (*Enhanced Oil Recovery*). Les réserves disponibles à la date de l'investissement sont alors augmentées d'un facteur  $\lambda$ . Le niveau d'investissement unitaire est identique à celui de l'investissement unitaire initial.

Ainsi, une taxe devrait avoir pour effet de changer le niveau d'investissement réalisé, et donc la production. Cependant, selon le modèle de Smith, l'application d'une taxe n'a aucun effet direct sur le niveau de production des puits déjà en fonctionnement, puisque la courbe de production est prédéterminée. Seuls les nouveaux puits, ainsi que les investissements supplémentaires sur les puits existants seront impactés par l'application de taxes.

Le modèle retenu considère un prix du pétrole de 100\$/bbl. Afin d'observer les impacts d'une taxe sur la production et les émissions de dioxyde carbone résultantes, le modèle s'intéresse aux décisions suivantes : la production initiale, la durée de production et la présence d'investissements supplémentaires ou non.

Pour permettre des comparaisons valides, il convient de fixer une mesure des effets de la taxes de manière intertemporelle. Ainsi, on considère que la valeur actuelle nette des taxes est toujours égale à 50% de la valeur sociale actualisée brute des coûts sociaux et environnementaux présents avant l'imposition de la nouvelle fiscalité.

Enfin, on considère ici une réserve unique. L'entreprise est donc *price-taker*, et n'influence donc pas le niveau des prix de vente.



### C. Analyse du modèle à un puit

On observe tout d’abord les effets de l’ajout d’une taxe constante (33,9%) vis-à-vis d’une situation de base sans taxe. Les investissements initiaux sont réduits de 20%, ce qui est contraire à la principale conclusion du *Green Paradox* et les investissements supplémentaires au cours de la vie de production du champ sont retardés de 6 ans. Par ailleurs, la période de production est augmentée. Enfin, la baisse des débits a plus d’impact que l’augmentation de la période de production, puisque la production totale du champ est réduite à la suite de l’application d’une taxe.

Ensuite, on observe que **le sens d’évolution des taxes entraîne des comportements différents**. S’il existe une augmentation graduelle de la taxe au fil du temps, les investissements initiaux sont supérieurs comparés au cas d’une taxe décroissante. Ce résultat est cohérent avec les prédictions du *Green Paradox*. De plus, plus l’augmentation de la taxe est importante, plus la production initiale augmentera. Au-delà d’une certaine limite, on observe également que la récupération assistée du pétrole (EOR) n’a plus lieu car elle est économiquement non viable. La production totale du champ s’en trouve alors nettement diminuée.

Scenario	Initial royalties rate (%)	Royalties growth rate (%)	Onset on EOR (years)	Initial production (mm bbl)	Ultimate recovery (mm bbl)	End of life (year)
No tax	0	0	10	7,5	166	44
Constant tax	33,9	0	16	6	150	54
Increasing tax	30,35	3	na	7	86	27
Decreasing tax	51,6	-3	15	4,5	172	80

Figure 19 - Résumé des résultats de Smith (effet des royalties)<sup>12</sup>

Dans le cas d’une taxe décroissante, le niveau de production initiale est plus faible que dans le cas d’une taxe constante ou croissante. Cependant, étant donné une augmentation conséquente de la durée de vie du champ, la production totale est supérieure par rapport à une taxe croissante ou constante. Si le taux de décroissance de la taxe est supérieur à 3% par an, cette production totale est même supérieure au cas de base sans taxe. En effet, la production étant plus faible chaque année, le champ produira de nombreuses années supplémentaires avant que les coûts opératoires soient supérieurs aux revenus.

Pour conclure, l’imposition d’une taxe transforme les volumes de production ainsi que leur *timing*. Puisque la production est affiliée à l’émission de CO<sub>2</sub> (à un coefficient près), on constate que l’imposition d’une taxe croissante permet de limiter considérablement ces émissions sur le long terme, pour en produire plus sur le court terme. A l’inverse, une taxe décroissante aura tendance à accroître ces émissions sur le long terme, tout en les limitant sur le court terme. Par ailleurs, une taxe croissante ou décroissante entraîne une perte importante de la rente pétrolière du producteur. Certaines hypothèses de ce modèle peuvent néanmoins être discutées, notamment celle des prix du pétrole constant.

<sup>12</sup> Source : *Green Paradox, Hotelling Cul de Sac*, James L. SMITH, Edwin L. Cox School of Business, Southern Methodist University, Dallas, 23 Septemeber 2016

En résumé, on note que dans chacun des différents scénarios étudiés, **l'instauration d'une taxe à un effet favorable sur les émissions de CO<sub>2</sub>, en réduisant la production de pétrole**. Cependant, on retrouve des tendances communes par rapport au modèle d'Hotelling, à savoir que dans le cas d'une taxe croissante, les **producteurs produiront le plus possible dès le début, et sur une période courte**.

Enfin, l'auteur finit son étude en s'intéressant à "l'effet d'annonce". L'effet d'annonce traduit le fait que les décideurs publics préviennent deux ou trois ans en avance de l'instauration d'une taxe.

Dans ce cas, il conclut que les compagnies auront une forte incitation à investir de façon massive dès l'an 0, et on assisterait alors une surproduction importante au moment de l'annonce de la taxe future.

#### D. Conclusion de l'article

Pour conclure, les investissements dans l'industrie pétrolière sont ponctuels. En d'autres termes, les producteurs prennent des décisions irréversibles qui prédéterminent les niveaux de production futurs. La modélisation de Smith prend ainsi en compte ces décisions, en proposant un modèle de déplétion naturel à la suite de ces investissements.

L'application d'une taxe sur la production induit une réduction de la production initiale, des investissements supplémentaires plus tardifs, et dans la majorité des cas une réduction des émissions totales de gaz à effet de serre. **Ces conclusions sont contraires aux effets du Green Paradox : il n'y a pas de décalage de la production vers le présent.**

L'incitation à réduire la production initiale est plus forte pour une taxe décroissante que pour une taxe croissante. Cependant, une taxe décroissante augmente de manière conséquente la durée de vie des champs pétroliers, ce qui entraîne des niveaux de productions totaux plus importants que dans le cas d'une taxe croissante. De plus, une taxe croissante décourage les entreprises pétrolières à réaliser des récupérations assistées du pétrole. Les simulations réalisées par Smith suggèrent donc que la meilleure taxe est une taxe croissante. Elle permettrait de limiter les émissions de gaz à effet de serre sur le long terme.

#### E. Critique de l'article et ouverture

Le modèle proposé par Smith met en lumière l'impact de l'ajout d'une taxe sur la réaction des entreprises, modifiant la production pétrolière et donc les émissions de CO<sub>2</sub>. Cependant, dans cet article, l'auteur laisse un certain « flou » dans ses hypothèses :

- L'auteur a décidé de fixer l'objectif de maximisation de l'Etat producteur à *50% du coût social de production ou dommages causés par les émissions de CO<sub>2</sub>*. Le calcul de ce coût social et environnemental n'est jamais expliqué.
- L'auteur ne définit pas clairement comment les probabilités et chances d'obtenir des réserves à la suite de l'exploration d'une zone géographique sont prises en compte. Une analyse en option réelle permettrait d'utiliser ces informations.

Ainsi, **à partir des conclusions de SMITH, j'ai élaboré un modèle complémentaire**, mêlant les hypothèses de l'auteur, mais également nos connaissances du milieu pétrolier. Ce modèle est présenté dans la partie suivante.

## 2) Présentation du modèle choisi

Tout en s’aidant des résultats obtenus par le modèle de Smith, j’ai créé un modèle, en changeant certains paramètres ou fonctions qui paraissaient trop simplistes ou peu adaptées.

