

## UNIVERSITE THOMAS SANKARA

Centre d'Etudes, de Documentation  
et de Recherche Economiques et Sociales (CEDRES)

# REVUE ECONOMIQUE ET SOCIALE AFRICAINE

## SÉRIES ÉCONOMIE

### **Elicitation of the determinants of Energy Poverty in Côte d'Ivoire**

Arouna DIALLO & Richard K. MOUSSA

### **Changements climatiques et comportement stratégique des pays en présence d'incertitude : une analyse par la théorie des jeux**

Thierry NIANOGO & Minkieba Kevin LOMPO

### **Couverture santé et vulnérabilité des ménages au Togo**

Abla AMEGADZE & Esso-Hanam ATAKE

### **Investissement en infrastructures routières, croissance économique et emploi au BF : une analyse en équilibre général calculable**

Ibrahim OUEDRAOGO, Boureima SAWADOGO & Moussa OUEDRAOGO

### **Impact de l'utilisation de l'engrais organique sur les rendements des cultures céréalières au Burkina Faso**

S. Rachel NANA, T. Florent MARE & Pam ZAHONOGO

### **Efficacité technique des producteurs de maïs au BF : une approche par la frontière de production stochastique**

Dénis OUEDRAOGO

[www.cedres.bf](http://www.cedres.bf)

La REVUE CEDRES-ETUDES « séries économiques » publie, semestriellement, en français et en anglais après évaluation, les résultats de différents travaux de recherche sous forme d'articles en économie appliquée proposés par des auteurs appartenant ou non au CEDRES.

Avant toute soumission d'articles à la REVUE CEDRES-ETUDES, les auteurs sont invités à prendre connaissance des « recommandations aux auteurs » (téléchargeable sur [www.cedres.bf](http://www.cedres.bf)).

Les articles de cette revue sont publiés sous la responsabilité de la direction du CEDRES. Toutefois, les opinions qui y sont exprimées sont celles des auteurs.

En règle générale, le choix définitif des articles publiables dans la REVUE CEDRES-ETUDES est approuvé par le CEDRES après des commentaires favorables d'au moins deux (sur trois en générale) instructeurs et approbation du Comité Scientifique.

La plupart des numéros précédents (77 numéros) sont disponibles en version électronique sur le site web du CEDRES [www.cedres.bf](http://www.cedres.bf)

La REVUE CEDRES-ETUDES est disponible au siège du CEDRES à l'Université Thomas SANKARA et dans toutes les grandes librairies du Burkina Faso et aussi à travers le site web l'UTS ou par le lien : <https://www.journal.uts.bf/index.php/cedres>

## **DIRECTEUR DE PUBLICATION**

Pr Pam ZAHONOGO, Université Thomas SANKARA (UTS)

## **COMITE EDITORIAL**

Pr Pam ZAHONOGO, UTS Editeur en Chef

Pr Noel THIOMBIANO, UTS

Pr Denis ACCLASATO, Université d'Abomey Calavi

Pr Akoété AGBODJI, Université de Lomé

Pr Chérif Sidy KANE, Université Cheikh Anta Diop

Pr Eugénie MAIGA, Université Norbert ZONGO Burkina Faso

Pr Mathias Marie Adrien NDINGA, Université Marien N'Gouabi

Pr Omer COMBARY, UTS

Pr Abdoulaye SECK, Université Cheikh Anta DIOP

Pr Charlemagne IGUE, Université d'Abomey Calavi

## **SECRETARIAT D'EDITION**

Dr Yankou DIASSO, UTS

Dr Théodore Jean Oscar KABORE, UTS

Dr Jean Pierre SAWADOGO, UTS

Dr Kassoum ZERBO, UTS

## **COMITE SCIENTIFIQUE DE LA REVUE**

Pr Abdoulaye DIAGNE, UCAD (Sénégal)

Pr Adama DIAW, Université Gaston Berger de Saint Louis

Pr Gilbert Marie Aké N'GBO, Université Félix Houphouët Boigny (Côte d'Ivoire)

Pr Albert ONDO OSSA, Université Omar Bongo (Gabon)

Pr Mama OUATTARA, Université Félix Houphouët Boigny (Côte d'Ivoire)

Pr Youmanli OUOBA, UTS

Pr Kimséyinga SAVADOGO, UTS

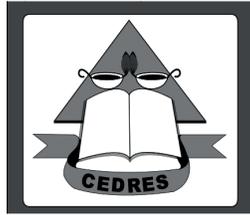
Pr Nasser Ary TANIMOUNE, Université d'Ottawa (Canada)

Pr Noel THIOMBIANO, UTS

Pr Gervasio SEMEDO, Université de Tours

Pr Pam ZAHONOGO, UTS

Centre d'Etudes, de Documentation et de Recherche Economiques et Sociales (CEDRES)



[www.cedres.bf](http://www.cedres.bf)

# **REVUE CEDRES-ETUDES**

Revue Economique et Sociale Africaine

**REVUE CEDRES-ETUDES N°78**

**Séries économie**

**2<sup>e</sup> Semestre 2024**

# SOMMAIRE

<b>Elicitation of the determinants of Energy Poverty in Côte d'Ivoire</b> Arouna DIALLO & Richard K. MOUSSA.....	05
<b>Changements climatiques et comportement stratégique des pays en présence d'incertitude : une analyse par la théorie des jeux</b> Thierry NIANOGO & Minkieba Kevin LOMPO.....	45
<b>Couverture santé et vulnérabilité des ménages au Togo</b> Abla AMEGADZE & Eso-Hanam ATAKE.....	79
<b>Investissement en infrastructures routières, croissance économique et emploi au BF : une analyse en équilibre général calculable</b> Ibrahim OUEDRAOGO, Boureima SAWADOGO & Moussa OUEDRAOGO.....	114
<b>Impact de l'utilisation de l'engrais organique sur les rendements des cultures céréalières au Burkina Faso</b> S. Rachel NANA, T. Florent MARE & Pam ZAHONOGO.....	152
<b>Efficacité technique des producteurs de maïs au BF : une approche par la frontière de production stochastique</b> Dénis OUEDRAOGO.....	184

**Changements climatiques et comportement  
stratégique des pays en présence d'incertitude :  
une analyse par la théorie des jeux**

**Thierry NIANOGO**

Université Thomas SANKARA  
Email : t.nianogo@gmail.com

**Minkieba Kevin LOMPO**

Université Thomas SANKARA  
Email : minkieba@yahoo.fr

## Résumé

L'incertitude sur l'amplitude et les effets des gaz à effet de serre (GES) peuvent inciter certains Pays à adopter une stratégie de « passer clandestin » dans la mise en œuvre des réglementations internationales. L'objectif de cet article est de montrer comment l'incertitude sur les émissions de GES peut, en fonction de l'aversion au risque, atténuer ou intensifier les engagements des Pays dans la réduction de leurs émissions de GES. Pour ce faire, un modèle à partir de la théorie des jeux, intégrant à la fois l'incertitude sur le changement climatique et le comportement stratégique des pays, a été construit. Ce modèle permet de montrer qu'une augmentation de l'incertitude des effets de GES pourrait entraîner une diminution de leurs effets si les pays ont un comportement stratégique guidé par une aversion aux risques (prudence, tempérance). En termes, d'implication de politique, les États devraient donc s'engager davantage dans la mise en œuvre et le respect des conventions international de limitations de GES.

***Mots clés*** : risques, comportements stratégiques, changement climatique, ordres de préférence, émissions

***JEL*** : Q54, C72

## Abstract

Uncertainty about the range and the effects of greenhouse gases (GHGs) can lead countries to adopt a “free rider” strategy when it comes to implementing international regulations. The aim of this article is to analyze how uncertainty about GHG emissions can, depending on risk aversion, attenuate or intensify countries' commitments to reduce their greenhouse gases. Henceforth, we have built a theoretic model that incorporates both uncertainties about climate change and the strategic behavior of countries. This model reveals that an increase in uncertainty about the effects of GHGs could lead to a decrease in their effects if countries behave strategically in a risk-averse way (prudence and temperance). Regarding policy inferences, countries should commit to implementing international GHG limitation conventions as it would lead to lower

***Key words*** : risks, strategic behaviour, climate change, preference orders, emissions

***JEL*** : Q54, C72

## Introduction

La quatrième évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2007) a établi un lien entre le changement climatique et l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère. Dans l'optique de réduire le niveau global des émissions de GES, plusieurs initiatives ont été mises en œuvre. L'exemple de l'Accord de Paris, adopté par la Convention Cadre des Nations Unis sur les Changements Climatiques (CCNUCC) le 12 Décembre 2015 à la Vingt-et-unième Conférence des Parties (COP21) est illustratif. Cet Accord vise trois objectifs principaux : l'atténuation des effets des changements climatiques, l'adaptation aux impacts des changements climatiques et enfin le financement des actions permettant d'atteindre les deux premiers objectifs. Pour le premier objectif, les pays s'engagent à mettre en œuvre des actions afin de limiter l'augmentation de la température mondiale nettement en dessous de 2 °C d'ici à 2100 (par rapport aux niveaux préindustriels) et de poursuivre les efforts en vue de limiter cette augmentation à 1,5 °C. Quant au second objectif, un accent particulier est mis sur le renforcement de la résilience des pays. Le dernier objectif concerne l'augmentation des flux financiers compatibles avec les objectifs climatiques, en particulier la mobilisation annuelle de 100 milliards de \$ de « financements climat Nord-Sud » à partir 2020.

