



**HAL**  
open science

## Sur la conception des chaînes logistiques à faible teneur en carbone

Amina Chelly Ben Younes

► **To cite this version:**

Amina Chelly Ben Younes. Sur la conception des chaînes logistiques à faible teneur en carbone. Système d'exploitation [cs.OS]. Université Grenoble Alpes; École nationale d'ingénieurs de Tunis (Tunisie), 2019. Français. NNT: 2019GREAI074 . tel-02475625

**HAL Id: tel-02475625**

**<https://theses.hal.science/tel-02475625>**

Submitted on 12 Feb 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## THÈSE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE LA COMMUNAUTE UNIVERSITE  
GRENOBLE ALPES**

**préparée dans le cadre d'une cotutelle *entre la  
Communauté Université Grenoble Alpes et  
L'université Tunis El Manar (Ecole Nationale  
d'Ingénieurs de Tunis)***

Spécialité : **Génie Industriel**

Arrêté ministériel : le 6 janvier 2005 – 25 mai 2016

Présentée par

**Amina CHELLY BEN YOUNES**

Thèse dirigée par Mr « **Yannick FREIN** »  
codirigée par Mme « **Atidel B. HADJ-ALOUANE** »  
co-encadrée par Mme « **Imen NOUIRA** »

préparée au sein des **Laboratoires G-SCOP et OASIS**

dans l'**École Doctorale IMEP2 et École Doctorale Sciences et  
Techniques de l'Ingénieur**

## **Sur la conception des chaînes logistiques à faible teneur en carbone**

Thèse soutenue publiquement le « **19 Novembre 2019** »,  
devant le jury composé de :

**Mme Najoua DRIDI**

Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Présidente

**M. Hamid ALLAOUI**

Professeur à l'Université d'Artois, Rapporteur

**M. Khaled HADJ-HAMOU**

Professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Rapporteur

**Mme Hanen BOUCHRIHA**

Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Examinatrice

**M. Yannick FREIN**

Professeur, Grenoble INP, Directeur de thèse

**Mme Atidel B. HADJ-ALOUANE**

Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Codirectrice

**Mme Imen NOUIRA**

Maître de Conférences, Rennes School of Business, Co-encadrante



# *Dédicaces*

*Je dédie cette thèse à ma chère regrettée grand-mère Fatma. A celle qui m'a appris à savourer la joie et la fierté de la réussite. Comment t'oublier ? Tu seras présente dans nos cœurs. Tes mots d'apaisement, tes encouragements, ton soutien, tes sacrifices et tous les petits efforts que tu faisais pour nous apaiser la vie et nous rendre heureux seront à jamais gravés dans ma mémoire. Surement ta perte était très dure, néanmoins, un vrai coup de pouce qui m'a permis d'être déterminée à achever, réussir cette thèse et te la dédier. Que Dieu t'accorde la paix éternelle et t'accueille dans son paradis.*

*A toi Maman, source inépuisable de tendresse et d'amour, je dédie cette thèse. Quoique je puisse dire et écrire, je ne saurais exprimer ma profonde reconnaissance et ma grande affection. J'espère que tu seras fière de moi. Puisse Dieu tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et Bonheur.*

*A mon cher époux Housseem, qui n'a jamais cessé de me soutenir et de m'épauler, je dédie cette thèse. Ton amour ne m'a procuré que confiance et détermination. Tu as été toujours présent pour le bien et le pire. Je te remercie de tes sacrifices, de tes encouragements et de ne m'avoir jamais déçu. Puisse le bon Dieu nous procure santé et longue vie.*

*A ma chère petite sœur Fatma, une sœur comme on ne peut trouver nulle part ailleurs. Tu as été présente pour moi durant ces années dans les moments les plus durs. Je te suis très reconnaissante pour ton écoute inlassable au sujet de ma thèse, pour ton aide précieuse et pour tout le reste. Je te souhaite tout le bonheur du monde et plein de réussite dans ta vie.*

*A ma sœur Khadija et à mon frère Hamdi, aucune dédicace ne peut exprimer la profondeur des sentiments fraternels, d'amour et d'attachement que j'éprouve envers vous. Vous m'avez toujours supportée et soutenue. J'aimerais vous dédier ce travail en témoignage de ma profonde affection. Puisse Dieu vous protéger, garder et renforcer notre fraternité*

*A mon trésor Lina, qui a embelli ma vie. Tu es ma bénédiction. Ta présence dans ma vie à ce moment précis m'était d'un apport exceptionnel. Tes pleures, tes rires, tes premiers mots, tes premiers pas, tous ces moments magiques sont derrière ma persévérance. Puisse Dieu te protéger, te procurer santé et longue vie.*

*A mon père Lotfi,  
à mes beaux-parents Sliman et Faouzia,  
à mes belles-sœurs Amira, Monjia et Inès,  
à mes nièces Aya Ella et mon neveu Ahmed,  
je vous dédie cette réussite.*

# *Remerciements*

Pour que cette thèse puisse s'achever, plusieurs personnes ont contribué de près et de loin à son succès. Je profite de cet espace pour leur exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance.

J'aimerais bien commencer par remercier mes directeurs de thèse qui ont accepté de diriger mes travaux de recherche.