Tout d’abord, nous pouvons revenir sur la nouvelle fonction de production qui dépend de la capacité installée et d’une contrainte de déplétion. En première période, c’est-à-dire avant qu’intervienne un investissement supplémentaire, la production est égale au minimum entre la capacité installée  $K_0$  et la contrainte de déplétion du champ défini comme 10% de la réserve disponible à chaque période (11). A la suite d’un investissement supplémentaire à la date  $M_2$ , cette production est augmentée. Ce supplément de production est égal au minimum entre la capacité supplémentaire installée et 10% de la réserve supplémentaire disponible (11). Comme nous le verrons par la suite, cette fonction de production se traduit le plus souvent par un plateau en début de vie du champ, et égale à la capacité installée, avant de décroître à la suite de la contrainte de déplétion. Par ailleurs, la date de l’investissement supplémentaire doit avoir lieu après le plateau de production. On a donc la contrainte suivante :

$$M_2 > \{\min(t) | production_t < K_0\} \quad (10)$$

La fonction de production s’écrit :

$$\begin{cases} \min(K_0, 10\% \times R_{0,t}) & \text{Si } t < M_2 \\ \min(K_0, 10\% \times R_{0,t}) + \min(K_1, 10\% \times R_{1,t}) & \text{Si } t > M_2 \end{cases} \quad (11)$$

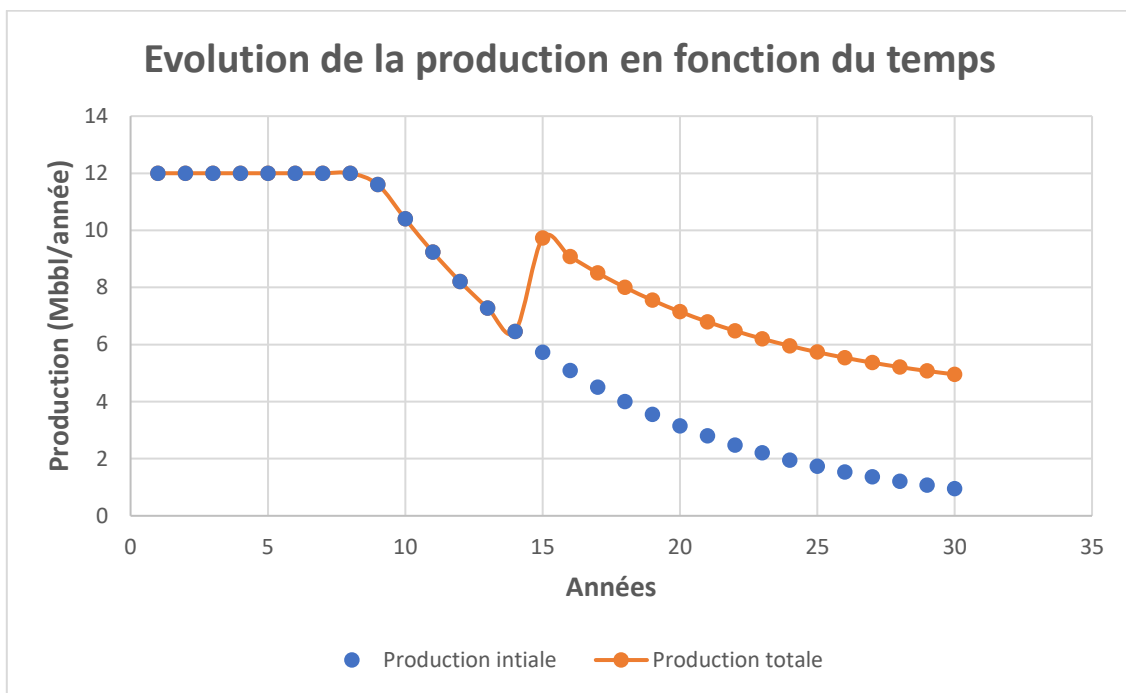


Figure 20 – Évolution temporelle de la production selon le modèle défini en (3), avec  $K_0=12$  et  $K_1=10$ .

L’investissement supplémentaire, intervenant à la date  $M_2$ , permet d’augmenter les réserves disponibles d’un facteur  $\lambda$ . Par exemple, il peut correspondre à la mise en place de puits injecteurs.

Ensuite, les hypothèses suivantes sont utilisées dans le modèle :

- CAPEX (Capital expenditures) : 60 000\$/bbl multiplié par la capacité journalière initialement installée (bbl/jour).
- Opex (Operational expenditures) : coûts fixes de 2% de la somme totale des CAPEX installés à la période  $t$ , plus les coûts variables égaux à 20\$/bbl produits.
- Coûts d'exploration : \$0,5 par baril de réserve initiale.
- Dépréciation : dépréciation de l'ensemble des coûts d'exploration en première année de production ; dépréciation linéaire pour les coûts de développement sur 5 ans.

Les hypothèses économiques sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Indicateur	Valeur	Commentaire
Taux d'impôt	50%	Impôt sur les sociétés. L'absence de royalties explique sa valeur élevée
Taux d'actualisation	8%	Valeur standard dans l'industrie pétrolière et gazière
Taux d'inflation	1.5%	Taux d'inflation classique pour des calculs économiques
Prix du baril	50 ou 100\$	Le scénario à 100\$ correspond à la structure de coût choisi. Le scénario à 50\$, plus proche de la situation actuelle, permet d'apprécier l'impact du prix du pétrole sur le modèle.
Augmentation du prix du baril	2%	Hypothèse reprise de Smith

Figure 21 – Tableau récapitulatif des hypothèses économiques du modèle défini.<sup>13</sup>

L'imposition de 50% est calculé à partir du *Taxable Income*, correspondant aux revenus auxquelles on retranche les coûts de CAPEX, d'OPEX. Dans le cas d'un *Taxable Income* négatif l'année précédente, ce dernier est placé en *Carry Over* et vient diminuer le *Taxable Income* de l'année en cours. Le calcul de cet impôt se fait en monnaie courante, les OPEX et les CAPEX étant inflatés.

Par ailleurs, la taxe CO2 mise en place est proportionnelle à la production totale du champ. Le facteur de proportionnalité dépend du prix d'émission par baril et de la variation temporelle de ce prix (on considère qu'un baril contient 0.5tCO2). Les prix d'émission initiaux retenus ici sont 5, 10, 15 et 50\$/bbl. Par exemple, un prix de 10\$/bbl correspond à une taxe de 20\$/tCO2, ce qui est cohérent avec les prix aujourd'hui observés sur le marché EU-ETS. A l'inverse, un prix de 50\$/bbl correspond à une taxe carbone de 100\$/tCO2, ce qui correspondrait à une forte croissance du prix du CO2 (envisagé par

<sup>13</sup> Source : *Green Paradox, Hotelling Cul de Sac*, James L. SMITH, Edwin L. Cox School of Business, Southern Methodist University, Dallas, 23 Septemeber 2016

différentes entreprises). De plus, nous envisagerons trois types de variations de cette taxe CO<sub>2</sub> : constante, croissante et décroissante.

La conversion des cash-flows en monnaie constante de l'année 0 nous permet de calculer les indicateurs économiques clés : la VAN (Valeur Actuelle Nette) ainsi que le TRI (Taux de Rendement Interne) du projet. Les tableaux Excel servant aux divers calculs sont présentés dans les annexes.

### 3) Présentation des résultats et discussion

Pour tenter de répondre au mieux à la problématique de l'efficacité ou non des systèmes de taxes carbone, via notre modèle, nous avons envisager deux types de résultats : les solutions dites optimales, c'est-à-dire les meilleures solutions pour maximiser le profit des producteurs, sous la contrainte d'un régime fiscal donné ; et une analyse de sensibilité des profits des producteurs, avec divers scénarios de productions et de taxes.

#### A. Solutions optimales : choix stratégiques des producteurs

L'instauration d'une taxe a pour effet de modifier les décisions des producteurs. A l'aide du modèle défini précédemment, nous cherchons à quantifier leurs impacts sur la production et la NPV du projet. Trois variables de décisions sont utilisées : l'investissement initial  $K_0$ , l'investissement supplémentaire  $K_1$  et sa date  $M_2$ . Nous cherchons donc, pour chaque niveau de taxe et chaque variation, à maximiser la NPV du projet en jouant sur ces 3 variables d'action. Nous étudions deux schémas de prix du pétrole, à savoir 100\$/baril puis 50\$/baril. Ces résultats sont obtenus à l'aide d'un code VBA disponible en annexe.

##### i) Scénarios à 100\$ :

Scénario 100\$	Niveau initial de la taxe	5	5	5	5	5	10	10	10	10	10
	Variation de la taxe	-10%	-5%		5%	10%	-10%	-5%		5%	10%
K <sub>0</sub>		15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
K <sub>1</sub>		10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
M <sub>2</sub>		7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
NPV		4279	4152	3941	3569	2861	3949	3694	3273	2527	1113
Production		371	371	371	371	371	371	371	371	371	371

Scénario 100\$	Niveau initial de la taxe	15	15	15	15	15	50	50	50	50	50	-
	Variation de la taxe	-10%	-5%		5%	10%	-10%	-5%		5%	10%	-
K <sub>0</sub>		15	15	15	15	12	10	8	7	7	7	15
K <sub>1</sub>		10	10	10	10	7	10	10	10	7	7	10
M <sub>2</sub>		7	7	7	7	31	13	18	22	31	31	7
NPV		3619	3236	2604	1486	129	1704	777	-572	-2434	-6190	4610
Production		371	371	371	371	192	348	314	272	182	182	371

Figure 22 – Solutions optimale pour un scénario à 100\$/bbl.