Il reste cependant encore beaucoup d'effort pour atteindre ces objectifs. Deux axes explicatifs de cette relative sous-performance des Pays qui se sont engagés peuvent être envisagés : Il s'agit d'une part, de la difficulté à prédire avec exactitude les effets des émissions des GES. La science du changement climatique demeure complexe et se caractérise par un niveau d'incertitude inéluctable sur les sources et les conséquences du changement climatique. D'autre part, l'absence de mesures coercitives pour les Pays, certains peuvent être tenter d'adopter une stratégie de « passager clandestin » et à laisser les autres porter le fardeau de la réduction des émissions. Ces remarques soulèvent des questions théoriques intéressantes sur le lien entre les incertitudes sur le changement climatique et la stratégie de réduction des émissions globales des GES.

De ces observations découlent la question de recherche suivante : Comment l'incertitude sur le niveau des émissions de GES et leurs effets peuvent-elles atténuer (ou intensifier) les engagements des pays concernant la réduction des gaz à effet de serre ? Ainsi, l'objectif général du présent article est de déterminer les effets de l'incertitude liée aux changements climatiques sur les comportements stratégiques entre pays en matière de réduction des émissions de GES. Il s'agira de déterminer les conditions qui pourraient entraîner une réduction ou une hausse des émissions globales des GES. Le défi théorique consiste à construire un modèle qui intègre à la fois l'incertitude sur le changement climatique et le comportement stratégique des pays.

L'hypothèse de recherche est la suivante : Globalement, l'incertitude peut accroître le bien-être global des pays, si l'effet positif de la réduction de leurs émissions est supérieur à l'effet négatif du comportement stratégique. De façon spécifique, en présence d'incertitude sur le niveau des émissions, deux réactions sont envisageables par les pays : (i) par prudence, les pays peuvent réduire leurs émissions (effet positif-effet de l'aversion pour le risque) et (ii) l'incertitude peut inciter les pays à être des « passagers clandestins » et de ce fait augmenter leurs émissions de GES (effet négatif-effet stratégique).

La présente approche est novatrice sur deux points. Premièrement, le modèle présenté est inspiré de celui de Gradstein et al. (1990) sur l'équilibre de Nash avec incertitude. Cependant, contrairement à eux, l'existence d'un équilibre unique est prouvée plutôt que de la supposer. Cela permet de déterminer le signe de l'effet de l'incertitude sur les émissions. L'objectif du présent article est également différent du leur. Alors, qu'ils établissent les conditions dans lesquelles la direction de l'effet de l'incertitude sur les variables choisies est la même dans l'équilibre de Nash que pour un décideur individuel, le présent article détermine les conditions dans lesquelles l'incertitude réduira les émissions et éventuellement, améliorera le bien-être.

Le modèle théorique proposé est plus général que ceux utilisés dans les recherches similaires qui étudient les questions dans un environnement plus général, ce qui permet une caractérisation plus riche des préférences au-delà des premières dérivées partielles (aversion au risque) des fonctions d'utilité et des relations stratégiques entre pays. Le modèle proposé n'impose pas à priori le type de relation entre pays. La concavité de la fonction d'utilité implique, en plus de l'aversion au risque, que les émissions des pays d'être peuvent être soit complémentaires ou substitués stratégiques (e.g., Bramoullé et Treich 2009). En outre, le modèle permet l'introduction des notions d'aversion à la corrélation, de prudence (signe de la dérivée de troisième degré), et de tempérance (signe de la dérivée de troisième degré), introduite par Eeckhoudt et al. (2007). En effets, ces ordres préférences supérieures pour le risque interagissent de manière complexe pour déterminer la direction de la réponse d'un agent économique à une augmentation de du risque. Par exemple, Lopez et al. (2020), prouvent que le niveau de pollution d'un agent économique croit avec le niveau d'incertitude économique sur la pollution, dépendamment de son degré d'aversion au risque et de prudence. Dans le domaine de la santé, Baiardi et al. (2020) montre que prudence, comme aversion pour le risque, permet d'expliquer la mise en œuvre de certaines interventions sanitaires (e.g., les programmes de dépistage) sont encouragées par le public malgré le niveau relativement faible de la probabilité préalable de maladie correspondante.

La suite du document se présente comme suit la section 1 présente le cadre théorique et les éléments constitutifs du modèle . La section 2 décrit le modèle théoriques et ses implications en termes de préférence. La section 3 présente les résultats qui porte, d'une part, sur la caractérisation des émissions socialement optimales fixées par un planificateur social dans le cadre d'un équilibre de Nash unique. D'autre part, cette section détermine les conditions dans lesquelles une augmentation de l'incertitude sur les dommages environnementaux réduira les émissions de gaz à effet de serre.

# 1. Le cadre théorique

La compréhension des effets des préférences en matière de risque sur la prise de décision des agents économiques (pays, consommateurs, etc.) en situation d'incertitude est un aspect important de l'analyse économique. Les recherches sur l'utilité espérée (Bernoulli 1738, Von. Neumann 1944) et l'aversion au risque, ont montré que cette dernière est importante pour les décisions économiques (Bernoulli, 1954, Pratt, 1964, et Arrow, 1965).

A la suite de ces auteurs, en complément à la notion d'aversion au risque, les recherches ont porté sur les préférences d'ordre supérieur que sont la prudence et la tempérance. Ces notions de prudence (Drèze et Modigliani, 1972, Kimball, 1990, Nocetti, 2015) et de tempérance (Pratt et Zeckhauser, 1987, Kimball, 1992) sont respectivement liées à la convexité (préférence pour l'asymétrie) de la troisième dérivée et à la concavité (aversion pour l'aplatissement) de la quatrième dérivée de la fonction d'utilité sous l'hypothèse d'utilité espérée. La prudence équivaut à une réduction de l'aversion pour le risque. La tempérance indique que la présence d'un risque antérieur rend un agent économique plus averse au risque.

En élargissant l'analyse univariée des préférences pour le risque, Eeckhoudt et al. (2007) ont démontré que les signes des dérivées partielles croisées successives (aversion pour la corrélation, prudence croisée, tempérance croisée) de l'utilité sont importants dans l'analyse des processus de décision en situation d'incertitude. Leurs résultats révèlent entre autres qu'un agent économique qui a une aversion pour les corrélations préfère toujours un jeu 50-50 de perte de richesse ou de santé à un autre jeu 50-50 qui offre une perte dans les deux attributs ou pas de perte.

Du point de vue empirique, des auteurs se sont intéressés aux effets de l'incertitude sur la l'offre de bien public. Sur ce sujet, la littérature concernant les préférences d'ordre supérieur en matière de risque nous permet de distinguer deux grandes catégories: un premier groupe s'intéressent particulièrement à l'effet de l'incertitude concernant une variable donnée sur le niveau de production d'un bien commun tel que la santé, l'environnement, etc. Lopez et al. (2020), par exemple, analyse

l'effet de l'incertitude économique sur la pollution d'un agent économique. Ils modélisent une fonction de production à deux variables (le capital et le niveau de pollution). Leurs résultats indiquent que le niveau de pollution croît avec le niveau d'incertitude économique en fonction du degré d'aversion au risque et de prudence du consommateur. Gollier et al. (2000), quant à eux, examinent comment l'aversion au risque et l'apprentissage peuvent expliquer les motifs de précaution lors de la mise en place d'une politique d'émissions.

