|  |
| --- |
|  |

**Ressources naturelles épuisables:**

**que laisser pour l'avenir ?**

**Présenté par : \*\*\*\*\*\*\*\***

**Sous la direction de \*\*\*\*\*\***

**Paris, juin 2012.**

*« La nature n'est pas seulement une réalité qui nous entoure,*

*mais aussi une réalité qui nous constitue »*

Jorge Juanes, 1980.

# TABLE DE MATIERES

[Introduction 5](#_Toc327970007)

[CHAPITRE 1. La règle de Hotelling 8](#_Toc327970008)

[Le regard de Solow sur la règle d’Hotelling. 13](#_Toc327970010)

[Trajectoires de prix et conditions initiales 14](#_Toc327970011)

[L’extraction éternelle d’une source sans l’épuiser 16](#_Toc327970012)

[CHAPITRE 2. Raréfaction du charbon et la diminution de sa valeur. 19](#_Toc327970013)

[Chapitre 3. Les combustibles fossiles, l’extraction minière, le capital naturel et humaine. 27](#_Toc327970014)

[Les combustibles fossiles 27](#_Toc327970015)

[L’extraction minière 29](#_Toc327970016)

[Les prix de la nature 29](#_Toc327970017)

[Substitution entre le capital naturel et le capital fabriqué par l’homme 31](#_Toc327970018)

[CHAPITRE 4 Physique, nature et économie. 34](#_Toc327970019)

[La physique de la nature 34](#_Toc327970020)

[La loi zéro 34](#_Toc327970021)

[La première loi de la thermodynamique. 35](#_Toc327970022)

[Compression d’un gaz 36](#_Toc327970023)

[Deuxième loi de la thermodynamique ou loi de l’entropie. 38](#_Toc327970024)

[Deuxième loi de la thermodynamique 39](#_Toc327970025)

[La nature 40](#_Toc327970026)

[De la physique à la nature 43](#_Toc327970027)

[Le processus économique en termes énergétiques 44](#_Toc327970028)

[Recyclage 45](#_Toc327970029)

[Les sources d’énergie 45](#_Toc327970030)

[La réserve d’énergie ordonnée terrestre 46](#_Toc327970031)

[CONCLUSIONS 48](#_Toc327970032)

[Biblographie 54](#_Toc327970033)

[ANNEXE 57](#_Toc327970035)

# Introduction

La question de l’assignation intergénérationnelle des *ressources* *épuisables* est une problématique qui prend diverses dimensions. Du point de vue de l’analyse économique conventionnel, la façon dont nous pourrions garantir pour les futures générations l’accès à ces ressources, consiste à les valoriser monétairement -dans le présent- avec une structure de propriété privée, et avec l’idée qu’il faut que cette valeur doive s’accroître avec le temps. Cependant, cette perspective laisse de côté toutes les dimensions non-monétaires, tels que l’environnement et les rapports sociaux, lesquelles devraient être prises en compte dans cette analyse.

Ce travail a pour objectif de présenter et de faire des réflexions avec un regard critique à de deux éléments d’analyse que s’utilisent dans l’économie de l’environnement : la règle de Hotelling et la substituabilité de capital naturel pour capital humain*.* L’analyse critique de ces éléments montrera des contradictions dans la logique économique, et mettra en question la scientificité de l’économie.

Ensuite nous allons exposer qu’il est possible –ou plutôt nécessaire – de concevoir autrement les analyses de l’économie, lesquelles nous demandent de comprendre avec une autre perspective les rapports homme-nature et les rapports économie-nature. Nous considérons que l’analyse économique conventionnelle a pris la forme d’une analyse qui porte sur une réalité fragmentée laquelle omet la relation serrée de l’économie et la nature, ainsi que les rapports sociaux.

Dans ce travail, nous nous sommes centrés particulièrement sur deux auteurs :  Harold Hotelling et Nicholas Georgescu-Roegen. Tous les deux ont en commun deux choses : ils étaient mathématiciens avant d’être économistes et ils se sont préoccupés par une thématique commune : les futures générations. Il n’y a pas mal des coïncidences en plus entre les deux : ils ont ciblé la base d’analyse d’une discipline nouvelle. Pour sa part, Hotelling a fait l’étude de l’économie des ressources naturelles et Georgescu-Roegen s’est occupé de l’étude de l’économie au sein de la biosphère ou ce que nous pouvons aussi appeler la bioéconomie.

« *C’est à* Nicolas Georgescu-Roegen (1906*-1994) que l’on doit, en 1971, la percée décisive consistant à insérer le développement économique dans les flux énergétiques de la biosphère*» (Passet 2010. p. 457). Nous considérons que ses contributions sont pertinentes ainsi qu’originelles et qu’il es nécessaire de relever ce qu’il nous a dit, afin de cibler, en économie, une approche plus consciente de la dépendance de l’homme -et de tous les êtres vivants de la planète- à la nature, ainsi que pour comprendre ce que le processus économique fait en termes physiques.

Georgescu-Roegen a fait une approche économique de caractère transdisciplinaire, qui faisait des allers-retours entre la physique et l’économie. Donc, nous sommes obligés à présenter un minimum des fondements physiques dont il s’en est servi, afin de comprendre ses contributions à l’économie. De la même manière, sont présentés des considérations de la nature qui révèlent la dépendance de l’homme à la nature et l’influence des activités humaines sur l’état de la nature.

Nous sommes conscients que la démarche à empreindre pour intégrer à l’économie certains aspects de la physique de la nature, et les doter du sens économique, n’est pas du tout banal. En faisant ces considérations, nous partons du fait que ce que nous pouvons apporter dans ce mémoire, est de montrer le besoin d’incorporer ces aspects, ainsi que donner des bases pour concevoir autrement l’économie.

Dans le premier chapitre, nous présentons une analyse de la règle de Hotelling, qui donne des significations économiques aux équations mathématiques -que nous n’avons pas trouvées dans aucun des textes consultés- et qui explique ce que nous devons comprendre face à la possibilité d’extraire infiniment des ressources naturelles d’une source finie.

Dans le deuxième chapitre nous exposons un suivi statistique, qui montre que l’assignation des ressources épuisables organisée par le marché, se fait avec des logiques économiques contradictoires, c’est-à-dire, qu’elle permet la raréfaction des ressources, au même temps que celles-ci diminuent sa valeur.

Le chapitre 3, présente une section qui traite les lois de la thermodynamique à partir d’une approche de vulgarisation, qui tire des connaissances scientifiques précises sans avoir besoin de passer pour la formulation mathématique de ses lois. Expose clairement l’essence des raisonnements de Nicolas Georgescu-Roegen et aborde des considérations de la nature lesquelles permettent de la concevoir autrement par rapport à celles de l’économie conventionnelle.

# CHAPITRE 1. La règle de Hotelling

La règle de Hotelling a vu le jour en 1931, lors de l’apparition de l’article *The Economics of Exhaustible Resources* (Hotelling, 1931),  publié dans le  [Journal of Political Economy](http://fr.wikipedia.org/wiki/Journal_of_Political_Economy). Toutefois ce n’est qu’au cours des années 70 qu’elle a trouvé de l’écho. A peine quelques jours après la mort de Hotelling en 1973, Robert Solow a dicté une conférence où il a fait la citation de cet article, en rappelant la mort récente de sont auteur mais en signalant surtout que sa contribution était « à la fois contemporaine et pérenne » (Solow, 2012). Il a ajouté que la citation  «[aurait pu] été publiée dans le journal de la veille ou dans l’édition la plus récente de l’*American Economic Revie*w » (Solow, 2012. Op. cit., p. 84)­. Il a même considéré la règle de Hotelling comme « le principe fondamental de l’économie des ressources naturelles […] la règle est une condition nécessaire de l’efficience et mais aussi de l’optimun social » (Solow, 2012. Op. cit., p. 95)­. Cette conférence a été transcrite et publiée dans *The American Economic Review* un an plus tard.

La problématique d’où Hotelling part, consiste à trouver un sentier optimal pour l’extraction des RNR[[1]](#footnote-1), qui prenne en considération les profits présents et futurs possibles en accord avec le taux d’intérêt. Autour de ce sujet, il est possible de trouver des nombreuses contributions qui visent à perfectionner cette règle, en partant des hypothèses plus réalistes ou qui puissent inclure les effets des chocs exogènes -tels que la découverte de nouvelles gisements des RNR, la hausse des taux d’intérêt, le progrès technique, les coûts d’extraction par rapport la taille du stock, la possibilité de stockage, l’incertitude – ainsi que des modèles dynamiques avec des outils mathématiques plus sophistiqués. Il y a des multiples façons de concevoir cette règle, lesquelles partent des raisonnements diverses et qui prennent notamment des raccourcis, pour utiliser des mathématiques plus simplifiées que celles utilisées par Hotelling.

Pour analyser cette règle, nous partirons de l’article original de Hotelling afin d’exposer de cette manière, les réflexions qui l’ont motivé, ainsi que ses propres conclusions. De plus nous expliquerons le contenu économique des équations mathématiques utilisées.

Dans l’article original de Hotelling, la problématique abordée porte sur l’épuisement accéléré des ressources non renouvelables (RNR). Pour lui, cette problématique doit être comprise dans le cadre d’une assignation intergénérationnelle des ressources. Donc le problème à résoudre est de trouver le sentier optimal d’extraction, de façon que la valeur des mines soit maximisée tout au long du temps.

Hotelling considère que l’épuisement des ressources naturelles est dû aux bas prix qu’ils prennent, en provoquant ainsi l’accélération de leur extraction. Alors, pour la ralentir, il faut que les prix soient plus élevés et qu’en plus ils augmentent au cours des années. De cette manière les propriétaires des mines ou des gisements pourront choisir entre les profits de l’extraction présente et ceux de l’extraction future.

Il suggère qu’une des possibilités pour faire augmenter les prix est la taxation des RNR, laquelle serait positive car au même temps que les prix s’accroissent, le trésor public s’enrichit. Cependant il observe que les propriétaires des mines s’opposeront à diminuer leur profit. Donc, il propose une autre façon d’augmenter les prix des ressources, qui consiste à valoriser les ressources en accord au taux d’intérêt. Avec ce critère de valorisation, -ce que Hotelling affirme- les ressources naturelles peuvent être traitées de la même façon que les actifs financiers. Il les nomme même indifférentement, soit comme des actifs financiers non-renouvelables, soit comme des ressources naturelles non-renouvelables.

Dans le cas de libre compétition, il postule tout d’abord la propriété privée des RNR. Il donne une formule pour le prix future des ressources comme la formule de l’intérêt composée continue. Autrement dit, la fonction nous donnera la valeur de la ressource après le temps *t* une fois que le taux d’intérêt soit *g* et *p0* soit le prix initial. Les prix de référence correspondent au prix naturel fixé par l’offre et la demande.

Le contenue mathématique de la formule : , nous permet de faire certaines observations:

1. Les prix des RNR seront toujours strictement croissants.
2. Tant que le taux d’intérêt fixé au moment de prendre la décision est plus élevé, les RNR seront plus précieux.
3. Tant que nous nous éloignons de plus en plus du temps du départ, les RNR augmenteront sa valeur.
4. est le prix minimum qui peut être donné au matériel au long du temps.

Pour Hotelling, la quantité des RNR est finie, et pourtant le temps est infini. Cette remarque lui fait penser que sans importer le taux avec laquelle les RNR seront extraites, un jour on arrivera sans doute à épuiser le gisement, et en conséquence une des hypothèses du modèle doit être l’épuisement du RNR ou temps *T*.

Avec les hypothèses additionnelles de la connaissance de la quantité de matière qui existe dans les mines ou gisements, les coûts fixes et uniformes par l’extraction des produits, la qualité homogène des produits, et l’indifférence du producteur pour avoir son profit aujourd’hui ou après un temps, il se demande comment faire pour connaître le temps *T* pour que les ressources s’épuisent. La réponse à cette question dépendra du programme de production qu’il adopte. Avec les hypothèses conventionnelles sur la fonction de production, il propose que celle-ci puisse prendre une de deux formes :

1. avec k, l >0 constants. Cette formule représente une ligne droite décroissante qui varie en rapport au prix. La valeur maximale qui touche est , ce qui représente la quantité de matériel total dans la mine ou gisement ou au temps initial, laquelle nous appellerons aussi. Une fois que les ressources se sont épuisés, il n’est plus possible de continuer la production. Pourtant : . Grâce à cette condition (et faisant la substitution de dans l’équation), il est possible de calculer le temps de l’épuisement, lequel est donné par la relation : Pour que cette relation soit bien définie, il est nécessaire que . Comme et sont donnés par la fonction de production et est prise empiriquement, nous pouvons exprimer le temps *T*  en termes du taux d’intérêt[[2]](#footnote-2).
2. avec k>0 constant. Cette équation a la forme d’une fonction exponentielle négative, selon laquelle la production s’approche de zéro (sans jamais l’atteindre) si tend à l’infini. Avec cette relation mathématique, nous ne pouvons pas trouver le temps d’épuisement *T*, car l’équation n’a pas de solution. Si nous substituions pour définir , le comportement est le même, car est croissante et positive, avec la seule différence que l’interprétation serait en termes de . Pour un temps donné, le taux d’intérêt accroîtra et la production diminuera. La constante nous donne la réserve, ce qui nous permettrait de dégager la constante , laquelle serait donné par : .