Tout d'abord, on observe que l'ajout d'une taxe, quelle que soit sa valeur initiale, réduit la NPV du projet. Cependant, la NPV ne nous renseigne pas sur le *timing* lié à cette production. En d'autres termes, on se demande si l'imposition d'une nouvelle taxe décale, comme le prévoit le *Green Paradox*, la production vers le présent.

Dans un premier temps, on s'intéresse uniquement au niveau initial de la taxe. Plus ce niveau est élevé, plus le niveau d'investissement initial  $K_0$  est faible. Par exemple, une taxe constante de 10\$/bbl impose un niveau de production de 15 Mbbbl/an, contre 7 Mbbbl/an pour une taxe de 50\$/bbl. **Ce résultat s'oppose au Green Paradox** : l'imposition d'une taxe élevée réduit la production initiale.

Cependant, dans le modèle retenu, on observe que pour des niveaux de taxe faible (5\$/bbl et 10\$/bbl), la décision optimale est identique à celle dans le cas où il n'y a pas de taxe. Un niveau de taxe faible n'a donc pas d'effet incitatif sur la politique de production.

Enfin, **l'imposition d'une taxe élevée et croissante a pour effet de supprimer l'investissement supplémentaire  $K_1$**  (la date  $M_2 = 31$  signifiant que le producteur ne réinvestit pas, la durée du projet étant fixée à 30 ans). A l'inverse, l'imposition d'une taxe élevée et décroissante, le producteur est amené à retarder l'investissement supplémentaire. Une taxe décroissante semble donc décaler la production vers le futur, ce qui est contraire à l'effet du *Green Paradox*.

ii) Scénario à 50\$/bbl :

Scénario 50\$	Niveau initial de la taxe	5	5	5	5	5	10	10	10	10	10
	Variation de la taxe	-10%	-5%		5%	10%	-10%	-5%		5%	10%
Ko	8	8	7	7	7	8	7	7	7	7	7
K1	10	10	7	7	7	10	10	7	7	7	7
M2	18	18	31	31	31	18	22	31	31	31	31
NPV	311	235	92	-92	-467	139	-1	-207	-575	-1326	
Production	314	314	182	182	182	314	272	182	182	182	

Scénario 50\$	Niveau initial de la taxe	15	15	15	15	15	50	50	50	50	50	-
	Variation de la taxe	-10%	-5%		5%	10%	-10%	-5%		5%	10%	-
Ko	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	10
K1	10	10	7	7	7	10	7	7	7	7	7	9
M2	22	22	31	31	31	22	31	31	31	31	31	13
NPV	-21	-212	-506	-1058	-2184	-1057	-1625	-2599	-4437	-8193		493
Production	272	272	182	182	182	272	182	182	182	182	182	342

Figure 23 – Scénario à 50\$/bbl

Le prix du baril de pétrole est à présent fixé à 50\$/bbl. On observe que la NPV du projet sans taxe est divisé par 10 comparé au scénario à 100\$/bbl. Cette baisse importante s'explique par une structure de coût adaptée à un prix du baril à 100\$/bbl. On remarque également qu'une chute du prix du baril réduit et retarde les investissements. Par exemple, l'investissement initial passe de 15 Mbbbl/an à 10 Mbbbl/an.

Dans ce scénario à 50\$/bbl, on observe que les revenus et les décisions des producteurs sont bien plus sensibles à l'instauration d'une taxe que dans le cas d'un baril à 100\$. On cherche à présent à savoir si ces effets confirment les conclusions du *Green Paradox*. Quel que soit son niveau initial, l'application d'une taxe sur la production induit une réduction de la production initiale, qui passe de 10 Mbbbl/an à 7 ou 8 Mbbbl/an, ainsi que des investissements plus tardifs. Ces conclusions sont contraires aux effets du *Green Paradox* : **il n'a pas de décalage de la production vers le présent.**

On observe également que l'instauration d'une taxe croissante supprime les investissements supplémentaires. La production totale est donc nettement diminuée. A l'inverse, une taxe décroissante décale l'investissement supplémentaire vers le futur à un niveau plus important dans le cas sans taxe.

## B. Analyse de sensibilité des profits des producteurs aux régimes de taxes carbonées

Ensuite, après avoir observé les solutions optimales pour notre problème, nous allons étudier les variations et évolutions des profits des entreprises pétrolières soumises à notre modèle, selon leur sensibilité à l'investissement. Le but sera d'observer les NPV des pétroliers, selon les différents régimes fiscaux vus précédemment, prix du baril et scénarios d'investissements. Nous fixons alors les paramètres de capacité  $K_0$ ,  $K_1$  et, selon les scénarios de prix du baril ou de régime fiscal choisis, faisons varier les dates de réinvestissement  $M_2$  afin de déterminer la NPV de chaque projet (un projet correspond à une combinaison de  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $M_2$ , prix du baril et régime fiscal). Nous comparerons ensuite l'ensemble des scénarios et projets entre eux.

Les différents scénarios d'investissements sont les suivants :

- **$K_0 = 15 / K_1 = 10$**  : scénario où les investissements initiaux sont supérieurs aux investissements secondaires. Les valeurs de 15 et 10 correspondent à certaines valeurs optimales trouvées ci-dessus. Le but est d'observer une différence de production par suite d'un réinvestissement ou non, et donc prendre des capacités  $K_0$  et  $K_1$  représentatives. On observe ensuite la variation de NPV des projets, selon des dates de réinvestissement de  $M_2=6$  à  $M_2=31$ .
- **$K_0 = 10 / K_1 = 15$**  : scénario où les investissements secondaires sont plus importants que les investissements initiaux. Toutefois, il faut noter que, puisque la capacité initiale  $K_0$  varie, les valeurs initiales de  $M_2$  varient également (car le producteur ne peut réinvestir avant la fin de son premier palier de production, c'est-à-dire que  $M_1 < M_2$ ). Ainsi, dans ces scénarios,  $M_2$  prends les valeurs de 12 à 31.
- **$K_0 = 12.5 / K_1 = 12.5$**  : scénario où le producteur choisit de réinvestir la même capacité que précédemment installée. Nous avons choisi les valeurs de 12.5 pour conserver la même capacité totale de 25. Dans ce cas,  $M_2$  prend les valeurs de 8 à 31.
- **$K_0 = 15 / K_1 = 15$**  : scénario où le producteur choisit de surinvestir, et donc d'investir beaucoup initialement puis de réinvestir la même capacité. Ici,  $M_2$  varie de 6 à 31.

### i) Scénarios sans taxe : résultats préliminaires

Avant d'étudier les scénarios présentés ci-dessus face à une taxe, on observe les résultats obtenus sans taxe. On obtient ainsi les graphiques suivants :

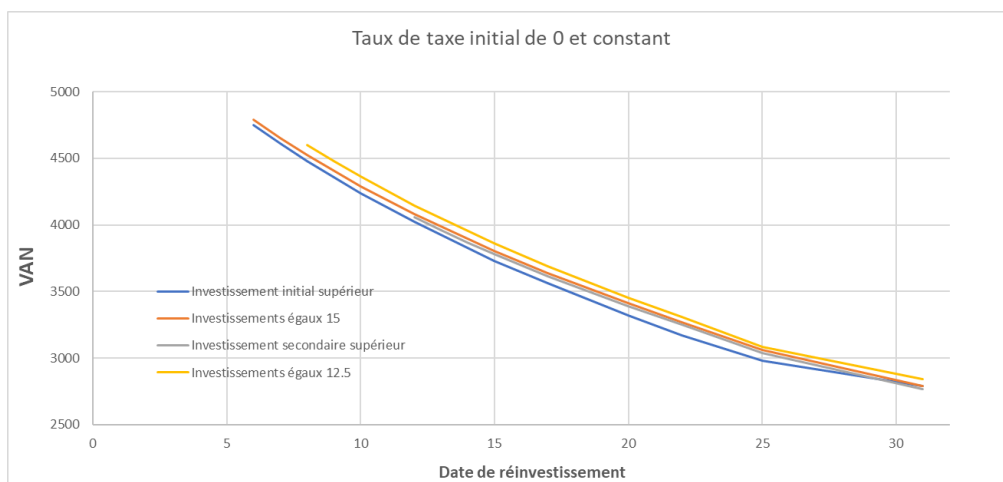


Figure 24 - Evolution des VAN selon les choix de production  $K_0$ ,  $K_1$  et  $M_2$  d'une entreprise ; en absence de taxe carbone.



