



CIRANO

*Allier savoir et décision*

# Alliances de villes pour le climat Modélisation par la théorie des jeux

ANGEL PRIETO

*Ce texte rapporte les travaux effectués lors du stage de recherche  
d'Angel Prieto au CIRANO, sous la direction de  
Bernard Sinclair-Desgagné, Directeur scientifique et Fellow du CIRANO.*

2019S-16  
CAHIER SCIENTIFIQUE



2019s-16

## **Alliances de villes pour le climat Modélisation par la théorie des jeux**

*Angel Prieto*

*Ce texte rapporte les travaux effectués lors du stage de recherche d'Angel Prieto au CIRANO, sous la direction de Bernard Sinclair-Desgagné, Directeur scientifique et Fellow du CIRANO.*

---

**Série Scientifique**  
*Scientific Series*

---

**Montréal**  
**Août/August 2019**

© 2019 Angel Prieto. Tous droits réservés. *All rights reserved.* Reproduction partielle permise avec citation du document source, incluant la notice ©. *Short sections may be quoted without explicit permission, if full credit, including © notice, is given to the source.*



Centre interuniversitaire de recherche en analyse des organisations

## **CIRANO**

Le CIRANO est un organisme sans but lucratif constitué en vertu de la Loi des compagnies du Québec. Le financement de son infrastructure et de ses activités de recherche provient des cotisations de ses organisations-membres, d'une subvention d'infrastructure du gouvernement du Québec, de même que des subventions et mandats obtenus par ses équipes de recherche.

*CIRANO is a private non-profit organization incorporated under the Quebec Companies Act. Its infrastructure and research activities are funded through fees paid by member organizations, an infrastructure grant from the government of Quebec, and grants and research mandates obtained by its research teams.*

## **Les partenaires du CIRANO**

### **Partenaires corporatifs**

Autorité des marchés financiers  
Banque de développement du Canada  
Banque du Canada  
Banque Laurentienne  
Banque Nationale du Canada  
Bell Canada  
BMO Groupe financier  
Caisse de dépôt et placement du Québec  
Canada Manuvie  
Énergir  
Hydro-Québec  
Innovation, Sciences et Développement économique Canada  
Intact Corporation Financière  
Investissements PSP  
Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation  
Ministère des Finances du Québec  
Mouvement Desjardins  
Power Corporation du Canada  
Rio Tinto  
Ville de Montréal

### **Partenaires universitaires**

École de technologie supérieure  
École nationale d'administration publique  
HEC Montréal  
Institut national de la recherche scientifique  
Polytechnique Montréal  
Université Concordia  
Université de Montréal  
Université de Sherbrooke  
Université du Québec  
Université du Québec à Montréal  
Université Laval  
Université McGill

Le CIRANO collabore avec de nombreux centres et chaires de recherche universitaires dont on peut consulter la liste sur son site web.

Les cahiers de la série scientifique (CS) visent à rendre accessibles des résultats de recherche effectuée au CIRANO afin de susciter échanges et commentaires. Ces cahiers sont écrits dans le style des publications scientifiques. Les idées et les opinions émises sont sous l'unique responsabilité des auteurs et ne représentent pas nécessairement les positions du CIRANO ou de ses partenaires.

*This paper presents research carried out at CIRANO and aims at encouraging discussion and comment. The observations and viewpoints expressed are the sole responsibility of the authors. They do not necessarily represent positions of CIRANO or its partners.*

**ISSN 2292-0838 (en ligne)**

# **Alliances de villes pour le climat Modélisation par la théorie des jeux**

*Angel Prieto*

## **Résumé/Abstract**

Ce travail s'intéresse aux initiatives infranationales pour lutter contre les changements climatiques. Plus précisément, nous partons du constat de l'insuffisance des négociations internationales à adresser seules ce problème, pour étudier la pertinence des alliances de villes. À partir de l'étude de cas de C40, une approche empirique fondée sur des entretiens et des recherches documentaires permet de mettre en évidence les spécificités de ce mode de coordination. Ceci sert ensuite de base à la construction d'un modèle théorique de villes en réseau, que nous exploitons grâce à d'outils de la théorie des jeux. Nous mettons ainsi en évidence l'émergence d'équilibres de coordination pour les villes en réseau, et nous étudions l'influence de divers paramètres sur les caractéristiques des équilibres, avant de nous pencher sur la question des inégalités villes/campagnes et la problématique de redistribution. Grâce à l'étude d'une échelle qui a été jusqu'à ce jour délaissée par les modèles théoriques, ce travail contribue au champ de l'analyse des accords environnementaux par la théorie des jeux, ouvrant la possibilité à de nombreuses extensions.

**Mots-clés/Keywords :** Environnement, Réseaux, Villes, Théorie des jeux

## ABSTRACT

---

Ce travail s'intéresse aux initiatives infranationales pour lutter contre les changements climatiques. Plus précisément, nous partons du constat de l'insuffisance des négociations internationales à adresser seules ce problème, pour étudier la pertinence des alliances de villes. A partir de l'étude de cas de C40, une approche empirique fondée sur des entretiens et des recherches documentaires permet de mettre en évidence les spécificités de ce mode de coordination. Ceci sert ensuite de base à la construction d'un modèle théorique de villes en réseau, que nous exploitons grâce à d'outils de la théorie des jeux. Nous mettons ainsi en évidence l'émergence d'équilibres de coordination pour les villes en réseau, et nous étudions l'influence de divers paramètres sur les caractéristiques des équilibres, avant de nous pencher sur la question des inégalités villes/campagnes et la problématique de redistribution. Grâce à l'étude d'une échelle qui a été jusqu'à ce jour délaissée par les modèles théoriques, ce travail contribue au champ de l'analyse des accords environnementaux par la théorie des jeux, ouvrant la possibilité à de nombreuses extensions.

# SOMMAIRE

---

• Executive summary	1
• Introduction : intérêt de l'étude et méthodologie	3
<b>1 Gouvernance climatique : limites des accords internationaux, pertinence de l'échelle infranationale</b>	<b>5</b>
1.1 Etat de l'art : les négociations internationales analysées par la théorie des jeux .	5
1.2 L'importance des villes dans la lutte contre le changement climatique . . . . .	6
<b>2 Les alliances de villes : intérêt et étude de cas</b>	<b>8</b>
2.1 Etude de cas : fonctionnement de C40 . . . . .	9
2.2 Plus-value des alliances de villes par rapport à des villes seules . . . . .	12
<b>3 Modélisation d'alliances de villes</b>	<b>16</b>
3.1 Construction du modèle : hypothèses générales . . . . .	16
3.2 Un premier modèle : villes seules homogènes . . . . .	17
3.3 Extension du modèle : introduction des pays et des zones rurales . . . . .	23
3.4 Inégalités et transferts . . . . .	29
3.5 Idées d'extensions pour des recherches futures . . . . .	34
• Conclusion	38
• Bibliographie	39

# INTRODUCTION : INTÉRÊT DE L'ÉTUDE ET MÉTHODOLOGIE

---

Depuis la signature de la CCNUCC en 1992, cela fait plus de 25 ans que les négociations internationales sur le climat sont en cours. Du protocole de Kyoto à l'accord de Paris, les accords internationaux sont souvent critiqués pour leur manque d'ambition. Par exemple, si l'accord de Paris a été perçu comme un grand succès diplomatique, sa contribution aux futurs efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) reste discutable et discutée : en effet, comme le montre le document *Emissions Gap Report 2018* du Programme des Nations Unies pour l'Environnement, les engagements actuels exprimés dans les contributions nationales (NDC) sont insuffisants pour combler l'écart entre les besoins et les projections en matière de réduction des émissions de GES d'ici à 2030<sup>1</sup>.

Les accords internationaux entre Etats seraient-ils incapables d'adresser l'enjeu climatique de manière satisfaisante ? C'est ce que défendent des travaux d'économistes qui étudient ces négociations à travers le prisme de la théorie des jeux. Deux constats sont à la source de leur raisonnement : d'une part, l'absence d'une institution supranationale capable d'exercer un pouvoir coercitif sur les questions environnementales ne peut mener qu'à des engagements de nature volontaire ; de l'autre, l'existence d'externalités liées aux émissions de gaz à effet de serre mène à une situation dans laquelle la somme des contributions individuelles est inférieure à l'optimum global.

En parallèle des négociations entre Etats, plusieurs initiatives transnationales ont vu le jour, impliquant des entreprises, des ONG et des autorités publiques. Celles-ci vont de marchés de permis de CO<sub>2</sub> (comme celui de Californie-Québec-Ontario) à des réseaux de villes (comme C40) en passant par des projets de captage de CO<sub>2</sub> par des puits naturels (comme le reboisement de Bonn). Une analyse quantitative d'impact suggère que ces initiatives peuvent générer des réductions d'émissions substantielles tout en relevant l'ambition des Etats, et ainsi permettre de se rapprocher de l'objectif 2°C (Graichen et al., 2017).

L'objectif de ce stage est d'étudier les alliances de villes pour le climat avec le prisme de la théorie des jeux, à partir de l'exemple du réseau C40, qui regroupe une grande partie des mégapoles mondiales. L'enjeu est de construire un modèle permettant de capturer les incitations des acteurs sous-nationaux à mettre en œuvre des initiatives d'atténuation, pour déterminer si ces initiatives sont susceptibles de fournir des réductions d'émissions non négligeables.

Pour ce faire, l'étude de recherche combine une approche empirique et théorique. La partie empirique (sections 1 et 2) porte sur le fonctionnement de C40 et repose sur des entretiens menés dans les mairies de Paris, Londres et New York, ainsi que sur des recherches personnelles.

---

1. Executive summary du *Emissions Gap Report 2018* :  
[https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26879/EGR2018\\_ESFR.pdf?sequence=17](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26879/EGR2018_ESFR.pdf?sequence=17)

S'appuyant sur les enseignements de l'étude empirique afin d'en saisir les enjeux pertinents, la partie théorique (section 3) consiste à construire un modèle de villes en réseau, puis à utiliser la théorie des jeux pour l'analyser. Cette analyse se déroule en plusieurs étapes : tout d'abord nous théorisons les briques constitutives d'un modèle général de villes en réseau (section 3.1). Puis nous explicitons un tel modèle, afin de mettre en évidence l'émergence d'un jeu dit "de coordination" dans un contexte de villes seules (section 3.2). Ensuite, nous complexifions le modèle avec l'introduction de zones rurales et de pays, et étudions en quoi cela modifie les résultats précédents (section 3.3). Finalement, nous nous penchons sur les questions des inégalités entre zones urbaines et zones rurales, ainsi que sur l'effet des politiques de redistribution (section 3.4). En guise d'extension, la section 3.5 vise à faire le lien entre cette étude et les recherches actuelles en théorie des jeux appliquée aux accords environnementaux, afin de proposer des pistes de travail futures.

# 1

## GOUVERNANCE CLIMATIQUE : LIMITES DES ACCORDS INTERNATIONAUX, PERTINENCE DE L'ÉCHELLE INFRANATIONALE

### 1.1 ETAT DE L'ART : LES NÉGOCIATIONS INTERNATIONALES ANALYSÉES PAR LA THÉORIE DES JEUX

Le changement climatique est un problème environnemental global, au même titre que la destruction de la couche d'ozone, l'épuisement de ressources halieutiques ou l'acidification des océans. Plus particulièrement, la réduction des émissions de gaz à effet de serre par les acteurs nationaux est un problème de provision de bien public (l'atmosphère étant non-rivale et non-exclusive), qui comporte des externalités réparties entre l'ensemble des acteurs. Comme les bénéfices générés par la réduction d'émissions d'une partie profitent à toutes les autres, le coût d'abattement individuel dépasse le bénéfice de la réduction d'émissions. C'est pourquoi l'absence de coopération mène nécessairement à une réduction d'émissions inférieure à l'optimum global, selon des logiques de passager clandestin et de dilemme du prisonnier (pour plus de détails, voir par exemple le cours de W. D. Nordhaus à l'IDEI, 1999<sup>2</sup>).

De plus, la gouvernance climatique est caractérisée par l'absence d'institution supranationale capable d'imposer des mesures coercitives. Ceci implique que tout accord international sur le climat qui soit stable doit être « autorenforçant » (*self-enforcing* dans la littérature (Barrett, 1994)), c'est-à-dire qu'il ne doit pas exister pour les membres d'incitation à quitter unilatéralement l'accord (être dans l'accord doit être pour eux un équilibre de Nash). Depuis les années 80, de nombreux travaux de recherche ont utilisé la théorie des jeux sous ces hypothèses, afin d'analyser les interactions stratégiques entre Etats lors des négociations climatiques. Leur objectif est de mettre en évidence les mécanismes qui sous-tendent les accords internationaux sur le climat (International Environmental Agreements ou IEAs, voir Marrouch et Chaudhuri (2016) pour une revue de littérature récente).

Plusieurs approches peuvent être adoptées, et les modèles peuvent comprendre plus ou moins de complexité. L'approche la plus répandue consiste à considérer des Etats souverains, avec des fonctions de profits telles que les bénéfices sont représentés par une fonction concave de la réduction totale d'émissions, et les coûts d'abattement par une fonction convexe de la réduction individuelle. Un jeu simple, examiné par Barrett (1994) et inspiré de D'Asprémont et al. (1983), consiste à considérer des Etats homogènes avec une approche dite de type « cartel ». Ceci signifie que le jeu se déroule en deux étapes :

---

2. [http://idei.fr/sites/default/files/medias/doc/conf/annual/paper\\_1999.pdf](http://idei.fr/sites/default/files/medias/doc/conf/annual/paper_1999.pdf)

1. Les Etats décident ou non de participer à l'accord
2. Les signataires maximisent la somme de leurs profits, tandis que les non-signataires maximisent leur profit individuel, jouant ainsi un équilibre de Nash.

