

Une approche évolutionnaire des négociations internationales en présence de problèmes environnementaux globaux*

Pierre Courtois
*C.N.R.S - E.H.E.S.S - CIRED** et Université Paris X - MODEM*

Jean-Christophe Péreau
*Université de Marne La Vallée - O.E.P****

Tarik Tazdaït
*C.N.R.S - E.H.E.S.S - CIRED** et
Université de Marne La Vallée - O.E.P*

1 Introduction

Les problèmes environnementaux globaux ont la particularité de concerner tous les pays de la planète dans le sens où chacun d'eux en souffre tout en étant (plus ou moins) responsable. Comme le montrent Barrett (1991), Carraro et Siniscalco (1992, 1993), et Chander et Tulkens (1992, 1995, 1997), en raison de l'interdépendance des actions des pays, la résolution de ce type de problème nécessite une coordination des politiques environnementales nationales. Cela implique la mise en place d'une concertation internationale, dont l'étude sous l'angle de la théorie de la négociation semble attrayante (Rotillon et Tazdaït, 1996, Rotillon *et al.* (1996), Chen (1997)). Cependant une limite importante caractérise cette théorie, aussi bien dans son axiomatique que dans son aspect stratégique. Les agents économiques qui négocient le font toujours sous l'hypothèse qu'en cas d'échec des négociations, ils aboutiront de fait à la situation qui prévalait avant les négociations, c'est à dire à celle correspondant au point de statu-quo. Par conséquent, les pays n'ont pas d'autre choix que de coopérer puisque la non-coopération s'identifie à la pire des solutions.

Retenir un tel cadre de réflexion revient implicitement à admettre qu'en cas d'échec des négociations, les pays se comporteront comme si les

* Pour leurs remarques et suggestions sur une précédente version de ce texte, nous souhaitons remercier Renaud Crassous, Christophe De Gouvello, Patrice Dumas, Ferenc Forgo, Emeric Fortin, Philippe Quirion, Thomas Vallée, ainsi que les deux rapporteurs anonymes de la *Revue*. Leur responsabilité n'est évidemment pas engagée par les erreurs et inexactitudes pouvant subsister dans le texte définitif.

** Jardin Tropical - 45 bis, avenue de la Belle Gabrielle, 94736 Nogent Sur Marne cedex, France

*** Cité Descartes, 5 boulevard Descartes, Champs Sur Marne, 77454 Marne-La-Vallée cedex 2, France

négociations n'avaient jamais eu lieu. Plus précisément, le comportement non-coopératif se perpétuera et il ne sera en aucun cas affecté par le processus de négociation. Cela n'est guère pertinent. Bien que les pays organisent les négociations afin d'améliorer leur situation initiale, il leur faut également réagir afin d'éviter une possible accentuation de la dégradation environnementale, il y a donc une volonté de coopération qui s'affirme par nécessité. Dans l'éventualité d'un désaccord, il n'est pas dans l'intérêt des pays concernés de s'en tenir à cette situation. Certains d'entre eux peuvent alors choisir de concrétiser leur volonté de coopération pour adopter de façon unilatérale une politique environnementale. Nous parlons de coopération pour caractériser ce type de comportement car le pays qui s'engage à adopter une politique respectueuse de l'environnement contribue, par là même, à l'amélioration du cadre environnemental.

Hoel (1991) s'est intéressé aux implications d'un engagement unilatéral. Dans le cadre d'un modèle à deux pays, cet auteur a montré que si un pays réduit unilatéralement ses émissions polluantes, celui qui ne coopère pas est alors incité à accroître le niveau de ses émissions, cet accroissement pouvant compenser la réduction unilatérale. Ce résultat s'explique par la représentation particulière qu'Hoel donne au comportement unilatéral. Une réduction unilatérale d'un pays décrit une situation dans laquelle le pays joue comme s'il avait un niveau de bien-être plus élevé que ce qu'il a en réalité. Cette définition s'apparente à celle du comportement altruiste tel que Becker (1974) l'entend, c'est à dire que le pays qui agit unilatéralement incorpore dans sa fonction de bien-être un argument qui désigne l'effort qu'il consent à prendre en charge à la place d'autrui. Mais une analyse en terme d'altruisme ne peut être conséquente car elle présente le défaut majeur de se donner d'emblée la réponse à la question posée. Pourquoi un pays prend-il l'initiative ? Parce qu'il est altruiste. Compte tenu des conséquences de ce comportement, il semble donc inconcevable d'entrevoir un quelconque engagement unilatéral. Pourtant un tel comportement a déjà été observé. Ce fut, par exemple, le cas des États-Unis qui ont interdit en 1978 l'emploi des chlorofluorocarbones dans les aérosols, ce gaz étant responsable du trou dans la couche d'ozone. Par ailleurs, pour lutter contre le réchauffement global, la Finlande a réduit unilatéralement ses émissions de dioxyde de carbone dès 1990. Ces deux exemples sont liés à ce que Tazdaït (1995) appelle l'engagement unilatéral spontané. La particularité de cet engagement est qu'il est le fait de pays industriels, sachant qu'il se produit avant que des négociations soient organisées. Nous le distinguons d'un engagement unilatéral d'une toute autre nature : l'engagement provoqué (Rotillon et Tazdaït, 1998). Dans ce second cas de figure, un pays moyennement industrialisé réduit ses émissions après y avoir été encouragé par un pays industriel frontalier. L'encouragement s'assimile ici à une politique de transfert. L'accord signé en 1987 entre la Finlande et l'ex-URSS illustre cette alternative, la Finlande finançant les réductions d'émissions de dioxyde de soufre de l'ex-URSS (Kaitala *et al.*, 1992a, 1992b). Comme l'indiquent ces exemples, l'absence d'accord international significatif ne traduit pas pour autant l'absence

d'initiative, les pays ayant la possibilité de s'engager unilatéralement, c'est à dire d'adopter une politique environnementale sans coordination. Dans la mesure où le comportement d'engagement unilatéral qui nous intéresse est susceptible d'émerger aussi bien à la suite d'un échec des négociations internationales qu'à la suite de la signature d'un accord entre un petit groupe de pays, nous l'assimilerons à un comportement de précaution.¹ En effet, faute de pouvoir évaluer avec certitude la contribution des pays à la dégradation environnementale, il s'avère difficile de les inciter à coopérer de façon significative. Toutefois, un pays peut choisir de s'engager de manière à prévenir un risque de dommage grave et irréversible sur l'environnement à un coût économiquement acceptable : pour un pays, un comportement de précaution constitue le moyen de rendre effective une politique environnementale restreinte. Il s'agit davantage de lancer un processus que de combattre efficacement le problème. Ce papier se fixe donc pour objectif de construire un cadre théorique commun au comportement de précaution et aux négociations internationales afin de déterminer les conditions sous lesquelles un comportement de précaution est susceptible d'émerger.

Concernant l'étude de ce type de comportement, la question se pose de savoir quel mode de réflexion semble le plus adapté pour en expliquer les raisons. L'engagement de précaution n'a en soi aucun sens, du moins comme phénomène abouti. À l'image du modèle de Hoel (1991), affirmer qu'un pays adopte un tel comportement revient à considérer qu'il consent des sacrifices aux autres, ce qui paraît contestable. En fait, dans son principe, l'engagement de précaution s'intègre dans un mouvement de coopération plus large.