Après avoir fait ses considérations, Hotelling s’intéresse à trouver une formule qui permet de mesurer l’utilité totale,  -et qu’il sera plus approprié d’appeler « la valeur sociale du ressource » (Hotelling, 1931. Op. cit, p.143), laquelle est donnée pour une unité de temps par :

Dans cette formule, la limite supérieure de l’intégrale est la quantité de la ressource existant sur le marché. La valeur présente d’une unité de ressource est donné par (la valeur future est donnée avec le signe positif de l’exposant, tandis que la valeur présente le fait avec le signe négatif), et cette valeur correspond à une fonction décroissante de .

Puisque le but du propriétaire est de maximiser la valeur de la mine pour toutes les périodes du temps, il doit alors maximiser la fonction définie par l’intégrale

Restreinte à : connue[[3]](#footnote-3).

Il s’agit d’un problème d’optimisation qui doit se résoudre avec le calcul différentiel et intégral. Une fois que ce problème est résolu, nous avons que l’optimum social est atteint lorsque. Si nous dénotons par, nous avons que . Ceci est le résultat avec lequel Hotelling conclut[[4]](#footnote-4).

Le résultat connu comme la règle de Hotelling, s’exprime avec l’équation suivante :

laquelle est déduite avec les mêmes arguments utilisées par Hotelling[[5]](#footnote-5). En revanche, elle peut être interprétée comme : les changements de prix en relation au temps d’une ressource naturelle, qui maximisent l’utilité d’une mine ou gisement, sont donnés par le taux d’intérêt.

Avec ce modèle, il affirme qu’il n’y a pas de justifications pour le mouvement de conservation de la nature. Par contre ceci peut être accusé de faire pression pour que l’extraction des ressources s’arrête, ce qui donnerait comme résultat que les prix des ressources s’accroissent en bénéficiant les propriétaires des mines et gisements, mais les usagers finaux finiraient par payer les hauts coûts.

Il considère aussi que le taux d’escompte choisi pour l’avenir par le taux d’intérêt, peut s’utiliser même pour les entreprises que pour les politiques publiques, car à court terme il ne produit pas d’erreurs importantes.

Hotelling admet aussi qu’il y a des différences entre les conditions faites par le modèle et la pratique en raison des nouvelles découvertes de mines et de gisements, des limites de stockage et de la compétition des entreprises d’extraction, lesquelles favorisent le gaspillage. Pour empêcher ce gaspillage, il faut que les gouvernements soient les régulateurs et qu’imposent des impôts spéciaux.

### Le regard de Solow sur la règle d’Hotelling.

Pour approfondir plus sur ce modèle, nous allons exposer par la suite certaines considérations faites par Solow dans sa conférence. Pour lui, cette règle doit être comprise comme « *une condition de l'équilibre concurrentiel dans la séquence des marchés à terme, pour la livraison de ressources naturelles* » (Solow, Op. cit., 2011, p. 89). À partir de cette conception s’écoule le problème de considérer les marchés à terme, car ils n’existent pas. Solow nous dit aussi que l’équilibre proposé par la règle doit se satisfaire non seulement par le marché présent, mais aussi par tous les marchés, dès maintenant jusqu’à la fin des ressources.

Il met en question si les prix observés des ressources naturelles doivent être considérés comme des approximations aux prix d’équilibre, en rajoutant que si l’équilibre n’est pas assez stable, ne pourraient pas être de bons indicateurs pour l’assignation des ressources. En réponse à ce questionnement il nous dit que : « *dans des conditions  tranquilles  les marchés des ressources naturelles vont suivre plus au moins le sentier d’équilibre, ou qu’au moins, ils ne vont pas s’éloigner beaucoup de lui*» (Solow, Op. cit., 2011, p. 90). En revanche, les marchés peuvent répondre aux diverses événements par rapport au volume de réserves, à la concurrence de nouvelles matières, aux coûts des technologies, au volume de production et aux faits politiques.

En réfléchissant autour des générations futures, il considère que grâce à la superposition des générations, chacune d’elles va prendre soin de la prochaine, mais qu’il paraît « fondamentalement invraisemblable qu’il existe quelque chose de correct *ex post*  pour le bien-être de ceux qui ne vivront pas avant mille ans » (Solow, Op. cit., 2011, p. 92).

### Trajectoires de prix et conditions initiales

Après avoir présenté la règle de Hotelling, ainsi que certaines considérations faites par Solow sur cette règle, nous allons montrer que cette règle a des conditions initiales sensibles, lesquelles font que les résultats soient susceptibles de forts changements tout au long du temps. Pour ce faire, nous allons utiliser des donnés statistiques en référence au charbon aux États-Unis issues des statistiques de l’AIE.

Partons de la formule qui pronostique les prix futurs des ressources. Le prix de référence est choisit comme le prix du charbon en 2000. Dans le tableau suivant, nous comparons les différentes trajectoires des prix obtenues de l’application de la règle d’Hotelling pendant une période de 50 ans; ceux-ci sont calculés avec les taux d’intérêt de la FED pour trois ans consécutifs qui correspondent à 2001, 2002 et 2003.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Taux d’intérêt | g1= 6.73 | g2=3.87 | g3=2.21 |
| Année | **Prix (Dollars américains) [[6]](#footnote-6)** | | |
| 2000 | 16.97 | 16.97 | 16.97 |
| 2001 | 18.58 | 18.06 | 17.76 |
| 2002 | 20.23 | 19.11 | 18.48 |
| 2003 | 22.10 | 20.28 | 19.30 |
| 2004 | 24.31 | 21.68 | 20.29 |
| 2005 | 26.84 | 23.27 | 21.41 |
| 2006 | 29.62 | 24.95 | 22.59 |
| 2007 | 32.53 | 26.63 | 23.70 |
| 2010 | 35.39 | 28.15 | 24.65 |
| 2020 | 41.43 | 31.12 | 26.36 |
| 2030 | 83.05 | 46.87 | 33.63 |
| 2040 | 166.41 | 70.56 | 42.88 |
| 2050 | **333.28** | **106.16** | **54.65** |

Pour rendre plus claire l’écart des prix dans cette période, nous présentons ces donnés dans la graphique suivante.

**Graphique 1**: Comparaison entre les trajectoires des prix

et les différentes taux d'intérêt.

Cette graphique nous permet comprendre comment la variation des trois possibles taux d’intérêt, vont produire des changements importants dans les prix futurs. A la fin de la période, les prix des ressources valorisées avec le taux d’intérêt *g1* sont de l’ordre de six fois plus grands qu’avec *g3*; *g2* est de l’ordre de deux fois les prix de *g3*. Ceci est provoqué par la nature de la fonction exponentielle – qui modèle les prix – car elle fait que les différences dans les conditions initiales de l’exposant rapportent des grandes augmentations dans le résultat.

Il faut remarquer qu’une fois que le taux d’intérêt est choisi, la trajectoire des prix est fixée pendant toute la durée des ressources et pour tous les producteurs. Un nouveau producteur devra s’ajuster à la courbe des prix que le marché a déjà adoptée. Avec la trajectoire des prix fixée, le sentier d’extraction de la ressource est aussi fixé par l’ensemble des producteurs, que par le temps pour l’épuisement même que le temps pour l’épuisement.

Selon ce modèle, les variations de taux d’intérêt au long du temps ne produiront pas de variations dans les prix, et non plus dans le sentier optime d’extraction. Cette supposition n’est pas réaliste, car en présence d’un taux d’intérêt qui descend constamment, les propriétaires changeront le sentier d’extraction afin d’éviter des pertes. Cependant, Hotelling pensait que les variations de taux d’intérêt ne seraient importantes qu’à long terme : « *Evidement, les changements de ce taux sont à prévoir, surtout en considérant l'avenir à long terme. Si nous regardons devant nous vers une époque lointaine où toutes les ressources de la terre seront presque épuisées, et la race humaine sera réduite à la pauvreté totale, on peut s'attendre à des taux d'intérêt très élevés****»*** (Hotelling. Op. Cit. P.145).

Contrairement à ce que nous laisse voir la graphique présentée, nous considérons qu’affirmer que les changements de taux d’intérêt ne sont pas importants qu’à long terme, ne correspond pas aux résultats du propre modèle. Mais qu’en plus, les changements du taux d’intérêt sont importants tant à court terme qu’à long terme.

Dans le modèle, il n’y a pas des distinctions entre les *réserves prouvées* et les *réserves probables*. Autrement dit, le modèle considère la connaissance de la totalité des réserves des matières, sans compter que pas toutes les réserves pourront être extraites compte tenu des barrières technologiques. Même en acceptant que dans l’avenir les avances technologiques peuvent amplifier les possibilités de l’extraction, il y une restreinte de plus –important surtout pour les combustibles fossiles-, et c’est que l’énergie nécessaire pour l’extraction et la distribution peut être plus élevée à l’énergie résultante, ce qui fait que la quantité des matières disponibles pour les générations futures soit inférieure à ce que le modèle assigne.

### L’extraction éternelle d’une source sans l’épuiser

En outre, un raisonnement présenté par Hotelling –qui est certes contradictoire- c’est de faire un modèle de conservation en partant de l’hypothèse de l’épuisement de la ressource que nous souhaitons conserver. La seule possibilité de conservation envisagée par Hotelling est que la ressource soit conservée d’une forme asymptotique, ce qui peut se comprendre aussi comme la possibilité d’extraire éternellement des matières d’une mine sans l’épuiser.

Même si cette dernière affirmation n’a rien de faux, elle ne correspond pas vraiment à un comportement qui serait observé dans la réalité. Pour clarifier cet argument, il nous faut réfléchir en termes mathématiques pour comprendre cette possibilité, laquelle révèle un comportement très particulier qui nous fait penser au paradoxe du mouvement de Zénon[[7]](#footnote-7), selon lequel le mouvement est impossible.

Dans ce qui nous concerne, nous commencerons par prendre une série qui révèle le comportement souhaité, c’est à dire, d’extraire éternellement des ressources d’une source finie sans l’épuiser. Partons du fait que la quantité de matière qui existe dans la mine ou le gisement est (dans la graphique 2, représente le cercle entier), alors, pendant la première période –donnée en années, en décennies ou n’importe quelle unité temporelle- nous allons extraire (la moitié bleu du cercle), ensuite la deuxième période, nous allons extraire (partie en bordeaux), après la troisième période, nous allons extraire (partie en verte), etc. Cette succession peut se penser comme une succession ayant comme terme général, où représente le période d’extraction. Si nous continuons ce raisonnement réitératif, nous allons diviser le cerclé de tel forme que le morceau le plus petit repesent ce qui reste du matérielle. La graphique 2 montre le comportement par une succession de neuf termes. Ce comportement peut continuer jusqu’au l’infini et avoir toujours une petite partie restante.

**Graphique 2**

Hors de ces sortes de séries, nous ne pouvons pas extraire des ressources de façon illimitée sans épuiser la source, ce qui peut se démontrer facilement. Pensons dans la série avec naturel. Il suffit de sommer les premiers quatre termes pour dépasser l’unité, ou dans nos termes, pour épuiser la source.

Une production qui n’épuise jamais une mine, n’a pas de vrai sens en économie. Si les propriétaires des ressources décident d’extraire ce qu’il y a dans les mines ou gisements –et qu’ils ont la technologie pour le faire-, ils vont préférer extraire le maximum possible de la mine pour ainsi amortir les coûts d’extraction et maximiser leurs profits.

D’après Solow, la conservation de la ressource aura lieu seulement dans le cas où les prix des matières augmenteront autant.que personne ne voudra les acheter. Selon lui : «*la ressource s’épuisera une fois que son propre prix l’aura supprimé du marché*». Cependant, avec les conditions deconcurrence parfaite « *le propriétaire de la ressource peut, à tout moment, placer dans le marché la quantité du stock total qu’il décid*e ».(Martínez et Roca, 200, p. 304).

# CHAPITRE 2. Raréfaction du charbon et la diminution de sa valeur.

Une fois que nous avons exposé quelques considérations et des possibles trajectoires des prix obtenus avec cette règle, nous allons faire une analyse basée sur des statistiques de prix, de production, de stocks et de réserves du charbon dans la période de 1959 à 2007[[8]](#footnote-8).

Avant de commencer la présentation de l’analyse qui nous concerne, nous devons faire quelques considérations à propos de la terminologie que nous allons utiliser. Ces considérations sont nécessaires car sans la littérature économique, il n’y a pas de consensus pour certaines définitions.

L’IEA dans l’International Energy Annual 2006, adopte la définition du World Energy Council et elle distingue deux catégories de réserves et les nomme : *réserves prouvées*, et *réserves probables*. Les premières incluent ces matériaux qui peuvent s’extraire avec la technologie actuelle et les deuxièmes nous renvoient aux réserves que nous ne pouvons pas extraire avec la technologie actuelle.