Avec cette approche et en adoptant une structure de bénéfices et de coûts quadratiques, l'auteur démontre qu'un accord international ne peut comprendre un grand nombre de pays que lorsque les gains de la coopération par rapport à la non-coopération sont faibles. Autrement dit, si les gains à coopérer sont élevés, alors un accord stable ne peut comporter qu'un nombre restreint de signataires. D'après ce résultat, les négociations internationales seraient soumises à un paradoxe de coordination, souvent cité sous la formule « *broad but shallow or deep but narrow* ». Dans tous les cas, avec ces hypothèses un accord stable ne peut pas permettre d'atteindre une réduction substantielle des émissions, par rapport à l'équilibre non coopératif.

Ce résultat obtenu à partir d'un modèle très stylisé (acteurs homogènes, pas de transferts, jeu joué une seule fois, formes fonctionnelles quadratiques plutôt que générales...) est néanmoins en accord avec ce que l'on observe pour l'instant des négociations climatiques internationales, plus particulièrement lors des COP sur le climat. Ainsi le protocole de Kyoto, et plus récemment les accords de Paris, n'ont pas engendré de réduction drastique des émissions mondiales malgré le nombre élevé de signataires. Ceci laisse à penser que de nouvelles approches doivent être explorées : c'est le cas des initiatives infranationales et transnationales, comme les alliances de villes qui font l'objet de cette étude.

## 1.2 L'IMPORTANCE DES VILLES DANS LA LUTTE CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Cette section présente plusieurs arguments qui justifient la pertinence de l'échelle d'étude adoptée, à savoir celle des villes, comme une alternative à celle des Etats. Ceux-ci se répartissent en trois catégories : impact, motivation et agilité.

### ● IMPACT : LES VILLES SONT RESPONSABLES D'UNE GRANDE PARTIE DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET MONDIALES

Les zones urbaines concentrent actuellement plus de 50% de la population mondiale, et les projections des Nations Unies prévoient qu'à l'horizon 2050, près de 70% de la population mondiale sera urbaine<sup>3</sup>. Cette croissance va s'accompagner d'une forte augmentation du nombre de mégapoles, suggérant une concentration accrue de la population dans un nombre restreint de villes. Logiquement, les zones urbaines représentent ainsi une partie importante des émissions mondiales de gaz à effet de serre, comprise entre 70 et 80 % selon les sources : leur impact potentiel en termes de réduction d'émissions est donc crucial.

---

3. The Population Division of the United Nations Department of Economic and Social Affairs (UN DESA) (2018). Revision of the World Urbanization Prospects.

● **MOTIVATION : LES VILLES ONT DES INCITATIONS PARTICULIÈRES À ENTAMER DES EFFORTS DE RÉDUCTION D'ÉMISSIONS**

D'une part, des études scientifiques suggèrent une plus grande vulnérabilité des zones urbaines face au changement climatique, par rapport aux zones rurales (Metz et al., 2007 ; Hallegatte et Corfee-Morlot, 2011). Cette vulnérabilité est due, entre autres, à une hausse plus marquée des températures (effet d'îlot de chaleur urbain), une plus forte exposition aux inondations (porosité des sols faible) et une plus faible résilience alimentaire en cas de disruption des circuits d'approvisionnement (peu de zones productrices d'alimentation).

Par ailleurs, les mesures visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre dans les villes peuvent présenter des co-bénéfices (Bollen et al., 2009), ce qui implique mécaniquement de plus fortes incitations à entamer ces réductions. Ces co-bénéfices peuvent prendre plusieurs formes, comme par exemple :

- Amélioration de la qualité de l'air par réduction de la pollution locale, par exemple dans le cadre d'une utilisation accrue des mobilités douces, des transports en commun et de la mobilité électrique ou à hydrogène.
- Opportunités de développement économique local par la mise en place de nouvelles filières technologiques et la création de nouveaux business, avec la possibilité de positionner en leader sur de nouveaux marchés. On peut citer de nouveau l'exemple de la mobilité électrique ou à hydrogène, mais également le domaine de la rénovation et l'efficacité énergétique des bâtiments ou encore les énergies renouvelables en milieu urbain.

Finalement, les coûts d'adoption de nouvelles technologies pour lutter contre le changement climatique peuvent être réduits par des effets d'apprentissages (Elsayyad and Morath, 2016). Ceux-ci sont en particulier accélérés par des partages de bonnes pratiques ; dans ce domaine, les réseaux d'acteurs transnationaux tels que les alliances de villes sont susceptibles d'apporter une vraie plus-value. Cet effet sera plus amplement discuté dans la suite du rapport.

● **AGILITÉ : L'IMPLEMENTATION DE POLITIQUES CONCRÈTES PEUT SE FAIRE PLUS FACILEMENT À L'ÉCHELLE INFRANATIONALE QUE NATIONALE**

Du fait de leur échelle plus réduite, l'inertie au changement à laquelle sont soumises les villes est moindre que celle que l'on trouve au niveau national. Les mairies ont une meilleure connaissance que les Etats des acteurs locaux susceptibles d'intervenir sur des projets d'aménagement, ainsi qu'une immersion plus marquée dans l'écosystème local qui permet d'identifier plus facilement et à moindre coût les parties prenantes pertinentes pour la mise en place de projets concrets.

## 2

# LES ALLIANCES DE VILLES : INTÉRÊT ET ÉTUDE DE CAS

---

On compte actuellement de nombreux réseaux de villes engagés pour l'environnement, aux missions et extensions géographiques variées. Parmi les plus notoires d'entre eux on peut citer :

- C40 (*Cities Climate Leadership Group*), une alliance mondiale de villes créée en 2005 par le maire de Londres de l'époque, Ken Livingstone, afin de favoriser l'engagement des villes dans la lutte contre le dérèglement climatique.
- ICLEI (*International Council for Local Environmental Initiatives*, Conseil International pour les Initiatives Ecologiques Locales), réseau mondial fondé en 1990 sous le parrainage du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) dont le but est de mettre en place et soutenir des projets de développement durable au niveau local.
- USDN (*Urban Sustainability Directors Network*), un réseau Nord-Américain fondé en 2008 dont la mission est de mettre en lien des membres des gouvernements locaux à travers les Etats-Unis et le Canada, afin de permettre des partages de bonnes pratiques.
- La Convention des Maires, un mouvement européen associant les autorités locales et régionale,s mis en place en 2008 par la Commission européenne après l'adoption du paquet Energie-Climat 2020. son but est d'appeler les membres à prendre des engagements pour l'amélioration de l'efficacité énergétique et l'augmentation de l'usage des sources d'énergie renouvelable.
- FMDV (Fonds Mondial pour le Développement des Villes), une alliance mondiale de villes créée en 2010 et chargée d'accompagner les gouvernements locaux et régionaux dans la recherche de financements pour la mise en place de projets urbains (une sorte de « Banque Mondiale des villes »).
- CCFLA (*Cities Climate Finance Leadership Alliance*), lancé par les Nations Unies en 2014. Assez semblable au FMDV, il s'agit d'une alliance mondiale qui vise à mobiliser des investissements pour des infrastructures résilientes et bas-carbone dans les zones urbaines. Cette initiative regroupe des villes mais également des institutions de financement (publiques et privées) ainsi que des agences de support et des ONGs.

Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur l'analyse de C40, dont nous allons à présent expliquer le fonctionnement à la lumière d'entretiens menés dans les mairies et auprès de parties prenantes, ainsi que de recherches supplémentaires.

## 2.1 ETUDE DE CAS : FONCTIONNEMENT DE C40

Actuellement, C40 comprend 94 villes réparties au niveau global, cumulant 25 % du PIB mondial ainsi que 10 % de la population mondiale (650 millions d’habitants). Comme expliqué précédemment, son positionnement environnemental est axé sur le climat, avec pour objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre des villes.

### ● MEMBRES

#### Répartition

Initialement réservé aux mégapoles (dans une logique de recherche du plus grand impact), le réseau s’est récemment ouvert à la participation de villes aux caractéristiques plus diversifiées. Les membres sont ainsi désormais répartis en trois catégories dont les spécificités sont les suivantes :

1. *Mégapoles* : elles doivent atteindre un certain seuil de population et de poids économique, à savoir :
  - Population : comporter au moins 3 millions d’habitants dans la ville ou 10 millions d’habitants dans la métropole, actuellement ou selon les projections à 2025.
  - PIB : faire partie des 25 premières villes en termes de PIB, actuellement ou selon les projections à 2025.
2. *Innovator cities* : les villes qui ne rentrent pas dans la catégorie de mégapoles, mais qui ont démontré du leadership dans la lutte contre le changement climatique, avec une reconnaissance internationale et un ancrage régional fort.
3. *Observer Cities* : les villes dont la candidature pour adhérer au réseau a été acceptée depuis moins d’un an, ainsi que celles qui rentrent dans une des catégories précédentes mais ne peuvent intégrer officiellement le réseau pour des raisons administratives.

On trouve au sein de C40 une deuxième catégorisation, qui consiste à répartir les villes par zones géographiques (dites « régions »). Celles-ci sont au nombre de sept : Afrique (11 villes), Amérique du Sud (12 villes), Amérique du Nord (15 villes), Asie du centre et de l’Est (13 villes), Asie du Sud et de l’Ouest (9 villes), Asie du Sud-Est/Océanie (12 villes), Europe (19 villes). Alors que certains critiques déplorent que les alliances de villes pour le climat comprennent principalement des villes de pays du Nord (Bansard et al., 2017), l’homogénéité de la répartition géographique des villes membres de C40, avec une grande représentation de pays en fort développement économique tels que la Chine, l’Inde ou le Brésil, est réel un atout pour la résolution du problème climatique, qui est par nature global<sup>4</sup>.

En troisième lieu, suite au constat de l’échec d’une grande partie des tentatives du réseau pour répliquer des initiatives à succès dans d’autres villes (le taux de répliquabilité était de 25 %

---

4. Pour une visualisation de la répartition des villes de C40, voir <https://www.c40.org/cities>

d'après des communiqués de C40), des critères ont été définis pour établir des groupes relativement homogènes, partageant des caractéristiques économiques et de morphologie, afin de mieux identifier les initiatives qu'il peut être pertinent d'exporter en fonction des spécificités locales. A titre d'exemple, une de ces répartitions (sur un plan très basique) se retrouve dans le rapport *Deadline 2020*<sup>5</sup> publié par C40 : chaque membre est positionné sur un axe de développement économique (PIB/hab) et un axe d'émissions de gaz à effet de serre (teqCO<sub>2</sub>/hab). Chaque axe est alors divisé en deux, donnant lieu à quatre catégories : pour chacune d'entre elles, une trajectoire type de réduction d'émissions est alors explicitée.

De plus, dix-sept villes font partie du comité de pilotage, et ont à ce titre un statut particulier. On compte parmi celle-ci Paris, car la présidence actuelle est assurée par la maire de la ville, Anne Hidalgo.

### Conditions d'accès

En 2011, C40 a adopté une liste de prérequis pour pouvoir bénéficier du réseau. Parmi ceux-ci les plus notables sont :

- Mise à disposition de données climatiques sur la ville via un questionnaire en ligne.
- Participation au sommet des maires de C40.
- Participation active à au moins deux sous-réseaux.
- Participation à au moins une collaboration régionale entre membres.
- Mise en place d'objectifs de réduction d'émissions et d'adaptation au changement climatique, ainsi que des plans d'action associés.

Ces conditions d'accès au réseau, qui peuvent être présentées comme des contraintes à satisfaire, comportent un coût que l'on inclura dans la modélisation. Ces prérequis sont toutefois peu contraignants, ce qui démontre le choix de créer un réseau vaste, quitte à avoir des membres moins engagés, plutôt qu'une alliance plus restreinte avec des exigences de réduction d'émissions ambitieuses.

## • MODE DE FONCTIONNEMENT

### Gouvernance

Le mode de gouvernance du réseau est plutôt horizontal et polycentrique, avec une hiérarchie très faible. Les décisions sont prises au sein de sous-réseaux, et les initiatives sont directement implémentées par les membres qui jouissent donc d'une grande autonomie. Ainsi, et en cohérence avec le fait que les conditions d'accès sont faciles à remplir, l'initiative C40 est plus pensée comme une plateforme pour faciliter l'engagement que comme une structure pour imposer des actions contraignantes. D'un point de vue de la théorie des jeux, on pourra donc supposer dans le modèle que les villes adoptent leurs équilibres de Nash respectifs.

---

5. <https://www.c40.org/other/deadline2020>

On peut toutefois expliciter la structure de gouvernance suivante :

- Présidence : ce poste de représentation est occupé à tour de rôle par un maire d'une ville membre, élu par l'organisation. C'est Anne Hidalgo, maire de Paris, qui assure cette fonction depuis 2016.
- Conseil de direction : chargé de surveiller le bon fonctionnement du réseau et de le gérer au quotidien, il est constitué de huit membres, dont des délégués de mairies de villes très actives ainsi que d'organisations qui financent l'initiative. Comme la présidence, le conseil assure de plus des fonctions de représentation.
- Comité de pilotage : actuellement composé des mairies de dix-sept villes membres, et occupé selon une logique de rotations, il est chargé de travailler à définir les directions stratégiques de l'alliance.
- Coordinateurs des sous-réseaux : en charge du développement et de l'animation des groupes de travail sectoriels.