Le deuxième groupe d'auteurs s'intéresse davantage au rôle du comportement stratégique entre différents agents économiques sur le niveau global de production des biens communs. Les résultats de ces différents travaux indiquent que les préférences d'ordre supérieur en matière de risque, la prudence et la tempérance, jouent un rôle important dans la décision des agents économiques à s'engager dans les activités risquées (Schneider et Sutter, 2021). Outre l'importance des préférences d'ordre supérieur, le niveau d'information des agents économiques s'avère important dans le processus de décision. Par exemple, les résultats de Kuusela et Laiho (2020) indiquent que si les pays ont une aversion au risque et ne coopèrent pas, il pourrait avoir un investissement inefficace et plus élevé dans l'information climatique lorsque les émissions prévues sont suffisamment importantes. En outre, si les niveaux d'émissions sont décidés de manière coopérative, les investissements dans l'équilibre non coopératif sont toujours trop faibles. De même Ulph et al (2018) s'interroge sur le rôle de l'apprentissage et de l'aversion au risque dans la décision des pays à coopérer (i.e., adhérer aux accords internationaux sur l'environnement).

## 2. Modèle d'analyse

Le modèle d'analyse à construire s'inscrit dans cette littérature économique comme une extension des modèles de d'interaction stratégique entre 2 pays (Bramoullé et Treich, 2009) à un modèle à  $n$  pays, avec  $n \geq 2$ . La qualité de l'environnement dépend des émissions globales de l'ensemble des pays et est soumise à un choc aléatoire (incertitude). Leur fonction d'utilité,  $U(e_i, q) = u(e_i + q)$ , est restrictive car elle suppose a priori la direction de la relation entre le niveau des émissions d'un pays et la qualité de l'environnement. En effet, une fonction d'utilité croissante et concave ( $u' > 0, u'' < 0$ ) indique que le pays a une aversion pour le risque par rapport à l'agrégateur linéaire  $e_i + q$  de sorte que (en l'absence d'incertitude) le pays considère les émissions et la qualité de l'environnement comme des substituts parfaits. Cela implique que les émissions et la qualité de l'environnement sont des substituts d'Edgeworth (puisque  $U_{eq} = u'' < 0$ ), ce qui les oblige à être des substituts stratégiques (Bulow et al., 1985).

Le présent article s'appuie sur une fonction d'utilité générale  $U(e_i, q)$  dont la seule restriction est la concavité avec deux conséquences importantes. Premièrement, elle permet une caractérisation beaucoup plus riche des préférences en matière de risque. En effet, compte tenu de la concavité, le pays a une aversion pour le risque par rapport aux deux arguments, les émissions et la qualité de de l'environnement, ( $U_{ee}, U_{qq} < 0$ ).

Cependant, nous permettons aux émissions d'être soient des substituts, soit des compléments d'Edgeworth. Le pays peut donc avoir une aversion pour la corrélation ( $U_{eq} \leq 0$ ) soit aimer les corrélations ( $U_{eq} \geq 0$ ) (Eeckhoudt et al., 2007). En outre, le pays peut être prudent ( $U_{eee} > 0$ ) ou imprudent ( $U_{eee} < 0$ ) (Kimball, 1990). Ces préférences en matière de risque interagissent de manière complexe pour déterminer la direction de la réponse du pays à une augmentation de l'incertitude environnementale. Deuxièmement, le fait de permettre aux émissions et à la qualité de l'environnement d'être des compléments d'Edgeworth leur permet également d'être des compléments stratégiques.

Le fait qu'ils soient des substituts stratégiques ou des compléments stratégiques déterminera l'ampleur de la réponse au risque. En effet, la complémentarité stratégique induit des effets "multiplicateurs" bien connus.

## 2.1. Émissions et qualité de l'environnement

Chaque pays  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) s'engage dans des émissions  $e_i \geq 0$ . Un pays tire des bénéfices de ses émissions, mais contribue ainsi à la dégradation de la qualité de l'environnement. A l'instar de Bramoullé et Treich (2009), nous supposons que le bénéfice des émissions est simplement égal au taux d'émission.

La qualité de l'environnement  $q$  dépend des émissions totales de tous les pays,  $\sum_{i=1}^n e_i$  et est soumise à un choc aléatoire (incertitude) :

$$q = \bar{q} - \theta d(\sum_{i=1}^n e_i). \quad (1)$$

Avec :

- $\bar{q}$  est le niveau maximal de qualité environnementale, ce qui correspond à un environnement vierge.
- La fonction  $d(\sum_{i=1}^n e_i)$  est la fonction de dommage. Elle est croissante et convexe en fonction des émissions totales, de sorte que  $d' > 0, d'' \geq 0$ . En outre, il n'y a pas de dégradation de l'environnement lorsqu'il n'y a pas d'émissions, donc  $d(0) = 0$ .
- Les dommages causés par les émissions sont incertains : les dommages dans chaque pays sont soumis à un choc multiplicatif  $\theta_i$  supposé être non négatif. Les chocs étant supposés identiques *ex ante*, nous écrirons dorénavant  $\theta_i = \theta$ . Cette spécification de la technologie est identique à celle de Bramoullé et Treich (2009), mais nous incorporons la dotation en qualité environnementale  $\bar{q}$ .

## 2.2. Fonction d'utilité et préférences

Chaque pays  $i$  tire son bien-être à la fois de ses émissions et de la qualité de l'environnement selon la fonction d'utilité  $U(e_i, q)$  croissante et concave dans les deux sens. La concavité implique une aversion au risque vis-à-vis des deux attributs (émissions et la qualité de l'environnement). Mathématiquement cela s'illustre par  $U_{ee} < 0, U_{qq} < 0$ . Dans la suite des analyses, tous les pays partagent les mêmes ordres de préférences.

La dérivée partielle croisée  $U_{eq}$  jouera également un rôle important dans la présente analyse selon qu'elle est positive ( $U_{eq} > 0$ ) ou négative ( $U_{eq} < 0$ ) (Amir, 2005). Effet, le signe de la dérivée partielle croisée affecte le comportement des pays de deux manières distinctes : dans un monde sans incertitude, le signe de  $U_{eq}$  détermine si les émissions et la qualité de l'environnement sont des compléments de Edgeworth ( $U_{eq} > 0$ ) ou des substituts ( $U_{eq} < 0$ ). Étant donné qu'une augmentation des émissions par un autre Pays réduit la qualité de l'environnement, la complémentarité d'Edgeworth est une condition suffisante pour que les émissions des différents pays soient des *substituts stratégiques* (Bulow et al., 1985)- en d'autres termes, les fonctions de réaction auront une pente négative et le jeu sera sous-modulaire. Toutefois, si les émissions et la qualité de l'environnement sont des substituts d'Edgeworth suffisamment forts, il est possible que les émissions dans différents Pays soient des *compléments stratégiques*, de sorte que le jeu sera super-modulaire. Il est important à cet égard de noter à quel point la fonction d'utilité utilisée par Bramoullé et Treich (2009) est restrictive. Si comme ils le supposent,  $u(e_i + q)$ , les émissions et la qualité de l'environnement soient des substituts de Edgeworth en raison de l'utilité marginale décroissante,  $U_{eq} = u'' < 0$  alors cela exclut la possibilité d'une complémentarité stratégique. Leur fonction d'utilité est une transformation concave de l'agrégateur *linéaire*  $e_i + q$ .

Ils supposent donc que les préférences ordinales entre les émissions et la qualité de l'environnement sont des substituts parfaits.

Aussi, dans un monde d'incertitude, le signe de la dérivée partielle  $U_{eq}$  permet également de déterminer si les préférences sont *averses à la corrélation* ( $U_{eq} \leq 0$ ) ou aiment *les corrélations* ( $U_{eq} \geq 0$ ). En s'appuyant sur les conclusions d'Eeckhoudt et al. (2007), un agent économique aura une aversion pour la corrélation s'il préfère un pari 50-50 d'une perte de son niveau d'émission (ou d'une détérioration de l'environnement  $q$ ) à un pari 50-50 d'une perte des deux ou d'une perte d'aucun des deux. Intuitivement, l'aversion pour la corrélation signifie qu'en profitant des avantages d'une augmentation des émissions, le pays peut atténuer la perte liée à une réduction de la qualité de l'environnement.<sup>1</sup> Inversement, un pays qui aime la corrélation perçoit une augmentation des émissions comme une aggravation de la perte de qualité de l'environnement. Le fait qu'un pays ait une aversion pour les corrélations ou qu'il aime les corrélations sera un élément important dans la manière dont il réagit à l'incertitude concernant la qualité de l'environnement. Au contrario, une fonction d'utilité  $U(e_i, q) = u(e_i + q)$ , implicitement confond l'aversion au risque et l'aversion à la corrélation. En effet, comme  $Signe(U_{ee}, U_{qq}, U_{eq}) = Signe(u'') < 0$ .