Les réserves prouvées et les réserves probables sont inclues dans la catégorie des réserves. Il n’y a pas de consensus sur ce qui signifie avoir une réserve prouvée  : pour les uns cela veut dire que nous avons une probabilité de 90% d’exploitation, et pour les autres il s’agit d’une probabilité de 50%, 25% ou  même de 10% (Martínez et Roca, 2001, 297).

Le mot *stock* n’accepte pas de définition unique et pose des problèmes en tant que mot anglais, voir sa traduction au français qui peut être faite avec l’acception de réserve. En accord à l’IEA, le stock c’est l’ensemble des matérielles qui sont «stockés » dans les dépôts d’une firme. D’autres sources définissent le stock comme les réserves, en faisant référence aux matériaux qui se trouvent dans le sous-sol et qui peuvent être soustraits avec les technologies actuelles.

Dans ce texte nous considérerons le *stock* comme la quantité de matière rassemblée dans les dépôts, et les réserves d’après la définition de l’IEA.

Ce que nous voulons prouver par la suite est que la diminution des réserves de matériaux non renouvelables n’est pas accompagnée de la hausse de prix de ceux-ci. C’est-à-dire, le système des prix de marché ne fonctionne pas de façon consistante avec sa propre logique, il permet de diminuer de plus en plus les ressources naturelles, sans qu’elles soient accompagnées d’augmentations dans la création de la valeur.

Pour parvenir à voir cette contradiction, il faut d’abord connaître la tendance des réserves du charbon, laquelle, en considérant qu’il s’agit d’un matériel non renouvelable, doit nécessairement être en baisse.

Premièrement, nous avons que les données officielles ne fournissent pas de données sur les réserves, mais plutôt celles du stock des firmes. L’information sur les réserves n’est pas présentée dans l’annuaire sous forme de série temporelle, mais avec des données isolées, de sorte que nous ne pouvons pas avoir le suivi de ces réserves tout au long du temps. Dans l’annuaire d’où nous avons extrait cette information, nous pouvons connaître que les réserves probables de l’année 2005, qui correspondent à 263 781 000 short tons[[9]](#footnote-9).

Il va de soi qu’avec une série temporelle, nous pourrons avoir une meilleure idée sur la façon avec laquelle le charbon existant dans les gisements diminue, alors qu’avec l’information disponible on ne peut pas le savoir.

Toute augmentation de stock déclenche simultanément une baisse dans les réserves. Plus le stock est agrandi, plus les réserves sont réduites. Dans cette perspective, l’implémentation des technologies qui permettront d’extraire le charbon des gisements les plus profonds et le plus difficile à extraire, permettra seulement accroître le stock, mais jamais les réserves.

Un pays –quelconque- peut faire accroître son stock sans diminuer ses réserves; mais cela est possible en raison de l’importation de charbon qu’il fait, et non pas parce que ses réserves ont augmenté. Le charbon qu’il achète à l’étranger provoque la réduction des réserves des pays qui le lui exportent et en conséquence, il provoque aussi la diminution des réserves mondiales. Pour que les réserves augmentent vraiment, il faudrait attendre des millions d’années !

L’augmentation enstock d’une nation, sans la diminution de ses réserves*,* implique nécessairement une croissante appropriation du charbon existant dans le monde entier[[10]](#footnote-10). Pareillement l’augmentation des stocks signifie qu’il y a moins de charbon dans la croûte terrestre et qu’il y en a plus dans les dépôts. Donc une augmentation de charbon dans les stocks ne veut pas dire qu’il y aura une majeure disposition future de charbon, mais mineure. En observant les statistiques, nous remarquons que le stock et les réserves semblent ne pas avoir de connexion entre eux. Voici ci-dessous le graphique de la série de temps du stock de charbon :

**Graphique 3 . Stockdu charbon des Etats-Unis. 1949-2007.**

Source: International Energy Annual 2006.

Notes: Année contre *Short Tons.*

A partir de ce graphique, nous pouvons voir que le stock s’est triplé entre1949 y 2007. Sans reconnaitre que les donnés des stocks ignorent les réserves, nous nous apercevons qu’il y a une tendance à croître jusqu’à la fin des années 70, et plus tard il diminue mais très légèrement et sans jamais baisser les niveaux qu’il avait au milieu des années 70.

Une partie de ce charbon reporté dans ces données provient des États-Unis et une autre du reste du monde. Pour connaître la fraction procédant hors les États-Unis, il est nécessaire de considérer les importations nettes (importations moins exportations). Dans le graphique 4, on peut remarquer que tous les données sont négatives, ce qui implique que, dans la période du temps analysé, le comportement qui décrit des augmentations dans le *stock* est lié au charbon extrait à l’étranger. La somme des importations nettes correspond approximativement au 10% de la production des États-Unis, pays qui d’ailleurs possède 25% des réserves mondiales (International Energy Annual, 2006].

**Graphique 4. Importations nettes aux. États-Unis 1949 -2007.**

Source: International Energy Annual 2006.

Notes: années contre Short tons.

En accord aux données ci-dessus, nous ne savons que très peu sur ce qui se passe vraiment avec le charbon. La présentation des séries de *stocks* et l’omission des séries de *réserves* favorise une analyse fragmentée de la réalité et une confusion au moment d’interpréter les statistiques, de sorte que la prise de décisions sur l’avenir soit réalisée en tenant compte des *stocks* et non pas des *réserves*.

Avec les données disponibles, il s’avère nécessaire de les réinterpréter, afin de faire une analyse plus sensée et qui reflète davantage la réalité. Pourtant nous utiliserons autrement ces données pour obtenir des conclusions différentes.

En partant du fait que nous ne pouvons pas connaître la quantité totale du charbon existant dans le sous-sol (indépendamment du fait que nous ayons la technologie indispensable pour l‘extraire ou que les conditions économiques soient favorables pour le faire), nous proposons de considérer une quantité hypothétique *S*=3.5X1011 *Short* *tons* de charbon comme celle qui avait aux États-Unis en 1949. La quantité présumée résulte de l’addition du niveau des réserves que l’IEA donne en 2005, plus la quantité extraite aux États-Unis entre 1945 et 2005. Cette quantité a été augmentée de 20% comme une marge d’erreur.

Si nous augmentions cette quantité de 200% -ou n’importe quelle autre quantité- comme une marge d’erreur, rien ne changerait dans les conclusions que nous ferions. Peu importe si cette quantité n’est pas réelle, parce que nous ne l’utiliserons pas pour faire des prévisions sur l’avenir, mais pour montrer une tendance dans les données. Si la quantité de *S* était majeure, la seule chose qui changerait serait le niveau de la série. Pourtant la tendance serait exactement la même.

Avec l’information tirée de l’IEA, nous avons calculé la quantité de charbon extraite des mines (production) et nous l’avons soustraite de S. Cette donnée nous donne les réserves dans la période de temps traité.

**Graphique 5. Réserves de charbon aux ETATS-UNIS calculées comme *S*-P.1949-2007.**

Source: International Energy Annual 2006.

Notes: années contre *Short tons.*

Ce graphique illustre que l’extraction provoque la réduction des *réserves.* Puis si ce qui est extrait est exporté, stocké ou consommé, la seule chose qui changerait serait la tendance en *stock.* Le défaut de ce graphique est qu’elle ne prend compte ni l’accessibilité pour l’extraction du charbon, ni l’énergie nette obtenue. Toutefois si cela y était considéré, le résultat inévitable serait la baisse du niveau de la série, c’est à dire qu’on devrait considérer un *S* plus petit.

Nous pouvons calculer une série temporelle qui inclut aussi le *stock* que les réserves, en soustrayant de *S* la production annuelle et le *stock*. Ce graphique nous montre la quantité de charbon hypothétique existant dans la croûte terrestre, et le résultat de cette addition est le graphique ci-dessous :

**Graphique 6***.* Dépôts plus stock estimés. ETATS UNIS . 1949-2006.

Source: International Energy Annual 2006.

Notes: Années contre. *Short tons*

A la différence du graphique 3 qui nous présente la série temporelle des stocks, dont la tendance est à croître, les deux derniers graphiques montrent la diminution du charbon dans la croûte terrestre. C’est ainsi que nous procédons à la présentation de la série des prix du charbon.

**Graphique 7** . Prix réel du charbon. États-Unis 1949-2007.

Source: International Energy Annual 2006.

Notes: Années contredollars.

Ici nous pouvons voir qu’il y a eu un rebond significatif des prix dans le milieu des années 70. La valeur maximale de la série se trouve dans les prix de 1975. Cette augmentation est due à la *crise du pétrole*, laquelle a eu des impacts sur les prix du charbon, vu que nous utilisons le pétrole pour extraire le charbon, qu’il est une importante source d’énergie et que son avenir et ses prix sont toujours incertains. Donc ce qui suit est une tendance des prix à la baisse, qui continue à diminuer jusqu’à ce qu’il y a eu une petite hausse des prix en 2003.

A cette tendance des prix à la baisse du charbon –compte tenu de son raréfaction-, c’est que les prix reportent les changements dans les *stocks* au lieu de considérer les changements dans les *réserves*. Donc, la baisse des prix du charbon nous fait penser que les ressources ne se raréfient pas.

Comme nous l’avons constaté, ni Hotelling ni Solow n’ont envisagé la possibilité que les prix des ressources chutent lorsque les ressources se raréfient. Les questionnements de Solow autour de cette règle, lui ont fait réfléchir à propos des conditions d’équilibre dans les marchés à terme sans jamais se poser des questions à propos des marchés actuels ou passés, lesquels sont toujours observables. Lui, avant d’avoir lancé la règle de Hotelling comme le principe de l’économie de ressources naturelles -toujours en vigueur-, il a du vérifier l’évidence empirique qui existait dans son époque. Le plus contradictoire c’est que Solow admet la possibilité que les prix ne suivent pas les trajectoires des prix d’équilibre à cause des facteurs exogènes au modèle. Cependant, en accord à l’évidence présenté, nous constatons que les facteurs exogènes au modèle font augmenter les prix et sont justement les facteurs exogènes au modèle, ceux qui font que les prix augmentent et qu’en conséquence ils soient moins éloignés des prix d’équilibre. Dans cette situation, si nous utilisons l’argument de Solow qui nous dit que pour réussir à faire de la règle de Hotelling un bon critère d’assignation des ressources, il faudra que les prix ne s’éloignent pas beaucoup des prix d’équilibre. Alors nous pourrons conclure que la règle de Hotelling n’est pas le bon critère par l’assignation intertemporelle des ressources naturelles.

## Chapitre 3. Les combustibles fossiles, l’extraction minière, le capital naturel et humaine.

La problématique d’assignation de la base matérielle est tellement complexe que nous sommes obligés à faire des multiples réflexions. Loin de remettre en question la portée de la règle de Hotelling pour assigner la base matérielle[[11]](#footnote-11) non renouvelable et d’analyser ses limitations, nous proposons d’analyser d’autres facteurs.

### Les combustibles fossiles

La première considération à faire est que l’extraction des matières des mines et des gisements, ne peut pas se faire en se basant sur les mêmes critères, donc le sentier d’extraction d’une mine d’argent, ne peut pas être le même que le sentier d’une mine de charbon ou d’un gisement de pétrole. L’extraction des matières énergétiques ne correspond pas aux mêmes besoins sociaux, par rapport à l’extraction de matières premiers utilisées par l’industrie ou la bijouterie.

Aujourd’hui les combustibles fossiles sont la principale source d’énergie électrique dans le monde, cependant leur processus de combustion provoque des fortes dégradations environnementales, dont les plus importants sont le réchauffement climatique –responsable du changement climatique et l’acidification des océans. Le problème de l’extraction des matières comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel, devrait inclure obligatoirement les émissions de carbone (et de méthane pour le gaz naturel) issus de leur combustion.

En accord à l’article: *Carbone capture and storage* ( Haszeldine, Stuart, Scott, Vivian, 2011), des modèles climatiques sophistiqués signalent qu’une augmentation de la température de la planète de plus de 2°C aurait des conséquences dramatiques. Pour que cette augmentation ait lieu, on estime qu’il suffira d’une concentration de carbone dans l’atmosphère de 450 parts par million (ppm).

Durant la période préindustrielle, la concentration de carbone dans l’atmosphère était de 280 ppm. En 2009 elle a augmenté jusqu’à 387 ppm (Foster, 2009, p.2). Cette augmentation de carbone dans l’atmosphère n’est pas du tout banale : pour conserver les possibilités de développement de cette civilisation -comme nous la connaissons-, il faut que la concentration des carbone dans l’atmosphère soit réduite à 350 ppm (ibidem).

Dans d’autres termes, l’augmentation de 2°C de la température planétaire se fera avec un milliard de tons de charbon, soit l’équivalent de 3,6 milliards de tons de carbone. Si nous analysons les tendances de consommation de charbon, et nous les utilisons pour faire des estimations pour l’avenir, nous trouverons qu’en considérant la demande croissante du charbon, il suffira entre 20 et 30 années pour que la température de la planète augmente de 2°C.