Tout d'abord, un engagement de précaution est précédé d'une négociation entre les pays concernés par la dégradation environnementale. Lorsque les négociations se terminent, on peut alors assister à l'engagement d'un pays ou d'un ensemble de pays, certains pouvant ensuite en faire autant. En conséquence, engagement de précaution et effet d'entraînement s'insèrent dans un processus de comportement global. Dans ce processus les pays cherchent à améliorer leur résultat en abandonnant les stratégies qui réussissent moins bien que la moyenne, pour adopter celle(s) qui se révèle(ent) meilleure(s). Le choix d'une stratégie, par un pays, ne se laisse donc pas dicter par un calcul visant à optimiser son résultat compte tenu des actions choisies par les autres pays. Dans la mesure où il s'agit d'un comportement non maximisateur, nous pouvons appeler cela de la rationalité limitée : les pays se satisfont des stratégies qui marchent et réajustent leurs exigences au fur et à mesure que leur information s'élargit par la découverte des stratégies les plus profitables. Ainsi les pays sont-ils dotés de la capacité de "mieux faire" et non de la faculté de "faire de leur mieux", notamment sur la base d'un comportement d'imitation. Nous nous trouvons donc confrontés à un processus d'évolution, c'est pourquoi pour en cerner les caractéristiques, nous recourons à la

¹ Il existe différentes définitions du comportement de précaution (Godard, 1997), celles-ci allant de la recommandation à l'obligation. Notre représentation s'inspire de la définition avancée par la loi Barnier sur le renforcement de la protection sur l'environnement, adoptée en France en 1995.

théorie des jeux évolutionnaires.² Une réflexion de type évolutionnaire met en scène des pays qui appartiennent à une population assez importante, confrontée de manière répétée à une situation de base. Les pays jouent en expérimentant les stratégies disponibles (ou connues) applicables à cette situation. Ceux d'entre eux qui obtiennent des gains supérieurs aux autres, en choisissant des stratégies qui paraissent meilleures, sont progressivement imités. L'idée que l'on cherche à saisir à travers cette représentation est qu'un processus d'imitation doit conduire l'ensemble des pays à sélectionner progressivement un type de comportement (une ou plusieurs stratégies) stable, parce que bien adapté à son environnement, l'environnement étant entendu comme l'ensemble des stratégies choisies par l'ensemble des pays. Ainsi, à partir du concept de stratégie évolutionnairement stable (SES), nous montrons que l'incitation à coopérer peut être forte, mais pas suffisamment forte pour induire une coordination de la coopération. Elle peut néanmoins conduire certains pays à agir unilatéralement. Ce comportement unilatéral a évidemment moins d'impact que la coopération coordonnée. Il tend tout de même à réduire la portée de la défection puisque les gains réalisés par la coordination des politiques environnementales sont si importants que cela crée une incitation à la défection, alors que ceux réalisés par un mouvement d'engagement unilatéral le sont beaucoup moins.

Le papier s'articule autour du plan suivant. En section (2), nous présentons le modèle reliant l'engagement unilatéral de précaution aux négociations internationales, pour en étudier les fondements non-coopératifs.³ En section (3) nous nous attachons à souligner l'aspect évolutionnaire de ce comportement en associant stratégie d'équilibre de Nash et SES. Nous élargissons par la suite le cadre d'analyse, afin de mettre en valeur un effet d'entraînement dont le point de départ est la formation d'une coalition (section 4). Enfin, dans une cinquième section, nous enrichissons notre réflexion par une prise en compte des conséquences d'une politique de sanctions (légitimée par l'adoption de normes écologiques) sur les possibilités d'émergence du comportement coopératif.

² Faber et Proops (1993), Ring (1997), van den Bergh et Gowdy (2000) mettent très bien l'accent sur l'intérêt de l'outil évolutionnaire en économie de l'environnement. Pour des synthèses méthodologiques liées à la théorie des jeux évolutionnaires, voir van Damme (1994), Vega-Fedondo (1996), Mailath (1998), Péreau et Tazdaït (2000).

³ Cet aspect se justifie par le fait que la théorie des jeux évolutionnaires est une théorie à fondement non-coopératif.

2 Le modèle⁴

2.1 Le cadre général

Soit $N = \{1, \dots, n\}$ l'ensemble des pays, supposés identiques, qui interagissent dans un environnement commun menacé par l'émission d'un gaz dont tous les pays sont producteurs. Chaque pays i bénéficie de l'environnement en l'utilisant comme facteur de production et comme récepteur de ses émissions polluantes. Le bien-être de chaque pays est positivement affecté à la fois par ses propres réductions, q_i , et par celles des autres pays, q_{-i} , où q_{-i} est le vecteur $(q_1, q_2, \dots, q_{i-1}, q_{i+1}, \dots, q_n)$. Les fonctions de bénéfices et de coûts peuvent être représentées par la fonction de bien-être : $\pi_i(q) = B_i(q_i, q_{-i}) - D_i(q_i)$, sachant que $B_i(q_i, q_{-i})$ traduit les bénéfices découlant des réductions globales, tandis que $D_i(q_i)$ désigne les coûts résultant de l'adoption d'une politique environnementale, et $q = (q_1, \dots, q_n) = (q_i, q_{-i})$ est le vecteur de réductions de l'ensemble des pays.

Les pays négocient entre eux de manière à mettre en place un programme de réduction de leurs émissions polluantes. Nous noterons $\pi_i^c(j)$ le bien-être obtenu par le pays i lorsqu'il participe à une coalition composée de j pays, $2 \leq j \leq n$, et $\pi_i^-(j-1)$ son bien-être lorsqu'il ne rejoint pas la coalition de $j-1$ pays qui résulte des négociations. De même, dans l'éventualité d'un échec des négociations, $\pi_i^a(k)$ désignera le bien-être du pays i quand k pays (dont i) s'engagent unilatéralement à réduire leurs émissions (et adoptent ainsi un comportement de précaution), tandis que le bien-être perçu par i quand il profite de l'engagement unilatéral de $k-1$ pays sera noté $\pi_i^a(k-1)$. Enfin, nous normalisons la fonction π_i de sorte que : $\pi_i^a(0) = 0$.

Le jeu décrit se déroule selon la structure suivante. Les n pays concernés par le problème environnemental se réunissent pour négocier. On recense une alternative possible : les négociations se concluent soit par un accord, soit par un échec. Dans le premier cas de figure, les j pays signataires, $2 \leq j \leq n$, forment une coalition qui s'engage à réduire le niveau de ses émissions polluantes.⁵ Tout se passe alors comme si chaque pays membre de la coalition délèguait sa décision à l'ensemble des membres pour maximiser le bien-être joint de la coalition. Ceux qui se trouvent en dehors de l'accord maximisent, en revanche, leur bien-être individuel. Dans le second cas de figure, des pays entreprennent une réduction de leurs émissions sans pour autant coordonner leur politique, ce qui revient à adopter un

⁴ Les résultats mis en valeur dans cette section sont conformes à ceux développés par Péreau et Tazdaït (2001) sur la base de la fonction de bien-être retenue par Barrett (1991).

⁵ Nous parlons d'engagement de précaution lorsqu'un pays adopte unilatéralement une politique environnementale alors que nous ne parlons pas de coalition de précaution lorsque les négociations se concluent par un accord. Sur ce point, le vocabulaire mérite d'être précisé. L'émergence d'une coalition est le fait d'un intérêt commun s'articulant autour d'un objectif commun. En revanche, l'engagement unilatéral que nous considérons reste le fait d'un intérêt individuel qui va dans le sens de l'intérêt de tous et qui n'a lieu qu'à la suite de négociations, c'est pourquoi nous le disons de précaution : alors que tous cherchaient à agir en commun, seuls quelques uns se sont engagés, et ce de façon non concertée.

comportement de précaution. Ceux qui ne s'engagent pas unilatéralement agiront selon leur intérêt propre étant donné le mouvement de précaution. Par conséquent, l'espace des stratégies se résume pour chacun des pays entre adopter une politique environnementale (E_F) ou non (T).