Le choix de l'horizontalité dans la gouvernance et de l'autonomie des membres dans le développement et la mise en place de solutions est un parti pris pragmatique, qui vise à augmenter le nombre de participants à l'alliance. Cependant, des entretiens ont soulevé le caractère confus de l'organisation qui en résulte, avec en particulier un risque à perdre en efficacité si les initiatives les plus pertinentes et les chantiers prioritaires sont difficiles à identifier parmi un foisonnement de propositions.

### Mode de travail

Les personnes qui prennent part au développement des activités de C40 peuvent être séparées en deux catégories :

- Une équipe interne, constituée d'environ 150 personnes qui exercent des fonctions de coordination, de recherche, de développement de nouvelles activités et de communication. En particulier, les activités de recherche consistent principalement dans la prospective en vue d'identifier des actions pertinentes, la collecte et le traitement de données climatiques sur les villes, ainsi que la rédaction et publication d'études techniques et de rapports destinés aux dirigeants.
- Des membres des mairies des villes partenaires, qui servent d'interface entre les villes et le réseau, en tant que points de contact et moteurs pour la mise en place d'actions au niveau local.

Dans ce cadre, les initiatives portées par les villes sont développées au sein de sous-réseaux, qui sont au nombre de dix-sept et se répartissent en cinq catégories :

- Adaptation
- Alimentation, Eau, Déchets

- Énergie et bâtiments
- Qualité de l'air
- Transport et planification urbaine

D'après C40, cette approche par des sous-réseaux vise à favoriser l'engagement climatique des villes grâce à une double dynamique. La première est la mise en réseau entre membres des mairies, qui peuvent s'inspirer des actions développées par leurs pairs et bénéficier de leur retour d'expérience pour faciliter la mise en place de projets et acquérir de nouvelles compétences. La seconde est le gain de légitimité et d'influence politique au niveau national et international, grâce à une plateforme qui confère de la visibilité et des outils d'accompagnement et d'accès à des financements et des connaissances.

Ces deux aspects seront implémentés dans le modèle, à travers la modélisation des effets d'apprentissage et de l'influence politique des villes.

## 2.2 PLUS-VALUE DES ALLIANCES DE VILLES PAR RAPPORT À DES VILLES SEULES

L'analyse précédente a permis de mettre en valeur certains des atouts que peut procurer la mise en réseau des villes pour lutter contre le dérèglement climatique. Dans la suite, nous poussons plus loin cette réflexion et synthétisons les résultats en vue de la construction du modèle.

### • PLUS-VALUE POUR LES VILLES

Nous nous intéressons d'abord aux avantages que les villes peuvent tirer de la participation à des alliances. Le but poursuivi par cette démarche est double : d'une part, il s'agit d'explicitier les arguments qui justifient la pertinence de ces regroupements, de l'autre, cela permet d'apporter un éclairage sur les mécanismes qui incitent ces acteurs à se constituer en réseau.

**Un premier avantage de la mise en réseau pour les villes est de faciliter l'accès à des connaissances et à de l'information.**

Comme expliqué précédemment, des initiatives telles que C40 permettent le partage de bonnes pratiques, ce qui permet de réduire les coûts de transaction associés à la recherche d'informations, tout en favorisant un transfert de compétences susceptible d'accélérer la mise en place d'initiatives similaires à celles ayant déjà été développées ailleurs (qui servent en outre de source d'inspiration). Un point particulièrement utile, d'après les entretiens menés, est la possibilité de bénéficier d'un retour d'expérience impartial par des acteurs qui ont vécu la mise en application concrète de projets, et peuvent donc capitaliser sur les difficultés rencontrées sur le terrain afin d'anticiper ces écueils. Ceci confère aux villes des gains de temps, financiers et en

utilisation de ressources humaines, en facilitant l'accès à des informations autrement difficiles à obtenir.

Par ailleurs, en plus des études de cas produites par les membres, et des échanges de pair-à-pair lors de conférences, de groupes de travail ou de prises de contact individuelles entre mairies, l'inclusion dans le réseau peut assurer un accès privilégié à certaines banques de données. Ainsi, C40 a mis en place un partenariat avec la Banque Mondiale en 2011, qui garantit aux membres de l'alliance l'accès à des outils de mesure développés par la banque multilatérale de développement. Ceux-ci permettent, en autres, d'aider dans l'identification d'opportunités de réduction d'utilisation d'énergie par les zones urbaines<sup>6</sup>. Dans le même esprit, grâce à la mise en place d'équipes de recherche propres au réseau, les villes ont l'opportunité d'exprimer leurs besoins en termes de production de connaissances, et ainsi disposer d'études directement appliquées aux problèmes auxquels elles font face. Dans une perspective d'impact, ceci permet de diminuer la dilution d'efficacité qui a traditionnellement lieu entre la production de connaissance par le domaine académique et la mise en place de politiques publiques associées (pour aller plus loin, voir Lee et Van de Meene, 2012).

Ainsi, du point de vue d'une ville considérée isolément, cet accès privilégié à de l'information permet de réduire les coûts de mise en place de politiques de réduction d'émissions ; d'un point de vue plus global, cette dynamique présente un avantage supplémentaire, qui est d'accélérer les effets d'apprentissage. Grâce à la meilleure maîtrise industrielle, ceci favorise une réduction de coûts des technologies concernées, et à plus long terme des effets de rendements d'échelle lors du développement de nouvelles filières. A ce propos, l'exemple de la mobilité électrique et hydrogène est instructif de ces dynamiques.

### **Un deuxième avantage du regroupement des villes concerne l'accès à des ressources financières.**

Cet atout, mentionné à plusieurs reprises dans des entretiens, a même été présenté comme la plus-value principale de C40 (les autres avantages pouvant être acquis autrement que par la participation à des réseaux officiels). C'est ainsi que le réseau de villes, en tant qu'entité indépendante et avec une forte visibilité, attire des investisseurs qui n'auraient pas été informés, dans le cas de villes isolées avec un pouvoir de communication plus limité, de l'opportunité de financer des projets urbains avec des bénéfices climat. En d'autres termes, cette mise en réseau permet de diminuer les problèmes d'asymétrie d'information auxquels sont soumis les investisseurs. En finançant des projets à travers la plateforme, ces derniers vont par ailleurs être en mesure d'espérer eux-mêmes gagner en visibilité et verdir leur image (pour le cas de réseaux de villes engagées pour l'environnement, comme c'est le cas pour C40) grâce à la communication externe de l'alliance.

Outre l'effet de mise en évidence, une plateforme telle que C40 peut oeuvrer comme un intermédiaire qui peut capter des investissements, ce qui facilite la collecte de fonds. A cela s'ajoute

---

6. <http://c40.org/c40blog/expert-voices-abha-joshi-ghani-sector-manager-urban-development-and-local-government-unit-the-world-bank>

la confiance que peut inspirer une initiative internationalement reconnue, qui communique sur des histoires à succès et est soumise à un risque politique moindre que des villes seules.

Finalement, dans le cas de C40, la participation au réseau permet aux membres de bénéficier d'outils de financement spécifiques et d'assistance technique pour des levées de fonds :

- Concernant les outils de financement, on peut citer à titre d'exemple, dans la lignée des banques de connaissance de la sous-partie précédente, un partenariat avec la Banque Mondiale qui prévoit pour les membres de C40 un accès à des fonds d'investissement climat ainsi qu'à des mécanismes de prêt destinés à des projets de développement. Ceci permet aux villes d'augmenter leur effet de levier, et ainsi de subvenir à des coûts d'investissement d'infrastructures vertes qui peuvent autrement être prohibitifs.
- Concernant l'assistance technique pour les levées de fonds, la mise à disposition d'experts permet aux mairies de surmonter l'asymétrie d'information à laquelle elles sont confrontées lors de la recherche de financements. En effet, ceci permet d'identifier plus facilement et de manière ciblée quels sont les mécanismes de financement les plus pertinents pour chaque situation, et de savoir quelles sources de financement sont mobilisables et selon quelles modalités.

**En troisième lieu, la mise en réseau des villes permet d'acquérir du capital politique et donc d'augmenter le pouvoir d'influence des zones urbaines.**

Grâce à la visibilité et les outils de communication que confère la plateforme, les villes membres peuvent plus facilement faire entendre leur voix ; de plus, leurs revendications sont susceptibles de gagner en légitimité grâce à la pertinence des connaissances que le réseau met à disposition. Ainsi, les villes pourraient disposer grâce à leur regroupement d'un pouvoir de négociation accru sur les politiques nationales, voire régionales ou internationales.

Par ailleurs, la mise en valeur au sein du réseau d'exemples d'engagements politiques forts pris par les pouvoirs publics de certaines villes (que l'on pourrait qualifier de *network brokers*) est susceptible de catalyser la mise en place d'actions par d'autres membres du réseau plus passifs (dit *followers*), selon une logique étudiée dans le champ de recherche sur les entrepreneurs politiques (*policy entrepreneurs*, voir Kern et Bulkeley, 2009).

### • PLUS-VALUE POUR LA RÉDUCTION GLOBALE DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

**La mise en réseau peut accentuer des effets de réputation et de comparaison entre les membres.**

Ceci peut pousser l'engagement des villes au-delà de ce qu'il aurait été autrement. Même si cela n'apporte pas nécessairement de bénéfices aux membres sur le court-terme et ne sera donc pas capturé par notre modèle stylisé, des considérations de dynamiques temporelles avec une actualisation des dommages futurs dûs aux émissions actuelles pourrait s'intéresser à la pertinence de ces efforts supplémentaires.

Dans le cas de C40 les villes ont adopté, en collaboration avec le *World Resources Institute*

(WRI), la Banque Mondiale et Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), le protocole GPC (*Global Protocol for Community-scale Greenhouse Gas Emissions*)<sup>7</sup>. Celui-ci permet de standardiser les métriques de mesure de réductions d'émissions, indépendamment de la taille et caractéristiques géographiques des villes : il facilite donc la comparaison des ambitions et résultats des membres du réseau. A cela s'ajoute l'effet dit de « simple mesure » (*mere measurement effect*) mis en évidence dans des études d'économie comportementale (Morwitz et Fitzsimons, 2001) et qui stipule que le fait de mesurer les effets d'une action a des conséquences sur le comportement lié à cette action (par exemple, le fait de mesurer sa consommation énergétique favorise la sobriété énergétique des ménages, argument souvent mis en avant en faveur des compteurs électriques dits « intelligents »).

Dans un registre légèrement différent, on peut citer les prix et distinctions conférés par le réseau et qui mettent en avant certains membres particulièrement engagés. Afin de bénéficier des opportunités que confère cette mise en valeur, en termes de gain de visibilité et de prise de leadership (Bulkeley et al., 2009), il se peut que certaines villes entreprennent des mesures particulièrement ambitieuses, rehaussant au passage le niveau d'engagement du reste des membres.

### **La mise en réseau peut permettre de basculer d'un équilibre carboné à un équilibre décarboné**

Il existe en théorie des jeux une classe de jeux dite "de coordination". Ceux-ci sont caractérisés par l'existence de plusieurs équilibres de Nash, dont certains consistent à ce que tous les joueurs adoptent la même stratégie. En général, un mode de coordination est nécessaire pour que les joueurs puissent adopter la même stratégie et sélectionner ce qui selon les critères retenus est un "bon" équilibre.

La lutte contre le changement climatique via la réduction d'émissions de gaz à effet de serre peut être présentée comme un tel jeu de coordination. En effet, la réduction des coûts des technologies dites "vertes" par effets de *learning-by-doing* et d'économies d'échelle laisse à penser qu'il y a au moins deux équilibres économiques : d'une part un équilibre "polluant" dans lequel nous nous trouvons actuellement et défini par le *business as usual*, de l'autre un équilibre plus décarboné caractérisé par l'adoption de nouvelles technologies à l'empreinte carbone plus faible, voire par des comportements plus sobres. A travers le modèle, nous allons pouvoir par la suite explorer dans quelle mesure cette hypothèse est pertinente, et éventuellement des conditions de coordination qui permettent de basculer dans l'équilibre décarboné.