Les troisièmes dérivés de la fonction d'utilité affecteront également la manière dont un pays réagit au risque. En adaptant la terminologie de Kimball (1990), nous dirons qu'un pays est prudent en matière d'émissions si  $U_{eee} > 0$  et qu'il est prudent en ce qui concerne la qualité de l'environnement si  $U_{qqq} > 0$ . Toutefois, une dérivée croisée de troisième ordre jouera également un rôle : un pays *fait preuve d'une prudence croisée en matière de qualité de l'environnement* si  $U_{eqq} \geq 0$ .<sup>2</sup> Un pays qui fait

<sup>1</sup> Nous paraphrasons la discussion intuitive d'Eeckhoudt, Ray et Schlesinger (2007). Formellement, laissez  $k \in [0, e]$  et  $c \in [0, q]$  deux constantes et désignons une loterie définie sur les résultats  $(\hat{e}, \hat{q})$  ou  $(e, \check{q})$  par  $[(\hat{e}, \hat{q}), (\check{e}, \check{q})]$  où les résultats se produisent avec la même probabilité. L'aversion pour la corrélation implique que  $[(e_i - k, q), (e_i, q - c)] \succ [(e_i, q), (e_i - k, q - c)]$ . Ils montrent que cela équivaut à  $U_{eq} \leq 0$  si les préférences peuvent être représentées par une fonction d'utilité différentiable à l'ordre requis.

<sup>2</sup> si  $U_{eqq} \leq 0$  alors le pays fait preuve d'une imprudence croisée en matière de qualité environnementale

preuve d'une prudence croisée en matière de qualité environnementale préférera un pari à parts égales entre un choc aléatoire sur les émissions ou une diminution non aléatoire de la qualité environnementale à un pari à parts égales entre le maintien des mêmes niveaux des deux attributs ou un choc aléatoire sur les émissions et une diminution non aléatoire de la qualité environnementale. Intuitivement, un niveau d'émission plus élevé atténue l'impact négatif du risque environnemental.<sup>3</sup> Avec un l'agrégateur linéaire  $ei+q$  comme argument de la fonction d'utilité, la prudence et prudence croisée sont confondues,  $Signe (U_{eee}, U_{qqq}, U_{eqq}) = Signe (u''')$ .

### 3. Résultats

Les résultats montrent dans un premier temps les émissions socialement optimales fixées par un planificateur social dans le cadre d'un équilibre de Nash unique. Dans un temps, les conditions dans lesquelles une augmentation de l'incertitude sur les dommages environnementaux réduira les émissions de gaz à effet de serre sont exposés

#### 3.1. Conditions d'existence d'un Équilibre de Nash en présence d'incertitude sur les émissions de GES

Nous considérerons à la fois les émissions qui seraient choisies par un planificateur social maximisant le bien-être et les émissions déterminées dans un équilibre de Nash.

---

<sup>3</sup> Nous exprimons à nouveau la discussion d'Eeckhoudt, Ray et Schlesinger (2007) en termes de deux biens dans notre modèle. Formellement, considérons la même perte dans l'argument du bénéfice  $k \in [0, e_i]$  ou de la qualité de l'environnement  $c \in [0, q]$  et imaginons maintenant un choc aléatoire  $\tilde{\theta}$  sur les émissions. La prudence croisée en matière de qualité de l'environnement, exprimée sous forme de loterie, implique que  $[(e, q + \tilde{\theta}), (q - k, q)] \succ, [(e, q), (e - k, q + \tilde{\theta})]$ . Ils montrent que si les préférences peuvent être exprimées à l'aide d'une fonction d'utilité comportant jusqu'à des dérivées d'ordre 3, cela équivaut à  $U_{eqq} \geq 0$  pour tout  $e$  et  $q$ .

Supposons que le bien-être social est simplement la somme des utilités de tous les pays. Les préférences étant identiques, il faut se focaliser sur un profil symétrique  $e_i = e, \forall i$ .

La métrique du bien-être est alors simplement

$$W(e) = nE_{\theta}U[e, \bar{q} - \theta d(ne)] \quad (2)$$

Un planificateur social maximise le bien-être en mettant sur un pied d'égalité les avantages marginaux attendus des émissions et les coûts sociaux marginaux attendus. Il choisit donc les émissions  $e^W$  de telle sorte que

$$E_{\theta}\varphi(e^W, \theta) = E_{\theta}\{U_e[e^W, \bar{q} - \theta d(ne^W)] - nE_{\theta}\theta d'(ne^W)U_q[e^W, \bar{q} - \theta d(ne^W)]\} = 0. \quad (3)$$

Il convient de noter que les coûts marginaux attendus sont pondérés par le nombre de pays,  $n$ . Pour référence future, nous notons la condition de second ordre pour le problème du planificateur,

$$E_{\theta}\varphi_e(e, \theta) = E_{\theta}\left(U_{ee} - 2n\theta d'U_{eq} + \theta^2 n^2 d'^2 U_{qq} - \theta d''U_q\right) < 0. \quad (4)$$

La concavité de  $U(e, q)$  et la convexité de  $d(ne)$  garantissent que cette condition est remplie. Dénotons le niveau socialement optimal d'émissions par  $e^W$ .

Supposons maintenant que les pays jouent un jeu en matière d'émissions. Par souci de simplicité, nous nous concentrons sur un jeu symétrique, puisque le comportement asymétrique n'est pas crucial pour le problème des biens communs. Chaque pays choisit ses émissions de manière à maximiser son utilité attendue, compte tenu des émissions des autres pays.

Pour ce faire, il émet jusqu'au point où l'avantage marginal de l'émission,  $E_\theta U_e^i(e_i, q)$  est égal au coût marginal privé attendu  $E_\theta \theta d'U_q^i(e_i, q)$ . Il en résulte les conditions de premier ordre suivantes

$$E_\theta \phi^i(e^N, \theta) = E_\theta \{E_\theta U_e^i(e_i^N, q) - E_\theta \theta d'U_q^i(e_i^N, q)\} = 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

L'équilibre de Nash consiste en un vecteur d'émissions  $e^N = (e_1^N, e_2^N, \dots, e_n^N)$  qui satisfait ce système d'équations. La condition de second ordre pour le problème de chaque pays est la suivante :

$$E_\theta \phi_{e_i}^i = E_\theta [U_{e_i e_i}^i - 2\theta d'U_{e_i q}^i + \theta^2 d'^2 U_{qq}^i - \theta d''/q] < 0, \quad (6)$$

où les arguments des dérivées sont les mêmes que dans l'équation (5). L'application du théorème de Gale-Nikaido (1965)<sup>4</sup> permet de prouver l'existence et l'unicité de l'équilibre (cf., Annexe 1 pour les dérivations).

Considérons  $\alpha_i$  et  $\beta_i$ , avec :

- $\alpha_i = E_\theta [U_{ee}^i - \theta d'U_{eq}^i] \quad (7)$
- $\beta_i = -E_\theta [\theta d'U_{eq}^i + \theta d''U_q^i - (\theta d')^2 U_{qq}^i]. \quad (8)$

Le jacobien  $J$  du système d'équations (5) peut alors être exprimé comme suit

---

<sup>4</sup> Voir la discussion lucide dans Friedman (1990), ainsi que l'énoncé succinct du théorème dans Sydsæter, Strøm et Berck. (2005).

$$J = \begin{pmatrix} \alpha_1 + \beta_1 & \beta_1 & \dots & \beta_1 \\ \beta_2 & \alpha_2 + \beta_2 & \dots & \beta_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_n & \beta_n & \dots & \alpha_n + \beta_n \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Les éléments diagonaux du jacobien enregistrent les effets des émissions de chaque pays  $i$  sur ses bénéfices marginaux nets ;  $\alpha_i + \beta_i = E_\theta \phi_{e_i}^i < 0$  par les conditions de second ordre du problème de maximisation de chaque pays [cela correspond à la condition de second ordre pour le planificateur dans l'inégalité (4)].

Les éléments hors diagonale  $\beta_i = \phi_j^i, j \neq i$ , capturent les effets des émissions des autres pays sur les bénéfices marginaux nets du pays  $i$  :

- si  $\beta_i < 0$  les émissions des autres pays sont des substituts stratégiques à celles du pays  $i$
- Si  $\beta_i > 0$  elles sont des compléments stratégiques.

Il convient de noter que  $U_{e_q}^i > 0$  (super-modularité) est une condition suffisante pour la substituabilité stratégique. Cependant, si  $U_{e_q}^i$  est suffisamment négatif, il est possible que les émissions soient des compléments stratégiques.