Ces données nous emmènent à prendre en considération d’autres facteurs outre que le taux d’intérêt envisagé pour la prise de décisions du future des ressources naturelles non renouvelables. La conservation des combustibles fossiles emporte la conservation de l’environnement et des formes de vie existant, y compris l’espèce humaine:

 Même si les limites de disponibilité de ressources [...] peut encore s’amplifier […], et que les limites de la capacité de charge des réserves pour les émissions gazeuses, liquides et solides du processus de production et de consommation ont diminué de façon spectaculaire […] de nombreuses espèces continuent à disparaître, sont menacées d’extinction ou sont déjà disparus. Il n’est pas exclu une baisse de l’évolution même s’il n’est pas extrait de la terre le dernier baril de pétrole. Les formes de vie et de production de la « société industrielle moderne » ne sont pas compatibles avec la nature  (Altvater et Mahnkopf, 2002, p. 308)

Si nous voulons nous baser sur des modèles mathématiques pour la prise des décisions, nous pourrons par exemple, trouver un sentier d’extraction qui minimise le temps d’épuisement de la ressource ou qui minimise les émissions de carbone, sous la contrainte d’utiliser un plafond minimal d’énergie - nécessaires pour réaliser une série d’activités accordées socialement. De cette manière, nous pourrions sauvegarder la valeur d’usage de la biosphère et des océans en bénéfice de tous les êtres vivants de la planète. Or cette logique s’oppose à celle de la maximisation des bénéfices individuels des propriétaires des mines ou des gisements sous la contrainte d’épuiser les ressources.

### L’extraction minière

En outre il nous faut aussi réfléchir autour de l’extraction minière et de la prospection des gisements, lesquelles ne polluent pas seulement le seuil, le sous-seuil, la napée phréatique, les océans et l’atmosphère, mais transforment aussi permanemment les écosystèmes et diminuent la biodiversité. Dans les pays non développés, ces dommages environnementaux sont accompagnés des forts impacts sur la santé des travailleurs – la plupart d’entre eux sont plongés dans la pauvreté-, en même temps que les communautés des paysans sont dépouillés de leurs formes de vie traditionnelles au profit des industries d’extraction minière transnationales, ce qui a donné lieu aux nombreux mouvements contre les industries minières. Malheureusement, les effondrements et les explosions dans les mines représentent toujours un danger imminent pour les travailleurs. Nous donnons à titre d’exemple le cas de la mine *pasta de conchos*  au Mexique, qu’en 2006 a pris la vie de 67 miniers (La jornada, editorial. 19/02/2010).

### Les prix de la nature

Pour que le marché parvienne à organiser l’assignation des ressources non renouvelables, il faut tout d’abord qu’elles soient valorisées monétairement. Une des difficultés pour le faire, c’est de donner un prix qui déterminerait l’accès à la base matérielle pour tous les gens qui vivent dans le présent, et pour ceux qui vivront dans le futur.

Si nous réfléchissons au fait que l’argent a comme caractéristique la rareté, nous devons reconnaître que « *dans une économie monétaire, la capacité de paiement est en principe limité*» (Altvater, 1993. Op.cit., p. 214). Donc, même avant de faire des discussions autour des prix, nous avons déjà accepté qu’il y a des personnes qui ne pourront pas accéder à ces biens –les marchés favorisent avantage à ceux qui en possèdent le plus-. En conséquence, cette manière d’organiser l’assignation des biens, exclut en avance à tous ceux qui sont dépourvus d’argent, et à tous ceux qui ne peuvent pas exprimer leurs préférences, c’est-à-dire les générations futures et tous les êtres vivants de la planète qui ne sont pas des êtres humains. Malgré les efforts de l’économie des ressources non-renouvelables, il n’y a pas vraiment d’avancées en matière d’assignation intergénérationnelle des ressources.

Avec les mécanismes d’assignation des ressources toujours orchestrés par les marchés, nous voyons qu’à présent, la moitié des habitants dans la planète qui vivent avec deux dollars par jour –dont un milliard le fait seulement avec un dollar- (PNUD, 2012) , ne sont pas capables de satisfaire le minimum de leurs besoins biologiques, même si nous vivons dans une époque où les structures productives dépassent largement la quantité d’aliments nécessaires pour nourrir tous les habitants de la planète. De l’autre côté du monde, il y a des personnes qui meurent à cause de la famine, alors que d’autres pays –comme les États- Unis- investissent d’énormes sommes d’argent afin de trouver la façon de manger plus et de ne pas grossir.

Un autre problème de la valorisation monétaire de la nature, c’est que les prix y proposés, ne considèrent pas la dégradation de l’environnement générée dans chaque échelon de la chaîne de production, telles que : l’extraction, la vente, la consommation et la disposition finale. Cette dévastation n’est reprise ni dans le système de prix du marché, ni dans les statistiques.

Même si nous réussissons à inclure dans le système du marché un prix pour la dévastation de l’environnement, considéré comme une externalité, le résultat sera une valorisation financière de sa destruction et celle-cisera évaluée seulement de manière partielle, ce qui ne garantira ni la conservation de la base matérielle ni celle de l’environnement. Nous remarquons cette impossibilité (ou manque de volonté), dans l’omission que les statistiques font sur cette dévastation. Par exemple, nous n’avons pas de suivi statistique de la pollution que les industries minières produisent sur la nappée phréatique, ou de la perte de biodiversité que ses activités entraînent. Donc pour parvenir à créer un mécanisme approprié, il faudra d’abord connaître la totalité ou, au moins, les principaux effets indésirables, fixer un prix approprié pour ces fins, et déterminer la quantité de matériaux que nous devront laisser aux générations futures.

Dans le cas du charbon, la trace que nous avons à propos des dommages de la nature causés par sa combustion, correspond à la quantité de carbone dans l’atmosphère. L’acceptation de ce préjudice a donné lieu à la création d’un marché où la marchandise commercialisée est le droit à polluer, ainsi qu’à l’innovation des technologies et à la vente des services écosystémiques, qui pourront agir sur la décharge de carbone.

Malgré ces efforts nous sommes déjà dans une situation critique au niveau planétaire, qui demande de ne pas réduire seulement le volume des émissions de carbone, mais aussi de réduire la concentration de carbone dans l’atmosphère.

La valorisation monétaire de la base matérielle avec des perspectives intergénérationnelles n’a pas vraiment de sens, car aussi l’argent que les marchés sont des constructions sociales, lesquelles correspondent aux périodes spécifiques dans l’histoire de l’humanité. À propos de l’assignation intergénérationnelle, en 1977, Nicholas Georgescu-Roegen a fait la réflexion suivante : « Considérons une population de trois individus, dont chacun meurt chaque jour. Si tous les trois ont six portions quotidiennes de nourriture, comment pourraient-ils les distribuer ? La répartition devra se faire d’escompter le futur en accord à la probabilité de survie, dont le résultat sera la répartition de 3,2,1, et non pas la répartition équitable 2,2,2 [...] Or en ce qui concerne les entités quasi-immortelles, telles que la nation et notamment l’humanité, l’escompte du futur est erroné dans tous les point de vue *[…]La solution analytique pour la répartition équitable des ressources tout au long du temps, même si dans ce cas il s’agit d’un horizon temporel  infini, aboutit au paradoxe suivant : chaque année on pourrait consommer une quantité nulle [ou infinitésimale] de ressources... si nous basons nos recommandations sur le principe archiconnu de la maximisation de  « l’utilité », nous devrons minimiser le regret qui en résultera dans l’avenir. On dirait que c’est la seule solution raisonnable -même si je ne la considère pas rationnelle, pour confronter les incertitudes les plus incertaines de toutes : l’incertitude historique* (Georgescu-Roegen, cité par Martinez, 1998, p, 88).

### Substitution entre le capital naturel et le capital fabriqué par l’homme

Face à la problématique de l’épuisement des ressources naturelles et à la dévastation écologique, il existe des arguments qui nous disent que la perte de  *capital naturel*  (considéré comme les ressources naturelles non renouvelables) peut être compensée sans affecter la production, une fois que la dotation en *capital fabriqué par l’homme* ou *capital* *humaine* (machinerie) soit assez grande (Martínez et Roca, 2001. p. 374).

Toutefois nous ne pouvons pas accepter cette conclusion, car elle omet lle fait que l’économie dépende de la nature. C’est-à-dire, qu’il n’y rien que l’homme puisse faire dans l’absence de la nature ou contre ses lois.

Alors, nous allons exposer les fondements avec lesquels cette idée a éte concue. Pour le faire, nous utilisons le livre *L’environnement* –destiné aux étudiants d’économie de l’environnement du 2ème cycle ([Zagame](http://www.decitre.fr/auteur/226608/Paul+Zagame/),  [Schubert](http://www.decitre.fr/auteur/178071/Katheline+Schubert/), 1998).

Au début de la section qui traite sur les RNR, est faite la considération que la prise en compte des ressources naturelles se traduit par l’introduction d’un troisième input dans la fonction de production.

Le texte considère la ressource naturelle *nécessaire* à la production « lors qu’un montant nul de ressource contraint la production à s’annuler (si ) ». Il nous dit aussi que « de manière intuitive, un progrès technique ou une importante substituabilité entre le capital et la ressource peuvent permettre à l’économie de se soustraire à cette limite physique ». Ensuite, il définit de manière négatif ce qui est une ressource *essentielle* : « la ressource est non *essentielle* s’il est toujours possible d’obtenir un niveau perpétuel de consommation strictement positif quelque soit le niveau de ressource utilisé ».

Ensuite, il postule que dans le cas où la ressource est nécessaire à la production, alors :

une condition suffisante pour qu’il existe un sentier de croissance réalisable à niveau de consommation strictement positif à toutes les périodes est que la ressource ne soit pas *essentielle.* Ce sont les propriétés de la fonction de production, en particulier le comportement de la productivité moyenne de la ressource lors que celle-ci tend vers zéro, qui déterminent son caractère essentielle ou non. Plus précisément, une productivité moyenne de la ressource bornée (pour ) implique que la production totale de l’économie est également finie. Il s’en suit que le niveau de consommation tend progressivement vers zéro et donc que la ressource est essentielle (p.115).

Puis il illustre les différents cas où la ressource est essentielle ou non  « à l’aide des fonctions de production à élasticité de substitution constant et à rendements d’échelle contestants »:

, avec et

Où est l’élasticité de substitution entre les deux facteurs de production.

Il dégage trois cas en accord à la valeur de l’élasticité.

1. Pour , la ressource est nécessaire mais pas essentielle.
2. Pour , il conclut que la ressource est nécessaire et essentielle.
3. Pour . La ressource est nécessaire à la production et sa productivité moyenne est non bornée. Avec cette conclusion il affirme que « l’accumulation de capital peut compenser l’épuisement progressif de la ressource […] Le capital physique est suffisamment important dans la production pour permettre un niveau de production indéfiniment positif alors même que la ressource s’épuise» (p.116).

Pour montrer pourquoi nous ne pouvons pas conceptualiser la nature comme un input plus de la fonction de production, et pour montrer que ce n’est pas possible de substituer le capital naturel pour le capital fabriqué par les hommes, nous devons comprendre autrement la nature. Cette approche serait exposée dans le suivante chapitre.

# CHAPITRE 4 Physique, nature et économie.

Pour l’instant, nous avons vu que par la gestion RNR, la règle d’Hotelling est très loin d’être appliqué pour fixer le sentier d’extraction. Nous avons aussi montré que les lois de l’offre et la demande du marché ont aussi échoué dans cette gestion des RNR, et en plus nous avons exposé les approches que justifient la substitution de  *capital naturel*  par le *capital fabriqué par l’homme.*

Afin de continuer notre analyse, nous avons besoin de considérer les rapports homme-nature d’après une perspective plus élargie, qui nous permettra de comprendre que la nature est le soutien de toutes les formes de vie, et que dans l’économie, la nature ne peut pas être seulement un input de plus de la fonction de production. Pour empreindre cette démarche, nous avons besoin de faire des réflexions concernant le rapport homme-nature, et les lois de la nature, lesquelles seront bornées dans ce mémoire aux lois physiques, et plus précisément aux lois de la thermodynamique.

## La physique de la nature

## La loi zéro

Nous commencerons par une présentation des lois ou des principes de la thermodynamique. Le premier principe est connu sous le nom de la *loi zéro* et il postule que si deux corps ont la même température qu’un troisième, ces deux corps- là sont aussi à la même température. Si deux corps –n’importe lesquels- sont en contact, ils arriveront irrémédiablement à égaler leurs températures. Nous appellerons ce phénomène « l’équilibre thermique ».

A chaque état d’équilibre thermique de deux corps en contact, nous pouvons l’associer un numéro qui représentera leur température. C’est sous ce principe qu’on construit les thermomètres : en fixe deux états d’équilibre thermique pour établir après une échelle de mesure.

En termes plus concrets, la chaleur et la température sont deux choses différentes. La chaleur est une mesure d’énergie avec laquelle les particules qui forment un corps, un gaz, un liquide, etc. se déplacent. Pour qu’un corps soit plus chaud qu’un autre, il faut que ses particules se déplacent à une vitesse plus élevée aussi dans ce corps que dans l’autre.

Le fait que la chaleur passe d’un corps chaud vers un corps froid –et pas à l’inverse- est dû au fait que les particules qui sont en mouvement dans le corps chaud, provoquent que les particules du corps qui a moins de chaleur se déplacent à une vitesse plus élevée. Cela se produit parce que les particules du corps chaud choquent avec les particules du corps qui a moins de chaleur, en transférant ainsi une partie de leurs énergies aux particules qui reçoivent l’impact.