Le premier graphique présente la NPV de l'entreprise selon ses choix de production  $K_0$ -  $K_1$ , et variant selon la date de réinvestissement  $M_2$ . On observe ainsi que les scénarios offrant les solutions les plus intéressantes pour les producteurs sont les scénarios où les investissements initiaux sont supérieurs aux investissements secondaires, et les scénarios où le producteur a surinvesti. Les NPV maximales sont données dans la figure 25 :

Capacité $K_0$	Capacité $K_1$	NPV maximale	Date $M_2$ associée	Production de CO2
15 Mbbl	10 Mbbl	4748 M\$	6	187 tCO2
15 Mbbl	15 Mbbl	4787 M\$	6	189 tCO2
12,5 Mbbl	12,5 Mbbl	4602 M\$	8	186 tCO2
10 Mbbl	15 Mbbl	4057 M\$	12	181 tCO2

Figure 25 - Tableau récapitulatif des NPV maximales selon les scénarios possibles de production, et quantité de CO2 associée.

Ainsi, en absence de taxe, le producteur va choisir de produire de manière importante et le plus tôt possible (aux vues de la décroissance stricte des courbes) pour maximiser son profit.

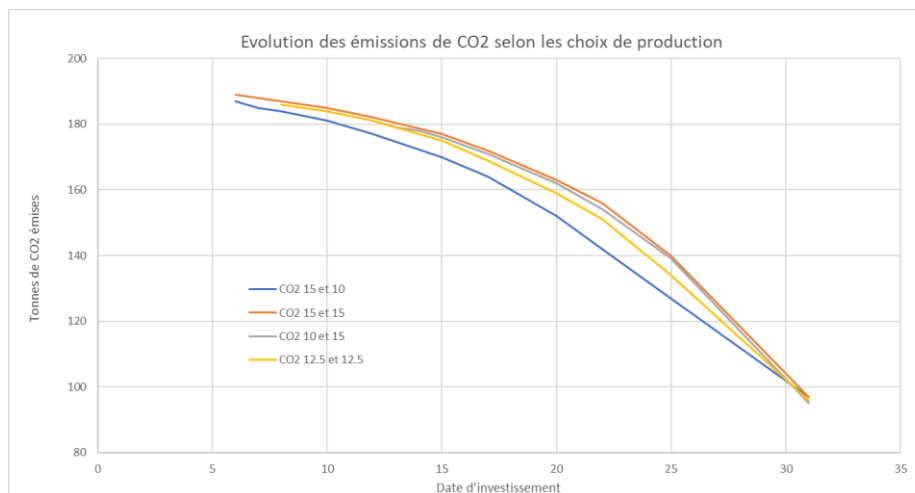


Figure 26 - Emissions de CO2 associées à chaque scénario possible.

Le second graphique montre, lui, la production de CO2 associée à chaque scénario. De ce fait, en absence de taxe, les scénarios les plus intéressants pour le producteur sont également les plus émetteurs (bien que les émissions soient relativement similaires, voir tableau ci-dessus).

Par la suite, nous allons observer si l'ajout d'une taxe spécifique à ces émissions a un impact ou non sur la stratégie des producteurs.

ii) *Taxe constante : impact du montant initial de taxe*

Premièrement, intéressons-nous à l'effet d'une taxe constante avec un **prix fixé à 100\$/baril**. On étudie l'impact de cette taxe constante avec les montants initiaux suivants : 50\$/baril (scénario de 100\$/tCO2 émis), 15\$/baril (ou 30\$/tCO2 émis), 10€/baril (ou 20\$/tCO2) et 5\$/baril (ou 10\$/tCO2). Ensuite, selon chacun de ces montants, nous apposons les mêmes scénarios d'investissements que précédemment, pour observer les VAN résultantes. On obtient ainsi le graphique suivant :



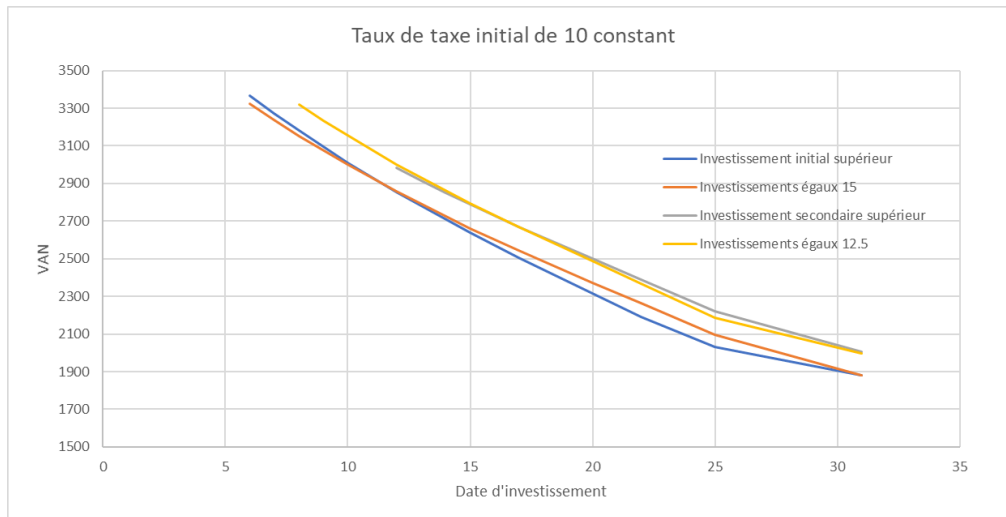


Figure 27 - Impact d'une taxe constante de 10€/baril sur la VAN des producteurs.

La figure 27 prend en compte un montant de taxe raisonnable, et observable actuellement sur l'EU ETS, à savoir 10\$/baril. On observe alors que la meilleure VAN est de 3369M\$ pour le scénario *Investissements initiaux supérieurs* 15-10, contre 3320M\$ et 3322M\$ pour les scénarios *Investissements égaux* 12.5-12.5 et 15-15. De plus, la date de réinvestissement est choisie le plus tôt possible afin de maximiser son profit. Ainsi, le producteur choisit de minimiser le plus possible la date  $M_2$ . Ce choix du *plus tôt possible* se constate par la décroissance systématique des courbes.

**Ainsi, ces premières conclusions permettent de confirmer une première caractéristique du Green Paradox : pour maximiser son profit sous l'effet d'une taxe sur le CO<sub>2</sub> émis, le producteur va choisir d'investir le plus tôt possible et le plus possible.**

Toutefois, l'introduction d'une taxe a permis de diminuer la VAN du producteur de 1379M€, et l'a guidé vers un scénario moins émetteur en CO<sub>2</sub> (comme vu sur la figure 8). La taxe a permis de réduire de 2Mt de CO<sub>2</sub> sur la durée de vie du projet, passant de 189Mt à 187Mt. De plus, en reprenant les scénarios donnant les VAN les plus importantes ( $M_2=6$  et soit  $K_0 = 15$  et  $K_1=10$ , soit  $K_0 = 15$  et  $K_1=15$ ), on peut s'apercevoir que les émissions à court terme sont moins importantes dans le scénario 15-10, celui choisi par les producteurs : 99.5 tCO<sub>2</sub> émis sur 10 ans pour le scénario 15-10 contre 112.8 émis sur 10 ans pour le scénario 15-15.

Date	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Total production Mbbl / 15-15	15	15	15	15	15	29	27,5	26,1	24,85	22,74
Somme sur les 10 premières années / 15-15	112,8									
Total production Mbbl / 15-10	15	15	15	15	15	24	22,5	21,1	19,85	18,74
Somme sur les 10 premières années / 15-10	90,6									

Figure 28 - Tableau récapitulatif des émissions liées aux scénarios 15-15 et 15-10 sur 10 ans.