Puisque les préférences sont identiques, un équilibre intérieur doit nécessairement être symétrique, de sorte que  $\alpha_i = \alpha$  et  $\beta_i = \beta$ . Dans l'annexe A, nous prouvons que

**Proposition 1 :** *Il existe un équilibre de Nash unique, intérieur et symétrique  $e^N = (e_1^N, \dots, e_n^N)$  si  $\alpha^{j-1}[\alpha + j\beta]$  alterne en signe négatif, positif, négatif, . . . , pour  $j = 1, \dots, n$ .*

**De plus, ces conditions seront satisfaites si et seulement si  $\alpha < 0$  et  $\alpha + j\beta < 0$ .**

Une condition suffisante pour  $\alpha < 0$  [voir l'équation (7)] est que, pour chaque réalisation de  $\theta$ , si les émissions et la qualité de l'environnement sont des substituts ( $U_{e_q} < 0$ ) elles doivent être si fortement substituables

qu'elles dominent les effets de la diminution de l'utilité marginale (de sorte que  $U_{ee} - \theta d'U_{eq} < 0$ ).

La restriction  $\alpha + j\beta < 0$  est satisfaite automatiquement si les émissions sont des substituts stratégiques ( $\beta < 0$ ). Toutefois, la complémentarité stratégique ( $\beta > 0$ ) est compatible avec l'équilibre tant que la complémentarité n'est pas trop forte.

Une condition suffisante pour  $\alpha + j\beta < 0$  (voir l'Équation 8) est que, quel que soit le niveau de  $\theta$ ,  $U_{ee} - \theta d'U_{eq} + j \left[ \theta d' U_{eq}^i + \theta d'' U_q^i - (\theta d')^2 U_{qq}^i \right] < 0$ .

En d'autres termes, il y aura un équilibre unique tant que les émissions seront soit super-modulaires, ou pas trop fortement sous-modulaires.

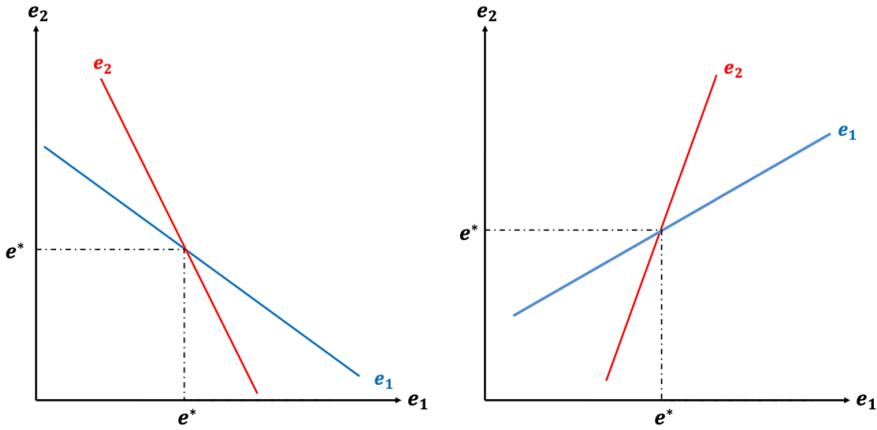
Du point de vue géométrique la proposition 1 a une interprétation éclairante dans un plan à 2 dimensions ( $j = 2$ ).

Supposons, en effet, qu'il y ait deux pays 1 et 2. La proposition 1 affirme alors qu'il existe un équilibre unique si  $\alpha + \beta < 0$  et  $\alpha(\alpha + 2\beta) > 0$ . La première inégalité  $\alpha + \beta < 0$  découle de la condition de second ordre pour chaque pays.

Pour comprendre le sens du second terme  $\alpha(\alpha + 2\beta) >$ , considérons les pentes des fonctions de réaction pour les deux pays :  $\left. \frac{de_2}{de_1} \right|_1 = -\frac{\alpha+\beta}{\beta}$  et  $\left. \frac{de_2}{de_1} \right|_2 = -\frac{\beta}{\alpha+\beta}$ . La condition  $\alpha(\alpha + 2\beta) > 0$  exige simplement qu'une fonction de réaction soit plus raide que l'autre.

Si  $\beta > 0$  les fonctions de réaction sont à pente positive. La Figure 1 illustre les fonctions de réaction dans les cas où les émissions entre les deux pays sont complémentaires ou substituts stratégiques.

**Figure 1: Fonctions de réaction**



**A. Substituts Stratégiques**

**B. Compléments Stratégiques**

Nous nous arrêtons pour établir un résultat évident mais important. Puisque l'équilibre est symétrique, nous pouvons écrire  $U^i = U$  et réduire le système de l'équation (5) à une seule équation

$$E_{\theta}\phi(e^N, \theta) = E_{\theta}\{U_e[e^N, \bar{q} - \theta d(ne^N)] - \theta d'(ne^N)U_q[e^N, \bar{q} - \theta d(ne^N)]\} = 0. \quad (10)$$

Chaque pays assimile le bénéfice marginal attendu des émissions aux coûts *privés* attendus. Ceci doit être comparé à la condition de premier ordre du planificateur, dans l'équation (3), où les coûts sociaux marginaux attendus sont proportionnels au nombre de pays,  $n$ . Nous pouvons alors déduire :

**Proposition 2 : Les émissions dans l'équilibre de Nash dépassent toujours le taux d'émissions socialement optimal ( $e^N > e^W$ ).**

## 3.2. Émissions et incertitude

L'incertitude quant aux dommages potentiels que pourraient causer nos émissions devrait-elle nous inciter à moins polluer ? Comment cette incertitude relative à ces dommages affecte-t-elle le taux d'émission lorsque les pays agissent de manière stratégique ? Pour répondre à ces questions, nous examinerons les effets d'une augmentation du risque, au sens de Rothschild et Stiglitz (1970), sur le taux d'émission socialement optimal et sur l'équilibre de Nash.

### 3.2.1. Incertitude sur les dommages environnementaux et comportement du planificateur social

Pour être précis, supposons que la distribution de  $\theta$  est initialement de  $g(\theta)$  et désignons les émissions socialement optimales associées à cette distribution par  $e_g^W$ .

Laissons la distribution de  $\theta$  se transformer en  $h(\theta)$  où  $h(\theta)$  est un étalement préservant la moyenne de  $g(\theta)$ .

Notons les émissions socialement optimales associées à  $h(\theta)$  par  $e_h^W$ . Nous nous intéressons à la question de savoir si l'augmentation du risque commande une diminution des émissions : Quand est-ce que  $e_h^W < e_g^W$  ?

Initialement, étant donné  $g(\theta)$  le planificateur choisit les émissions de manière à ce que  $E_\theta \varphi(e_g^W, \theta) = 0$ . Intuitivement, nous savons, grâce à des arguments standard de dominance stochastique, que l'écart préservant la moyenne diminuera  $\varphi(e, \theta)$  si  $\varphi(e, \theta)$  est concave en  $\theta$ , de sorte que  $E_\theta \varphi(e_g^W, \theta) < 0$ . Si  $\varphi(e, \theta)$  est décroissante en  $e$  alors pour retrouver  $E_\theta \varphi(e_h^W, \theta) = 0$  le planificateur doit réduire les émissions, de sorte que  $e_h^W < e_g^W$ . En adaptant la formulation de Gradstein et al. (1992), nous pouvons dire plus généralement que

$$\text{Sign}(e_g^W - e_h^W) = \text{Sign}(\varphi_{\theta\theta})\text{Sign}(\varphi_e). \quad (11)$$

Nous savons que  $\varphi_e < 0$  grâce à la condition de second ordre de l'inégalité (4). La question se réduit donc à évaluer le signe de  $\varphi_{\theta\theta}$ .

Un peu d'algèbre révèle que :

$$\varphi_{\theta\theta} = d^2 \left[ U_{eqq} - n\theta d'U_{qqq} + 2n \frac{d'}{d} U_{qq} \right]. \quad (12)$$

A l'instar de Dardanoni (1998), cette expression peut être utilement décomposée en deux parties.