### La première loi de la thermodynamique.

Cette loi explique le fonctionnement d’une machine thermique. Elle affirme que l’énergie calorifique peut se transformer en énergie mécanique, grâce à l’existence de deux sources de température : la source froide et la source chaude.

La manière dont on mesure l’efficacité d’une machine thermique, consiste à faire le quotient de la différence de la chaleur de la source chaude moins la chaleur de la source froide, divisé par la température de la source froide, c’est-à-dire, celle de la température la plus basse. Cela veut dire que : *plus la différence de température entre la source froide et la source chaude est élevée, plus l’énergie calorifique pourra se transformer intègrement en travail*. Ce qui montre que pour qu’un corps réalise un travail, il ne lui suffit pas d’avoir uniquement de l’énergie calorifique. L’exemple le plus typique de cela, est que l’immense quantité d’énergie calorifique de la mer ne peut pas être utilisée pour qu’un bateau y flotte, pour qu’il réussit à se déplacer il faut qu’il y ait une différence de températures, dans ce cas « un moteur à vapeur » ou « le vent » sont un bon exemple.

Cette loi décrit aussi l’impossibilité d’une machine thermique à transformer toute la chaleur en travail. Elle explique donc que la quantité d’énergie qui se transforme en travail est toujours inférieure à la quantité du travail qu’en résulte. Cette partie de l’énergie qui ne s’est pas transformée en travail se transforme en une autre sorte d’énergie. Pour mieux comprendre cela, il faut d’abord comprendre que « l’énergie de la chaleur » et « l’énergie du travail » sont équivalentes et que la chaleur et le travail sont deux manières différentes de les représenter.

Autrement dit, la première loi de la thermodynamique est (celle déjà bien connue) la loi de la  conservation de la matière et de l’énergie *:  rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme».* En admettant cette loi, il ne sera pas approprié de parler de *consommation d’énergie* mais de  *transformation d’énergie*.

Une automobile est un exemple de machine thermique, laquelle transforme l’énergie provenant de l’essence -grâce à un moteur qui réalise un cycle- en travail mécanique. Quand nous touchons le coffret d’une automobile qui a été en mouvement, nous pouvons nous rendre compte qu’il est chaud, cette chaleur est une manifestation de l’énergie qui n’a pas pu se transformer en travail, et qui s’est transformée en chaleur.

Vu que la plupart des machines thermiques ont leur  source chaleur à l’intérieur, leur source froide se trouve dans l’atmosphère. Cela est une des causes du réchauffement climatique : toutes les machines qui transforment l’énergie en travail libèrent inévitablement de l’énergie calorifique dans l’environnement –qui dû à l’effet de serre- fait que la chaleur ne puisse pas être libéré vers l’espace, en provoquant ainsi une augmentation de la température globale.

Le principe de la réfrigération est presque le même que celui des machines thermiques, sauf que la source froide et la source chaude se trouvent inversées. La première se trouve à l’intérieur de la machine et la deuxième à l’extérieur.

### Compression d’un gaz

Il y a des processus que la thermodynamique étudie et qui ne sont pas réfutés par aucune loi de la physique ; cependant ils ne sont pas observés car la probabilité qu’ils ont de se réaliser est nulle.

Pour mieux exemplifier ceci, nous allons penser à un gaz contenu dans un récipient muni d’un piston, par exemple une seringue. D’après les hypothèses qui postulent que le récipient ne permet pas l’échange entre la chaleur du gaz et la chaleur de l’extérieur, et que le processus se réalise à une température constante ; si nous tirons le piston, le gaz se répandra (on peut dire qu’il redoublera le volume du récipient) et les molécules qu’il contient se rependront partout dans le récipient[[12]](#footnote-13). Ceci est le comportement le plus probable à se passer. Cependant, rien n’empêche que les molécules occupent exactement la même place où elles étaient avant de tirer le piston.

Si nous considérons que le gaz a une seule particule, la probabilité qu’elle se trouve dans la même place où elle était avant de tirer le piston est de 0,5, soit un 50%. S’il y a deux particules la probabilité est de 0,25, c’est-à-dire 25% ; et s’il y a quatre particules la probabilité est de 12,5%. Comme nous pouvons le remarquer, lorsqu’il y a plus de particules, il est plus difficile qu’elles se retrouvent dans la place où elles étaient initialement. Pour un récipient contenant 10 molécules, la probabilité qu’elles se trouvent dans la même place qu’au début, est de . Si nous observions le récipient chaque seconde, nous remarquerions tous les 17 minutes que les molécules seraient du même côté dans le récipient. La probabilité que 50 molécules soient du même coté dans le récipient est de 10-15. Pour constater que toutes les molécules se trouvent du même côté du récipient, il serait nécessaire d’attendre 36 millions d’années (Tipler, 1995, p. 58). Certainement, il faudra attendre plus de la moitié de la durée de vie de l’homo-sapiens pour que cinquante molécules occupent à nouveau la moitié du récipient.

La quantité de particules contenue dans une mole d’une substance – n’importe laquelle - s’appelle le nombre d’Avogadro et ceci correspond à 6.02× 1023   (c’est-à-dire : 602,000,000,000,000,000,000,000 ) particules. Alors, la probabilité que toutes ces particules se retrouvent dans la moitié initiale, est pratiquement zéro. Combien de temps nous devons attendre pour renverser l’expansion adiabatique d’une mole de gaz ?   Même pas l’âge de l’univers. Il est dans ce sens que l’improbable devienne impossible. Cependant, presser à nouveau le piston de manière que le gaz occupe à nouveau la même place qu’au début, est très facile à faire. Il nous faut seulement fournir assez d’énergie mécanique sur celui-ci. Cet exemple nous montre qu’il y a des procès qui peuvent être restitués d’une façon simple seulement si une force externe est appliquée. En l’absence de cette force externe, les restituer est pratiquement impossible.

Transformer l’énergie mécanique du frôlement des mains  en chaleur est simple, cependant, transformer la chaleur provenant de ce frôlement en énergie pour realiser un travail, est pratiquement impossible. À chaque fois qu’une goutte d’encre est dissolue dans un pot avec de l’eau, il se passe que dans de petits périodes de temps, la différence entre les deux périodes successives est imperceptible. Néanmoins, une fois qu’une longe période de temps est passée, nous pouvons remarquer que la goutte d’eau s’est dissolue. Ce phénomène est appelle l’équilibre quasi-statique, lequel fait référence au processus de transformation thermodynamique qui va d’un état d’équilibre à un’ autre. Le fait d’avoir une goutte d’encre dissolue dans l’eau et rassembler ses particules pour former la goutte d’encre initial est presque impossible. Ceci est la caractéristique des processus irréversibles.

### Deuxième loi de la thermodynamique ou loi de l’entropie.

Cette loi nous dit que les processus tendent à suivre un seul sens, c’est-à-dire, cette loi nous parle de l’irréversibilité. Le processus de tirer le piston de la seringue –avec les conditions décrits-, pour faire que les particules occupent à nouveau le même volume qu’au début, s’appelle *expansion adiabatique,* et a comme processus contraire la *compression adiabatique.* Ce processus, il peut bien se faire en sens inverse, mais les probabilités que ceci arrive sans avoir effectué un travail extérieur, sont infinitésimales, autrement dit, dans le limite de l’impossible.

Il y a une grande quantité de processus qui ne peuvent pas être revêtis. Par exemple, si nos pressons la valve d’un atomiseur, comment pourrons-nous faire pour que les particules qui on été dispersées, retournent de nouveau à la valve ? Comment pouvons nous récupérer l’énergie du frôlement des pneusd’une automobile pour le faire avancer ? Comment inverser la photosynthèse ? Comment rajeunir le vieux ? Avec ces questions, il est plus claire ce que la deuxième loi de la thermodynamique nous dit : il y a une direction des événements, lesquels sont déterminés par la flèche du temps.

À chaque fois que nous transformons l’énergie en travail, le résultat est une quantité d’énergie qui est transformée en travail, plus une autre partie qui ne peut pas être transformée en travail. La première forme d**’**énergie, nous l’appellerons *énergie utile* ou *énergie libre*, et la deuxième*: énergie résiduelle.*Par exemple, si nous laissons tomber une brique d’une certaine altitude, l’énergie potentielle qui aurait pu servir pour bouger une poulie -et en conséquence faire un travail-, ne pourra pas être utilisée une fois que la brique est tombée. Dans ce cas, l’énergie libre s’est transformée en énergie résiduelle sans avoir réalisé un travail. Basés sur ce fait, nous avons qu’en réalité, « *ce qui est consommé quand nous utilisons l’énergie, ce n’est pas l’énergie elle-même, sinon, sa disponibilité* » (Ehrlich, P. Ehrlich, A. y Holdren 1989:57).

Le mot *entropie* est utilisé en physique pour distinguer ces deux sortes d’énergie. Nous dirons que l’énergie qui se dégrade pendant un processus physique génère de *l’entropie*. Quand dans un processus physique, nous parlons de l’énergie qui se dégrade, nous disons que le processus a généré de l’entropie.

Dans d’autres termes, l’entropie est une mesure du degré d’ordre – ou désordre- des molécules d’un corps.   Le rapport qu’il y a entre la dégradation de l’énergie et la mesure d’ordre des molécules au niveau microscopique, est étudié par la physique statistique, laquelle est tout à fait compatible avec l’étude macroscopique proposé par la thermodynamique.

### Deuxième loi de la thermodynamique

Ce que nous dit la deuxième loi de la thermodynamique, est que : *dans tous les systèmes fermés, tous les processus thermodynamiques font que l’énergie de l’Univers ne puisse diminuer jamais. Si en plus, le processus est réversible, nous avons que l’entropie ne peut jamais diminuer[[13]](#footnote-14).*

Une remarque importante à faire, c’est que si nous ne considérons pas complètement l’univers, nous pouvons arriver à la fausse idée que l’entropie augmente. Par exemple : dans le processus de compression adiabatique du gaz – que nous avons cité- si nous considérons seulement ce qu’il y a à l’intérieur de la seringue, nous pouvons penser que l’entropie a baissé. Cependant, si nous considérons aussi l’environnement du processus, nous regardons que l’entropie totale augmente, car il y a eu un travail mécanique qui a produit une énergie résiduelle.

## La nature

Tout d’abord, il nous faut distinguer que la nature se présente sous deux aspects : *la nature naturelle*et la *nature humanisée*. La *nature naturelle* est la nature qui n’a pas été transformée par l’homme, et la *nature humanisée* est la nature qui a été transformée par l’homme.

Les transformations que l’homme fait sur la nature, l'ont éloigné de la  nature naturelle. Ce qui a propicié de concevoir qu’il y a une nature qui peut être fabriquée par les hommes, laquelle pourrait substituer  la nature naturelle en son absence. Cependant, la seule chose que les hommes peuvent faire avec la nature, grâce à  leur ingénie et leur travail, est de modifier la nature en ressemblant et en séparant ses éléments ou en rendant plus rapides les processus naturelles. En  reconnaissant les lois physiques de la nature, nous avons que l’idée de création réelle n’existe pas, « *unir et séparer sont les seuls éléments que l’ingénie humaine trouve en analysant l’idée de reproduction*» (Schmidt. Op. Cit. 1976, p. 85)

La séparation de l’homme et la nature dans son aspect naturelle, a fait oublier aux hommes que nous sommes une partie de la nature.  Lorsque cette séparation a été transportée au système économique, elle nous a fait penser qu’il y a une déconnection entre la nature et le système économique.

Les rapports de l’homme et la nature doivent être compris comme un rapport réciproque, de tel sorte que  l’existence de l’homme est sujette à la nature. Or l’état de la nature ne peut pas être compris sans analyser les transformations que l’homme lui a fait. Dans cette relation réciproque, la condition de l’existence a un seul sens.

Dans tous les endroits et tous les moments, l’état de la nature est déterminé par tous les faits passés, au même temps que l’état qu’elle prend dans un moment donné, fixe le point de départ  pour tous les possibles scenarios futurs.

La nature ne peut pas être conçue uniquement comme  l’environnement des êtres vivants, elle existe parelle-même et elle  a ses propres lois, lesquelles sont indépendants de tous les désirs des êtres humaines, de toutes les sociétés et de tous les  systèmes économiques. Bien que  les hommes aient une connaissance assez approfondie sur la nature,  ils ne peuvent pas changer ses lois. Dans le cas où l'homme transforme la structure biologique de la nature, il ne le fait que dans les limites établis par la nature elle-même. Les organismes génétiquement modifiés sont pour la plupart issus de la transgénèse,  laquelle nous pouvons la comprendre comme un processus d'union et de séparation des éléments de la nature.

Avec ou sans la présence de l’homme, la nature tient à se transformer tout au long du temps, cependant la capacité de l’homme à la transformer, est notamment supérieure à la capacité  des autres espèces.   Tous les êtres vivants ont besoin de s’approprier d’une partie de la nature afin de réaliser leurs fonctions biologiques, mais les hommes s’approprient  d’une partie de la  nature qui dépasse ses besoins biologiques  « *les sociétés humaines, se distinguent de  toutes les communautés biotiques du fait que  leur articulation avec le milieu naturelle, n’est pas régis par les lois biologiques qui régulent les processus évolutif »* (Leff, 1986. Op. cit., p. 29).