Ainsi, **cette seconde conclusion contredit l'autre caractéristique du Green Paradox, qui montrerait que l'entreprise émet plus au début du projet et moins par la suite.** De ce fait, l'introduction d'une taxe carbone permettrait bien de réduire les émissions à court et long terme, en passant d'un scénario en surinvestissement, à un scénario avec des investissements futurs moindres. Ces conclusions sont également remarquables sur d'autres taux de taxes. Par la suite nous nous concentrerons sur la taxe croissante.

iii) *Taxe croissante : mise en évidence du Green Paradox ?*

Pour étudier l'impact d'une taxe croissante, nous nous baserons sur un montant initial de taxe de 10\$/baril, et variant de +10%, +5% ou +3% chaque année. Nous observerons ensuite ces taxes sur les mêmes scénarios d'investissements que précédemment.

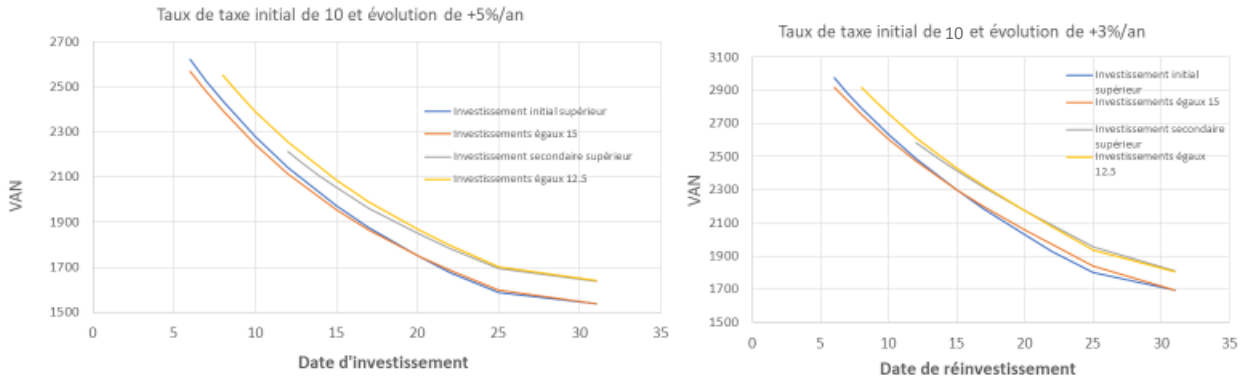


Figure 29 - Impact d'une taxe croissante (+5%/an à gauche et +3%/an à droite) sur la VAN des producteurs.

A l'aide des graphiques de la figure 29, on constate également que la VAN des producteurs a tendance à diminuer lorsque la date de réinvestissement  $M_2$  augmente. De plus, les VAN sont maximales pour les scénarios 15-10 et 15-15, où les investissements initiaux sont les plus importants. On retrouve alors la même conclusion que pour une taxe constante. **Le producteur va maximiser son profit en investissant le plus tôt, et le plus possible.**

En analysant les VAN des producteurs, on peut s'attarder sur les données suivantes :

Montant de taxe initial	Taux de croissance de la taxe	Choix du scénario de production K0-K1	Date de réinvestissement M2	VAN du producteur	Réduction/pertes par rapport au profit maximal réalisable	Cash Flow du régulateur ou pays	Pourcentage de captation de l'état des Cash Flow émis	Quantité d'émissions sur 10ans	Quantité d'émissions totales
0 \$/baril	0	15-15	6	4787 M\$	0%	12429 M\$	50%	113 tCO2	189 tCO2
10 \$/baril	0	15 10	6	3369 M\$	30%	15961 M\$	62%	99 tCO2	187 tCO2
10 \$/baril	3%	15 10	6	2975 M\$	38%	17329 M\$	67%	99 tCO2	187 tCO2
10 \$/baril	5%	15 10	6	2623 M\$	45%	18477 M\$	72%	99 tCO2	187 tCO2

Figure 30 - Tableau récapitulatif des données sur les VAN des producteurs en cas de taxes croissantes de +3 à +5%.

On s'aperçoit ici que les pertes des entreprises ont tendance à augmenter avec la croissance de la taxe, mais que les réductions d'émissions ont tendance à stagner. En effet, bien que l'instauration d'une taxe croissante entraîne le passage d'un choix de production 15-15 à 15-10, et donc des émissions réduites, le régime fiscal croissant n'est pas plus efficace qu'une taxe constante dans son objectif de limitation de la quantité de CO2 produite, à court et à long terme. Le seul avantage de la taxe croissante face à la taxe constante est le montant que va toucher l'Etat à la suite de l'instauration de cette taxe qui est très supérieur.

Pour compléter cette analyse, nous avons observé l'impact d'une taxe croissante, avec le même montant initial de 10€/baril, mais avec un taux de croissance de +10%/an. On obtient alors le graphique suivant :

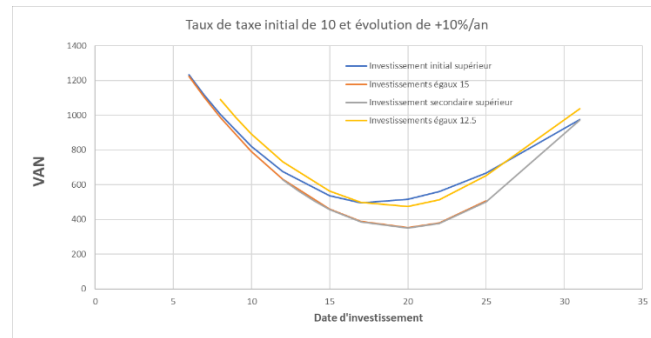


Figure 31 - Impact d'une taxe croissante de +10%/an sur la VAN des producteurs.

Dans ce cas également, on peut en tirer les mêmes conclusions, mais on peut ajouter qu'au bout d'un certain temps, il devient presque préférable de ne pas réinvestir ( $M_2=31$ ) et des scénarios avec des quantités produites inférieures peuvent devenir intéressants.

Ainsi, **notre modèle montre qu'une taxe croissante permet de confirmer que le *Green Paradox* est une réalité, mais ne prend pas l'ensemble des caractéristiques précisés par H.W. Sinn.** En effet, le producteur a intérêt à produire le plus et le plus tôt possible, mais ce choix de production n'est toutefois pas forcément le plus émetteur.

Pour tenter d'apporter une solution à ce problème des émissions de CO<sub>2</sub>, nous avons tenté d'analyser d'autres propositions fiscales et scénarios.

### C. Propositions et solutions au problème du *Green Paradox* :

#### i) Etude d'un régime fiscal décroissant : une alternative au marché ?

En reprenant les idées de Smith, j'ai de la même manière que les systèmes de taxes constantes et croissantes, analysé l'impact d'une taxe décroissante sur la stratégie des entreprises pétrolières. Bien que décriée et considérée comme irréalisable pour certains économistes, la taxe décroissante pourrait offrir une solution satisfaisante au problème des émissions de CO<sub>2</sub> à court terme. Pour cela, nous avons choisi un montant initial de taxe de 50€/baril, suffisamment élevé pour dissuader, puis nous appliquons des taux de décroissance de cette taxe de -15%/an à -3%/an. On obtient les graphiques suivants :

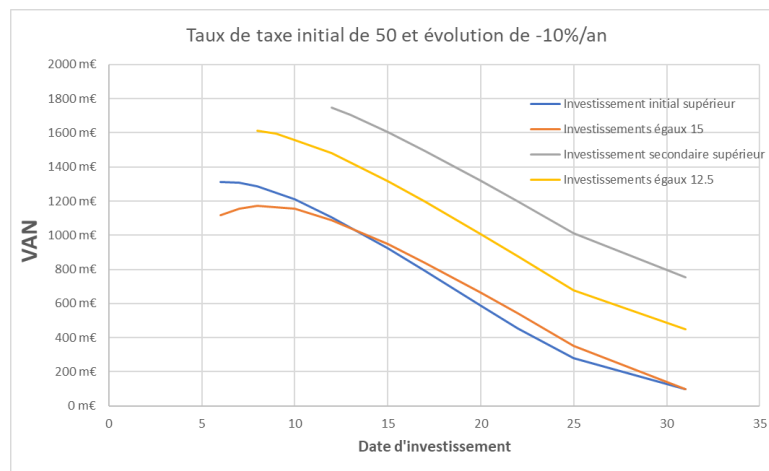


Figure 32 - Impact d'une taxe décroissante de -10%/an sur la VAN des producteurs.