- $2n \frac{d'}{d} U_{qq}$  correspond à ce que Dardanoni (1998) appelle "*l'effet de substitution de l'incertitude*". Cet effet est négatif, si l'on suppose que les gens ont une aversion pour le risque en ce qui concerne la qualité de l'environnement ( $U_{qq} < 0$ ). L'aversion pour le risque fait sans ambiguïté baisser les émissions socialement optimales lorsque l'incertitude augmente.
- Les deux premiers termes ( $U_{eqq} - n\theta d'U_{qqq}$ ) constituent ce que Dardanoni (1998) appelle "*l'effet de revenu d'incertitude*". Celui-ci dépend à son tour de deux facteurs,  $U_{qqq}$  et  $U_{eqq}$ . Si les gens sont prudents  $U_{qqq} \geq 0$  l'effet de l'aversion au risque est renforcé. Cependant, si les gens sont prudents de manière croisée  $U_{eqq} \geq 0$  en ce qui concerne la qualité de l'environnement, une augmentation de l'incertitude tend à accroître l'utilité marginale des émissions.

Cela conduit à

***Proposition 3.*** *Une augmentation de l'incertitude sur les dommages environnementaux des émissions augmentera (réduira) le taux d'émissions socialement optimal si  $U_{eqq} - n\theta d'U_{qqq} + 2n \frac{d'}{d} U_{qq}$  est positif (négatif).*

On pourrait penser qu'un planificateur ayant une aversion pour le risque réduirait toujours les émissions en réponse à l'incertitude environnementale. Cependant, la proposition 3 établit qu'un planificateur suffisamment prudent pourrait en fait *augmenter les émissions* en réponse à un risque plus important concernant leur effet sur la qualité de l'environnement.<sup>5</sup>

Pour rendre cette question plus concrète, il peut être utile d'envisager un "petit" risque.

Définir  $\theta = \bar{\theta} + \sigma\varepsilon$  où  $E\varepsilon = 0$  et  $var(\varepsilon) = 1$ , de sorte qu'un petit  $\sigma$  implique un petit risque pour  $\theta$ . Définir le taux d'émission socialement optimal en l'absence d'incertitude ( $\sigma = 0$ ) en  $\bar{e}^W$ . En prenant une série de Taylor de l'équation (3) autour de  $e^W = \bar{e}^W$  et autour de  $\varepsilon = 0$  donne alors

$$e^W = \bar{e}^W - \frac{\varphi_{\theta\theta} \sigma^2}{\varphi_e} \frac{\sigma^2}{2}. \quad (13)$$

Les fonctions  $\varphi_{\theta\theta}$  et  $\varphi_e$  sont bien sûr évaluées à  $\sigma = 0$ . Puisque  $\varphi_e < 0$  l'incertitude ne réduit les émissions par rapport au cas sans incertitude que si  $\varphi_{\theta\theta} < 0$ , comme l'affirme la proposition 3. C'est ce qui se produira à moins que le pays ne fasse preuve d'une très grande prudence croisée.

### 3.2.2. Modification de l'équilibre de Nash en présence d'incertitude sur les dommages environnementaux

Examinons maintenant les effets de l'incertitude de l'impact des émissions sur l'équilibre de Nash. Notons  $e_g^N$  les émissions dans l'équilibre de Nash symétrique pour la distribution la moins risquée  $g(\theta)$  et par  $e_h^N$  les émissions de l'équilibre pour la distribution la plus risquée

---

<sup>5</sup> Bramoullé et Treich (2009) attribuent cette ambiguïté à la prudence. En effet, leurs préférences  $u(e + q)$  imposent  $U_{eqq} = U_{qqq} = u'''$ . En fait, c'est la prudence croisée qui génère l'ambiguïté, si les gens sont prudents,  $U_{qqq} > 0$ .

$h(\theta)$ . Rappelons que l'équation (5) indique que la condition de premier ordre pour chaque pays  $i$  est  $E_{\theta}\phi^i(e^N, \theta) = 0$ .

En suivant le même raisonnement que dans la section précédente, il s'ensuit que le signe de l'effet de l'augmentation du risque sur les émissions d'équilibre est déterminé par

$$\text{Sign}(e_g^N - e_h^N) = \text{Sign}(\phi_{\theta\theta}^i)\text{Sign}(\phi_e^i) \quad (14)$$

Cela correspond, *mutatis mutandis*, à l'équation (3) de Gradstein *et al.* (1992). Considérons successivement les deux termes du côté droit de (14).

Gradstein *et al.* (1992,) soulignent que la dérivée  $\phi^i$  doit tenir compte du fait que *tous les pays* modifient leurs émissions, ainsi que du fait que les pays  $i$ . En d'autres termes,  $\phi_e^i$  est la dérivée de  $\phi^i$  par rapport au taux commun d'émissions  $e^N$  dans l'équilibre symétrique. Il s'avère que cette dérivée est

$$\phi_e^i = \left[ U_{e_i e_i}^i - 2\theta d' U_{e_i q}^i + \theta^2 d'^2 U_{qq}^i - \theta d''/q \right] - (n-1)[\theta d' U_{e q}^i + \theta d'' U_q^i - (\theta d')^2 U_{qq}^i]. \quad (15)$$

Le premier terme est simplement la condition de second ordre de l'inégalité (6), il est donc négatif. Le second terme est la variation de l'utilité marginale des émissions du pays  $i$  causée par un changement dans les émissions du pays  $j$ ,  $\partial^2 U^i / \partial e_i \partial e_j$ . Gradstein *et al.* (1992) affirment que, parce que  $U_{e q}^i$  peut être négatif, ce terme est de signe indéterminé. En fait, cette ambiguïté apparente provient du fait qu'ils ont supposé l'existence d'un équilibre ; elle disparaît une fois que les conditions d'existence de notre proposition 1 sont imposées.

Pour s'en convaincre, il suffit de prendre l'espérance de l'équation (14) et d'appliquer les définitions des équations (7) et (8) :

$$E_{\theta}\phi_e^i = \alpha_i + \beta_i + (n - 1)\beta_i \quad (16)$$

Dans un équilibre symétrique, où  $\alpha_i = \alpha$  et  $\beta_i = \beta$ , cela se réduit à  $E_{\theta}\phi_e^i = \alpha + n\beta$ . Cependant, la proposition 1 affirme que  $\alpha + n\beta < 0$  est une condition suffisante pour l'existence de l'équilibre. Il est clair que si  $\phi_e^i < 0$  pour toutes les réalisations de  $\theta$  alors  $E_{\theta}\phi_e^i = \alpha + n\beta < 0$ . Cependant  $\phi_e^i < 0$  est exactement la restriction imposée par l'équation (10) pour garantir l'existence de l'équilibre. En d'autres termes, la condition suffisante d'existence élimine l'ambiguïté concernant le second terme de l'inégalité (15).

Considérons maintenant  $\phi_{\theta\theta}^i$ . Des calculs simples révèlent que

$$\phi_{\theta\theta}^i = d^2 \left[ U_{eqq}^i - \theta d'U_{qqq}^i + 2 \frac{d'}{a} U_{qq}^i \right] \quad (17)$$

Ceci doit être comparé à la condition (13) pour le planificateur. Dans ce cas, « l'effet de substitution de l'incertitude » est négatif en raison de l'aversion pour le risque. « L'effet de revenu d'incertitude » dépend du signe de  $U_{eqq}^i - \theta d'U_{qqq}^i$ . La prudence à l'égard de la qualité de l'environnement  $U_{qqq}^i \geq 0$  tend également à le rendre négatif. Notez cependant que cet effet est plus important pour le planificateur et qu'il augmente avec le nombre de pays.

La prudence croisée  $U_{eqq}^i \geq 0$  compense les effets de l'aversion pour le risque et de la prudence, et peut en principe rendre l'aversion pour le risque négative.  $\phi_{\theta\theta}^i > 0$ . Cela conduit à

***Proposition 4.*** Une augmentation de l'incertitude sur les dommages environnementaux des émissions augmentera (réduira) les émissions dans l'équilibre de Nash lorsque  $U_{eqq} - n\theta d'U_{qqq} + 2n \frac{d'}{d} U_{qq}$  est positif (négatif).

Il est à nouveau instructif d'exprimer ceci pour un risque faible. Si nous désignons l'équilibre de Nash en l'absence d'incertitude par  $\bar{e}^W$  nous pouvons dire que localement

$$e^N = \bar{e}^N - \frac{\phi_{\theta\theta} \sigma^2}{\phi_e} \frac{1}{2}. \quad (18)$$

Comme précédemment, tant  $\phi_{\theta\theta}$  et  $\phi_e$  sont évaluées à la moyenne de  $\theta$ . Étant donné que  $\phi_e < 0$  l'incertitude réduira les émissions tant que  $\phi_{\theta\theta} < 0$ . Si l'on suppose que les pays ont une aversion pour le risque et sont prudents, cela se produira - comme dans le cas du planificateur - à moins qu'ils ne fassent également preuve d'une grande prudence croisée.