Dans ce processus d’appropriation, l’homme  ne se sert pas seulement de sa corporéité, mais il utilise des instruments externes pour le faire. Les organes avec lesquels les hommes sont nés, nous les appellerons ici les *organes endosomatiques* et les outils que l’homme a développé pour s’approprier de la nature,  nous les appellerons les *organes exosomatiques.* Il faut attendre un long processus évolutive pour qu’il y ait des changements dans les organes endosomatiques, en revanche, la fabrication des organes exosomatiques, est une façon d’évoluer plus rapidement pour les hommes. C'est seulement grâce à ces organes que l’homme a dépassé ses propres restrictions biologiques. C'est pour cela que Georgescu-Roegen nous dit que : « *Nous sommes la seule espèce qui a, dans son évolution, violé les limites biologiques »*(Carpintero, 2000, p.18). L’espèce  humaine, est la seule espèce qui a comme moyen d’appropriation de la nature les organes exosomatiques, lesquels se  produisent et s’échangent  actuellement grâce aux marchés.

Pour faire suite à notre analyse, nous pouvons définir la *transformation* *endosomatique d'énergie comme*l’énergie nécessaire pour satisfaire les besoins biologiques; et la transformation exosomatique d'énergie comme  toute l’énergie utilisée hors celle dicté par  les instructions génétiques.  (Martínez et Roca, 2006, p. 22).

La nature est une condition pour l’existence de l’homme «*l’histoire naturel et l’histoire humaine sont les deux visages du même  processus générale ; ils se modifient mutuellement et,  en cas extrême, ils se déterminent entre eux […]  il y a une interaction claire entre eux, chacun est le contexte et le contenu de l’autre* » (O’connor. 2001, op.cit,  p. 44).

Une compréhension approfondie de la nature implique toute une analyse des processus qui la modifient. L'humanité, avec toutes ses formes sociales, ne peut pas être comprise en l'absence de la relation de l'homme avec la nature et de la  compréhension de l’appropriation que les hommes font d’elle pour se reproduire biologiquement et culturellement.

La médiation entre l'homme et la nature a comme moyen le travail. D’après Marx : « *le travail est le métabolisme entre l'homme et la nature* » (200. Op. cit., p.223), lequel représente un moyen pour satisfaire les besoins de l’homme, lesquels sont historiquement déterminés. La relation « *entre l'homme et la nature n'est pas immédiatement adaptée à la réalisation (des objectifs) du premier* [de l’homme], *d'où la nécessité de transformer*[la nature]*et de l'adapter à ses besoins, lesquels sont toujours (impliqués) dans le processus de constitution historiques* ».

Le processus de travail est une condition de l'existence de l'Homme, laquelle se présente indépendamment des formes sociales existantes et qui vise à permettre la conservation vitale de l'homme et de rendre possible sa reproduction.

La façon de médiatiser le métabolisme entre l'Homme et la nature,  détermine les divers modèles économiques qui se succèdent historiquement (Schmidt, 1976, p. 87), lesquels sont aussi déterminés par rapport aux formes de production et aux rapports de propriété.

« *Tout type de production dans toutes les formes de société est une appropriation de la nature par l'individu, à l'intérieur et à travers d'une forme de société concrète* »*(*Marx, Cité par Foster, 2004, p. 261). La production ne produit pas seulement le produit à consommer, mais, au même temps, crée les conditions dans lesquelles cela devra se passer. « *La faim c'est la faim, mais la faim satisfaite avec de la viande bien cuite, en utilisant un couteau et une fourchette,  est distincte de celle où on dévore de la viande crue à l'aide des mains, des ongles et des dents*» (Schmidt, 1980, op. cit., p.91).

## De la physique à la nature

L’étude des lois physiques présentées  et l’analyse des rapports entre l’homme et la nature, nous permettent de comprendre autrement le système économique. Nous avons ciblé les bases pour  refuser la possibilité de prolonger éternellement la production, une fois que le capital physique soit suffisamment important dans la production, et même si la ressource s’épuise.

Cette dernière affirmation a value une critique qui s’est répandu partout, selon laquelle :

Les économistes ont été entrainés pour croire que les ressources naturelles proviennent des marchés, sans considérer la nature. La morale de cette histoire est que le capital créé par l’homme peut substituer le capital naturel. Mais la première loi de la thermodynamique nous dit qu’il y n’a pas de création, c'est-à-dire, le capital créé par l’homme simplement n’existe pas. Tout le capital est capital naturel et l’économie est 100% dépendante de la nature pour réaliser n’importe quelle activité (Hanson, 2004).

Une autre chose que la thermodynamique nous apprend, c’est que l’efficacité des machines thermiques a des limites, et qu'elle est fixée par la température de la source chaude et la source froide. Les technologies plus développées peuvent augmenter l’efficience des machines thermiques, mais, elles ne peuvent pas éviter qu’il y ait toujours une partie de l’énergie qui se dégrade et génère de l’entropie. En plus, une fois que la température globale de la planète augmente –et aussi dans la présence des îles de chaleur à l’intérieur des villes-, nous avons que les machines thermiques diminueront leur efficacité. A ce propos Georgescu-Roegen nous dit que la croissance de la technologie a des limites :

Malheureusement, ce que [Sadi Carnot] a démontré, est que la machine la plus efficace, la machine parfaite (celle dans laquelle la quantité de travail utile fournie et le flux d’énergie incorporé est égale à un), n’existe pas. Les ressources accessibles ne sont pas seulement finies, mais en plus, la loi de l’entropie fixe une limite à l’efficience que le progrès technologique peut atteindre. La technologie, la plus avancée, ne peut pas obtenir plus de travail de l’énergie d’un morceau de charbon que cette énergie libre qu’il contienne, mais en réalité, même pas cela (Carpintero, 2000, p. 25)

## Le processus économique en termes énergétiques

Selon Georgescu–Roegen, la seule chose que le processus économique peut faire en termes d’énergie, est de transformer : «*la matière et l’énergie de haut ordre en énergie résiduelle et en déchets sans valeur. Vu que l’énergie et la matière ne peuvent ni se créer ni se détruire, les inputs du système productif se transforment forcement en marchandises et en déchets, mais ils ne disparaissent jamais* » (Geogescu-Roegen,1989). Dans les termes de l’entropie, « *les coûts de toutes les activités biologiques ou économiques, sont toujours plus hauts que les produits. Dans ce sens, n’importe quelle activité de ce sorte emmène forcement à un déficit* ». (Georgescu-Roegen 1989, p.66).

Tous les êtres vivants ont besoin de l’énergie pour se reproduire. Mais cette énergie doit avoir une qualité particulière : *la faible entropie*. Tout ce que nous pouvons reconnaître comme des valeurs d’usage a comme qualité la faible entropie. Cependant, cette faible entropie est nécessaire pour la satisfaction des besoins, quoiqu’elle ne soit pas une condition suffisante pour la satisfaction des besoisns. Par exemple les champignons vénéneux ont une faible entropie, mais ils n’ont pas de valeur d’usage (Altvater, 1993, p. 193) ; une voiture qui tombe en panne conserve le haut ordre de ses particules, par contre, elle n’a pas de valeur d’usage.

## Recyclage

L'entropie d'un objet peut diminuer uniquement, si elle cause une majeure entropie à son alentour. Ceci est une des raisons pour lesquelles, le recyclage de matériels ne peut pas se réaliser sans générer sur son chemin, une série de transformations d'énergie et une augmentation de l'entropie. Si on ne peut recycler un matériel qu'en générant une majeure entropie, le recyclage de l'énergie sera impossible. Le fait de penser qu'il existe une possibilité de recycler à 100%, et que la matière et l'énergie dissipées peuvent être récupérées, c'est ce que Georgescu-Roegen appelle *le dogme énergétique* (Carpintero. 2000, p.15). L'énergie libre dégradée en énergie de déchet ne peut pas faire marche arrière  et, en tenant compte de la première loi, l'énergie est conservée. Donc, nous devons être attentifs non seulement à la quantité d'énergie, mais aussi à la quantité.

Même si nous ne pouvons rien faire contre l’accroissement entropique, il nous faut réfléchir que celui-ci est « déterminé par les modèles sociaux de vie et de travail, ainsi que par les solutions aux problèmes techniques» (Altvater, 2003. Op. cit., 21). Donc nous pouvons limiter l’entropie que nous générons en modérant la façon de le générer par rapport à la forme dont nous nous approprions de la nature.

## Les sources d’énergie

Nous avons dans la Terre deux sources d’énergie libre, l'une d’elles provient des dépôts de minéraux qui se trouvent dans le seuil et le sous-seuil, et l'autre est le *flux* composé par la radiation solaire qui arrive à la terre. Ces deux sources sont asymétriques quantitativement. Le flux de rayonnement solaire va durer plus de 5.000 millions d’années, tandis que l’énergie contenue par la totalité des réserves dans les dépôts minéraux de la Terre, est comparable à l’énergie radiée par le soleil pendant quelques jours.

Donc, nous devons modérer la quantité d’énergie provenant des dépôts, pour utiliser au maximum l’énergie provenant des rayonnements solaires, « la radiation solaire est la source première de toute la vie sur Terre, laquelle commence par la photosynthèse de la chlorophille » (Georgescu-Roegen 1989, p. 69) Donc, c’est l’énergie solaire ce que nous devons utiliser davantage pour élargir l’espoir de vie des êtres humaines.

## La réserve d’énergie ordonnée terrestre

De la même façon qu’il y a des réserves de RNR, nous pouvons penser qu’il y a une réserve d’énergie ordonnée, susceptible de se convertir en travail, pour satisfaire des besoins, soit biologiques – n’importe de quel espèce- soit des besoins determinés par la société :

Disons que S dénote la réserve actuelle de basse entropie terrestre et que *r* dénote la moyenne annuelle d’épuisement. Si nous faisons l’abstraction (ici on peut le faire sans aucun danger) de la lente dégradation de S, le maximum théorique d’années écoulées pour compléter l’épuisement de cette réserve, c’est S/r. Cela représente aussi le nombre d’années qui devraient s’écouler pour que la phase industrielle de l’évolution humaine arrive à sa fin [...] il est indiscutable que, même avec l’utilisation frugale de S, l’étape industrielle de l’évolution de l’homme finira des milliers d’années avant la disparition du soleil... plus le degré de développement économique s’élève, plus l’épuisement r augment, et l’espoir de vie diminue. Les résultats sont évidents. À chaque fois qu’on fabrique un Cadillac, on détruit irrévocablement une quantité de basse entropie, qui autrement pourrait être utilisée dans la production des pelles et des charrues. En d’autres mots, lorsqu’on produit un Cadillac on le fait aux dépens de la réduction du nombre de vies humaines futures. Le développement économique basé sur l’abondance industrielle peut représenter, à présent, une bénédiction aussi pour nous que pour tous ceux qui pourront en profiter dans un futur proche, mais ce qui est certain est qu’il attente contre les intérêts de l’humanité en tant qu’espèce [...] Dans le paradoxe de ce développement économique, nous pouvons entrevoir le prix à payer à cause de notre acharnement à surpasser les limites biologiques dans la lutte de notre survie. (Georgescu-Roegen Op, cit.,1989 p. 70)

Bien que la restriction entropique est inutile pour la durée de vie humaine, dans le temps géologique elle peut être certainement une restriction pour l’avenir des espèces. Enfin, la possibilité qu’il existe des formes de vie futures, est liée à l’énergie ordonnée que nous léguerons. Ce dont les futures générations ont besoin pour leur existence, est de la matière et de l’énergie ordonnée, ainsi qu’un environnement qui les permettra de se reproduire.

# CONCLUSIONS

Face aux considérations faites ultérieurement, nous pensons qu'on a bien justifié le besoin d’incorporer des connaissances des autres disciplines à l’étude de l’économie, ainsi que d’étudier l’économie à partir d'une perspective critique. La physique a beaucoup de choses a nous apprendre à propos de la nature, cependant il nous faut considérer d'autres disciplines pour mieux comprendre l’économie, telles que la biologie,  l’écologie et la sociologie. La géographie critique et l’écologie politique sans  doute,  ont fait des considérations sur les rapports de la nature, la société et l’économie, qui ne sont pas négligeables. Nous sommes conscients que l’approche proposée par Georgescu Roegen a ses propres faiblesses et limitations, néanmoins nous trouvons que ses réflexions sont précieuses, grâce aux apports fournis dans le progrès de la compréhension du système économique.

Pour nous, les statistiques constituent  le mémoire historique des données. Donc, avant de s’aventurer à faire des propositions pour le futur, il faut au moins considérer ce qui s’est passé  jusqu’à présent. Nous pensons qu’un de facteurs qui ont produit la déconnexion entre les résultats théoriques de la théorie économique et les résultats statistiques, est  l’absence de connexions entre la théorie et les données observables. Ceci nous a fait réfléchir autour d’une question : à quoi sert l’analyse statistique ? Comment pouvons-nous rendre utiles les statistiques dans l’étude de l’économie ?  Dans quelle mesure est-ce que nous pouvons faire des précisions avec des modèles mathématiques ?