Nous supposons qu'en cas d'échec des négociations, aucune nation n'est en mesure de prévoir le comportement des autres pays. Il ne sera donc pas possible pour les pays d'anticiper un engagement unilatéral. En fait, les pays doivent attendre l'après négociation pour observer les comportements des uns et des autres, et déterminer ceux qui s'engagent unilatéralement.

Définissons par φ_i^k la probabilité que k pays adoptent un comportement de précaution sachant que le pays i en fait autant, et par β_i^{k-1} la probabilité que $k - 1$ adoptent un comportement de précaution sachant que i privilégie la défection. Ainsi :

$$\varphi_i^k = p(k \text{ pays} \in K / i \in K), \tag{1}$$

$$\beta_i^{k-1} = p(k - 1 \text{ pays} \in K / i \notin K), \tag{2}$$

où K désigne l'ensemble des k pays, $2 \leq k \leq n$, qui adoptent un comportement de précaution si un accord n'est pas atteint lors des négociations. Nous désignerons par J l'ensemble des pays membres de la j -coalition.

En vertu de nos hypothèses, le comportement du pays i , $i \in N$, peut être explicité par la matrice de gains suivante.

$i/$	Coalition	Non - Coalition
E_F	$\pi_i^c(j)$	$\pi_i^a(k, 1)$
T	$\pi_{-i}^c(j - 1)$	$\pi_{-i}^a(k - 1, 0)$

où :

$$\pi_i^a(k, 1) = \varphi_i^k \pi_i^a(k) + \varphi_i^1 \pi_i^a(1), \tag{3}$$

et :

$$\begin{aligned} \pi_{-i}^a(k - 1, 0) &= \beta_i^{k-1} \pi_{-i}^a(k - 1) + \beta_i^0 \pi_{-i}^a(0) \\ &= \beta_i^{k-1} \pi_{-i}^a(k - 1) \end{aligned} \tag{4}$$

En effet, en cas de désaccord, si le pays i a l'intention de réduire ses émissions, soit il s'engage unilatéralement au même titre que $k - 1$ autres avec une probabilité φ_i^k , soit il est le seul à s'engager unilatéralement avec une probabilité φ_i^1 . Si le pays i n'a pas l'intention de réduire ses émissions, soit il profite de l'engagement des $k - 1$ pays qui agissent unilatéralement avec une probabilité β_i^{k-1} , soit aucun pays n'adopte de politique environnementale.

2.2 Les issues du jeu

La stratégie d'engagement constitue une stratégie de meilleure réponse (pour chaque membre de la coalition coopérante) au comportement de défection des non-signataires si et seulement si :

$$\pi_i^c(j) - \pi_{-i}^c(j-1) \geq 0 \quad (5)$$

Cette relation traduit la condition de stabilité interne définie par d'Aspremont *et al.* (1983) : un pays signataire de l'accord n'est aucunement incité à y renoncer. Pour garantir la stabilité de la coalition, il est également nécessaire de compléter cette condition par celle de stabilité externe, c'est-à-dire que tout pays non signataire n'est aucunement incité à l'intégrer : $\pi_i^c(j+1) - \pi_{-i}^c(j) < 0$. Néanmoins, lorsque le bien-être de la coalition est une fonction croissante de sa taille, la condition de stabilité interne suffit à assurer la stabilité globale (Donsimoni *et al.*, 1986).

La stabilité joue ici un rôle majeur car elle permet l'auto-exécution de l'accord. Si un signataire revient sur son engagement, il est alors conduit à procéder à des réductions moindres que prévu. L'avantage qu'il en retire vient de la diminution de ses coûts. Cependant il existe une contrepartie notable. La défection du dit pays entraîne une réduction du nombre des pays coopérants, ce qui fragilise l'accord originel puisque les pays membres en viennent à diminuer leurs niveaux de réductions. En réalité, un pays signataire ne cherchera à se retirer que si la diminution de ses coûts de réductions compense la perte de bénéfices qui en résulte. Réciproquement, tout pays qui décide de s'associer à un accord de coopération s'engage à réaliser des réductions plus importantes (que s'il agissait de façon égoïste) et consent, dans le même temps, à supporter des niveaux de coûts plus élevés. L'adhésion d'un pays supplémentaire conforte pourtant l'accord : les autres pays membres de la coalition sont incités à augmenter leurs niveaux de réductions. Soulignons que cette adhésion n'est possible que si l'augmentation des bénéfices perçus par le nouveau signataire est supérieure à la hausse des coûts qui s'ensuit.

L'auto-exécution est d'autant plus importante qu'il n'existe pas d'organisme suffisamment influent pour veiller au respect du traité. Il existe évidemment des institutions internationales, mais aucune d'entre elles n'a le pouvoir ni le devoir d'imposer à une ou plusieurs nations « le » comportement à adopter. Cela nécessite de fait un accord entre les différentes parties concernées.

Considérons maintenant une j -coalition stable. La question se pose de savoir si les j pays membres de la coalition peuvent l'élargir au moyen de transferts d'utilité en direction de pays qui, par définition, n'ont aucune incitation à la rejoindre.

Un transfert d'utilité n'est possible que s'il est au mieux égal au gain que les j pays réaliseraient en passant à une $(j+1)$ -coalition. En outre, l'intégration d'un pays supplémentaire (à la j -coalition), nécessite que le

transfert V couvre la perte que le $j + 1^{ème}$ pays risquerait de subir en rejoignant la coalition. Ces deux contraintes sont résumées par la relation ci-dessous :

$$j[\pi_i^c(j + 1) - \pi_i^c(j)] \geq V > \pi_{-i}^c(j) - \pi_i^c(j + 1) \tag{6}$$

Cette relation assure qu'il est possible d'élargir une coalition par auto-financement. Or, nous savons que la j -stabilité de la coalition est vérifiée lorsque $\pi_i^c(j + 1) < \pi_{-i}^c(j)$, ce qui signifie que les j pays coopérants seront incités à renoncer à la coalition avec l'entrée d'un pays supplémentaire. La $(j + 1)$ -coalition ne peut donc être qu'instable. Les pays membres de la coalition stable ne peuvent donc pas élargir la coalition initiale par l'octroi de transfert d'utilité en direction des pays non-coopérants. C'est pourquoi, Carraro et Siniscalco (1993) procèdent à une modification des règles du jeu en introduisant notamment une condition d'engagement. Ces auteurs en viennent à supposer qu'il existe des pays (mais pas tous) dont l'engagement est irréversible : quel que soit le comportement des autres nations, ces pays ne reviennent pas sur leur politique environnementale. Cela revient à admettre que certains pays sont plus responsables que d'autres vis-à-vis de la dégradation environnementale. C'est là un point contradictoire avec le corps du modèle de ces auteurs puisque tous les pays sont supposés identiques. Il est donc difficile de justifier l'engagement de certains. Pour notre part, nous avons choisi de considérer qu'en cas d'échec des négociations, le contexte évoluant, les pays peuvent être incités à envisager un engagement unilatéral.