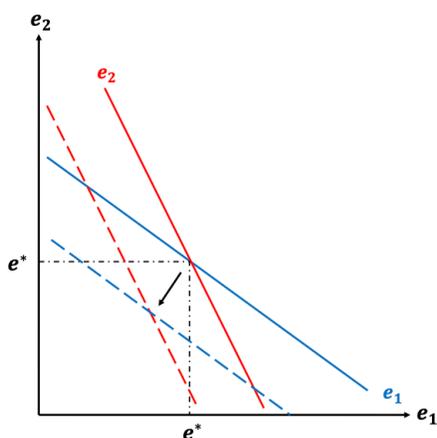
L'équation (19) nous apprend également quelque chose d'autre. Regardez la définition de  $\phi_e$  dans l'équation (16), et rappelez-vous que si  $-\left[\theta d' U_{eq}^i + \theta d'' U_q^i - (\theta d')^2 U_{qq}^i\right] > 0$  - en d'autres termes, si  $\beta_i > 0$  - les émissions sont des compléments stratégiques. Désignons maintenant par  $e_{sub}^N$  les émissions d'équilibre lorsque les émissions sont des substituts stratégiques et par  $e_{comp}^N$  l'équilibre correspondant lorsque les émissions sont des compléments stratégiques. La complémentarité stratégique rend le dénominateur du dernier terme de l'équation (19) moins négatif, de sorte que  $-\phi_{\theta\theta}/\phi_e$  augmente. Nous avons donc :

***Proposition 5.*** La complémentarité stratégique amplifie les effets du risque sur les émissions, tandis que la substituabilité stratégique les atténue. En d'autres termes,  $|\partial e_{comp}^N / \partial \sigma| > |\partial e_{sub}^N / \partial \sigma|$ .

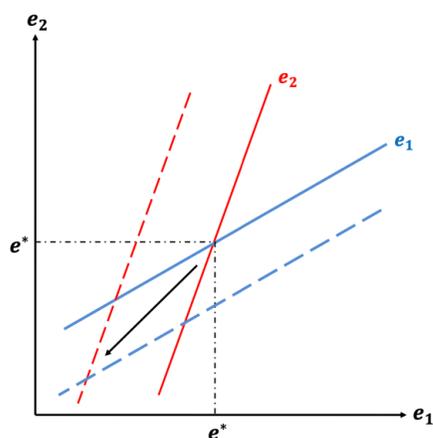
L'interprétation géométrique est simple, comme le montre la figure 2. Cependant, elle pourrait avoir d'importantes implications politiques. La complémentarité stratégique a le potentiel d'amplifier considérablement les effets du risque climatique, pour le meilleur ou pour le pire. Cela nous amène à la question du risque et du bien-être.

**Figure 2: Impact du risque sur niveau d'équilibre des émissions**

**A. Substituts Stratégiques**



**B. Compléments Stratégiques**



**3.3. Effets des incertitudes sur le bien être**

Bramoullé et Treich (2009) soulignent que l'incertitude affecte le bien-être à la fois directement (en affectant la taille des dommages) et indirectement (en modifiant les émissions). Intuitivement, l'effet direct devrait réduire le bien-être. Est-il donc possible que l'incertitude entraîne une baisse des émissions si importante, dans un cadre stratégique, que l'optimum social augmente?

Afin de répondre à cette question, considérons la fonction de bien-être définie dans l'équation (2), mais évaluée à l'équilibre de Nash. Nous utilisons le même petit risque que celui présenté dans la section précédente,  $\theta = \bar{\theta} + \sigma\varepsilon$  avec  $E\varepsilon = 0$  et  $var(\varepsilon) = 1$ .

Le bien-être est alors

$$W(e^N) = n E_\theta U[e^N, 1 - (\bar{\theta} + \sigma\varepsilon)d(ne^N)]. \quad (19)$$

Prenons une série de Taylor du second ordre autour de l'équilibre de Nash sans risque  $e^N = \bar{e}^N$  et autour de  $\varepsilon = 0$  pour trouver

$$W(e^N) - W(\bar{e}^N) = n[U_e - \bar{\theta}d/U_q - (n-1)U_q](e^N - \bar{e}^N) + n^2 U_{qq} \frac{\sigma^2}{2}. \quad (20)$$

Nous pouvons cependant appliquer le théorème de l'enveloppe pour voir que  $U_e - \bar{\theta}d/U_q = 0$ . Nous pouvons également utiliser l'équation (18) pour réécrire l'équation (20) comme suit

$$W(e^N) - W(\bar{e}^N) = (n-1)U_q \frac{\phi_{\theta\theta} \sigma^2}{\phi_e} \frac{1}{2} + n^2 U_{qq} \frac{\sigma^2}{2}. \quad (21)$$

Le deuxième terme du côté droit de l'équation (21) est l'effet direct du risque. Il est sans ambiguïté négatif en raison de l'aversion au risque. Remarquez que son ampleur augmente avec le carré du nombre de pays.

Le premier terme est l'effet stratégique du risque. Remarquez que son ampleur (en valeur absolue) augmente linéairement avec le nombre de pays. Rappelons que  $\phi_e < 0$ . Il y a alors deux cas à considérer, selon le signe de  $\phi_{\theta\theta}$ .

Supposons d'abord que  $\phi_{\theta\theta} < 0$ . La proposition 3 a montré qu'une augmentation du risque réduira les émissions et tendra donc à augmenter le bien-être. Dans ce cas, les effets directs et indirects poussent dans des directions opposées. Il est possible que le bien-être augmente en fait. C'est la possibilité envisagée par Bramoullé et Treich (2009).

Si, toutefois, la proposition 3 affirme que l'augmentation du risque augmentera les émissions et réduira donc le bien-être,  $\phi_{\theta\theta} > 0$  alors la proposition 3 affirme que l'augmentation du risque *augmentera les émissions et réduira donc le bien-être*. Les effets directs et indirects du risque se renforcent mutuellement en réduisant le bien-être.

Dans les deux cas, la proposition 4 combinée à l'équation (21) nous indique que l'ampleur de l'effet sur le bien-être (en valeur absolue) sera plus importante en présence de complémentarité stratégique qu'en présence de substituabilité stratégique.

Nous pouvons résumer tout cela par

***Proposition 6.*** *Si  $\phi_{\theta\theta} > 0$  l'incertitude sur les dommages environnementaux des émissions réduit le bien-être. Si  $\phi_{\theta\theta} < 0$ , il est possible qu'elle augmente le bien-être. En outre, la valeur absolue du changement de bien-être sera plus importante en cas de complémentarité stratégique qu'en cas de substituabilité stratégique.*

## Conclusion

L'objectif du présent article est de montrer que l'incertitude sur les émissions de GES peut atténuer ou intensifier les engagements des pays, concernant la réduction des GES en fonction de l'aversion au risque. Nous avons établi qu'une augmentation de l'incertitude sur les dommages environnementaux causés par les émissions entraînera une diminution des émissions dans les pays si la fonction  $\phi_{\theta\theta}$  est négative. Cela se produit si les pays (1) ont une aversion pour le risque, (2) sont prudents et (3) ont une imprudence croisée ou ne sont pas terriblement imprudents. Il est donc possible de montrer que *a priori* que l'aversion au risque augmente le bien-être. Toutefois, l'ampleur de la réduction des émissions sera plus faible en présence d'une substituabilité stratégique. Il est plausible (Echazu et al, 2012) que les émissions et la qualité de l'environnement soient des compléments d'Edgeworth, ce qui nécessite une complémentarité stratégique. Ces derniers auraient tendance à réduire les avantages d'une réduction des émissions. Il ne faut pas oublier non plus que l'avantage stratégique du risque augmente linéairement avec le nombre de pays, tandis que l'effet direct de l'aversion au risque augmente avec le carré du nombre de pays. Il est donc peu probable que l'effet net du risque environnemental soit *a priori* d'accroître le bien-être. En conséquence, il est important pour les pays de s'engager et de mettre en œuvre les conventions internationales de limitations des gaz à effet de serre. En effet, par prudence, lorsque l'incertitudes sur les dommages causés et l'amplitude des changements climatiques augmentent, le bien être global de ces pays pourrait augmenter si les pays qui sont membres d'un accord multilatéral sur le climat (i.e., leurs émissions sont des compléments stratégiques). L'effet positif (réduction des émissions de GES) démunirait les effets négatifs induits par le phénomène de « passagers clandestins » qui tendent à augmenter les émissions de GES.