---

7. [http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/GPC\\_PilotVersion\\_1.0\\_May2012\\_0120514.pdf](http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/GPC_PilotVersion_1.0_May2012_0120514.pdf)

## 3

# MODÉLISATION D'ALLIANCES DE VILLES

## 3.1 CONSTRUCTION DU MODÈLE : HYPOTHÈSES GÉNÉRALES

### Notations :

Nous considérons  $N$  pays indicés  $i \in \llbracket 1, N \rrbracket$

Dans un pays, il y a deux types d'acteurs indicés  $j \in \{u, r\}$  : les urbains (villes) et les ruraux. Chaque acteur réalise un effort de réduction  $a_i^j$ , et on note

$$a = \sum_{\{i,j\}} a_i^j$$

Les villes peuvent décider ou non de participer à un accord (C40). On définit donc :

$$A := \{i \in \llbracket 1, N \rrbracket / a_i^j \in C40\}, \quad n := \#A$$

Les profits sont définis de manière abstraite par :

$$\pi_i^j(a_i^j, a, n, \delta_{i \in A}) = B_i^j(a) - C_i^j(a_i^j, n, \delta_{i \in A})$$

### Hypothèses :

- Croissances et convexités :

$$(i) \quad B_i^{j'}(a) > 0, \quad B_i^{j''}(a) \leq 0$$

$$(ii) \quad \partial_{a_i^j} C_i^j > 0, \quad \partial_{a_i^j a_i^j} C_i^j \geq 0$$

$$(iii) \quad \partial_n C_i^j < 0, \quad \partial_{nn} C_i^j \geq 0$$

- Urbains VS ruraux :

$$(iv) \quad B_i^u(a) \geq B_i^r(a)$$

$$(v) \quad \partial_{a_i^j} C_i^u \leq \partial_{a_i^j} C_i^r$$

- Signataires VS non-signataires :

$$(vi) \quad \partial_{a_i^j} C_i^u(\dots, 1) \leq \partial_{a_i^j} C_i^u(\dots, 0)$$

$$(vii) \quad C(., 0, 1) \geq C(., 0, 0)$$

$$(viii) \quad \forall a \in \mathbb{R}^+, \exists n \in \mathbb{N}, \forall n \geq N, C(a, n, 1) \leq C(a, n, 0)$$

#### Justification des hypothèses :

- (i) Les dommages dus aux dérèglements climatiques sont une fonction croissante et convexe de la concentration totale de GES dans l'atmosphère, d'où des bénéfices de réduction d'émissions (et donc de la limitation des effets des changements climatiques) croissants et concaves dans la réduction totale d'émissions.
- (ii) Les coûts de réduction d'émissions sont croissants et convexes en l'effort de réduction individuel. En effet, plus on réduit les émissions et plus il est coûteux de réduire une unité d'émission supplémentaire (coût marginal croissant).
- (iii) On suppose des effets d'apprentissage (*learning-by-doing*) permettant de réduire les coûts d'abattement. L'apprentissage est d'autant plus important qu'il y a de membres dans l'alliance de villes, car le partage d'informations est alors plus fructueux. De plus, on suppose que les non-signataires bénéficient également de ces apprentissages, sous la forme de retombées (*spillovers*) qui génèrent ainsi des externalités positives.
- (iv) Les zones urbaines sont supposées plus vulnérables aux changements climatiques que les zones rurales.
- (v) Cette condition traduit la présence de co-bénéfices locaux à réduire les émissions, plus marqués dans les zones urbaines que dans les zones rurales (par exemple, l'amélioration de la qualité de l'air).
- (vi) Toutes conditions égales par ailleurs, le coût marginal de réduction d'émissions est toujours inférieur pour un membre de l'accord que pour un non-membre.
- (vii)-(viii) A niveau d'effort de réduction fixée, être signataire de l'accord ne permet de réduire les coûts d'abattement que si suffisamment d'autres joueurs le sont également.

## 3.2 UN PREMIER MODÈLE : VILLES SEULES HOMOGÈNES

Nous considérons d'abord le cas de  $N$  villes homogènes et nous faisons abstraction des pays. Pour plus de clarté, nous omettons donc l'indice  $u$  dans la suite de cette section. Afin de

simplifier les calculs, nous précisons la forme de la fonction de profits associée :

$$\begin{cases} \pi_i(a_i, a, n, 1) = \delta a - [(c - \lambda n)a_i + \frac{\gamma}{2}a_i^2] - F \\ \pi_i(a_i, a, n, 0) = \delta a - [(c - \beta\lambda n)a_i + \frac{\gamma}{2}a_i^2] \end{cases}$$

Ainsi, le bénéfice marginal de la réduction d'émissions est constant, et le coût d'abattement est une fonction quadratique de l'effort du pays considéré. Le choix de ces formes fonctionnelles entraîne une perte de généralité du modèle, mais est partagé par la plupart des travaux théoriques de modélisation des accords climatiques internationaux.

### Explication des paramètres :

- $\lambda$  caractérise l'importance des effets d'apprentissage.
- $\beta \in [0, 1]$  traduit le degré de *spillover* dont bénéficient les non signataires.
- $F$  représente le coût (supposé constant) de participer au réseau, dû à la contrainte de devoir animer des groupes de travail et de dédier des ressources humaines et financières à l'alliance.

### Fonctions de réaction :

Si l'on suppose que l'alliance comprend  $n \in \llbracket 0, N \rrbracket$  membres, il est possible de calculer la fonction de réaction des signataires et des non-signataires. On obtient :

$$\begin{cases} a_i = \frac{\delta - c + \lambda n}{\gamma} & \text{si } i \in A \\ a_i = \frac{\delta - c + \beta\lambda n}{\gamma} & \text{si } i \notin A \end{cases}$$

Par la suite, on remplace  $a_i$  par  $a_s$  si  $i \in A$  et par  $a_{ns}$  si  $i \notin A$

### Réduction globale d'émissions :

La réduction globale d'émissions vaut :

$$\begin{aligned} a &= na_s + (N - n)a_{ns} \\ &= n\frac{\delta - c + \lambda n}{\gamma} + (N - n)\frac{\delta - c + \beta\lambda n}{\gamma} \\ &= \frac{(1 - \beta)\lambda}{\gamma}n^2 + \frac{\beta\lambda N}{\gamma}n + \frac{(\delta - c)N}{\gamma} \end{aligned}$$

Naturellement, cette expression est croissante en  $n$  le nombre de signataires,  $\lambda$  et  $\beta$  les facteurs d'apprentissage et de *spillover* ainsi qu'en  $\delta$  le bénéfice marginal de réduction d'émissions. De manière tout aussi naturelle, elle est décroissante en  $c$  et  $\gamma$ , paramètres de coûts d'abattement.

**Conditions de stabilité et recherche d'équilibres :**

Une alliance comportant  $n \in \llbracket 1, N - 1 \rrbracket$  membres sera stable à condition que :

$$\begin{cases} \pi_s(n) > \pi_{ns}(n-1) & (i) \\ \pi_{ns}(n) \geq \pi_s(n+1) & (ii) \end{cases}$$

La condition (i) traduit la stabilité interne de l'alliance : il est plus profitable pour un membre de rester dans l'alliance que de la quitter.

La condition (ii) traduit la stabilité externe de l'alliance : il est plus profitable pour un non-membre de rester hors de l'alliance que d'y entrer.

De plus, pour une alliance comportant  $n = N$  (respectivement  $n = 0$ ) membres la condition (i) (respectivement (ii)) suffit à garantir la stabilité.

Dans un premier temps, nous effectuons l'étude de stabilité en supposant  $n \gg 1$ , ce qui permet d'approcher  $\pi_s(n) - \pi_{ns}(n-1) \approx \pi_s(n) - \pi_{ns}(n) := \pi_s - \pi_{ns}$ . Ceci revient à négliger l'influence d'une ville donnée sur les choix d'abattement de toutes les autres ; nous relâcherons cette hypothèse ultérieurement.

On a (voir annexe pour les détails) :

$$\pi_s - \pi_{ns} = An^2 + Bn + C \quad (*)$$

Avec :

$$\begin{cases} A = \frac{\lambda^2(1-\beta^2)}{2\gamma} \\ B = -\frac{c\lambda(1-\beta)}{\gamma} \\ C = -F \end{cases}$$

On trouve deux racines réelles au polynôme :

$$n_{\pm} = \frac{c}{\lambda(1+\beta)} \left( 1 \pm \sqrt{1 + \frac{2\gamma F}{c^2} \frac{1+\beta}{1-\beta}} \right)$$

On remarque :

$$\begin{cases} n_- < 0 \\ n_+ > 0 \end{cases}$$

Si l'on considère que le nombre total de villes susceptibles de participer à l'accord est suffisamment élevé, nous pouvons supposer que  $n_+ < N$ . Nous avons dans ce cas-là un jeu dit "de coordination" : pour  $n < n_+$ , une ville n'aura pas intérêt à entrer dans l'accord unilatéralement, et pour  $n > n_+$ , elle n'aura pas intérêt à en sortir unilatéralement. En d'autres termes, le jeu possède deux équilibres de Nash :  $n = 0$  et  $n = N$ .

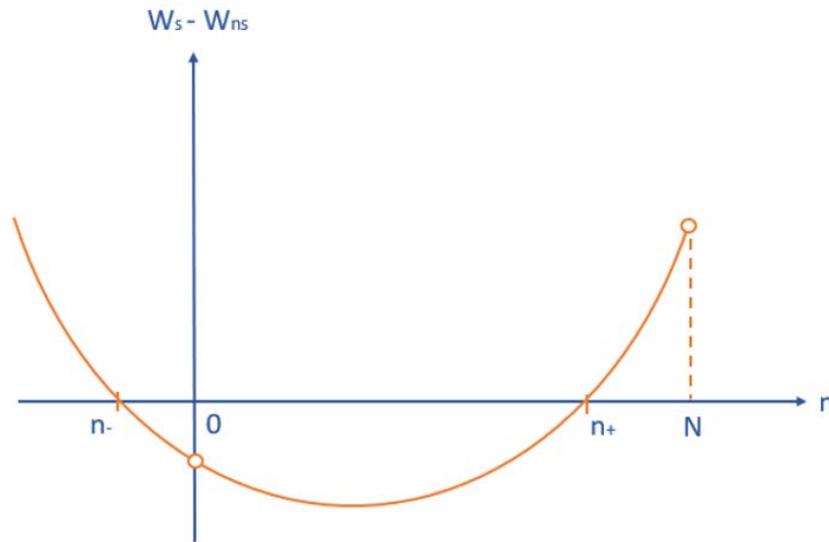


FIGURE 1 – Représentation graphique du jeu de coordination

**Discussion :** Le passage de l'équilibre non-coordonné à l'équilibre coordonné se fait lorsque l'alliance de villes atteint  $n_+$  membres. Ainsi, la coordination est d'autant plus aisée à atteindre que  $n_+$  est faible, c'est-à-dire lorsque :

- $F$  est faible : alors les coûts à adhérer à l'alliance sont faibles, ce qui diminue l'incitation à se comporter en passager clandestin (*free-riding*).
- $c, \gamma$  sont faibles : dans ce cas-là les coûts de réduction d'émissions sont faibles, et donc la contrainte d'engagement plus ambitieux qu'impose la participation à l'accord est moindre.
- $\lambda$  est élevé : la participation à l'accord présente d'autant plus d'avantages (via la réduction du coût d'abattement) que les effets d'apprentissage sont importants. Dans ce cas encore, l'incitation au *free-riding* diminue, car si les non-signataires bénéficient eux aussi des effets d'apprentissage, ils en tirent un profit moindre dès lors que  $\beta < 1$

L'existence d'un point de bascule dans ce modèle n'est pas sans rappeler la mise en place de certaines clauses dans des accords environnementaux, et qui stipulent que l'accord n'entre en vigueur qu'à partir d'un nombre suffisamment élevé de signataires.

Remarque : les expressions précédentes concernant le seuil de coopération ne font pas intervenir le paramètre de bénéfice d'abattement  $\delta$  : ceci provient de la simplification qui consiste à négliger l'effet d'une ville individuelle ; le calcul exact effectué par la suite permettra de mettre en évidence l'effet de ce paramètre.

#### Prise en compte de la taille des villes :

Si l'on souhaite introduire de l'hétérogénéité dans la taille des villes, on peut par exemple

aggréger les bénéfices et les coûts d'abattement sur l'ensemble de la population.

Plus précisément, soit  $P_i$  la taille de la ville  $i$ , et supposons que  $F$  est indépendant de  $P_i$ . Ceci revient à considérer que les ressources dédiées à l'animation du réseau et autres coûts de participation ne dépendent pas de la taille de la ville, ce qui est cohérent avec les contraintes imposées aux membres de C40.

On obtient sous ces hypothèses :

$$\begin{cases} \pi_i(a_i, a, n, 1) = P_i \cdot (\delta a - [(c - \lambda n)a_i + \frac{\gamma}{2}a_i^2]) - F \\ \pi_i(a_i, a, n, 0) = P_i \cdot (\delta a - [(c - \beta\lambda n)a_i + \frac{\gamma}{2}a_i^2]) \end{cases}$$

Alors :

$$\pi_s - \pi_{ns} = P_i A n^2 + P_i B n + C$$

D'où une racine positive :

$$\begin{aligned} \tilde{n}_+ &:= \frac{-P_i B + \sqrt{P_i^2 B^2 - 4P_i A C}}{2P_i A} \\ &= \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4\frac{AC}{P_i}}}{2A} \\ &< \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} = n_+ \end{aligned}$$

(Pour rappel, on a  $AC < 0$  car  $A > 0$  et  $C < 0$ ).

On en déduit que la coordination est d'autant plus facile à atteindre que la taille de la ville est grande. Ce fait stylisé n'est pas sans rappeler que les villes participant à C40 sont essentiellement des mégapoles, l'acceptation au réseau ayant même été à l'origine réservée à celles-ci.

### Prise en compte de l'effet d'une ville individuelle :

Dans le calcul précédent, afin de déterminer les conditions sous lesquelles il est plus intéressant pour une ville de participer à l'alliance, nous avons comparé les profits d'un signataire  $\pi_s$  (implicitement :  $\pi_s(n)$ ) et d'un non-signataire  $\pi_{ns}$  (implicitement :  $\pi_{ns}(n)$ ) lorsque l'accord comprend  $n$  membres. Nous avons ainsi négligé l'effet d'une ville fixée sur le comportement des autres joueurs. Cette hypothèse d'"atomicité", qui permet de simplifier les calculs, est justifiée dès lors que  $n$  est élevé et permet de mettre en évidence que le modèle donne lieu à un jeu de coordination.

Il est néanmoins possible de relâcher cette hypothèse ; dans ce cas-là, il s'agit de déterminer les  $n \in \llbracket 1, N \rrbracket$  tels que  $\pi_s(n) > \pi_{ns}(n-1)$ .