Nous montrons que la stratégie de non-engagement est une stratégie de meilleure réponse si et seulement si :

$$\pi_{-i}^a(k - 1, 0) - \pi_i^a(k, 1) \geq 0, \tag{7}$$

c'est à dire lorsque l'incitation à la défection est positive ou nulle. À l'aide de la formule de Bayes, il nous est possible d'explicitier les probabilités conditionnelles φ_i^k , φ_i^1 et β_i^{k-1} en fonction de p . Nous obtenons :

$$\varphi_i^k = p(i/k)p(k)/p(i) = p(i/k)p(k) / \sum_{r=1}^n p(i/r)p(r)$$

Dans la mesure où le pays i accepte de signer un accord au même titre que $k - 1$ autres pays parmi les n pays participants, nous avons :

$$p(i/k) = k/n \quad k \in K,$$

soit :

$$\varphi_i^k = kp(k) / \sum_{r=1}^n p(r)r \quad \text{et} \quad \varphi_i^1 = p(1) / \sum_{r=1}^n p(r)r$$

De même :

$$\beta_i^{k-1} = (n - k + 1)p(k - 1) / [n - \sum_{r=1}^n p(r)r]$$

En substituant dans (7), il vient :

$$p(k - 1) \geq [kp(k)\pi_i^a(k) + p(1)\pi_i^a(1)][n - \sum_{r=1}^n p(r)r] / (n - k + 1) \sum_{r=1}^n p(r)r \quad (8)$$

Les propositions (1) et (2) récapitulent ces résultats.

Proposition 1 (d'Aspremont *et al.*, 1983)

Pour un pays i , $i \in N$, la stratégie d'engagement est une stratégie de meilleure réponse (au comportement de défection des non-signataires à l'accord) si et seulement si j est un petit nombre comparativement à n .

Proposition 2 *La stratégie de non-engagement est une stratégie de meilleure réponse si et seulement si :*

$$p(k - 1) \geq [kp(k)\pi_i^a(k) + p(1)\pi_i^a(1)][n - \sum_{r=1}^n p(r)r] / (n - k + 1) \sum_{r=1}^n p(r)r$$

La proposition (1) nous apprend que pour des pays caractérisés par des fonctions de bien-être continues et concaves, il existe des coalitions stables mais celles-ci seront composées d'un très petit nombre d'adhérents.⁶ L'explication est la suivante. Plus la coalition comprend de pays, plus cela accroît l'incitation à la défection de certains des signataires (ceux-ci cherchant à profiter des réductions des autres pays sans en supporter les coûts associés). Anticipant cette attitude, les pays ne sont alors guère incités à signer un accord, d'autant plus que la coordination des politiques environnementales induit de fortes réductions de la part des coopérants. De manière générale, on peut considérer qu'il y a un coût personnel à faire partie d'une coalition, tandis que les bénéfices apparaissent comme des biens publics distribués à l'ensemble des pays concernés par le problème environnemental et non aux seuls pays coopérants. Le nombre maximum de j pays s'interprète donc comme le nombre de pays qui permet d'entrevoir la soutenabilité d'une coordination des politiques sans qu'aucune incitation à la défection ne soit possible.

En revanche, il ressort de la relation (8) associée à la proposition (2), qu'un pays préférera ne pas s'engager unilatéralement si ses croyances concernant le comportement unilatéral des autres pays sont élevées. Lorsque le pays i anticipe un large mouvement d'engagement unilatéral, il cherchera alors à profiter de cette situation.

⁶ Les simulations de Carraro et Siniscalco (1991) confirment ce résultat : la coalition la plus large qui puisse être obtenue se compose de trois pays.

Nous constatons que le comportement d'un pays ne dépend pas des mêmes paramètres selon les situations. Il acceptera de participer à une coalition si celle-ci est soutenable alors qu'il privilégiera ou non un engagement unilatéral suivant ses croyances quant au comportement d'engagement des autres pays. Cette remarque a son importance. Elle montre bien qu'en cas d'échec des négociations, les pays peuvent néanmoins être incités à entreprendre une politique de réduction de leurs émissions.

Cependant le problème ne se pose pas véritablement en terme de stratégies pures. Dans la mesure où les pays évoluent dans un environnement complexe, chacun d'eux observe les autres pour imiter les comportements de ceux dont le bien-être est le plus élevé. Derrière ce processus d'apprentissage, nous retrouvons l'idée d'imitation. Cela revient à supposer un degré limité de rationalité de la part des joueurs : ils effectuent leur choix entre les différentes stratégies à la lumière de l'expérience. Aucun élément ne permet donc de garantir la validité des relations (5) et (8). Nous supposons dans ce qui suit qu'elles ne sont pas vérifiées :

$$\pi_{-i}^c(j-1) - \pi_i^c(j) \geq 0 \quad \text{et} \quad \pi_i^a(k,1) - \pi_{-i}^a(k-1,0) \geq 0 \quad (9)$$

Désignons par x (resp. $1-x$), $0 < x < 1$, la probabilité qu'il n'émerge pas (resp. émerge) de coalition après les négociations. Si les relations décrites en (9) sont respectées, le jeu a alors une unique stratégie mixte d'équilibre, x^* . Formellement, une stratégie mixte d'un pays i se traduit comme si ce pays créait volontairement de l'incertitude sur son choix. En réalité, ce pays sait parfaitement le choix qu'il va effectuer alors que les autres joueurs, ne connaissant pas avec exactitude ce choix, attribuent une distribution de probabilité sur les actions possibles de i (Harsanyi, 1967-68). Une stratégie mixte d'un pays i consiste donc en une distribution de probabilité sur l'ensemble de ses actions possibles. Le calcul de celle-ci résulte de l'égalisation des gains espérés associés aux deux stratégies pures E_F et T . Lorsque le pays i joue E_F il perçoit :

$$\Pi E_F = x\pi_i^a(k,1) + (1-x)\pi_i^c(j) \quad (10)$$

En jouant T le pays i obtient :

$$\Pi T = x\pi_{-i}^a(k-1,0) + (1-x)\pi_{-i}^c(j-1) \quad (11)$$

Les équations (10) et (11) pour $x = x^*$ impliquent, à l'équilibre, la formulation suivante de x^* :

$$x^* = [\pi_{-i}^c(j-1) - \pi_i^c(j)] / [\pi_i^a(k,1) - \pi_{-i}^a(k-1,0) + \pi_{-i}^c(j-1) - \pi_i^c(j)] \quad (12)$$

Notons qu'au numérateur nous retrouvons l'expression de l'incitation à coopérer. Le dénominateur se composant, pour sa part, de la somme de l'incitation à coopérer et l'incitation à la défection. Nous en déduisons donc

que x^* est une stratégie mixte d'équilibre si et seulement si x^* est égale à la fréquence de l'incitation à coopérer.