A l'inverse de ce qui a été observé dans le cas de taxes constante ou croissante, on constate que les scénarios les plus intéressants sont ceux dont les investissements initiaux sont inférieurs à ceux réalisés plus tard, 10-15, et ceux dont les investissements sont égaux, 12.5-12.5. Dans les deux cas, **la production initiale a été réduite, au profit d'une production future plus importante ou égale**. Ce graphique est intéressant, mais puisque le taux de décroissance est supérieur au taux d'actualisation du producteur ( $10\% > 8\%$ ), ce résultat est difficilement analysable. Ainsi, nous avons réitéré l'opération avec un taux de décroissance inférieur.

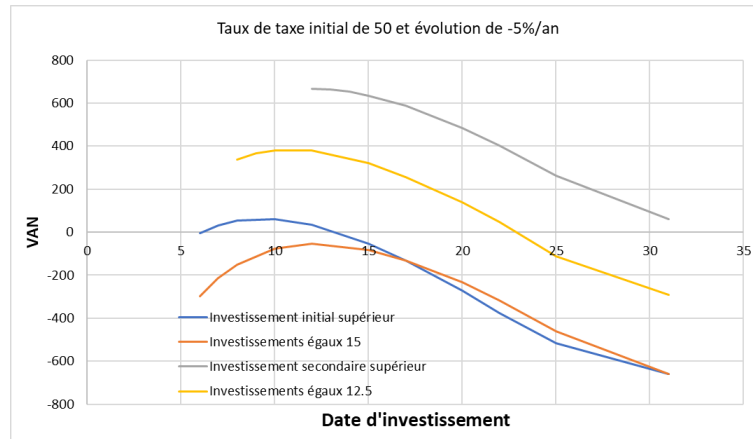


Figure 33 - Impact d'une taxe décroissante de -5%/an sur la VAN des producteurs.

Dans ce cas, on s'aperçoit que les scénarios qui offraient les meilleurs profits aux producteurs dans des régimes fiscaux croissants et constants, ne sont maintenant même plus rentables, avec des VAN négatives. Comme constaté plus haut, l'instauration d'une taxe décroissante entraîne une diminution de la production initiale du producteur, mais également un **retardement du réinvestissement**. On voit ainsi que le meilleur scénario, 10-15, réinvestit lorsqu'il lui est possible, avec  $M_2=12$ , mais dans le cas du scénario 12.5-12.5, le producteur choisirait de réinvestir 2 à 4 ans après que cela soit possible pour obtenir sa VAN maximale. On peut également regarder les données suivantes :

Montant de taxe initial	Taux de croissance de la taxe	Choix du scénario de production K0-K1	Date de réinvestissement M2	VAN du producteur	Quantité d'émissions sur 10ans	Pourcentage de réduction sur 10 ans	Quantité d'émissions totales	Pourcentage de réduction sur la vie du projet
0 \$/baril	0	15-15	6	4787 M\$	113 tCO2	-	189 tCO2	-
10 \$/baril	0	15 10	6	3369 M\$	99 tCO2	12%	187 tCO2	1%
10 \$/baril	5%	15 10	6	2623 M\$	99 tCO2	12%	187 tCO2	1%
50 \$/baril	-5%	10 15	12	665 M\$	55 tCO2	51%	181 tCO2	4%
50 \$/baril	-5%	12,5 12,5	10	381 M\$	78 tCO2	31%	184 tCO2	3%

Figure 34 - Tableau comparatif des VAN maximales et des quantités de CO2 émises selon des scénarios de taxes constantes, croissantes et décroissantes.

On s'aperçoit alors que l'instauration d'une taxe décroissante permet de **réduire grandement les émissions à court terme** (entre 30 et 50% de réduction par rapport à scénario sans fiscalité carbone), et de réduire également les émissions à long terme (de manières moins importantes que à court terme). Cette réduction est principalement dû au retardement du réinvestissement, passant de  $M_2=6$  à  $M_2=10$  à 12.

Ainsi, selon notre modèle, **la création d'une taxe sur les émissions de carbone décroissante**, avec un montant initial de taxe élevé, couplé à un taux de décroissance inférieur au taux d'actualisation des entreprises pétrolières, **permettrait de résoudre le problème du Green Paradox** en diminuant la volonté des entreprises de surinvestir au début de la vie du projet, et donc d'étaler les émissions de CO2 sur le long terme. Difficile à mettre en place car jugé peu crédible, cette taxe, couplée à des

mécanismes de diminution de la demande en produits pétroliers, pourrait être une solution afin de lutter contre le réchauffement climatique et limiter nos émissions de CO2.

ii) Compléments du modèle : analyse de scénarios actuels

Enfin, dans le but de compléter notre travail, nous avons observé l'impact de taxes constante, croissante et décroissante avec un **prix du baril à 50\$**, hypothèse plus réaliste et s'ajustant à l'actualité. En effet, ces derniers mois, dû à la crise du Covid-19, le prix du baril a connu de grands chamboulements, notamment le WTI (*West Texas Intermediate*, pétrole brut américain) qui a connu des prix négatifs, jusqu'à près de -40\$/baril. Une hypothèse de prix de 50\$/baril est de ce fait plus proche des prix actuellement pratiqués, que les 100\$/baril de Smith dans son article datant de 2012.

En conservant les mêmes méthodes que précédemment, les VAN maximales observées sont toutes négatives, quels que soient les choix de production et d'investissement ; indiquant que dans le cas d'un prix de 50\$/baril, aucun projet n'est rentable, ou du moins que les retours sur investissements sont trop faibles.

Le seul scénario qui peut être analysable, est le cas où aucune taxe n'est apposée sur les émissions. On obtient les résultats suivants :

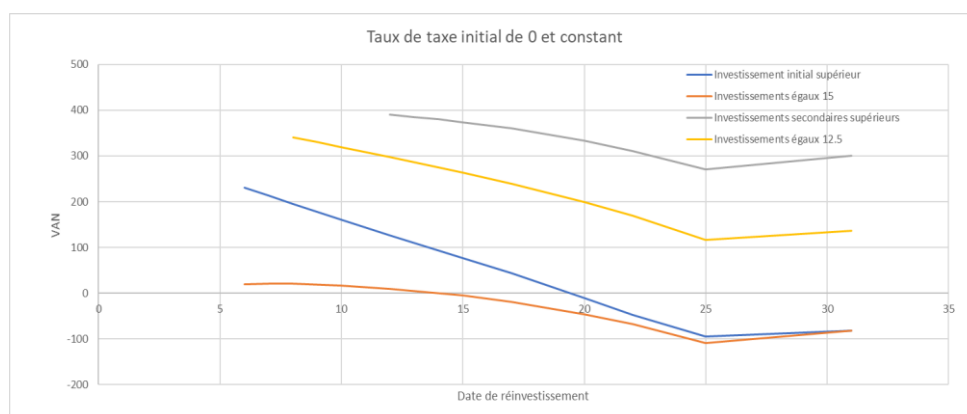


Figure 35 - Evolution des VAN d'un producteur selon ses choix de productions, avec un baril à 50\$ et en absence de taxe.

On constate ainsi que la chute du prix du baril provoque le même effet qu'une taxe décroissante : **investissements initiaux moins importants, décalage des investissements secondaires et réduction importante de la VAN des producteurs**. On peut alors comparer les scénarios sans taxe avec un baril à 100 et 50\$ :

Prix du baril	Choix du scénario de production K0-K1	Date de réinvestissement M2	VAN du producteur	Quantité d'émissions sur 10ans	Pourcentage de réduction sur 10 ans	Quantité d'émissions totales	Pourcentage de réduction sur la vie du projet
100 \$/baril	15 15	6	4787 M\$	113 tCO2	-	189 tCO2	-
50 \$/baril	10 15	12	390 M\$	55 tCO2	51%	181 tCO2	4%

Figure 36 – Tableau comparatif des VAN et émissions dans cas de projets avec un prix du baril de 50 ou de 100\$.

Ce complément permet de montrer que le prix du baril va agir sur la stratégie du producteur en retardant et diminuant son investissement initial, et participe à réduire la quantité d'émission de CO2 à court et long terme. Les producteurs sont ainsi bien plus sensibles à une taxe carbone dans le cadre d'un prix du baril faible.