On obtient après calculs :

$$\pi_s(n) - \pi_{ns}(n-1) = A'n^2 + B'n + C'$$

Avec :

$$\begin{cases} A' = \frac{\lambda^2(1-\beta^2)}{2\gamma} = A \\ B' = \frac{\lambda(1-\beta)}{\gamma}(\delta - c) = \frac{\lambda(1-\beta)}{\gamma}\delta + B \\ C' = \frac{\lambda^2\beta^2}{2\gamma} - F = \frac{\lambda^2\beta^2}{2\gamma} + C \end{cases}$$

Dans ce cas-là plusieurs situations sont possibles :

- Si  $C' < 0$  : on a un jeu de coordination comme précédemment. Cette configuration correspond à une situation dans laquelle le coût d'être dans l'accord est suffisamment élevé par rapport à la réduction de coûts due au *spillover*. L'alliance ne devient attractive qu'à partir d'un certain seuil de signataires (voir figure 2).

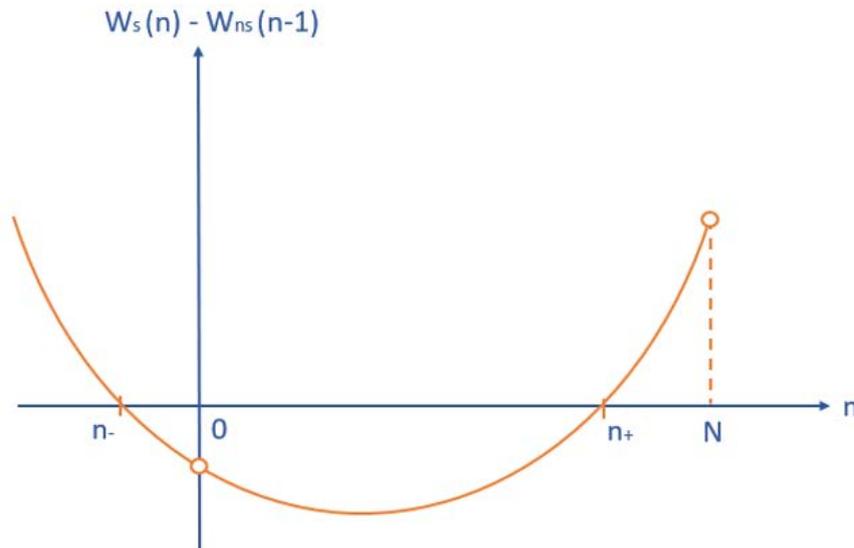


FIGURE 2 – Cas  $C' < 0$  : jeu de coordination

- Sinon : en notant  $\Delta' := B'^2 - 4A'C'$  le discriminant du trinôme :
  - ★ Si  $\Delta' > 0$  et  $B' < 0$  : le trinôme possède deux racines réelles positives : il y a ainsi deux équilibres avec un nombre strictement positif de signataires, dont celui de participation totale. C'est donc encore un jeu de coordination mais qui diffère du précédent dans la mesure où dans l'équilibre non-coordonné certaines villes participent

à l'accord (voir figure 3).

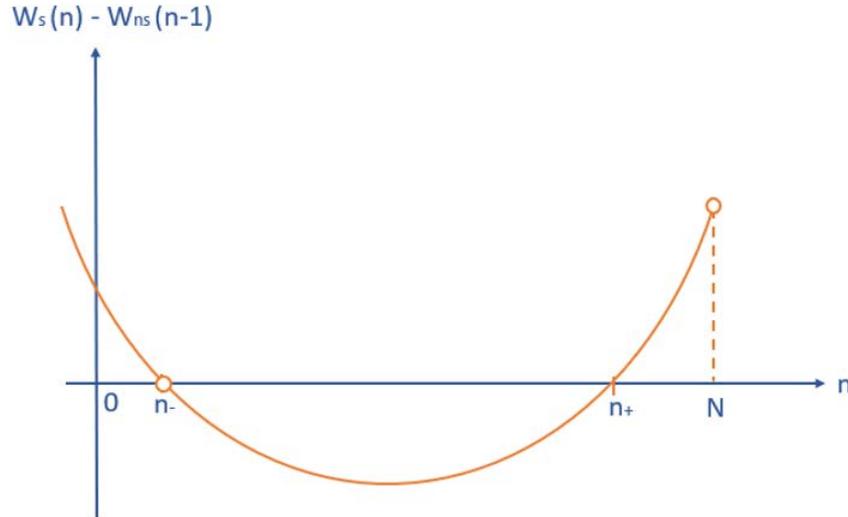


FIGURE 3 – Cas  $\Delta' > 0$  et  $B' < 0$  : deux équilibres, coordination partielle et totale

Cette situation correspond à un coût de participation à l'accord faible comparée aux gains du spillover ( $C' > 0$ , réduit les incitations au *free-riding*), couplée à des bénéfices de réduction d'émissions faibles comparés aux coûts d'abattement ( $B' < 0$ , ie  $\delta < c$ , augmente les incitations au *free-riding*).

Avec ces valeurs des paramètres, les villes peuvent effectuer des efforts d'abattement négatifs (dès lors que  $\lambda n < c - \delta$ ).

- ★ Sinon, le jeu ne possède qu'un équilibre, celui de participation totale. Il est toujours avantageux d'être dans l'accord lorsque le coût de participation est faible et que les gains à réduire ses émissions sont importants (voir figure 4).

### 3.3 EXTENSION DU MODÈLE : INTRODUCTION DES PAYS ET DES ZONES RURALES

Afin de pousser plus loin l'étude, et dans le but d'explorer les interactions entre les alliances de villes et les négociations entre Etats, nous complexifions le modèle présenté précédemment. Nous considérons donc  $N$  pays indicés  $i \in \llbracket 1, N \rrbracket$ , avec dans chaque pays deux types d'acteurs indicés  $j \in \{u, r\}$  : les urbains (villes) et les ruraux.

Les fonctions de profit sont les suivantes :

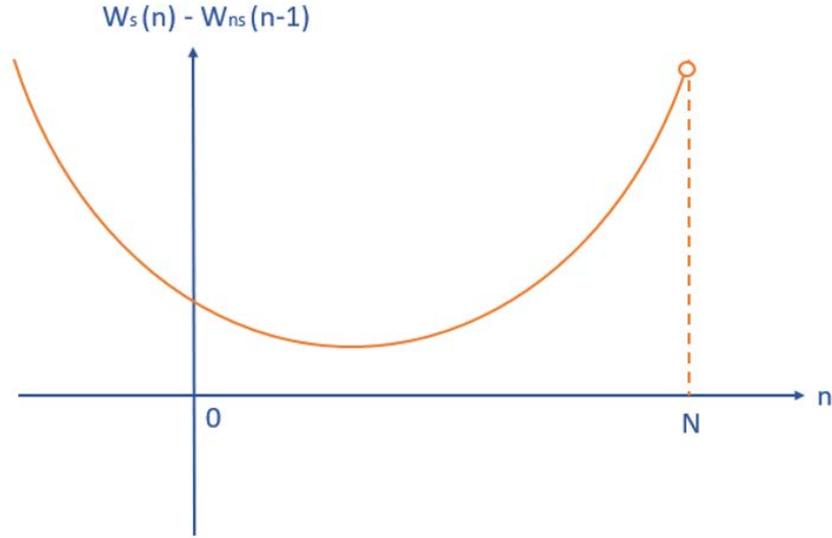


FIGURE 4 – Reste des cas : un seul équilibre, coordination totale

Villes :

$$\begin{cases} \pi_i^u(a_i^u, a, n, 1) = \delta^u a - [(c - \lambda n)a_i^u + \frac{\gamma}{2}a_i^{u2}] - F \\ \pi_i^u(a_i^u, a, n, 0) = \delta^u a - [(c - \beta\lambda n)a_i^u + \frac{\gamma}{2}a_i^{u2}] \end{cases}$$

Zones rurales :

$$\pi_i^r(a_i^r, a, n, \cdot) = \delta^r a - [ca_i^r + \frac{\gamma}{2}a_i^{r2}]$$

Pays :

$$\begin{cases} \pi_i(a_i^u, a_i^r, a, n, 1) = \pi_i^u(a_i^u, a, n, 1) + \pi_i^r(a_i^r, a, n) + x \sum_{j \in A} B_j^u(a) \\ \pi_i(a_i^u, a_i^r, a, n, 0) = \pi_i^u(a_i^u, a, n, 0) + \pi_i^r(a_i^r, a, n) \end{cases}$$

Ainsi :

- Les villes ont la même fonction de profit que dans le modèle de base.
- Les zones rurales ont une structure de coût similaire, avec  $\delta^r < \delta^u$  et sans effets d'apprentissage. De plus, elles n'ont pas la possibilité de former des alliances.
- Les pays cherchent à maximiser la somme des fonctions objectif de leur zone urbaine et leur zone rurale.
- Si la ville  $i$  est dans l'alliance, alors elle impose à son pays de prendre en compte les dégâts climatiques subis par les autres villes de l'accord et dûs aux émissions du pays, avec un facteur d'internalisation  $x \in [0, 1]$  (Hagen et al., 2016). Ce facteur peut se comprendre comme une mesure de l'influence politique de la ville sur le planification

climatique décidée au niveau national.

Le jeu se déroule en deux étapes :

1. Les villes décident d'entrer ou non dans l'alliance.
2. Chaque pays maximise son profit compte tenu des anticipations des réductions d'émissions des autres pays (équilibre de Nash), et ce de manière simultanée.

Un tel jeu peut se résoudre par la méthode dite de raisonnement rétrograde (*backward induction*). C'est ce que nous présentons par la suite.

### Fonctions de réaction :

Si l'on suppose  $n \in \llbracket 0, N \rrbracket$  villes signataires, il est possible de calculer la fonction de réaction des pays dont la ville est signataire et de ceu où elle est non-signataire. On pose :

$$\delta := \delta^u + \delta^r$$

et on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} (a_i^u, a_i^r) = \left( \frac{\delta - c + \lambda n + x n \delta^u}{\gamma}, \frac{\delta - c + x n \delta^u}{\gamma} \right) := (a_s^u, a_s^r) \quad \text{si } i \in A \\ (a_i^u, a_i^r) = \left( \frac{\delta - c + \beta \lambda n}{\gamma}, \frac{\delta - c}{\gamma} \right) := (a_{ns}^u, a_{ns}^r) \quad \text{si } i \notin A \end{array} \right.$$

### Réduction globale d'émissions :

La réduction globale d'émissions vaut :

$$\begin{aligned} a &= n(a_s^u + a_s^r) + (N - n)(a_{ns}^u + a_{ns}^r) \\ &= n \frac{2(\delta - c) + (\lambda + 2x\delta^u)n}{\gamma} + (N - n) \frac{2(\delta - c) + \beta \lambda n}{\gamma} \\ &= \frac{(1 - \beta)\lambda + 2x\delta^u}{\gamma} n^2 + \frac{\beta \lambda N}{\gamma} n + 2 \frac{(\delta - c)N}{\gamma} \end{aligned}$$

Comme dans le modèle "villes seules", cette expression est croissante en  $n$  le nombre de signataires,  $\lambda$  et  $\beta$  les facteurs d'apprentissage et de *spillover*, ainsi qu'en  $\delta^u$  et  $\delta^r$  les bénéfices marginaux de réduction d'émissions. Elle est décroissante en  $c$  et  $\gamma$ , paramètres de coûts d'abattement. Finalement, cette expression est croissante en  $x$ , l'influence politique des villes.

### Condition d'adhésion à l'accord :

Comme dans la section précédente, nous effectuons dans une premier temps l'étude de stabilité en supposant  $n \gg 1$ , ce qui permet d'approcher  $\pi_s(n) - \pi_{ns}(n - 1) \approx \pi_s(n) - \pi_{ns}(n) := \pi_s - \pi_{ns}$ .

On a (voir annexe pour les détails) :

$$\pi_s^u - \pi_{ns}^u = A_2 n^2 + B_2 n + C_2 (**)$$

Avec :

$$\begin{cases} A_2 = A(1 - a) < A \\ B_2 = B(1 + b) < B < 0 \\ C_2 = C \end{cases}$$

Où l'on a posé :

$$\begin{cases} a := \frac{1}{1-\beta^2} \left( \frac{x\delta^u}{\lambda} \right)^2 \\ b := \frac{1}{1-\beta} \frac{x\delta^u}{\lambda} \frac{\delta}{c} \end{cases}$$

### Discussion :

Nous distinguons plusieurs cas de figure, selon  $\text{sgn}(1 - \alpha) = \text{sgn}(1 - (\beta^2 + (\frac{x\delta^u}{\lambda})^2))$  :

• **Cas 1** : si  $1 > \beta^2 + (\frac{x\delta^u}{\lambda})^2$  :

On a alors  $A_2 > 0$ , donc on obtient un jeu de coordination analogue à celui du modèle "villes seules", mais avec un seuil de coordination différent. Il est tentant de comparer  $n_+$  à la valeur de la racine positive de ce nouveau trinôme, notée  $n_{+2}$  par la suite.