3 Processus évolutif

Le cadre que nous venons de définir s'articule autour d'une hypothèse forte qu'il nous faut maintenant lever afin de rendre plus réaliste notre représentation des négociations internationales. Les probabilités d'engagement unilatéral φ et β sont supposées exogènes au système, ce qui tend à affaiblir la portée évolutive et dynamique du modèle. Une amélioration pertinente consiste à les associer aux stratégies adoptées, de sorte que pour tout pays i , $i \in N$:

$$\varphi_i^k = \varphi_i^k(x) \quad , \quad \varphi_i^1 = \varphi_i^1(x) \quad , \quad \beta_i^{k-1} = \beta_i^{k-1}(x) \quad (13)$$

En associant φ et β à x , nous en venons à les endogénéiser. La tendance à la défection, x , prend ainsi la forme d'un paramètre stratégique qui s'interprète comme une réponse sélective aux distributions subjectives φ et β . Étant donné ce cadre, en jouant E_F le pays i perçoit :

$$\Pi E_F(x) = x[\varphi_i^k(x)\pi_i^a(k) + \varphi_i^1(x)\pi_i^a(1)] + (1-x)\pi_i^c(j), \quad (14)$$

tandis que s'il joue T , son gain s'écrit :

$$\Pi T(x) = x\beta_i^{k-1}(x)\pi_{-i}^a(k-1) + (1-x)\pi_{-i}^c(j-1) \quad (15)$$

Nous supposons également que les nations qui participent à la concertation internationale forment une population x -monomorphique : avant que les négociations ne s'engagent, l'expérience a conduit les pays à se déterminer par une tendance à la non-coopération identique (en l'occurrence égale à x). Le concept qui va nous permettre de caractériser les issues de ce jeu de négociation évolutive est celui de SES (Maynard-Smith et Price, 1973). Une stratégie (ou une distribution de stratégies) est dite évolutivement stable si, partant d'une situation où tous les acteurs l'ont adopté, l'apparition d'une petite fraction de pays ayant adopté une stratégie alternative, ne réussit pas à envahir la population initiale. En conséquence, une SES est en mesure de résister à l'intrusion d'un groupe d'agents adoptant un comportement alternatif.

Définition La stratégie x^* est dite évolutivement stable si :

- (a) aucune autre stratégie x' ne procure un meilleur gain en jouant contre x^* que x^* elle-même (condition d'équilibre),
- (b) et lorsque x^* ne fait pas mieux face à elle-même que x' , si x^* procure un meilleur gain contre x' que x' elle-même (condition de stabilité).

De façon générale, si la plupart des pays adoptent la stratégie x^* , aucune stratégie alternative ne peut améliorer leur bien-être. Cela signifie que x^* définit une stratégie qui se trouve être la meilleure réponse à elle-même.

Nous pouvons maintenant déterminer si l'adoption de x au sein de l'ensemble des pays constitue une SES. Pour ce faire, supposons que $0 < x < 1$ est telle que le gain espéré de E_F est différent de celui de T :

$$\Pi E_F(x) \neq \Pi T(x) \tag{16}$$

Nous allons en fait montrer que si (16) est vérifiée, x ne peut être évolutionnairement stable car une communauté internationale x -monomorphe peut voir émerger et se développer une stratégie alternative $x' \neq x$. Considérons en premier lieu le cas où $\Pi T(x) > \Pi E_F(x)$ et où une stratégie alternative x' , légèrement supérieure à x , est adoptée par un certain nombre de pays. Supposons que lors de l'ouverture des négociations deux types de pays coexistent : ceux dont la stratégie est x et ceux dont la stratégie est x' . Puisque les x' -pays ont une tendance plus forte que les x -pays à la non-coopération au sein d'une coalition, cela signifie qu'en moyenne ils obtiennent un profit supérieur en adoptant la stratégie pure T . Par conséquent, les x' -pays obtiennent en moyenne un gain supérieur à celui des x -pays. Compte tenu de cet avantage, le processus de sélection des stratégies va alors jouer en faveur de x' , et donc la x -population va être amenée à opter pour x' jusqu'au point où celle-ci sera la seule à figurer. En procédant de la même manière, on montre que dans le cas où $\Pi T(x) < \Pi E_F(x)$ alors une stratégie x' , légèrement inférieure à x , tend à se développer.

Il en résulte que chacun des pays membre de la population x -monomorphe s'en tiendra effectivement à la stratégie x si et seulement si la condition suivante est vérifiée :

$$\Pi T(x) = \Pi E_F(x), \tag{17}$$

où $0 < x < 1$, ce qui nous conduit à la proposition (3).

Proposition 3 *Soit une population x^* -monomorphe. Alors x^* est une stratégie mixte évolutionnairement stable si et seulement si :*

$$\Pi T(x^*) = \Pi E_F(x^*) \quad \text{pour} \quad 0 < x^* < 1 \tag{18}$$

Attachons nous maintenant à étudier les deux cas limites $x^* = 0$ et $x^* = 1$. On notera que si la probabilité qu'il n'émerge pas de coalition est nulle (i.e. $x^* = 0$), les gains escomptés par le pays i , $i \in N$, sont :

$$\Pi E_F(0) = \pi_i^c(j), \quad \Pi T(0) = \pi_{-i}^c(j - 1), \tag{19}$$

et il existe j tel que :

$$\Pi E_F(0) \geq \Pi T(0) \tag{20}$$

Ce cas correspond à une incitation à la coopération positive. En revanche, si la probabilité qu'il n'émerge pas de coalition est certaine (i.e. $x^* = 1$), il s'ensuit :

$$\Pi E_F(1) \leq \Pi T(1) \quad (21)$$

Cette inégalité correspond à une incitation à la défection positive. Les relations (20) et (21) permettent de définir les conditions nécessaires assurant que x^* est une stratégie pure évolutionnairement stable. Finalement, nous avons établi, pour tous les cas possibles ($0 \leq x^* \leq 1$), les conditions qui garantissent que x^* est une stratégie d'équilibre de Nash. D'où :

Proposition 4 *Dans le jeu de négociation évolutionnaire que nous avons considéré, toute SES x^* est une stratégie d'équilibre de Nash.*⁷

Par conséquent, l'élément qui conditionne le comportement des pays participant aux négociations est le degré d'importance du gain additionnel qu'ils sont susceptibles de percevoir, selon que ce gain soit positif ou non, il s'assimilera à une incitation à la coopération ou à la défection. Il émergera du processus de négociation une j -coalition de pays coopérants lorsque l'incitation à la coopération est positive pour chacun des j pays. À l'inverse, aucun pays n'adoptera de politique environnementale lorsque l'incitation à la défection est positive pour chacun des pays. Si aucun de ces cas de figure n'est vérifié, on recense un cas alternatif stable pour lequel les comportements sont plus nuancés : certains pays sont en mesure de coopérer, mais sans se coordonner. Ce type de situation ne ressort que lorsque les négociations ont échoué. Il existe, en effet, une distribution de probabilités qui rend indifférent chacun des pays entre adopter ou non une politique environnementale. Certains choisiront de coopérer tandis que d'autres opteront pour la défection. La coopération prenant la forme d'un engagement de précaution lorsqu'elle ne se concrétise pas par un accord.

Si l'on synthétise ces différents résultats, nous aboutissons au schéma suivant : dans la mesure où la participation à une coalition est soumise au comportement de défection, il peut être plus intéressant pour les pays de privilégier un comportement de précaution. Celui-ci est moins contraignant puisqu'il conduit chacun des pays à adopter une politique environnementale moins significative que s'ils avaient coopéré au sein d'une coalition. À cela s'ajoute le fait qu'il est moins coûteux de supporter le comportement de défection d'autres pays. En résumé, le comportement de précaution s'identifie au comportement le plus soutenable face à la défection. Les pays qui sont susceptibles de ne pas coopérer, ne pouvant réaliser une amélioration significative de leur bien-être à la suite de l'engagement d'autres nations, n'ont alors pas d'autre alternative que de s'engager eux aussi.

⁷ En fait la SES est un raffinement du concept d'équilibre de Nash. Pour plus de précisions sur les relations entre ces deux notions voir Weibull (1995).