#### 4) Conclusion et critique du modèle

A l'aide des différents scénarios et régimes fiscaux, nous avons voulu analyser si le *Green Paradox*, comme décrit par H.W. Sinn, était valable dans le cas d'un modèle de production différent de celui mis en avant par Smith. Une taxe constante ou croissante sur les émissions de CO<sub>2</sub> incite les entreprises à investir dans des **capacités importantes au début du projet, et investir de façon moindre par la suite**, comme a pu le montrer Smith. De plus, ce choix de réinvestissement est **fait le plus tôt possible** : ces deux conclusions confirment bien la première caractéristique du *Green Paradox*.

Toutefois, ce choix de production et d'investissement, avec nos hypothèses, montre que le producteur ne choisit pas les scénarios de productions les plus émetteurs, et que **la taxe permet bien de réduire la production de CO<sub>2</sub> à court et moyen terme**. Cette autre conclusion vient ainsi contredire la seconde caractéristique du *Green Paradox*.

Enfin, nous avons réalisé d'autres analyses afin de proposer un système de taxe décroissante, qui permettrait, selon nous, de réduire à court terme les émissions de CO<sub>2</sub>, et donc d'apporter une solution au *Green Paradox* mais également au problème de considération des émissions de gaz à effet de serre.

Malgré ces résultats, de nombreux points sont à améliorer dans notre modèle. En effet, le premier point améliorable, serait de **rendre possible le report de la production**. Comme vu dans le modèle de Hotelling, le producteur peut choisir de produire ou non selon qu'il anticipe des prix plus importants par la suite. Or, ici nous avons préféré par soucis de simplicité, décrire la production comme le maximum réalisable, ce qui restreint grandement les stratégies des producteurs. Ensuite, nous avons émis l'idée que le producteur ne pouvait **réinvestir qu'une seule et unique fois** au cours de la vie du projet. Cette hypothèse est également simplificatrice et ne distingue pas les différents investissements possibles (puits extracteurs, puits injecteurs, ...), et participe à limiter les stratégies de production possibles. Nous avons également pris une **durée de vie du champ de 30 ans**, mais cette donnée pourrait ne pas être fixée. En effet, les producteurs peuvent décider, par exemple dans le cas d'une taxe décroissante, de reporter la production à un horizon de temps supérieur à 30 ans.

## Conclusion générale :

A travers ce Travail de Fin d'Etudes, nous avons pu revenir sur différentes notions liées au réchauffement climatique, et principalement sur les systèmes de taxations des émissions de dioxyde de carbone.

En effet, marquées par le **raisonnement de Hotelling** de 1931, les entreprises productrices de **ressources non renouvelables**, et principalement les entreprises pétrolières, utilisent toujours ce raisonnement : pour assurer un profit maximal, l'entreprise doit gérer ses réserves pour conserver un profit marginal croissant tout au long de la vie de sa réserve. De plus, l'entreprise peut choisir de décaler sa production dans le cas où les prix qu'elle anticipe ne sont pas assez importants, ou que la production devient trop contraignante et/ou plus rentable.

En parallèle de ces raisonnements, de nombreux économistes et scientifiques du monde entier se sont accordés pour montrer que ces raisonnements, basés uniquement sur la production et le profit, ne sont plus viables à la suite de la mise en avant du réchauffement climatique et de la responsabilité de l'Homme dans ce phénomène. Cette prise de conscience s'est faite via un certain nombre d'ouvrages et de rapports d'académiques et d'institutions publiques, avec comme paroxysme le rapport du GIEC en 2007. C'est à la suite de ce rapport, et dans une discussion animée autour de la prise en compte des émissions de gaz à effet de serre, que H.W. Sinn va présenter sa thèse : le **Green Paradox**. Ce dernier montre ainsi que **les systèmes de taxation du carbone actuels sont défaillants, et provoquent, à l'inverse de l'effet escompté, une augmentation à court terme des émissions de dioxyde de carbone**. Cette thèse a été débattue, et confirmée par l'analyse de certains économistes comme Ploeg ou encore Withagen.

Toutefois, en 2012, J. Smith a voulu, à travers le même modèle de Hotelling, analyser si le *Green Paradox* est une réalité ou un biais théorique. Ainsi, en ajoutant des contraintes physiques et géologiques pour simuler le comportement des producteurs pétroliers, **Smith conclut que le *Green Paradox* n'est pas observable tel que l'a imaginé Sinn**. Selon lui, les systèmes de taxes carbone, croissants ou constants, permettent bien de limiter les émissions de CO<sub>2</sub> à long terme. Malgré ces résultats, Smith reste vague quant à ses hypothèses, et principalement sur la comptabilité du carbone. Ainsi, j'ai pu travailler sur un modèle complémentaire à celui de Smith, reprenant certaines de ses hypothèses. Le principal ajout concerne la production, avec l'apparition d'un plateau de production ainsi qu'un seul réinvestissement possible. A l'aide de ce modèle, **nous avons mis en évidence la présence de certaines caractéristiques du *Green Paradox***, à savoir qu'un producteur soumis à une taxe croissante ou constante choisit de décaler sa production et ses investissements à court terme, toutefois, ces scénarios ne sont pas les plus émetteurs en termes de CO<sub>2</sub>.

Ainsi, grâce à ce travail, nous avons pu montrer que les systèmes de taxation du dioxyde de carbone actuellement en place ne sont pas encore assez efficaces pour traiter le problème du réchauffement climatique dans sa globalité. Malgré ce constat, d'autres solutions sont envisagées. L'Union Européenne a par exemple, créé en 2005 le **système EU ETS** (EUropean Emissions Trading System), le **plus vaste marché d'échange de crédit carbone au monde**. Issu du protocole de Kyoto de 1997, ce marché fonctionne grâce à un système de quotas accordé chaque années à près de 10 000 installations. Les entreprises régulent ainsi eux-mêmes le prix du carbone. Cette solution, bien que suscitant des débats animés, permet aux états européens de se décharger du problème de taxation, et ainsi donner au marché l'obligation de se réguler, et serait, selon Sinn et Smith, une solution particulièrement encourageante en vue de limiter le réchauffement climatique et résoudre le problème du *Green Paradox*.



## Bibliographie

- Arnaud Diemer, *Dossier 3 : Economie des ressources naturelles*, DUEDD-UE2-Fondamentaux dans le cadre du développement durable – module 1: Economie, cours de l'université Blaise Pascacl, IUFM Auvergne
- *Exhaustible ressources*, Natural resources economics, chapitre III, cours délivré à la Toulouse Business School TBS
- F. van der Ploeg & C. Withagen, *Is There Really a Green Paradox?*, CESIFO WORKING PAPER NO. 2963, 2010
- Harold Hotelling, *The Economics of exhaustible ressources*, The Journal of Political Economy, Vol. 39, No. 2., 1931, pp. 137-175.
- H.W. Sinn, *Public policies against global warming: a supply side approach*, CESifo Working Paper No. 2087, August 2007 and NBER Working Paper 13454, September 2007
- H.W. Sinn, site personnel de l'auteur, adresse URL : <https://www.hanswernersinn.de/en/topics/GreenParadox>
- James L. SMITH, *Green Paradox, Hotelling Cul de Sac*, Edwin L. Cox School of Business, Southern Methodist University, Dallas, 23 Septemeber 2016.
- Jason F. Shogren, *Natural Resource Economics*, chap. Economics interactions with other disciplines – Vol. II, University of Wyoming, Laramie, USA
- Jean Marc Jancovici, Commentaire : *Rapport du Club de Rome – Donella Meadows, Dennis Meadows, Jørgen Randers et William W. Behrens III – 1972*, publié en 2003, adresse URL : <https://jancovici.com/recension-de-lectures/societes/rapport-du-club-de-rome-the-limits-of-growth-1972/>
- K. Schubert, *Le Green Paradox : une introduction*, Université Paris 1 et Ecole d'Economie de Paris, Commissariat Général au Développement Durable (SEEIDD-DRI)
- *La gestion des ressources naturelles*, Manuel d'économie environnementale, CHAPITRE IX
- Nicholas Stern, *Executive Summary of STERN REVIEW*, 2007
- Margaret E. Slade & Henry Thille, *Whither Hotelling: Tests of the Theory of Exhaustible Resources*, publié en ligne en 2009
- R. Quentin Grafton, Tom Kompas, Ngo Van Long, Hang To, *US biofuels subsidies and CO2 emissions: An empirical test for a weakand a strong green paradox*; p.4.
- Rodrigo, auteur et éditeur du journal *The Write Pass Journal* (2016), *Analysis Of Harold Hotelling's Theory*, adresse URL : <https://writepass.com/journal/2016/09/analysis-of-harold-hotellings-theory-2/>

- Svernn Jensen, *An Introduction to the Green Paradox: The Unintended Consequences of Climate Policies*, 2016, adresse URL : <https://academic.oup.com/reep/article/9/2/246/1626618>
- Site du journal *WSJ Opinion*, adresse URL : <http://www.opinionjournal.com/extra/?id=110009182>

## Annexes :

### PHYSICAL ASSUMPTION.

K0	K1	M2
15	10	6
mm bbl	mm bbl	date
$g=a(K0)$	0,2	
R0	200	mm bbl
$R1=\lambda R0$	200	mm bbl
M1	6,00	years
M3	17	years
$\delta$	1	
$\lambda$	1	

### CONCESSION

Prix émission	10
a(K)	0,2
CAPEX (\$/b)	60 000
% of CAPEX	2,00%
Variation de	5,00%
Taxe rate	50%

### ECONOMIC ASSUMPTIONS

Discount Rate (constant money)	8%
Inflation Rate	1,5%
Change in Oil Price	2,0%
Crude Oil Price (\$/b)	100

Figure 37 - Hypothèses pris pour le modèle de productions choisit et modifiables.