Or on a :

$$(An^2 + Bn + C) - (A_2n^2 + B_2n + C_2) = aAn^2 - bBn > 0$$

On en déduit :

1.  $n_+ < n_{+2}$ , donc il est plus facile d'atteindre le seuil de coordination dans le modèle des villes seules que lorsque l'on prend en compte les zones rurales. ceci est dû à l'acquisition d'une influence politique des villes signataires qui oblige les pays correspondants à internaliser une partie des externalités produites par les émissions de gaz à effet de serre.
- 2.

$$\forall n \in \mathbb{N}, aAn^2 - bBn = \frac{(x\delta^u)^2}{2\gamma} n^2 + \frac{x\delta^u \delta}{\gamma} n$$

Pour  $n = n_{2+}$  cette expression est une fonction :

- Croissante de  $x, \delta^u, \delta^r$
- Décroissante de  $\gamma$

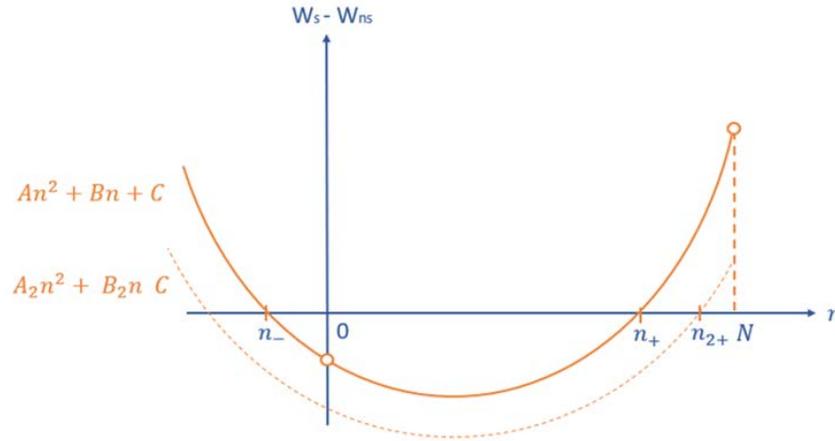


FIGURE 5 – Jeux de coordination villes seules et villes avec zones rurales

Comme  $A, B, C$  sont indépendants de  $x$ , de  $\delta^u$  et de  $\delta^r$ , un raisonnement graphique montre que  $n_{+2} - n_+$ , et donc  $n_{+2}$ , est croissant en  $x$  et en  $\delta^u, \delta^r$ . D'où :

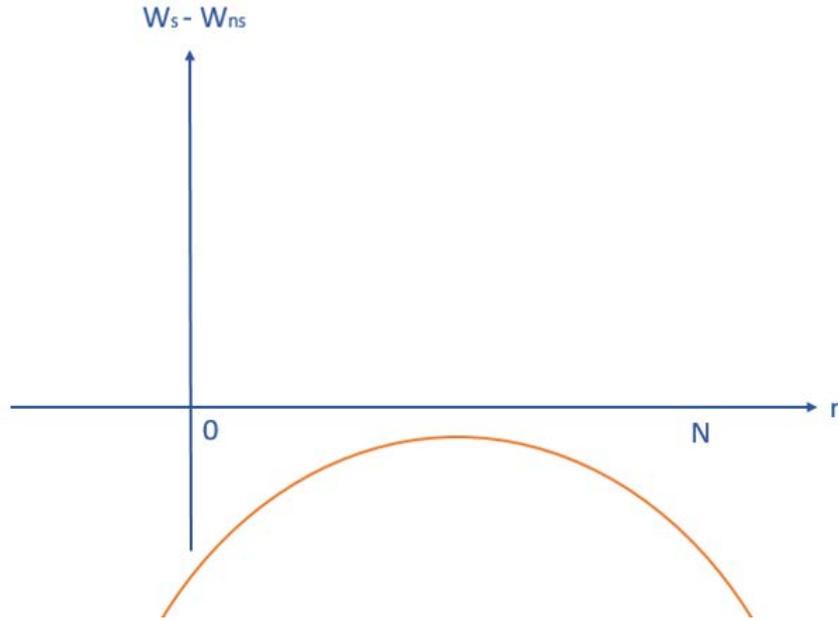
- ★ Si  $x$  augmente, alors la coordination est plus difficile à atteindre. Ceci découle de l'internalisation d'une partie des externalités pour les villes signataires, ce qui augmente les incitations au *free-riding*
- ★ Si  $\delta^u$  ou  $\delta^r$  augmente, alors la coordination est plus difficile à atteindre. En effet, l'internalisation des externalités va être d'autant plus importante que les joueurs sont enclins à effectuer des réductions d'émissions (via l'effet de produits croisés dans les coûts quadratiques).

• **Cas 2** : si  $1 < \beta^2 + \left(\frac{x\delta^u}{\lambda}\right)^2$ , c'est-à-dire lorsque si le poids politique des villes  $x$  ou les bénéfices marginaux d'atténuation des villes  $\delta^u$  sont trop importants relativement au facteur d'apprentissage  $\lambda$ , ou bien si le facteur de spillover  $\beta$  est trop important :

Dans ce cas-là, on a  $A_2 < 0, B_2 < 0$  et  $C_2 < 0$ , et la fonction  $\pi_s^u - \pi_{ns}^u$  est négative pour tout  $n$  : la coordination n'est pas possible, voir figure 6.

On retient de cette discussion que les éléments suivants peuvent briser la coordination :

- Un poids politique des villes  $x$  trop important, ou alternativement des bénéfices d'atténuation marginaux des villes (et donc des dommages climatiques marginaux)  $\delta^u$  trop importants, par rapport au facteur d'apprentissage  $\lambda$ . Ceci entraîne des réductions d'émission par les Etats trop ambitieuses par rapport aux gains qu'apporte la coordination.
- Un facteur de spillover  $\beta$  trop important, qui augmente l'incitation au *free-riding*. Ainsi, dans un cas où le *spillover* peut être contrôlé par les membres de l'alliance (avec une forme de sanction commerciale ou de brevet restrictif de la part des pays où la ville est signataire vis-à-vis des pays où elle ne l'est pas), il peut être socialement optimal

FIGURE 6 – Cas  $1 < \beta^2 + (\frac{x\delta^u}{\lambda})^2$ , pas de coordination

que de telles mesures soient adoptées. Le facteur d'apprentissage gagne d'autant plus en exclusivité que  $\beta$  est restreint, se rapprochant ainsi d'un "bien club" exclusif mais non-rival (en effet, les extrêmes  $\beta = 0$  et  $\beta = 1$  correspondent respectivement aux effets d'apprentissage vus comme un bien club et comme un bien public).

#### Version exacte du calcul de stabilité :

Dans le cas où l'on ne suppose pas  $n \gg 1$ , l'approximation  $\pi_s(n) - \pi_{ns}(n-1) \approx \pi_s(n) - \pi_{ns}(n)$  n'est plus valable. Comme le montre une analyse à l'ordre dominant, les termes négligés lors de cette approximation sont en  $O(n)$ . Ceci ne modifie donc pas la convexité/concavité de la courbe et par conséquent son allure qualitative : on en déduit que cette simplification ne change pas l'existence ou non d'un équilibre de coordination totale (dans l'hypothèse où  $N$  est suffisamment grand, plus précisément supérieur à la plus grande des racines du trinôme si elles existent).

Néanmoins, le calcul exact peut altérer le signe des coefficients du trinôme en  $n$ , et donc le positionnement des racines par rapport à 0. En effet, on trouve en l'absence d'approximation :

$$\pi_s(n) - \pi_{ns}(n-1) = A_3 n^2 + B_3 n + C_3$$

Avec :

$$\begin{cases} A_3 = A_2 \\ B_3 = B_2 + \frac{2\lambda(1-\beta)\delta^u + (\beta\lambda)^2 + 4x\delta^{u^2}}{\gamma} \\ C_3 = C_2 + \frac{-(\beta\lambda)^2 - 2\beta\lambda c - 2\lambda\delta^u - 4x\delta^{u^2} + 2(N+1)\beta\lambda}{2\gamma} \end{cases}$$

Une discussion sur l'expression analytique des racines, ainsi que l'étude de leur signe, n'est pas abordée dans le cadre de ce travail.

Intéressons-nous tout de même à l'effet du poids politique des villes  $x$  sur la coordination. On note :

$$\Phi(n, x) := \pi_s(n) - \pi_{ns}(n-1)$$

Les conditions de stabilité se réécrivent alors :

$$\begin{cases} \Phi(n, x) > 0 & (i) \\ \Phi(n+1, x) \leq 0 & (ii) \end{cases}$$

Ou encore, si l'on ne considère plus  $n$  comme discret mais continu :

$$\begin{cases} \Phi(n, x) = 0 \\ \frac{d\Phi(n, x)}{dn} < 0 \end{cases}$$

De plus, pour  $n = N$  (respectivement  $n = 0$ ) il suffit d'avoir (i) (respectivement (ii)). On peut alors écrire :

$$\Phi(n, x) = \Phi(n, 0) - \frac{\delta^{u2} n^2}{2\gamma} x^2 + \frac{(4\delta^{u2} - \delta^u \delta)n - 2\delta^{u2}}{\gamma} x$$

D'où :

$$\frac{d\Phi}{dx}(n, x) = -\frac{\delta^{u2} n^2}{\gamma} x + \frac{(4\delta^{u2} - \delta^u \delta)n - 2\delta^{u2}}{\gamma} = \frac{\delta^u}{\gamma} \left( -\delta^u x n^2 + (4\delta^u - \delta)n - 2\delta^u \right)$$

A partir de cette expression, il est possible de voir comment évolue  $\Phi$  en tout point  $n$  lorsque l'on fait varier  $x$ , ainsi que le seuil de coordination  $n_+(x)$  (s'il existe). Il est difficile de mener le raisonnement analytique à bout, mais on pourrait définir un  $x$  optimal par :

$$x^* := \operatorname{argmin}_{x \in [0,1]} n_+(x)$$

## 3.4 INÉGALITÉS ET TRANSFERTS

Nous nous intéressons dans cette section à la question des inégalités villes/campagnes et l'éventualité de transferts associés.

Les résultats établis dans les sections précédentes permettent d'écrire les niveaux d'abattement

dans les différentes étapes de construction du modèle :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Sans pays :} \\ \quad (a_s^u, a_0^s) = \left( \frac{\delta^u - (c_0 - \lambda n)}{\gamma}, \frac{\delta^u - c_0}{\gamma} \right) \\ \quad (a_{ns}^u, a_{ns}^r) = \left( \frac{\delta^u - (c_0 - \beta \lambda n)}{\gamma}, \frac{\delta^u - c_0}{\gamma} \right) \\ \text{Avec pays :} \\ \quad (a_s^u(x), a_s^r(x)) = \left( \frac{\delta + xn\delta^u - (c_0 - \lambda n)}{\gamma}, \frac{\delta + xn\delta^u - c_0}{\gamma} \right) \\ \quad (a_{ns}^u(x), a_{ns}^r(x)) = \left( \frac{\delta - (c_0 - \beta \lambda n)}{\gamma}, \frac{\delta - c_0}{\gamma} \right) \end{array} \right.$$

On souhaite désormais étudier l'influence de l'introduction de l'Etat sur les profits des différentes parties, puis celle de la prise en compte de l'influence politique des villes.

### Influence de l'introduction de l'Etat :

Le gain de profit des villes signataires s'écrit :

$$\begin{aligned} G_v &= \int_{na_s + (N-n)a_{ns}}^{na_s(0) + (N-n)a_{ns}(0)} B'(x) dx - \int_{a_s^u}^{a_s^u(0)} C'(x) dx \\ &= \delta^u [na_s(0) + (N-n)a_{ns}(0) - (na_s + (N-n)a_{ns})] - (c_0 - \lambda n(a_s^u(0) - a_s^u)) - \frac{\gamma}{2}(a_s(0)^{u2} - a_s^u)^2 . \\ &= \frac{1}{\gamma}(N\delta^{u2} + (N-1)\delta^u\delta^r - \frac{1}{2}\delta^{r2}) > 0 \end{aligned}$$

Cette expression ne fait pas intervenir  $\lambda$ , elle est donc valable également dans le cas de villes non-signataires.

Pour les ruraux on trouve de même :

$$G_r = \frac{1}{\gamma}(N\delta^{r2} + (N-1)\delta^u\delta^r - \frac{1}{2}\delta^{u2}) .$$

On a donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} G_v - G_r = \frac{2N+1}{2\gamma}(\delta^{u2} - \delta^{r2}) > 0 \\ G_v + G_r = \frac{2N-1}{2\gamma}(\delta^{u2} + \delta^{r2}) + \frac{2(N-1)\delta^u\delta^r}{\gamma} > 0 \end{array} \right.$$

Puis :

$$\begin{aligned} G_r < 0 &\Leftrightarrow \frac{1}{\gamma}(N\delta^{r2} + (N-1)\delta^u\delta^r - \frac{1}{2}\delta^{u2}) < 0 \\ &\Leftrightarrow -\left(\frac{\delta^u}{\delta^r}\right)^2 + 2(N-1)\frac{\delta^u}{\delta^r} + 2N < 0 . \\ &\Leftrightarrow \frac{\delta^u}{\delta^r} > N-1 + \sqrt{N^2 - N + 1} \end{aligned}$$

Où la dernière équivalence provient de l'étude d'un trinôme du second degré.

Ainsi :

- L'introduction de l'Etat provoque un gain de profit total.

- Les villes tirent toujours un profit positif de l'action de l'Etat, et un profit supérieur à celui des ruraux.
- Le profit des ruraux peut être négativement influencé par l'introduction de l'Etat, lorsque le bénéfice de réduction d'émissions des villes est trop élevé par rapport à celui des ruraux. On pourra alors dire que l'on est dans une situation "gilets jaunes".