4 Un cadre élargi

Jusqu'à présent, nous nous sommes attachés à analyser les conditions d'émergence de situations symétriques : soit les négociations se concluent sur un accord, soit elles se concluent sur un échec et on observe un mouvement d'engagement unilatéral. En élargissant l'espace des stratégies des pays, de façon à permettre à ceux qui ne signent pas un accord de pouvoir effectuer un arbitrage entre comportement de précaution et défection, l'issue intermédiaire selon laquelle une j -coalition et engagement unilatéral coexistent devient alors envisageable.

Deux comportements coopératifs sont maintenant envisagés. Certains pays peuvent choisir de coopérer uniquement lorsqu'il émerge une coalition (E_f) quand d'autres sont prêts à adopter un comportement de précaution dans l'éventualité où il ne serait pas membre de la coalition (E_F). En d'autres termes, le comportement de précaution pourrait être observé en présence d'un accord comme en présence d'un échec des négociations. Du point de vue du pays i , $i \in N$, la nouvelle structure de jeu est décrite par la matrice suivante.

$i/.$	Coalition	Coalition/engagement unilatéral	Non - Coalition
E_F	$\pi_i^c(j)$	$\alpha\pi_i^c(j, m - 1) + (1 - \alpha)\pi_{-i}^c(j - 1, m)$	$\pi_i^a(k, 1)$
E_f	$\pi_i^c(j)$	$\pi_i^c(j, m - 1)$	$\pi_{-i}^a(k - 1, 0)$
T	$\pi_{-i}^c(j - 1)$	$\pi_{-i}^c(j - 1, m - 1)$	$\pi_{-i}^a(k - 1, 0)$

Dans la situation pour laquelle une j -coalition émerge en même temps qu'un m -engagement unilatéral, un pays i caractérisé par la stratégie E_F pourra soit participer à la coalition avec une probabilité α , d'où un bien-être $\pi_i^c(j, m - 1)$, soit s'engager unilatéralement avec une probabilité $(1 - \alpha)$ et obtenir un bien-être $\pi_{-i}^c(j - 1, m)$. Cela dépendra de la taille de la coalition résultant des négociations. Lorsque la stabilité est garantie indépendamment de la participation de i , celui-ci s'engagera unilatéralement alors que dans le cas inverse il rejoindra la coalition coopérante.

Désignons par x la probabilité qu'il n'émerge aucune entente des négociations mais que des comportements de précaution soient éventuellement rendus effectifs, y la probabilité que la coalition soit suivie d'un mouvement d'engagement unilatéral et $(1 - x - y)$ la probabilité que seule une coalition émerge, avec $0 < x, y < 1$. Pour le pays i , $i \in N$, les espérances de gain associés à chacune des stratégies possibles s'écrivent :

$$\Pi E_F = x[\pi_i^a(k, 1) - \pi_i^c(j)] + y[\alpha\pi_i^c(j, m - 1) + (1 - \alpha)\pi_{-i}^c(j - 1, m) - \pi_i^c(j)] + \pi_i^c(j),$$

$$\Pi E_f = x[\pi_{-i}^a(k - 1, 0) - \pi_i^c(j)] + y[\pi_i^c(j, m - 1) - \pi_i^c(j)] + \pi_i^c(j),$$

$$\Pi T = x[\pi_{-i}^a(k - 1, 0) - \pi_{-i}^c(j - 1)] + y[\pi_{-i}^c(j - 1, m - 1) - \pi_{-i}^c(j - 1)] + \pi_{-i}^c(j - 1)$$

Posons :

$$\begin{aligned}
 A &= \pi_i^a(k, 1) - \pi_i^c(j) & B &= \alpha\pi_i^c(j, m - 1) + (1 - \alpha)\pi_{-i}^c(j - 1, m) - \pi_i^c(j) \\
 C &= \pi_i^c(j) & D &= \pi_{-i}^a(k - 1, 0) - \pi_i^c(j) & E &= \pi_i^c(j, m - 1) - \pi_i^c(j) \\
 F &= \pi_{-i}^a(k - 1, 0) - \pi_{-i}^c(j - 1) & G &= \pi_{-i}^c(j - 1, m - 1) - \pi_{-i}^c(j - 1) & H &= \pi_{-i}^c(j - 1),
 \end{aligned}$$

il s'ensuit que x^{**} constitue une SES si et seulement si :

$$\begin{aligned}
 x^{**} &= (E - B)(H - C) / [(A - F)(E - B) - (A - D)(G - B)] \\
 y^{**} &= (A - D)(H - C) / [(A - F)(E - B) - (A - D)(G - B)] \\
 1 - x^{**} - y^{**} &= [(E - B)(A - F - H + C) - (A - D)(G - B + H - C)] / \\
 &\quad [(A - F)(E - B) - (A - D)(G - B)]
 \end{aligned}$$

avec toutefois les conditions d'existence suivantes :

$$\begin{aligned}
 \pi_{-i}^c(j - 1) - \pi_i^c(j) &\geq 0, & \pi_i^a(k, 1) - \pi_{-i}^a(k - 1, 0) &\geq 0, \\
 \pi_i^c(j, m - 1) - \alpha\pi_i^c(j, m - 1) - (1 - \alpha)\pi_{-i}^c(j - 1, m) &\geq 0, \\
 \pi_{-i}^c(j - 1, m - 1) - \alpha\pi_i^c(j, m - 1) - (1 - \alpha)\pi_{-i}^c(j - 1, m) &\geq 0
 \end{aligned}$$

Dans la mesure où $x^* = (H - C)/(A - F)$, nous constatons que $x^* > x^{**}$ implique : $(A - D)(H - C)(G - B) < 0$. Or $A - D > 0$ et $H - C > 0$, et donc l'inégalité est vérifiée pour $G - B < 0$, ce qui se réécrit :

$$\pi_{-i}^c(j - 1) - \pi_i^c(j) > \pi_{-i}^c(j - 1, m - 1) - \alpha\pi_i^c(j, m - 1) - (1 - \alpha)\pi_{-i}^c(j - 1, m) \quad (22)$$

Comme, en outre, $G - B > F - A$, nous pouvons voir que : $1 - x^* > 1 - x^{**} - y^{**}$, d'où nous déduisons : $y^{**} > 0$.

Proposition 5 *Si $G - B < 0$, alors :*

$$x^* > x^{**}, y^{**} > 0 \text{ et } 1 - x^* > 1 - x^{**} - y^{**}.$$

Le terme de gauche de (22) désigne l'incitation à adopter T (au détriment de E_F et E_f) dans une situation où seule une coalition émergerait. Le terme de droite désigne l'incitation à adopter T au détriment de E_F dans une situation où coalition et engagement de précaution prévaudraient. Si la première incitation est supérieure à la seconde, il devient dans l'intérêt des pays au comportement coopératif de privilégier une issue où la signature d'un accord est suivie d'un mouvement d'engagement de précaution. Nous savons qu'une coalition coopérante s'articule autour d'un petit groupe de pays et non sur la totalité des pays, aussi la portée de la défection ne peut être réduite que si l'action des pays composant la coalition est consolidée par un mouvement d'engagement de précaution. Ce résultat est toutefois paradoxal puisqu'il est indépendant des termes $\pi_i^a(k, 1)$ et $\pi_{-i}^a(k - 1, 0)$. L'existence d'un groupe moins important de pays E_f en vient à inciter les pays à arbitrer entre T et E_F , cet arbitrage jouant en faveur de E_F pour $G - B < 0$. En fait, il suffit que la proportion de pays susceptibles

d'adopter E_f se réduise à l'avantage de E_F pour que la coopération soit plus importante : lorsqu'un accord est signé, les pays E_F rendent effectifs un engagement unilatéral. En d'autres termes, l'apparition d'une coalition stable s'accompagne d'un effet d'entraînement significatif, ou encore le comportement de précaution devient sous-jacent à la formation d'une coalition.