	SUM	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>K0 Const. Mbbbl</b>		15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
<b>Depl. Const. Mbbbl</b>		20	20	20	19	17	16	14	13	11	10	9	8	7	6	5	5
<b>Global Const. Mbbbl</b>		15	15	15	15	15	15	14	13	11	10	9	8	7	6	5	5
<b>M1 cal year</b>		30	30	30	30	30	30	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Crude Oil Production : q(0,t) Mbbbl	194		15	15	15	15	15	14	13	11	10	9	8	7	6	5	5
Réserves R(0,t) (begining of the j) Mbbbl	200	200	185	170	155	140	125	111	99	87	78	69	61	54	48	43	
<b>K1 Const. Mbbbl</b>										10	10	10	10	10	10	10	
<b>Depl. Const. Mbbbl</b>										20	19	18	17	16	15	14	
<b>Global Const. Mbbbl</b>										10	10	10	10	10	10	10	
<b>M2 cal year</b>		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
Crude Oil + (if EOR) : q(1,t) Mbbbl	175									10	10	10	10	10	10	10	
Réserves R(1,t) (begining of the j) Mbbbl	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	190	180	170	160	150	140	
Total Production Mbbbl	368		15	15	15	15	15	14	13	21	20	19	18	17	16	15	
Total Réserves R(t) Mbbbl	400	400	385	370	355	340	325	311	299	277	258	239	221	204	188	173	
q(t)/R(t)			4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	8%	
Capex M\$	4 110	2 466								1 644							
Fixed Operating Costs M\$	756		49	49	49	49	49	49	49	82	82	82	82	82	82	82	
Variable Cost (\$/b)	20	3 917	300	300	300	300	300	280	250	422	397	375	355	338	322	308	
Total Opex M\$	4 673	349	349	349	349	349	349	329	299	504	479	457	437	420	404	391	

Figure 38 - Evolution de la production du modèle selon les hypothèses choisis.

### CASH FLOW SCHEDULE MOD (M\$)

IOC's Share	100%	SUM	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Revenues		23 906		765,0	780,3	795,9	811,8	828,1	788,3	717,9	1 236,1	1 186,1	1 142,2	1 103,8	1 070,5	1 041,7	1 017,1	996,4
Emission taxes		-		-														
Royalty																		
Total Capex		4318	2 465,8								1 851,8							
Exploration Depreciation		100		100,0														
Development Depreciation		4318		493,2	493,2	493,2	493,2	493,2			370,4	370,4	370,4	370,4	370,4			
Total Capex Depreciation		4418		593,2	493,2	493,2	493,2	493,2			370,4	370,4	370,4	370,4	370,4			
Operating Costs		5182		354,6	359,9	365,3	370,8	376,3	360,1	332,2	568,0	547,9	530,4	515,1	501,9	490,6	481,0	473,0
Carry forward				-183	-255	-318	-370	-411										
Taxable Income		6119		-183	-255	-318	-370	-411	17	386	298	268	241	218	198	551	536	523
Petroleum Tax		3828							8,4	192,9	148,9	133,9	120,7	109,2	99,1	275,5	268,0	261,7
State's Oil (Royalty + Carbon Tax + Pet. Tax)		3828							8,4	192,9	148,9	133,9	120,7	109,2	99,1	275,5	268,0	261,7
Contractor's Cash-Flow		3928	-2 466	410,4	420,4	430,6	441,1	451,7	419,8	192,9	-1 332,5	504,3	491,1	479,5	469,4	275,5	268,0	261,7

Figure 39 - Evolution des Cash Flow et calcul du carry-over selon les hypothèses choisis.

### CASH FLOW SCHEDULE CONSTANT MONEY (M\$ year 0)

IOC's Share	100%	SUM	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Contractor's Cash-Flow		632	-2 466	404,4	408,1	411,8	415,6	419,3	383,9	173,8	-1 182,9	441,0	423,2	407,1	392,6	227,0	217,6	209,3
Accumulated Cash-Flow		NPV@0%	-2 465,8	-2 061,4	-1 653,3	-1 241,5	-825,9	-406,5	-22,6	151	-1 032	-591	-168	240	632	859	1 077	1 286
Internal Rate of Return		9,17%																
Discounted Cash-Flow		-372	-2 466	374,4	349,9	326,9	305,5	285,4	242,0	101,4	-639,1	220,6	196,0	174,6	155,9	83,5	74,1	66,0
Accumulated DCF		NPV@8%	-2 465,8	-2 091,3	-1 741,5	-1 414,5	-1 109,1	-823,7	-581,7	-480,3	-1 119,4	-898,8	-702,8	-528,2	-372,3	-288,8	-214,7	-148,7
Financial Exposure (M\$)		-2466																
NPV @8% Contractor		195																
Pay-Out Time (years)		-1																
ERC @0%		-0,26																

Figure 40 - Evolution des Cash Flow en monnaie constante, et calcul de VAN.

### RENT SHARING

Constant Money (M\$)		SUM	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Company's Cash Flows	49%	2908	-2466	404	408	412	416	419	384	174	-1183	441	423	407	393	227	218	209
State's Cash Flows	51%	2986							8	174	132	117	104	93	83	227	218	209
Total Cash Flows		5895	-2466	404	408	412	416	419	392	348	-1051	558	527	500	476	454	435	419

Figure 41 - Partage des Cash Flow entre état et producteur.

```

For i = 1 To 20]

BestNPV = -100000
BestKo = 0
BestK1 = 0
BestM2 = 0

Dim Tax As Single, ChgtTax As Single

Tax = Cells(3, 38 + i)
ChgtTax = Cells(4, 38 + i)

Range("E42").Value = Tax
Range("E46").Value = ChgtTax

Sub Optimisation()
    For Ko = 7 To 15
        Range("K3").Value = Ko
        MinM2 = Range("L8").Value + 1
        For K1 = 7 To 10
            Range("L3").Value = K1
            For M2 = MinM2 To 31
                Range("M3").Value = M2
                NPV = Range("D73").Value
                If NPV > BestNPV Then
                    BestNPV = NPV
                    BestKo = Ko
                    BestK1 = K1
                    BestM2 = M2
                End If
            Next M2
        Next K1
    Next Ko
Worksheets("Onglet de calculs barril 100").Select
End Sub

BestNPV = -100000
BestKo = 0
BestK1 = 0

For Ko = 16 To 25
    For K1 = 9 To 9
        Range("K3").Value = Ko
        Range("L3").Value = K1
        For M2 = MinM2 To 31
            Range("M3").Value = M2
            NPV = Range("D73").Value
            If NPV > BestNPV Then
                BestNPV = NPV
                BestKo = Ko
                BestK1 = K1
                BestM2 = M2
            End If
        Next M2
    Next K1
Next Ko

Sub OptimisationM2fixe()
    Dim BestKo As Single
    Dim BestK1 As Single
    Dim BestNPV As Single
    Dim NPV As Single
    Dim Ko As Integer
    Dim K1 As Integer
    Dim M2 As Integer

    Range("I7").Value = BestKo
    Range("I8").Value = BestK1
    Range("I9").Value = BestNPV
    Range("I10").Value = BestM2
End Sub

Worksheets("Onglet de calculs barril 100").Select

```

Figure 42 - Code VBA utilisé pour calculer les solutions optimales de production selon le modèle choisis.