### Effet de l'influence politique des villes :

On souhaite désormais comparer la situation avec  $x = 0$  et celle avec  $x > 0$ . Nous examinons d'abord un premier temps le cas simple des pays dont la ville est non-signataire, puis celui plus complexe où la ville est membre de l'alliance.

#### a) Le cas des villes non-signataires :

Le gain de profit d'une ville non-signataire s'écrit, en remarquant que  $a_{ns}^u(0) = a_{ns}^u(x)$  et  $a_{ns}^r(0) = a_{ns}^r(x)$  :

$$\begin{aligned}
 G_v &= \int_{na_s(0)+(N-n)a_{ns}(0)}^{na_s(x)+(N-n)a_{ns}(x)} B'(x) dx - \int_{a_{ns}^u(0)}^{a_{ns}^u(x)} C'(x) dx \\
 &= \delta^u (na_s(x) - na_s(0)) \\
 &= \frac{2xn^2\delta^u}{\gamma}
 \end{aligned}$$

Pour les ruraux on a :

$$G_r = \frac{2xn^2\delta^u\delta^r}{\gamma} .$$

Ainsi :

- Dans les pays où la ville est non-signataire, aussi bien les villes que les zones rurales gagnent d'une influence politique accrue des villes. Ceci provient des externalités positives que produit la hausse de l'effort d'atténuation dans les pays où la ville est signataire (cette analyse ne prend pas en compte l'effet indirect d'une variation du nombre total de signataires due à une influence politique des villes accrue, qui peut affecter le niveau total d'émissions ainsi que la réduction de coûts due au *spillover*).
- Les villes bénéficient plus de cet effet que les zones rurales, car  $\delta^u > \delta^r$ .

#### b) Le cas des villes signataires :

Le gain de profit d'une ville signataire s'écrit :

$$\begin{aligned}
 G_v &= \int_{na_s(0)+(N-n)a_{ns}(0)}^{na_s(x)+(N-n)a_{ns}(x)} B'(x) dx - \int_{a_s^u(0)}^{a_s^u(x)} C'(x) dx \\
 &= \delta^u (na_s(x) - na_s(0)) - (c_0 - \lambda n)(a_s^u(x) - a_s^u(0)) - \frac{\gamma}{2}(a_s^u(x)^2 - a_s^u(0)^2) \\
 &= \frac{xn\delta^u}{\gamma} (2n\delta^u - \delta - \frac{xn\delta^u}{2}) \\
 &= \frac{xn\delta^u}{\gamma} \left[ \left( (2 - \frac{x}{2})n - 1 \right) \delta^u - \delta^r \right] \quad (> 0 \Leftrightarrow n \geq 1)
 \end{aligned}$$

Pour les ruraux on a :

$$G_r = \frac{xn\delta^u}{\gamma}(2n\delta^r - \delta - \frac{xn\delta^u}{2}) .$$

Cette fois-ci, il y a aussi un gain de l'Etat, dû à la prise en compte dans la fonction de profit des bénéficiaires d'atténuation des autres villes membres de l'accord (qui pourrait s'interpréter comme une dimension altruiste). On obtient :

$$\begin{aligned} G_p &= xn\delta^u(a^u(x) + a^r(x) - (a^u(0) + a^r(0))) \\ &= xn\delta^u(2n\frac{xn\delta^u}{\gamma}) \\ &= 2n^3\frac{(x\delta^u)^2}{\gamma} \end{aligned}$$

Pour les questions de redistribution, on fait le choix de ne pas comptabiliser ce profit, qui est d'une certaine manière "artificiel".

On a d'après ce qui précède :

$$\left\{ \begin{array}{l} G_v - G_r = 2\frac{xn^2\delta^u}{\gamma}(\delta^u - \delta^r) \\ G_v + G_r = \frac{xn\delta^u}{\gamma}(2(n-1)\delta - xn\delta^u) \\ \quad = \frac{xn\delta^u}{\gamma}((2-x)n - 2)\delta^u + (2n-1)\delta^r \end{array} \right. > 0$$

On a ainsi :

$$\left\{ \begin{array}{l} n = 0 \Rightarrow G_v + G_r = 0 \\ n \geq 2 \Rightarrow G_v + G_r > 0 \end{array} \right.$$

Et :

$$\begin{aligned} G_r < 0 &\Leftrightarrow (2n-1)\delta^r - (1 + \frac{xn}{2})\delta^u < 0 \\ &\Leftrightarrow (2n-1) - (1 + \frac{xn}{2})\frac{\delta^r}{\delta^u} < 0 \end{aligned}$$

Ainsi :

- L'introduction de l'influence politique des villes provoque dans les pays de villes signataires un gain de profit total s'il y a au moins deux signataires, et ce même lorsque l'on ne prend pas en compte la dimension altruiste nouvelle des pays (ie  $G_p$ ). On remarquera que l'on n'a pas étudié le cas  $n = 1$  car il n'a pas réellement de sens en pratique.

On peut calculer la valeur optimale de  $x$ , notée  $x^*$ , qui maximise  $G_v + G_r$  (en considérant  $n$  indépendant de  $x$ , ce qui sera le cas par exemple si pour tout  $x$  le jeu reste un jeu de coordination et que l'équilibre de coordination est atteint). On obtient après une simple dérivation :

$$x^* = \min\left(\left(1 - \frac{1}{n}\right)\left(1 + \frac{\delta^r}{\delta^u}\right), 1\right)$$

Il est donc toujours optimal d'avoir une influence politique de la part des villes, mais pas nécessairement maximale.

- Les villes tirent toujours un profit positif d'une influence politique accrue, et un profit supérieur à celui des ruraux.

La valeur optimale de  $x$ , notée  $x^{**}$ , qui maximise  $G_v$  vaut :

$$x^{**} = \min \left( 2 - \frac{1}{n} - \frac{\delta^r}{n\delta^u}, 1 \right) = \min \left( \left(1 - \frac{1}{n}\right) \left(1 + \frac{\delta^r}{\delta^u}\right) + \left(1 - \frac{\delta^r}{\delta^u}\right), 1 \right) \geq x^*$$

Ainsi, les villes peuvent désirer une influence politique supérieure à celle qui correspondrait à l'optimum global. Dans ce cas-là, nous pouvons imaginer des mécanismes mis en place par l'Etat pour limiter cette influence, via des politiques de centralisation et des mesures visant à nationaliser des ressources normatives, administratives, juridiques ou financières.

- Le profit des ruraux peut être affecté négativement par l'influence politique des villes (situation "gilets jaunes"). Ceci a lieu lorsque :
  - ★ Le rapport entre le bénéfice de réduction d'émissions des villes et celui des ruraux est suffisamment élevé (plus précisément si  $\frac{2n-1}{1+\frac{xn}{2}} < \frac{\delta^u}{\delta^r}$ ).
  - ★ L'influence politique des villes est suffisamment élevée (plus précisément si  $\frac{\delta^r}{\delta^u} \left(4 - \frac{2}{n}\right) - \frac{2}{n} < x$ , dans le cas où le membre de gauche de cette inégalité est inférieur à 1).
  - ★ Le nombre de signataires est suffisamment faible (plus précisément si  $n < \frac{1+\frac{\delta^u}{\delta^r}}{2-\frac{x}{2}\frac{\delta^u}{\delta^r}}$ , dans le cas où  $\frac{\delta^u}{\delta^r} < \frac{4}{x}$ ).

Sous l'hypothèse que l'Etat ne permet pas aux situations "gilets jaunes" de se produire (afin de préserver la paix sociale par exemple), et en l'absence de redistribution, la valeur de  $x$  est bornée supérieurement et celle de  $n$  inférieurement, ce qui traduit les tensions entre volet social et volet environnemental en contexte de transition.

En effet, la première de ces contraintes peut conduire à une solution en coin dans le problème d'optimisation de l'influence politique des villes  $x$ , et donc rendre inaccessible l'optimum global  $x^*$ .

Quant à la seconde contrainte, elle signifie que le fait de s'interdire les situations "gilets jaunes" peut repousser le seuil de coordination, voire le rendre inaccessible (ce dernier cas émerge lorsque  $N < \frac{1+\frac{\delta^u}{\delta^r}}{2-\frac{x}{2}\frac{\delta^u}{\delta^r}}$ ).

### Redistribution :

Dans tous les cas examinés précédemment, le gain de profit des urbains est supérieur à celui des ruraux. Cette remarque amène tout naturellement la question de la redistribution des gains, et tout particulièrement dans les cas "gilets jaunes". Plusieurs options sont envisageables, qui dépendent des critères de justice retenus et donc de considérations éthiques et morales. Par exemple :

- Critère d'égalité : les villes effectuent des transferts de valeur  $\frac{G_v - G_r}{2}$  vers les zones rurales, de manière à ce que les gains de profits des deux parties soient égaux (il vaut alors  $\frac{G_v + G_r}{2}$ ).
- Critère de "paix sociale" : dans les situations "gilets jaunes", où les ruraux sortent perdants du changement de situation, des transferts peuvent avoir lieu de la ville vers les zones rurales, à hauteur de  $-G_r > 0$  afin de compenser les pertes des ruraux.
- Critère d'impact : si les villes effectuent un tranfert vers les campagnes, ceci diminue les incitations à être signataires de l'accord, et donc les efforts de réduction d'émissions au niveau global. En effet, si la ville redistribue un taux  $\alpha \in [0, 1]$  de la différence de bénéfices entre villes et ruraux, le calcul de stabilité devient :

$$\begin{aligned}
 \tilde{\pi}_s^u - \tilde{\pi}_{ns}^u &= (\pi_s^u - \alpha(G_v^s(n) - G_r^s(n))) - (\pi_{ns}^u - \alpha(G_v^{ms}(n-1) - G_r^{ms}(n-1))) \\
 &= (\pi_s^u - \pi_{ns}^u) - \alpha [(G_v^s(n) - G_r^s(n)) - (G_v^{ms}(n-1) - G_r^{ms}(n-1))] \\
 &= (\pi_s^u - \pi_{ns}^u) - \alpha \left[ \frac{2x\delta^u n^2}{\gamma} (\delta^u - \delta^r) - \frac{2x\delta^u (n-1)^2}{\gamma} (\delta^u - \delta^r) \right] \\
 &= (\pi_s^u - \pi_{ns}^u) - \alpha \frac{2x\delta^u}{\gamma} (\delta^u - \delta^r) (n^2 - (n-1)^2) \\
 &< \pi_s^u - \pi_{ns}^u
 \end{aligned}$$

### 3.5 IDÉES D'EXTENSIONS POUR DES RECHERCHES FUTURES

Le modèle stylisé développé lors de cette étude est déjà riche à explorer. Il n'en reste pas moins qu'il peut être complexifié et examiné dans une plus grande généralité ; nous exposons succinctement dans cette section quelques idées d'extensions.

#### Etude avec des formes fonctionnelles générales

Plutôt que de préciser d'emblée les formes fonctionnelles définissant la structure de profits des joueurs, il pourrait être intéressant de travailler uniquement sous les hypothèses de la section 3.1, en poussant l'analyse le plus loin possible.

Alternativement, il serait possible de s'intéresser aux résultats obtenus avec d'autres formes fonctionnelles que celles choisies pour notre étude, toujours sous les conditions de la section 3.1, afin de les comparer avec celles de ce travail.

#### Asymétries entre pays

Plutôt que de considérer un ensemble de pays homogènes (comme nous l'avons fait à l'exception près de la discussion sur la taille des villes de la section 3.2), nous suggérons d'introduire une distinction pays développés/en voie de développement, avec des paramètres de bénéfices  $\delta$  et/ou de coûts d'abattement  $c$ ,  $\gamma$  distincts. En fonction des distinctions effectuées, il pourrait ainsi y avoir jusqu'à quatre catégories de pays, selon la catégorisation inspirée de Sprinz et Vaahoranta (2002) et présentée dans la figure 7.

		Coût d'abattement	
		Faible	Elevé
Bénéfice d'abattement	Faible	Observateur	Détracteur
	Elevé	Moteur	Facilitateur/intermédiaire

FIGURE 7 – Catégorisation des pays dans un modèle avec hétérogénéité (les noms correspondent aux rôles dans les efforts de réductions)

### Incertitudes sur les paramètres des fonctions de profits

Plutôt que de supposer les paramètres  $\delta$ ,  $c$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$  et  $\beta$  connus, on peut imaginer que l'un voir plusieurs d'entre eux suive une distribution de probabilité donnée, et s'intéresser à ce que cela change sur les résultats du modèle.

Pour aller plus loin, et suivant la lignée de Finus et Pintassilgo (2010), trois degrés de lever du "voile d'incertitude" peuvent être étudiés :

- Connaissance complète : cas standard dans lequel les valeurs des paramètres sont connus dès le début du jeu.
- Incertitude partielle : dans ce cas les valeurs des paramètres incertains sont inconnues au moment de la prise de décision de participer à l'alliance, mais connues lors des décisions d'abattement.
- Incertitude complète : dans ce cas-là les valeurs des paramètres incertains sont inconnues à toutes les étapes de décision du jeu.

### Dynamique temporelle

Plutôt que la version simplifiée d'un jeu statique dans lequel la concentration de polluants n'évolue pas, c'est possible d'imaginer une dynamique ou temporelle des émissions (une dynamique spatiale pourrait être envisagée pour d'autres problèmes de pollution, mais ce n'est pas vraiment adapté au changement climatique, car le temps caractéristique d'homogénéisation des concentrations de gaz à effet de serre est très court, de l'ordre du mois).