Si l'inégalité (22) est inversée, il s'ensuit : $x^* < x^{**}$ et $1 - x^* > 1 - x^{**} - y^{**}$. Mais, pour que x^{**} , y^{**} et $1 - x^{**} - y^{**}$ aient un sens, il est également nécessaire que $(A - F)(E - B)/(A - D) > G - B$. Nous en déduisons ainsi : $y^{**} > 0$.

Proposition 6 *Si $(A - F)(E - B)/(A - D) > G - B > 0$, alors : $x^* < x^{**}$, $y^{**} > 0$ et $1 - x^* > 1 - x^{**} - y^{**}$.*

Pour $G - B > 0$, un mouvement d'engagement unilatéral consolidant la signature d'un accord reste encore plausible mais, parallèlement, la possibilité d'une situation caractérisée par un comportement coopératif des seuls pays s'engageant unilatéralement devient très significative. Soit le premier cas de figure se réalise, soit nous nous retrouvons dans la situation illustrée dans la section (2). Cela est différent de la configuration associée à la condition $G - B < 0$: soit il y a émergence d'une coalition accompagnée d'un engagement de précaution, soit il y a uniquement signature d'un accord.

Les propositions (5) et (6) garantissent la possibilité d'un élargissement de la coopération autour de la j -coalition. Ainsi, à une coordination des politiques environnementales des membres de la coalition se grefferaient des pays caractérisés par des politiques de précaution. Le nombre de ces derniers peut-être suffisamment significatif (prop.5) ou relativement faible (prop.6). Néanmoins, dans un cas comme dans l'autre, le processus a le mérite d'être envisageable. La distinction entre les deux cas de figure porte sur la proportion de pays qui adoptent E_f comparativement à ceux qui adoptent E_F . Si les pays E_f sont nombreux, la coopération ne peut prendre une grande ampleur. En effet, comme nous avons pu le voir dans la précédente section, en raison de la stabilité une coalition comprendra au plus j membres. Lorsqu'elle se constitue, les pays E_f qui ne la composent pas opteront pour la stratégie T . En revanche, si les pays E_F sont nombreux, l'engagement unilatéral prendra une forme significative : ceux qui ne participent pas à la coalition opteront pour un comportement de précaution. En fait, pour être la plus large possible, la coopération doit s'établir selon le principe suivant : la j -coalition doit se composer uniquement de pays E_f de sorte à ce que les pays E_F rendent effectif un engagement unilatéral. En d'autres termes, pour éviter que des pays E_f soient incités à préférer T , il est important d'éviter que des pays E_F composent la coalition.

5 Mise en place de sanctions

La mise en place d'une politique environnementale peut s'accompagner de l'adoption d'instruments incitatifs. Afin d'établir une analyse complète de la situation, il nous faut pouvoir souligner l'interaction entre comportement coopératif et mise en place d'incitations spécifiques. Dans ce qui suit, nous avons choisi de coupler la coopération à la détermination d'une taxe-sanction. Plus précisément, nous supposons que les pays qui mettent en place une politique environnementale sont ceux dont la production répond à des normes écologiques. Pour ne pas désavantager les firmes nationales qui ont entrepris des investissements satisfaisant aux normes, de tels pays imposeront une taxe-sanction uniforme sur les produits étrangers ne répondant pas aux normes écologiques.

Nous supposons que les pays qui entreprennent une politique environnementale adoptent des normes écologiques identiques. En conséquence, qu'ils coopèrent au sein d'une coalition ou par un comportement de précaution, le taux de taxe-sanction qu'ils rendront effectifs sera le même. La matrice de gains associée au comportement d'un pays i , $i \in N$, est alors la suivante.

$i/$.	Coalition	Coalition/engagement unilatéral	Non - Coalition
E_F	$\pi_i^c(j) + t_{n-j}$	$\alpha\pi_i^c(j, m - 1) + (1 - \alpha)\pi_i^c(j - 1, m) + t_{n-j-m+1}$	$\pi_i^a(k, 1, t_{n-k}, t_{n-1})$
E_f	$\pi_i^c(j) + t_{n-j}$	$\pi_i^c(j, m - 1) + t_{n-j-m+1}$	$\pi_i^a(k - 1, 0, t_{k-1})$
T	$\pi_i^c(j - 1) - t_{j-1}$	$\pi_i^c(j - 1, m - 1) - t_{j+m-2}$	$\pi_i^a(k - 1, 0, t_{k-1})$

Comme le montre la matrice, le montant global résultant des sanctions apparaît positivement lorsque le pays i coopère et négativement lorsqu'il fait défection. En outre, quand il coopère (resp. ne coopère pas), nous avons indiqué le montant de sanction qu'il perçoit (resp. verse) par le nombre de pays qu'il sanctionne (resp. qui le sanctionne).

En posant :

$$\begin{aligned}
 A' &= A + \varphi_i^k t_{n-k} + \varphi_i^1 t_{n-1} - t_{n-j} & B' &= B + t_{n-j-m+1} - t_{n-j} \\
 C' &= C + t_{n-j} & D' &= D - \beta_i^{k-1} t_{k-1} - t_{n-j} & E' &= E + t_{n-j-m+1} - t_{n-j} \\
 F' &= F - \beta_i^{k-1} t_{k-1} + t_{j-1} & G' &= G - t_{j+m-2} + t_{j-1} & H' &= H - t_{j-1},
 \end{aligned}$$

nous obtenons :

$$x^{***} = (E' - B')(H' - C') / [(A' - F')(E' - B') - (A' - D')(G' - B')]$$

Dans la mesure où tout pays coopérant perçoit le même montant de chacun des pays non-coopérants, il vient : $t_v = vt$. Aussi la comparaison de x^{**} et x^{***} nous conduit au résultat suivant lequel $x^{***} > x^{**}$ si :

$$[(n-k)\varphi_i^k + (n-1)\varphi_i^1](H-C)(E-G) < (G-E)[(n-1)(A-D) + (k-1)\beta_i^{k-1}(H-C)]$$

Cette relation est toujours vérifiée pour $G - E > 0$ (et impossible pour $G - E < 0$). Par conséquent, lorsque l'incitation à ne pas participer à un

large mouvement de coopération (ni au sein de la coalition, ni en adoptant un engagement unilatéral), $\pi_{-i}^c(j-1, m-1) - \pi_i^c(j, m-1)$, est supérieure à l'incitation à rester en dehors de la coalition, $\pi_{-i}^c(j-1) - \pi_i^c(j)$, alors la probabilité que les négociations se concluent sur un échec est élevée. Plus précisément, lorsque les pays qui composent la coalition adoptent le même taux de taxe-sanction que ceux qui adoptent un comportement de précaution, la tendance des négociations à se clore sur un échec devient plus importante. La raison en est simple. Il n'est plus dans l'intérêt des pays susceptibles de composer la coalition de se coordonner puisqu'il leur suffit d'adopter un comportement de précaution pour garantir la coopération. Une taxe-sanction uniforme favorise donc l'engagement unilatéral au détriment de la formation d'une coalition. Cela signifie que la coopération est liée à la capacité des pays à s'engager unilatéralement, leur nombre restant toutefois limité. En résumé, en présence d'une taxe-sanction uniforme, la coopération sera le fait d'un mouvement d'engagement unilatéral restreint.