Le comportement observé des résultats statistiques, s’explique en considérant les stocks à la place des réserves. Notons que d'autant Hotelling que Solow ont considéré dans leurs approches que l’épuisement des RNR est en relation avec les matières qui existent dans les mines et les gisements (c'est-à-dire, les réserves) et non pas dans les stocks. Donc, d’après eux, il ne doit  pas  avoir de justification pour confondre les stocks est les réserves.

Nous avons constaté, qu’il y a un écart assez important entre les considérations faites par Solow et Hotelling -présenté**e**s dans l’article et la conférence consultés- et les résultats qui sont présentés dans les livres de l’économie de l’environnement. Sans aucun doute, nous pouvons affirmer qu’il y une vulgarisation de leurs réflexions et que les résultats présentés dans les manuelles d’économie de l’environnement, ont perdu une partie importante des considérations faites par ces auteurs. Même si nous pensons que leurs approches sont coupées en biais, nous devons aussi admettre que leurs résultats ont été très simplifiés, et qu'ils ont permis  de faire des analyses qui ne correspondent pas à l'esprit de ces arguments.

Si nous nous approchons vers la formulation mathématique de l’économie, quelle sera la portée des modèles et des équations que nous pouvons proposer pour expliquer la réalité ? Les mathématiques sont bien une discipline abstraite qui se complique notamment à chaque fois que nous incluions une variable de plus. A partir de quatre variables, nous ne pouvons plus faire de représentations graphiques; et à partir de trois,  pour maximiser une fonction  il est nécessaire calculer les variations ou l’utilisation des méthodes numériques. Donc, afin d’établir des modèles mathématiques qui pourront représenter mieux la réalité, il nous faut que leurs modèles incorporent plus de variables, ce qui demande une bonne maîtrise des mathématiques. Quoiqu'il se passe, l’utilisation des mathématiques pour l’analyse économique doit être justifiée par sa capacité d’expliquer la réalité. Ce n’est pas l’emploi des mathématiques ce qui doit légitimer la scientificité de l’économie, sinon, son rapport à la réalité.

Si nous nous limitons toujours aux hypothèses qui nous permettent de rendre plus simples les mathématiques, nous risquons de faire autant des simplifications que la réalité serait laissée de coté. Peut-être, pour faire une formulation mathématique de l’économie qui soit plus près de la réalité, il faudra suivre la même démarche qu’ont suivi les physiciens: se plonger dans un univers de langage mathématique, et s’investir à apprendre les mathématiques au point d'arriver à obtenir un niveau très élevé. Dans l’actualité nous avons des physiciens qui sont en train de démontrer des propositions mathématiques que les mathématiciens n’ont pas réussi à faire, ce qui fait preuve du dégrée d’abstraction mathématique qu'ils ont dû adopter pour atteindre leurs objectifs. Nous avons même des  nouvelles mathématiques développées concrètement pour résoudre des problèmes physiques. Si l’analyse économique souhaite faire des mathématiques leur langage, il faudra aller aussi loin que nécessaire. .

En accord à notre perspective, utiliser une seule variable –comme  le taux d’intérêt dans la règle de Hotelling-  pour l’assignation intergénérationnelle des RNR,  exclue en avance tous les rapports possibles entre les autres variables, au même temps que le choix des variables utilisées détermine le résultat donné. Si  nous postulons que le sentier des RNR doit se faire par  rapport au taux d’intérêt, et après nous montrons qu’en  l’utilisant  les profits sont toujours maximisés (dans tous les temps), alors nous ne montrerons pas que cette variable est bien choisie ou qu’il n’y a pas d'autres variables qui pourront nous donner des bons résultats.

 Les fonctions mathématiques peuvent être vues comme des *machines*qui transforment des données. Si nous mettons l’utilité et le taux d’intérêt dans cette *machine*, nous devons nous attendre que les résultats soient donnés avec les même variables. Si nous y mettons la conservation de l’environnement, les émissions de carbone et l’augmentation de la température de la planète comme variables, nous auront des résultats en ces termes.  Le choix des variables à utiliser détermine le résultat du modèle.

Une autre considération à mettre en question, est celle de l’infini. Dans quelle mesure l’infini mathématique peut être transporté dans un  infini que nous pouvons observer dans la réalité? Dans quelle mesure cette transportation nous amène aux paradoxes ? La conclusion de continuer éternellement la production sans ressources doit être comprise comme un constat en économie, ou comme un paradoxe, voir celui de Zénon ?  L’extraction éternelle des RNR d’une source sans l’épuiser est paradoxale dans la vie réelle ?

L’infini dans les mathématiques a été l'objet de multiples complications, vu que celui-ci est seulement un concept abstrait et non pas un chiffre. L’infini  représente une idée : avoir quelque chose non borné. Cependant  il existe même des mesures de l’infini, où le plus petit d’entre eux, se dit d’avoir comme mesure zéro, beaucoup de résultats –disons incroyables- en mathématiques, ont l’infini dans ces explications.

En outre, nous n’avons pas choisit d'annoncer les détails de la problématique écologique qui met en danger l'avenir de l’espèce humaine et des autres formes de vie. Nous avons exposé seulement la problématique liée aux émissions de carbone, sans   aller plus loin. Cependant, nous sommes conscients que la problématique écologique peut déclencher la diminution d'espérance de vie dans la Terre. Ce qui est plus étonnant c'est qu’en utilisant  des analyses qui ne reportent pas les influences de l’homme sur la plante, nous ne pouvons pas prendre conscience de l’influence humaine sur la planète et même pas du fait que nous sommes la seule espèce capable de faire quelque chose pour sauver la planète d’un destin tragique (pour  les hommes).

La problématique écologique actuelle, ne doit pas se comprendre comme un problème de la planète,  nous ne traversons pas une crise écologique, nous traversons une crise humaine qui s’explique lors de la problématique écologique, laquelle n’a pas été produite par la planète elle-même. Nous ne sommes pas les victimes d’une problématique imposée par des forces extérieurs à nous, car nous sommes les acteurs de cette problématique. La sixième extinction massive des espèces (Ehrlich,1989) reportée dans l’histoire de la planète, est celle qui est en train de se passer et est la seule à ne pas avoir une cause biotique, puisqu’elle est provoquée par les activités  d’une seule espèce, à savoir : l’espèce humaine. L’effet de serre a comme source principale les  gaz qui sont déposés dans l’atmosphère, produits de l’activité industrielle (le carbone et le méthane principalement), au cours de la satisfaction des besoins sociaux de notre époque. Nous avons déjà perdu la quatrième partie de la terre productive à cause du changement climatique et des activités humaines, c'est-à dire, la désertification de la planète (<http://www.unesco.org/mab/doc/ekocd/spanish/chapter1.html>). Nous pourrions faire une longue liste des dommages de la planète et faire aussi un suivi des activités humaines qui  ont contribué à la réalisation de ces dommages.

Un autre élément très important à considérer pour mieux comprendre le système économique, est l’importance de la concurrence, laquelle n’a pas été traitée dans ce mémoire. Notons que la concurrence n’est pas abordée par l’économie néoclassique, car  normalement elle se base sur l’hypothèse de la concurrence pure et parfaite, ou sur les supposés de monopole et duopole. Donc, cet effet de la concurrence est important pour comprendre comment les capitalistes, dans la recherche de l'obtention de meilleurs profits, permettent que la nature soit dévastée si elle est toujours rentable. La concurrence dans le système capitaliste, ne peut  pas être  omise de cette analyse, compte tenu de sa compression, laquelle nous permettre de comprendre la dégradation de la base matérielle : « *Le moteur du capitalisme est la concurrence, qui garantit que chaque entreprise doit croître et réinvestir ses gains (excédent) pour survivre […] la valeur du capital est auto-expansible et l'accumulation est son maître (Foster, 2002). Par conséquent, le capitalisme en tant que système ni adhère, ni reconnaît, la notion de suffisant. Joseph Schumpeter (1951: 293) a observé que «le capitalisme stationnaire serait une contradiction in adjecto* ». L'économie doit augmenter sons échelle et son intensité afin de survivre »[[14]](#footnote-15) (Foster, 2009).

Les limites physiques de la planète et la restriction entropique, nous font réfléchir au fait que la meilleure chose que nous pouvons faire pour les  générations futures, est de leur laisser la possibilité de se reproduire et de choisir ce qu’ils voudront. Il faut que nous leur permettions de s’approprier d’une partie de la nature qui leur permettra de satisfaire leurs besoins physiques et sociaux.

Ce que nous devons leur léguer ne doit pas être seulement des quantités infinitésimales des RNR, mais une source abondant de matière et d'énergie ordonnée.  Pour ce faire, la seule possibilité qu'on a, est de modérer la transformation de matière et d’énergie, et de choisir un style de vie où on  ne gaspille pas l’énergie dont les générations futures pourront se servir pour vivre. Il nous faut choisir de ne pas continuer la production de marchandises basée sur la maximisation des profits des détenteurs du capital, mais plutôt, d'être utiles pour satisfaire des besoins, qui devraient répondre en moindre mesure au style de vie imposé par la société de consommation, qui nous a fait croire que le bonheur s’atteigne grâce aux biens que nous achetons dans les marchés.

Oublions la devise keynésienne selon laquelle, à long terme, nous serons tous morts, et battons-nous plutôt pour  sauver la planète des dommages que nous, l’espèce humaine, sommes en train de faire.

# Biblographie

Altvater, E. (1993). *The future of the market. An essay on the regulation of Money and nature after the colapse of actually existing socialism.* Ed*.* Verso.

-MaHnkopF ,B. (2002). *Las limitaciones de la globalización: Economía, ecología y política de la globalización*. Siglo XXI en coedición con el Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, UNAM. México.

CARPINTERO, O. (2000). « La bioeconomía de Nicholas Georgescu-Roegen ». *Fundación 1° de Mayo*. Documento de trabajo 4.

DENHEZ, F.(2007) « La nature, combien ca coute ? Pourquoi l’économie n’est pas l’ennemi de l’économie ». Ed. delachaux et niestlé.

EHRLICH, P. EHRLICH, A. HOLDREN, J. (1989). « Disponibilidad de entropía y la leyes de la termodinámica ». Au *H. Daly (comp). Economía, Ecología y Ética: Ensayos hacia una Economía en Estado Estacionario.* Fondo de Cultura Económica. Pp. 56-60.

ELDREDGE, Niles. (2001). « La Sexta Extinción*».* Actionbioscience. Washington, D.C. Junio. Disponible au: <http://www.actionbioscience.org/esp>.

Foster,Bellamy. (2004). *La Ecología de Marx: Materialismo y naturaleza*. Ediciones de Intervención Cultural El viejo Topo. Madrid, España.

-CLARK B, YORK R. (2009) *The Midas Effect: A Critique of Climate Change Economics. Development and Change* 40(6): 1085–1097 (2009). Institute of Social Studies.

GEORGESCU-ROEGEN, N. (1989). “La ley de la entropía y el sistema económico”. *En Herman Daly, (Comp.) Economía, Ecología y Ética: Ensayos hacia una Economía en Estado Estacionario*. Fondo de Cultura Económica.

-(1996) *La Ley de la entropía y el proceso económico.* Ed. Visor. España.

-(1983) *Bioeconomics and Ethics.* Third World Congress of Social Economics. California.

HANSON, J. (2004) *Cinco errores fundamentales* Asociación para el Estudio de los Recursos Energéticos. España. Febrero. Disponible au:

<http://www.crisisenergetica.org/staticpages/index.php?page=20031016182139855>

HASZELDINE, STUART, SCOTT, VIVIAN, (2011). *Carbon capture and storage.* New Scientist. 4/2/2011, Vol. 210, Edition 2806.

Hecht, E. (1987). *Física en perspectiva*. Adisson Wesley Iberoamericana. Wilmington, Estados Unidos.

Hewitt, Paul. (2004). *Física conceptual*. Pearson Educación, México.

HOTELLING, H.(1931) *The Economics of Exhaustible Resources* The Journal of Political Economy, Vol. 39, No. 2. (Apr., 1931), pp. 137-175.

INTERNATIONAL ENERGY ANNUAL 2006. *. Coal Information .*EIA. Disponible au internet: <http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/coal.html> .

Juanes, Jorge. (1980). *Historia y naturaleza en Marx y el marxismo.* Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán, México.

LA JORNADA. *Pasta de Conchos : cuatro años de ofensiva obrera.02/09/* 2010. Disponible au : (<http://www.jornada.unam.mx/2010/02/19/edito>).

LEFF,Enrique. (1986). *Ecología y capital: Hacia una perspectiva ambiental del desarrollo.* Universidad Nacional Autónoma de México. México.

MARTÍNEZ, Joan. (1997) *La ecología y la economía*. 1ª. Reimpresión. Fondo de Cultura Económica. Colombia.

-(1998) « Curso de economía ecológica*»*.Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. Serie Textos Básicos para la Formación Ambiental.

-(2006). *El ecologismo de los pobres:* *Conflictos ambientales y lenguajes de valoración.*2ª. ed. Icaria. Barcelona, España.