Le modèle pourrait ainsi prendre en compte les dégâts de la quantité totale de GES dans l'atmosphère, notée  $s$  et vérifiant par exemple :

$$\frac{ds}{dt} = e + \alpha s, \quad \alpha \in ]0, 1[$$

ou alternativement pour conserver le point de vue abattement plutôt qu'émissions :

$$\frac{ds}{dt} = C - a + \alpha s, \quad \alpha \in ]0, 1[, \quad C \text{ cte}$$

Puis les coûts et bénéfices futurs seraient escomptés avec un taux d'actualisation  $\rho$ , en temps discret ou continu.

En parallèle, les effets d'apprentissage peuvent eux aussi suivre une évolution dynamique, avec par exemple :

$$\lambda(t) = \lambda(1 - e^{-\mu t})$$

#### **Liaison avec les marchés d'échanges de biens**

Un autre aspect à explorer, et qui fait l'objet de travaux récents de théorie des jeux appliquée aux accords internationaux pour l'environnement, est la liaison avec un modèle de commerce entre pays. En adaptant le travail de Diamantoudi et al. (2018), on pourrait incorporer à notre modèle des émissions de GES dues à la production de biens à l'étranger, et non seulement des coûts d'abattement nationaux.

Les pays pourraient imposer des taxes sur l'exportation  $\tau_i$  ainsi que sur les émissions de carbone  $t_i$ . Il y aurait ainsi deux modèles duaux, celui des émissions de GES et celui du commerce de biens, ainsi qu'une étape supplémentaire du jeu consistant dans le choix par les pays du niveau de ces taxes, avant ou après la décision des villes d'entrer dans l'accord. Il s'agirait d'étudier l'influence des choix effectués par les pays, ainsi que de la temporalité des décisions, sur les perspectives de coordination entre les villes.

## CONCLUSION

---

En combinant une approche empirique et théorique, cette étude a permis d'apporter un éclairage nouveau sur les initiatives transnationales pour le climat, en particulier les réseaux de villes. En effet, si les initiatives infranationales de ce type ont été assez étudiées par le champ de l'économie politique, elles font l'objet de peu d'études empiriques et quantitatives et sont délaissées par les modèles de théorie des jeux. A travers la construction du modèle présenté et une première analyse de celui-ci, nous avons donc fait le choix d'explorer un domaine de recherche ouvert. D'où le choix d'éclairer plusieurs pistes de travail et considérations générales, plutôt que d'approfondir une question précise.

Ce travail ne demeure pas pour autant exempt de résultats. L'étude de cas a permis de caractériser le fonctionnement d'un réseau de villes, et de mettre en évidence la pertinence des initiatives transnationales regroupant des acteurs à l'échelle infranationale (plus particulièrement des villes). En effet, leur impact potentiel dans la réduction d'émissions de gaz à effet de serre est élevé, et elles ont a priori plus de marge de manoeuvre que les Etats sur certains sujets ; la mise en réseau permet en outre l'acquisition d'informations et de connaissances, ainsi que l'accès à des ressources financières et à du capital politique, qui peuvent contribuer à rendre plus attractives les mesures de transition à l'échelle urbaine. Et ce en créant plus facilement une dynamique de concurrence entre les engagements climatiques des acteurs en jeu, repoussant ainsi les ambitions des villes mais aussi des pays.

Dans le cas d'un modèle avec des villes en réseau en présence d'externalités environnementales et d'apprentissage, nous avons mis en évidence l'émergence d'équilibres de coordination permettant de passer d'un équilibre carboné à un équilibre bas-carbone. L'existence d'un seuil de coordination, ainsi que l'incitation plus forte de la part de grandes villes à participer à une alliance met en relief le rôle essentiel des acteurs visionnaires et des effets de leadership dans une optique de transition environnementale. Cette thématique, récemment explorée par Caparros et Péreau (2017) dans le cas de la formation de coalitions, peut en effet se révéler précieuse pour l'atteinte du seuil de coordination.

Lors de l'enrichissement du modèle par l'introduction de zones rurales et de pays, nous avons montré que la coordination est plus difficile à atteindre lorsque certains acteurs ne bénéficient pas des effets d'apprentissage qui leur permettent de réduire les coûts d'atténuation des émissions, et que la possibilité même de se coordonner peut être brisée, si les bénéfices d'appartenir à l'alliance sont tenus par rapport à la situation de non-appartenance. Il est ainsi recommandable de limiter les retombées des effets d'apprentissage pour les non-participants à l'alliance, et au contraire favoriser les échanges de bonnes pratiques et d'informations entre membres afin d'accélérer l'acquisition de nouvelles compétences. Concernant l'influence politique des villes, nous avons trouvé qu'elle n'est pas nécessairement maximale à l'optimum social de notre modèle, et que l'atteinte de cet optimum peut nécessiter une limitation du pouvoir politique des villes de la part de l'Etat. La redistribution des profits des villes vers les zones rurales diminue l'incitation à participer à l'accord, ce qui met en relief les tensions entre limitation des inégalités et réduction d'émissions dans le cadre d'une économie de croissance.

## ANNEXE : CALCULS DE STABILITÉ

Calcul de (\*) :

$$\begin{aligned}
 \pi_s - \pi_{ns} &= \left[ \delta a - \left( (c - \lambda n) a_s + \frac{\gamma}{2} a_s^2 \right) - F \right] - \left[ \delta a - \left( (c - \beta \lambda n) a_{ns} + \frac{\gamma}{2} a_{ns}^2 \right) \right] \\
 &= (c - \beta \lambda n) a_{ns} - (c - \lambda n) a_s + \frac{\gamma}{2} (a_{ns}^2 - a_s^2) - F \\
 &= \left( c + \frac{\gamma}{2} (a_{ns} + a_s) \right) (a_{ns} - a_s) + \lambda n (a_s - \beta a_{ns}) - F \\
 &= \left( c + \left( \delta - c + \frac{1+\beta}{2} \lambda n \right) \right) \frac{(\beta-1)\lambda n}{\gamma} + \frac{\lambda n}{\gamma} (\delta - c + \lambda n(1 + \beta)) (1 - \beta) - F \\
 &= \frac{\lambda n}{\gamma} (1 - \beta) \left( \delta - c + \lambda n(1 + \beta) - \left( \delta + \frac{1+\beta}{2} \lambda n \right) \right) - F \\
 &= \frac{\lambda n}{\gamma} (1 - \beta) \left( \frac{\lambda n(1+\beta)}{2} - c \right) - F \\
 &= An^2 + Bn + C
 \end{aligned}$$

Calcul de (\*\*):

$$\begin{aligned}
 \pi_s^u - \pi_{ns}^u &= \pi_s^u(a_s^u, a, n, 1) - \pi_i^u(a_{ns}^u, a, n, 0) \\
 &= \left( \delta^u a - \left( (c - \lambda n) a_s^u + \frac{\gamma}{2} a_s^{u2} \right) - F \right) - \left( \delta^u a - \left( (c - \beta \lambda n) a_{ns}^u + \frac{\gamma}{2} a_{ns}^{u2} \right) \right) \\
 &= (c - \beta \lambda n) a_{ns}^u - (c - \lambda n) a_s^u + \frac{\gamma}{2} (a_{ns}^{u2} - a_s^{u2}) - F \\
 &= \left( c + \frac{\gamma}{2} (a_{ns}^u + a_s^u) \right) (a_{ns}^u - a_s^u) + \lambda n (a_s^u - \beta a_{ns}^u) - F \\
 &= \left( c + \left( \delta - c + \frac{(1+\beta)\lambda + x\delta^u}{2} n \right) \right) \frac{(\beta-1)\lambda - x\delta^u}{\gamma} n + \frac{\lambda n}{\gamma} (1 - \beta) \left( \delta - c + \left( \lambda(1 + \beta) + \frac{x\delta^u}{1-\beta} \right) n \right) - F \\
 &= \frac{\lambda n}{\gamma} (1 - \beta) \left[ - \left( \delta + \frac{(1+\beta)\lambda + x\delta^u}{2} n \right) \left( 1 + \frac{x\delta^u}{\lambda(1-\beta)} \right) + \left( \delta - c + \left( \lambda(1 + \beta) + \frac{x\delta^u}{1-\beta} \right) n \right) \right] - F \\
 &= \frac{\lambda n}{\gamma} (1 - \beta) \left[ \left( \frac{\lambda(1+\beta)}{2} - \frac{(x\delta^u)^2}{2\lambda(1-\beta)} \right) n - \left( c + \frac{x\delta^u \delta}{\lambda(1-\beta)} \right) \right] - F \\
 &= A_2 n^2 + B_2 n + C_2
 \end{aligned}$$

## BIBLIOGRAPHIE

---

- ANDONOVA, L. B., HALE, T. N. et ROGER, C. B. (2017). "National Policy and Transnational Governance of Climate Change : Substitutes or Complements?" *International Studies Quarterly*.
- BARRETT, S. (1994). "Self-Enforcing International Environmental Agreements". *Oxford Economic Papers*, 46, new series, 878-894.
- BARRETT, S. (2008). "Climate treaties and the imperative of enforcement". *Oxford Review of Economic Policy*, 24(2), 239-258.
- BANSARD, J.S., PATTBERG, P.H. et WIDERBERG, O. (2017). "Cities to the rescue? Assessing the performance of transnational municipal networks in global climate governance". *International Environmental Agreements : Politics, Law and Economics*, 17(2), 229–246
- BAYRAMOGLU, B., FINUS, M. et JACQUES, J. F. (2018). "Climate agreements in a mitigation-adaptation game". *Journal of Public Economics*, Elsevier, vol. 165(C), 101-113.
- BOLLEN, J., GUAY, B., JAMET, S., and CORFEE-MORLOT, J. (2009). "Co-Benefits of Climate Change Mitigation Policies", *OECD Economics Department Working Papers 693*, OECD, Economics Department.
- BULKELEY, H., SCHROEDER, H., JANDA, K., ZHAO, J., ARMSTRONG, A. CHU, S. Y. and GHOSH, S. (2009). "Cities and Climate Change : the role of institutions, governance and urban planning". Report for the World Bank Urban Research Symposium : Cities and Climate Change.
- CHAN, S., BRANDI, C. and BAUER, S. (2016). "Aligning transnational climate action with international climate governance : the road from Paris". *Review of European, Comparative and International Environmental Law*, 25(2), 238-247.
- D'ASPREMONT, C. A., JACQUEMIN, J., GABSZEWEITZ, J., AND WEYMARK, J.A. (1983). "On the stability of collusive price leadership", *Canadian Journal of Economics*, 16, 17-25.
- DIAMANTOUDI, E., SARTZETAKIS, E. et STRANTZA, S. (2018). "International Environmental Agreements and Trading Blocks - Can Issue Linkage Enhance Cooperation?", *Working Papers 2018.23*, Fondazione Eni Enrico Mattei.
- ELSAYYAD, M. and MORATH, F. (2016). "Technology transfers for climate change". *International Economic Review*, 57 : 1057-1084.
- FINUS, M., et PINTASSILGO, P. (2010). "International Environmental Agreements Under Uncertainty : Does the Veil of Uncertainty Help?" *SSRN Electronic Journal*. doi :10.2139/ssrn.1646866
- GRAICHEN, J., HEALY, S., SIEMONS, A. et al. (2017). "International Climate Initiatives—A way forward to close the emissions gap?"
- GRASSO, M. (2004). "Climate change : the global public good". *EconWPA*, Others.
- HAGEN, A., KAHLER, L. and EISENACK, K. (2016). "Transnational Environmental Agreements with Heterogeneous Actors". 10.13140/RG.2.1.1484.1360.

HALLEGATTE, S. and CORFEE-MORLOT, J. (2011). "Understanding climate change impacts, vulnerability and adaptation at city scale : an introduction". *Climatic Change* 104.1 : 1-12.

HERMWILLE, L. (2018). "Making initiatives resonate : how can non-state initiatives advance national contributions under the UNFCCC?". *International Environmental Agreements : Politics, Law and Economics*, 18(3), 447–466.

HOEL, M. and SCHNEIDER, K. (1997). "Incentives to participate in an international environmental agreement". *Environmental and Resource economics*, 9(2), 153-170.

KERN, K and BULKELEY, H. (2009). "Cities, Europeanization and Multi-level Governance : Governing Climate Change through Transnational Municipal Networks". *JCMS : Journal of Common Market Studies* 47 : 309-332.

LEE, T. and VAN DE MEENE, S. (2012). "Who teaches and who learns? Policy learning through the C40 cities climate network". *Policy Sciences*, 1-22

MARROUCH, W. et CHAUDHURI A. (2016). "International Environmental Agreements : Doomed to Fail or Destined to Succeed? A Review of the Literature". *International Review of Environmental and Resource Economics*. /9. 245-319. 10.1561/101.00000078.

METZ, B., DAVIDSON, O.R. , BOSCH, P.R, DAVE, R. and MEYER, L. A. (2007) "Mitigation of Climate Change", Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge.

MORWITZ, V. and FITZSIMONS, G. (2001). "The Mere-Measurement Effect : Why Does Measuring Intentions Change Actual Behavior?". *Journal of Consumer Psychology*. 14.

SPRINZ, D. F. et VAAHTORANTA, S. (2002). "National self-interest : a major factor in international environmental policy formulation." In Volume 4, Responding to global environmental change (Tolba M K ed.) pp. 323-328, in *Encyclopaedia of global environmental change* (Munn T, editor-in-chief). John Wiley and Sons : Chichester.