6 Conclusion

Face aux problèmes environnementaux globaux, la coopération totale s'avère être la situation la plus profitable dès lors que les termes de l'entente sont mutuellement respectés. Cependant, plus une coalition sera large et plus chacun de ses membres sera incité à en profiter par le biais de la défection. C'est pourquoi la coopération totale, tout en étant souhaitable, n'en est pas moins une issue non soutenable. Néanmoins l'absence d'un accord international ne signifie pas pour autant l'absence de coopération. Nous avons justement montré que pour des pays dotés de la capacité de « mieux faire » et non de la faculté de « faire de leur mieux », un comportement de précaution peut survenir à la suite d'un échec des négociations. Il est exact que ce comportement a moins d'impact que la coopération de tous, mais il tend tout de même à réduire la portée de la défection. Les gains réalisés par la coordination des politiques environnementales sont si importants que cela crée une incitation à la défection, alors que ceux réalisés par un mouvement d'engagement unilatéral le sont beaucoup moins. Cela explique la pertinence d'un tel comportement. Soulignons également que l'émergence d'une coalition stable peut également créer une incitation, pour certains pays, à adopter un comportement de précaution, favorisant ainsi un élargissement du comportement coopératif. Enfin, l'adoption de sanctions à l'encontre des pays non-coopérants ne garantit pas pour autant l'émergence d'un large mouvement de coopération. Tout se passe comme si les sanctions devenaient un prétexte à l'engagement unilatéral lorsqu'il n'existe pas de clause de participation minimum. En effet, si le taux de taxe-sanction est uniforme, les pays ne trouvent aucun intérêt à se coordonner au sein d'une coalition puisqu'il leur suffit de s'engager unilatéralement, ce qui leur permet de réaliser de moindres réductions tout en les finançant par les revenus

des sanctions. Si ces pays s'étaient coordonnés, ils auraient été amenés à réaliser plus de réductions pour un même montant de revenu des sanctions.

Bibliographie

- d'Aspremont C., A. Jacquemin, J.J. Gabszewicz et J. Weymark (1983), "On the Stability of Collusive Price Leadership", *Canadian Journal of Economics*, 16, pp.17-25.
- Barrett S. (1991), "The Paradox of International Agreements", Mimeo, London Business School, January.
- Barrett S. (1994), "Self Enforcing International Environmental Agreements", *Oxford Economic Papers*, 46, pp.878-894.
- Becker G. (1974), "A Theory of Social Interactions", *Journal of Political Economy*, 82, pp.1063-1093.
- Carraro C. et D. Siniscalco (1991), "Strategies for the International Protection of the Environment", Discussion paper n°568, CEPR, London, August.
- Carraro C. et D. Siniscalco (1992), "The International Dimension of Environmental Policy", *European Economic Review*, 36, pp.379-387.
- Carraro C. et D. Siniscalco, (1993), "Strategies for the International Protection of the Environment", *Journal of Public Economics*, 52, pp.309-328.
- Chander P. et H. Tulkens (1992), "Theoretical Foundations of Negotiations and Cost Sharing in Transfrontier Pollution Problems", *European Economic Review*, 36, pp.388-398.
- Chander P. et H. Tulkens (1995), "A Core-Theoretic for the Design of Co-operative Agreements on Transfrontier Pollution", *International Tax and Public Finance*, 2, pp.279-294.
- Chander P. et H. Tulkens (1997), "The Core of an Economy with Multilateral Environmental Externalities", *International Journal of Game Theory*, 26, pp.379-401.
- Chen Z. (1997), "Negotiating an Agreement on Global Warming: A Theoretical Analysis", *Journal of Environmental Economics and Management*, 32, pp.170-188.
- Donsimoni M.P., N.S. Economides et H.M. Polemarchakis (1986), "Stable Cartels", *International Economic Review*, 27, pp.317-327.
- Faber M. et J.L.R. Proops (1993), *Evolution, Time, Production and the Environment*, Berlin, Springer-Verlag.
- Godard O. (1997), « L'ambivalence de la précaution et la transformation des rapports entre science et décision », dans Godard O. (éd.), *Le principe de précaution*, Paris, Editions de la Maison des Sciences de l'Homme, pp.37-83.

- Harsanyi J. (1967-68), "Games with Incomplete Information Played by Bayesian Players", *Management Science*, 14, pp.159-182, pp.320-334, pp.486-502.
- Hillman A.L. et H.W. Ursprung (1992), « Influence des mouvements écologiques sur la détermination des Politiques Commerciales », dans Anderson K. et Blackhurst R. (éds.), *Commerce Mondial et Environnement*, Paris, Economica, pp. 241-272.
- Hoel M. (1991), "Global Environmental Problems : The Effects of Unilateral Actions Taken by One Country", *Journal of Environmental Economics and Management*, 20, pp.55-70.
- Kaitala V., M. Pohjola et O. Tahvonen (1992a), "Transboundary Air Pollution and Soil Acidification : A Dynamic Analysis of an Acid Rain Game Between Finland and the USSR", *Environmental and Resource Economics*, 2, pp.161-181.
- Kaitala V., M. Pohjola et O. Tahvonen (1992b), "An Economic Analysis of Transboundary Air Pollution Between Finland and the Former Soviet Union", *Scandinavian Journal of Economics*, 94, pp.409-424.
- Mailath G.J. (1998), "Do People Play Nash Equilibrium ? Lessons from Evolutionary Game Theory", *Journal of Economic Literature*, 36, pp.1347-1374.
- Maynard Smith J. et G.R. Price (1973), "The Logic of Animal Conflicts", *Nature*, n°246, pp.15-18.
- Péreau J.-C. et T. Tazdaït (2000), « La théorie des jeux évolutionnistes peut-elle expliquer la coopération ? », *Économie Appliquée*, 53, pp.101-131.
- Péreau J.-C. et T. Tazdaït (2001), "Cooperation and Unilateral Commitment in the Presence of Global Environmental Problems", *Environmental and Resource Economics*, 20, pp.225-239.
- Ring I. (1997), "Evolutionary Strategies in Environmental Policy", *Ecological Economics*, 23, pp.237-249.
- Rotillon G. et T. Tazdaït (1996), "International Bargaining in the Presence of Global Environmental Change", *Environmental and Resource Economics*, 8, pp.293-314.
- Rotillon G. et T. Tazdaït (1998), « Engagement unilatéral provoqué en présence de problèmes environnementaux globaux », *Revue Économique*, 49, pp.1089-1102.
- Rotillon G., T. Tazdaït et S. Zeghni (1996), "Bilateral or Multilateral Bargaining in the face of Global Environmental Change?", *Ecological Economics*, 18, pp. 177-187.
- Tazdaït T. (1995), *Coopération en présence de risques globaux : une approche par la théorie des jeux*, Thèse de Doctorat, Université Paris X - Nanterre.

- van den Bergh J. et J.M. Gowdy (2000), "Evolutionary Theories in Environmental and Resource Economics : Approaches and Applications", *Environmental and Resource Economics*, 17, pp. 37-57.
- van Damme E. (1994), "Evolutionary Game Theory", *European Economic Review*, 38, pp. 847-858.
- Vega-Redondo F. (1996), *Evolution, Games, and Economic Behaviour*, Oxford, Oxford University Press.
- Weibull J.W. (1995), *Evolutionary Game Theory*, Cambridge Mass., MIT Press.