-et ROCA J. (2001). *Economía ecológica y política ambiental.* 2ª. Ed. Fondo de Cultura Económica. México.

MARX, Karl (2007) (1). *El Capital*. Libro 1. Vol. 1. 6ta. ed. Siglo XXI. México.

O’CONNOR, James. (2004). « Es posible el capitalismo sostenible » en *Papeles de la población.* N.24. Universidad Autónoma del Estado de México. México. P. 9-35.

-(2001) *Causas naturales*: *Ensayos de marxismo ecológico.* Siglo XXI. México.

PASSET, R. « Les grandes représentations du monde et de l'économie à travers l'Histoire: De l'univers magique au tourbillon créateur ».Ed. Les liens qui libèrent, 2010.

QUERINI, G « Ressources naturelles environnement et croissance industrielle. Ed. publisud ». 1996.

SANTOS, Milton. (1990). *Por una geografía nueva.* Espasa Calpe.España.

SCHMIDT, Alfred. (1976). *El concepto de naturaleza en Marx*. Siglo XXI. México.

SCHUBERT K., ZAGAME P.(2003) « L’environnement. Une nouvelle dimension de l’analyse économique ». Ed. Vuibert.

SOLOW, R. (2011). « La economía de los recursos o los recursos de la economía ». *De la Economía Ambiental a la Economía Ecológica.* Fuhem e Icaria, 1994, pp.83-97). Edición electrónica revisada, 2011 CIP-Ecosocial.

TIPLER, Paul. (1995). Física. Vol. 1. 3ª. ed.Reverté. Barcelona, España.

## Internet :

FED. <http://search.newyorkfed.org/board_public/search?source=board_pub&text=PGB&submit=Search>

EIA*:* <<http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/coal.html>>

PNUD: <http://www.teamstoendpoverty.org/wq_pages/fr/visages/chiffres.php>

UNESCO : <http://www.unesco.org/mab/doc/ekocd/spanish/chapter1.html>

# ANNEXE

Tabla 1. Serie de tiempo para el carbón, 1949-2005. EEUU.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Año | Stock\* | Importaciones  Netas\*\* | Consumo\*\* | Producción\*\* | Precios reales\*\*\* |
| 1949 | 49,465,814 | -32,470,000 | 63,192 | 63,637 | 32.05 |
| 1950 | 77,294,630 | -28,995,000 | 73,417 | 72,718 | 31.4 |
| 1951 | 81,843,552 | -62,359,000 | 78,094 | 79,331 | 29.86 |
| 1952 | 82,426,040 | -51,944,000 | 67,356 | 68,254 | 29.24 |
| 1953 | 86,587,571 | -36,226,000 | 77,696 | 78,837 | 28.67 |
| 1954 | 75,664,755 | -33,687,000 | 59,121 | 59,662 | 26.12 |
| 1955 | 71,691,016 | -54,092,000 | 76,145 | 75,302 | 25.02 |
| 1956 | 81,349,210 | -73,441,000 | 73,324 | 74,483 | 25.83 |
| 1957 | 83,739,708 | -80,410,000 | 74,433 | 75,951 | 26.35 |
| 1958 | 78,650,536 | -52,262,000 | 52,658 | 53,604 | 24.73 |
| 1959 | 78,353,952 | -38,663,000 | 54,668 | 55,864 | 23.85 |
| 1960 | 75,160,382 | -37,719,000 | 56,946 | 57,229 | 22.96 |
| 1961 | 73,001,072 | -36,240,000 | 52,089 | 51,711 | 22.23 |
| 1962 | 71,261,992 | -39,975,000 | 51,823 | 51,910 | 21.42 |
| 1963 | 71,516,229 | -50,163,000 | 55,002 | 54,278 | 20.87 |
| 1964 | 76,743,266 | -49,251,000 | 62,637 | 62,145 | 20.79 |
| 1965 | 78,639,806 | -50,848,000 | 65,379 | 66,854 | 20.19 |
| 1966 | 75,623,973 | -49,890,000 | 66,020 | 67,402 | 19.93 |
| 1967 | 94,560,276 | -49,896,000 | 61,572 | 64,580 | 19.63 |
| 1968 | 87,028,562 | -50,931,000 | 62,438 | 63,653 | 19.07 |
| 1969 | 81,933,559 | -56,752,000 | 66,166 | 64,757 | 19.43 |
| 1970 | 93,033,701 | -71,697,000 | 63,207 | 66,525 | 23.03 |
| 1971 | 90,954,870 | -57,193,000 | 56,689 | 57,436 | 24.73 |
| 1972 | 116,752,939 | -56,693,000 | 60,046 | 60,507 | 25.59 |
| 1973 | 117,155,204 | -53,460,000 | 65,765 | 64,325 | 26.97 |
| 1974 | 108,237,168 | -58,581,000 | 64,092 | 61,581 | 45.56 |
| 1975 | 140,391,216 | -65,369,000 | 53,692 | 57,207 | 50.92 |
| 1976 | 148,898,944 | -58,818,000 | 56,834 | 58,333 | 48.66 |
| 1977 | 171,543,397 | -52,665,000 | 54,144 | 53,509 | 46.66 |
| 1978 | 166,605,814 | -37,761,098 | 56,948 | 49,009 | 47.77 |
| 1979 | 202,811,597 | -63,982,796 | 53,826 | 52,943 | 47.93 |
| 1980 | 228,406,667 | -90,548,320 | 41,278 | 46,132 | 45.61 |
| 1981 | 209,423,288 | -111,497,522 | 44,046 | 42,786 | 44.66 |
| 1982 | 232,037,612 | -105,534,550 | 25,776 | 28,115 | 43.44 |
| 1983 | 202,584,250 | -76,501,316 | 29,850 | 25,808 | 39.84 |
| 1984 | 231,300,325 | -80,197,161 | 29,737 | 30,399 | 37.85 |
| 1985 | 203,366,746 | -90,727,442 | 29,057 | 28,438 | 36.15 |
| 1986 | 207,319,258 | -83,306,175 | 24,728 | 24,917 | 33.39 |
| 1987 | 213,780,019 | -77,860,123 | 27,654 | 26,304 | 31.52 |
| 1988 | 188,830,864 | -92,888,984 | 30,021 | 28,945 | 29.16 |
| 1989 | 175,086,550 | -97,963,533 | 28,934 | 28,045 | 27.78 |
| 1990 | 201,628,678 | -103,104,494 | 27,811 | 27,617 | 26.67 |
| 1991 | 200,681,913 | -105,578,802 | 24,248 | 24,046 | 25.45 |
| 1992 | 197,685,109 | -98,713,432 | 25,030 | 23,410 | 24.34 |
| 1993 | 145,741,782 | -66,338,358 | 24,697 | 23,182 | 22.46 |
| 1994 | 169,358,478 | -62,488,760 | 25,563 | 22,686 | 21.5 |
| 1995 | 169,083,050 | -79,074,197 | 25,845 | 23,749 | 20.44 |
| 1996 | 151,626,969 | -82,357,378 | 23,974 | 23,075 | 19.71 |
| 1997 | 140,373,697 | -76,058,055 | 24,018 | 22,116 | 19.01 |
| 1998 | 164,602,044 | -69,323,963 | 23,108 | 20,041 | 18.32 |
| 1999 | 188,590,211 | -49,386,509 | 22,422 | 20,016 | 16.99 |
| 2000 | 140,281,591 | -45,976,170 | 23,242 | 20,808 | 16.78 |
| 2001 | 181,911,694 | -28,878,739 | 20,202 | 18,949 | 16.97 |
| 2002 | 192,126,666 | -22,725,812 | 19,603 | 16,778 | 17.26 |
| 2003 | 165,467,552 | -17,969,538 | 19,437 | 17,173 | 16.78 |
| 2004 | 154,005,698 | -20,717,891 | 22,491 | 16,909 | 18.21 |
| 2005 | 144,303,985 | -19,481,862 | 18,238 | 16,719 | 20.88 |
| 2006 | 186,946,116 | -13,401,293 | 18,785 | 16,404 | 21.58 |
| 2007P | 189,443,482 | -22,816,256 | 17,269 | 16,201 | 21.23 |

**Fuente:** *Coal Information* <http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/coal.html>

**Notes:** \*Miles de *short tons*. \*\* S*hort tons. \*\*\* dollars américains , base 2000.* P valeur estimé.

1. Nous allons considérer comme ressources non renouvelables, celles dont leur utilisation économique diminue forcement les réserves de cette ressource et dont la vitesse de l’extraction est plus rapide que la vitesse de production géologique, ce qui fait que nous pouvons les considérer avec un taux de rénovation nul. Dans cette catégorie, sont inclus aussi les combustibles fossiles (non recyclables) que les minéraux recyclables. (Martínez et Roca, 2001. p.297). [↑](#footnote-ref-1)
2. Comme le numérateur est une constante, la fonction peut être considérée come la branche d’une hyperbole définie par l’équation : , avec δ une constate positive. De cette manière tant que s’approchera davantage vers le zéro, *T* ira vers l’infini, et quand ira vers l’infini *T* ira vers le zéro. Peu importe que *T* aille vers l’infini car on peut s’attendre que soit positive, mais non pas qu’elle s’accroisse sans limite. Ce comportement est opposé à l’objectif du modèle, parce que le temps de l’épuisement doit être plus lointain chaque fois que le taux d’intérêt soit plus grand. Donc, on doit admettre que la fonction de production n’est pas compatible avec ce modèle**.** Cette observation, n’a pas été abordée par Hotelling dans son article. [↑](#footnote-ref-2)
3. est la quantité totale des ressources dans la mine. [↑](#footnote-ref-3)
4. Il paraît bizarre que cette relation soit la même que celle donnée tout au début du modèle. Mais il y une chose qui change, au début du modèle, on a postulé que les prix devaient suivre cette trajectoire, alors qu’à la fin du modèle, Hotelling a prouvé qu’en effet, avec les hypothèses données, c’était bien la trajectoire qui maximisait l’utilité. [↑](#footnote-ref-4)
5. Une déduction de cette formule peut être consultée en Schubert et Zagamé 1998. P 118. [↑](#footnote-ref-5)
6. Les prix ont été déflatés de la même façon que dans le rapport des prix du charbon de la AIE, 2007. [↑](#footnote-ref-6)
7. La version plus simple de ce paradoxe nous dit que : dans un stade, il y a quelqu’un qui souhaite de le traverser. Pour le faire il avance jusqu'au milieu, donc, il lui reste l’autre moitié à traverser. Puis il continue jusqu’à la moitié de la moitié restant, et une fois qu’il l’a fait, il lui reste encore à marcher la deuxième moitié de la moitié du stade, ce raisonnement, s’étale vers l’infini, et donc il y aura toujours un partie qui reste à traverser. [↑](#footnote-ref-7)
8. Les donnés de l’annuaire statistique 2006 (*Coal Information 2006* publicado por la *EIA, disponible au :* <http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/coal.html>), ne peuvent pas être actualisés avec les données les plus récemment publiées dans le site d’internet de la AIE (<http://www.eia.gov/coal/data.cfm>). La raison c’est qu’il y a des données contradictoires notamment dans le cas des importations et exportations (les données plus récentes sont présentées concernant la période 2006-2011). En l’absence d’éléments pour comprendre cette différence, nous avons conservé les données de la série du temps de 1949 à 2007 sans les actualiser car cette série nous offre plus des informations. [↑](#footnote-ref-8)
9. 1 Short Ton équivaut à 2 000 livres qui correspondent à 907.18474 kg. Aux États-Unis on l’appelle simplement Ton [National Institute the Standar and Technology]. [↑](#footnote-ref-9)
10. En général le transfert de *ressources naturelles* se fait entre les pays du centre et la périphérie. Actuellement une réclamation a été déposée par les pays de la périphérie, qui ont souffert des fortes dégradations de leur environnement pendant le processus d’extraction et le pillage de leurs *ressources.* Ce conflit, c’est ce qu’on appelle une *dette écologique*. (Martínez, 2006, p.325) [↑](#footnote-ref-10)
11. Nous allons utiliser ce terme pour faire référence à ce que d’ordinaire connaissons comme « ressources naturelles ». Le terme « ressource » s’utilise dans l’économie pour désigner des facteurs de production. En admettant que les éléments provenant de la nature peuvent être compris hors de la sphère de production, nous allons les appeler ici « la base matérielle ». [↑](#footnote-ref-11)
12. Ce processus s’appelle l’expansion adiabatique d’un gaz à température constante. [↑](#footnote-ref-13)
13. Système fermé: permet l’échange entre l’énergie à l’intérieur du système et l’environnement.

    *Univers : système plus son environnement.*

    *Procès réversible : il s’agit d’un processus idéal où toute l’énergie est convertie en travail, sans générer d’énergie résiduelle. Ce processus est pratique pour l’étude de la thermodynamique, mais, il n’existe pas dans la vie réelle* [↑](#footnote-ref-14)
14. Citation: Schumpeter, Joseph A. (1951) *Essays*. Cambridge, MA: Addison-Wesley.

    Foster, John Bellamy (2002) *Ecology Against Capitalism*. New York: Monthly Review Press. [↑](#footnote-ref-15)