## Annexe A

Pour établir l'existence d'un équilibre unique, l'analyse se base sur la formulation du théorème de Gale-Nikaido (1965) dans Friedman (1990, p. 86).<sup>6</sup>

***Théorème de Gale-Nikaido (1965) :*** *Soit  $f(x)$  soit une fonction d'un ensemble convexe  $X \subset \mathbb{R}^m$  à  $\mathbb{R}^m$ . Si le jacobien de  $f$  est quasidéfini négatif pour tout  $x \in X$  alors  $f$  est un a un.*

Pour établir l'existence, nous devons dériver les conditions sous lesquelles le jacobien de l'équation (8) dans le texte est quasidéfini négatif. Par commodité, nous reproduisons l'équation (8) ici :

$$J = \begin{pmatrix} \alpha_1 + \beta_1 & \beta_1 & \dots & \beta_1 \\ \beta_2 & \alpha_2 + \beta_2 & \dots & \beta_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_n & \beta_n & \dots & \alpha_n + \beta_n \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

où

$$\alpha_i = E_\theta[U_{ee}^i - \theta d'U_{eq}^i] \quad (\text{A.2})$$

$$\beta_i = E_\theta[-\theta d'U_{eq}^i - \theta d''U_q^i + (\theta d')^2 U_{qq}^i]. \quad (\text{A.3})$$

Une matrice est quasi-définie négative si la somme de la matrice et de sa transposée est définie négative [Friedman (1990, p. 85)]. Construisez maintenant

---

<sup>6</sup> Pour d'autres versions du théorème, voir Parthasarathy (1983) et Sydsæter, Strøm et Berck (2005, pages 41 et 42).

$$J + J^T = \begin{pmatrix} 2(\alpha_1 + \beta_1) & \beta_1 + \beta_2 & \dots & \beta_1 + \beta_n \\ \beta_1 + \beta_2 & 2(\alpha_2 + \beta_2) & \dots & \beta_2 + \beta_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_1 + \beta_n & \beta_2 + \beta_n & \dots & 2(\alpha_n + \beta_n) \end{pmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Comme l'équilibre doit être symétrique,  $\alpha_i = \alpha$  et  $\beta_i = \beta$  de sorte que l'équation (A.4) devient

$$J + J^T = \begin{pmatrix} 2(\alpha + \beta) & 2\beta & \dots & 2\beta \\ 2\beta & 2(\alpha + \beta) & \dots & 2\beta \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 2\beta & 2\beta & \dots & 2(\alpha + \beta) \end{pmatrix} \quad (\text{A.5})$$

Pour que  $J + J^T$  soit défini négativement, ses mineurs principaux doivent alterner de signe : négatif, positif, négatif, etc.

Remarquez que le mineur principal de l'ordre  $j = 1, \dots, n$  peut est

$$|D_j| = (2\beta)^j \begin{vmatrix} \frac{\alpha}{\beta} + 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \frac{\alpha}{\beta} + 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & \frac{\alpha}{\beta} + 1 \end{vmatrix}. \quad (\text{A.6})$$

En appliquant maintenant le résultat 20.11 de Sydsæter, Strøm et Berck (2005, p. 143) :

$$|D_j| = (2\alpha)^j \left[ 1 + j \frac{\beta}{\alpha} \right]. \quad (\text{A.7})$$

La définition négative exige donc  $\alpha^{j-1}(\alpha + j\beta)$  à alterner en signe, négatif, positif, négatif, pour  $j = 1, \dots, n$  ce qui donne la proposition 1.

Les mineurs principaux ne seront alternés en signe que si et seulement si  $\alpha < 0$ . Ils alterneront en signe dans l'ordre approprié (négatif, positif, négatif, . . .) si et seulement si  $\alpha + j\beta$ .

## Références

- Amir, R. (2005). Supermodularity and complementarity in economics: An elementary survey. *Southern Economic Journal*, 71(3), 636-660.
- Arrhenius, S. (1896). On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science (London, Edinburgh, and Dublin)*, 5(41), p.251.
- Arrow, K.J. (1965). Aspects of the theory of risk bearing. *Yrjo Hahnsson Foundation*.
- Attema, A. E., l'Haridon, O., & van de Kuilen, G. (2019). Measuring multivariate risk preferences in the health domain. *Journal of health economics*, 64, 15-24.
- Berger, L. and Bosetti, V. (2020). Are policymakers ambiguity averse?. *The Economic Journal*, 130(626), pp.331-355.
- Bernoulli, D. (1954), Exposition of a new theory on the measurement of risk. *Econometrica* 22, 23–36
- Bernoulli, D. (2011). Exposition of a new theory on the measurement of risk. In *The Kelly capital growth investment criterion: Theory and practice* (pp. 11-24).
- Baiardi, D., Magnani, M., & Menegatti, M. (2020). The theory of precautionary saving: an overview of recent developments. *Review of Economics of the Household*, 18, 513-542.

- Bleichrodt, H. and Bruggen, P.V. (2022). The reflection effect for higher-order risk preferences. *Review of Economics and Statistics*, 104(4), pp.705-717.
- Bochet, O., Laurent-Lucchetti, J., Leroux, J. and Sinclair-Desgagné, B. (2019). Collective risk-taking in the commons. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 163, pp.277-296.
- Boucher, V. and Bramoullé, Y. (2010). Providing global public goods under uncertainty. *Journal of Public Economics*, 94(9-10), pp.591-603.
- Bramoullé, Y. and Treich, N. (2009). Can uncertainty alleviate the commons problem?. *Journal of the European Economic Association*, 7(5), pp.1042-1067.
- Bulow, J.I., Geanakoplos, J.D. and Klemperer, P.D. (1985). Multimarket oligopoly: Strategic substitutes and complements. *Journal of Political economy*, 93(3), pp.488-511.
- Dardanoni, V. (1988). Optimal choices under uncertainty: the case of two-argument utility functions. *The Economic Journal*, 98(391), pp.429-450.
- Echazu, L., Nocetti, D. and Smith, W.T. (2012). A new look into the determinants of the ecological discount rate: disentangling social preferences. *The BE Journal of Economic Analysis & Policy*, 12(1).
- Eeckhoudt, L., Rey, B. and Schlesinger, H. (2007). A good sign for multivariate risk taking. *Management Science*, 53(1), pp.117-124
- Friedman, J.W. (1986). Game theory with applications to economics. (*No Title*).
- Gale, D. and Nikaido, H. (1965). The Jacobian matrix and global univalence of mappings. *Mathematische Annalen*, 159(2), pp.81-93.

- Gradstein, M., Nitzan, S. and Slutsky, S. (1992). The effect of uncertainty on interactive behaviour. *The Economic Journal*, 102(412), pp.554-561.
- Heal, G.M. and Kriström, B., 2002. Uncertainty and climate change.
- Heinzel, C. (2023). Comparing utility derivative premia under additive and multiplicative risks. *Insurance: Mathematics and Economics*, 111, pp.23-40.
- Kuusela, O.P. and Laiho, T. (2020). The role of research in common pool problems. *Journal of Environmental Economics and Management*, 100, p.102287.
- Lopez, R.E., Pastén, R. and Cubillos, P.G. (2022). Climate change in times of economic uncertainty: A perverse tragedy of the commons?. *Economic Analysis and Policy*, 75, pp.209-225
- Parthasarathy, T. (2006). *On global univalence theorems* (Vol. 977). Springer.
- Salman, M., Long, X., Wang, G. and Zha, D. (2022). Paris climate agreement and global environmental efficiency: New evidence from fuzzy regression discontinuity design. *Energy Policy*, 168, p.113128.
- Seitz, F. (1994). *Global Warming and Ozone Hole Controversies: A Challenge to Scientific Judgment*. George C. Marshall Institute.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M. and Miller, H. (2007). IPCC fourth assessment report (AR4). *Climate change*, 374.
- Stearns, S.C., 2000. Daniel Bernoulli (1738): evolution and economics under risk. *Journal of biosciences*, 25(3), pp.221-228.
- Sydsæter, K., Strøm, A. and Berck, P. (2005). *Economists' mathematical manual* (Vol. 3). Berlin: Springer.

- Trautmann, S.T. and van de Kuilen, G. (2018). Higher order risk attitudes: A review of experimental evidence. *European Economic Review*, 103, pp.108-124.
- UNDP (2021). Nationally Determined Contributions (NDC) Global Outlook Report 2021: The State of Climate Ambition.
- Von Neumann, J. and Morgenstern, O. (1947). Theory of games and economic behavior, 2nd rev.
- Yohe, G., Andronova, N. and Schlesinger, M. (2004). To hedge or not against an uncertain climate future?. *Science*, 306(5695), pp.416-417.