Je remercie tout particulièrement Mme Atidel B. Hadj-Alouane pour la confiance qu'elle m'a accordée et la chance qu'elle m'a offerte pour faire cette thèse. Depuis des années, Mme Atidel m'a toujours accompagnée dans mes choix et mes décisions. Je la remercie infiniment de m'avoir accompagnée, et de m'avoir appris à être déterminée et à aller jusqu'au bout. Je lui suis très reconnaissante pour les qualités de rigueur et de persévérance qu'elle m'a transmises durant toutes ces années. Je la remercie très chaleureusement pour son soutien, son enthousiasme vis-à-vis de mon travail, son apport, ses conseils et sa disponibilité.

Ma reconnaissance va de même à Mr Yannick Frein pour ses encouragements, sa rigueur, ainsi que pour son aide précieuse, qui m'ont permis d'avancer et de mener à bien cette recherche. Je lui suis sensiblement reconnaissante pour sa patience, sa compréhension et pour ses qualités humaines, car non seulement il a suivi et dirigé mon travail, mais il m'a beaucoup soutenu dans les moments les plus difficiles par lesquelles je suis passée durant ces années. Je n'oublie pas de le remercier aussi pour sa présence, son assistance et son aide au niveau des démarches administratives pesantes que j'avais à gérer à distance.

Je profite de remercier du fond du cœur, Imen Nouira, qui était toujours présente depuis le début de cette thèse jusqu'à la fin. Je voudrais la remercier non seulement pour son apport scientifique, son assistance, ses relectures attentives, mais aussi pour tout le temps qu'elle m'a consacré et les sacrifices qu'elle a faits pour être disponible et m'aider à bien avancer dans mes recherches. Je n'oublie pas de la remercier d'avoir été toujours à mes côtés, de m'avoir poussée vers l'avant dans les moments les plus durs, de m'avoir aidée à gérer le stress et les sentiments les plus perplexes qu'une thèse peut évoquer. Un grand merci de son soutien moral. Finalement, je saisis cette occasion pour la remercier ainsi que le professeur Ramzi

Hammami de m'avoir soutenu financièrement pour pouvoir effectuer plus de séjours en France et faciliter ainsi le déroulement de nos travaux de recherche.

Je suis sensible à l'honneur que me font les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail: J'exprime ma reconnaissance à Mme. Najoua Dridi, Professeur à l'ENI Tunis, pour avoir accepté d'être présidente du jury. J'adresse mes remerciements à Mme Hanen Bouchriha, Professeur à l'ENI Tunis, pour avoir bien voulu se charger de la tâche de rapporteur. J'adresse également mes remerciements à Mr Hamid Allaoui, Professeur à l'université d'Artois, pour l'intérêt qu'il a accordé à ce travail de thèse en acceptant d'être rapporteur.

Je n'oublie pas de remercier très vivement toutes les personnes que j'ai eu la chance de croiser et de connaître durant ces années et qui m'ont beaucoup soutenue pour arriver à bien gérer mon quotidien à l'étranger et réussir à surmonter les moments les plus difficiles. Je remercie ainsi Mme Aida Sallemi, Safa Zouadi, Assia El hadhbi, Taher Slimi, Nessrine Boubaker, Nihel Elbanna, Donia Dowidar et sa petite famille, Wafa Triaa, Fatma Ben Guefrech, Nassim Loukkas, la famille de Anne Marie, et enfin Taheni Akremi et ses enfants Ayser et Assile.

Evidemment, je n'oublie pas de remercier très vivement tous ceux qui m'ont permis de passer quatre ans fabuleux aussi bien à l'ENI Tunis qu'à l'INP Grenoble.

Ma gratitude va de même à ma famille, ma chère mère Samira Hellali, mes sœurs Fatma et Khadija, mon frère Hamdi, mon époux Housseem et surtout à mon trésor Lina. Votre appui sans faille, votre patience, vos encouragements et bien évidemment votre amour généreux m'ont amplement épaulée et enthousiasmée pour continuer d'avancer toujours vers l'avant.

Mes remerciements les plus sincères vont également à mes proches, tout particulièrement à mes cousines Hana, Ameni, Mariam, Rahma, Farah et Chaima, ma nièce Aya, ma chère amie d'enfance Sarah, mon oncle Abdelhak, tata Pilar et aussi tata Fathia dont la présence et le soutien m'ont été très chers et d'une valeur extrême.

Merci.

شكرا

## **Résumé :**

Sous la pression externe des gouvernements et des clients conscients des enjeux environnementaux, les entreprises sont plus que jamais obligées de réduire leurs émissions de carbone. Par conséquent, elles sont poussées à trouver les moyens pour optimiser la gestion de leurs chaînes logistiques afin d'améliorer leurs performances environnementale et économique. Dans ce cadre s'intègre la problématique de gestion de chaîne logistique à faible teneur en carbone qui consiste à repenser les décisions de la gestion de la CL en vue de réduire les émissions de carbone. Dans la présente thèse, nous abordons cette problématique. Nous cherchons d'abord à comprendre les différentes caractéristiques de ce problème et à identifier ses facteurs clés. Une telle étude demeure essentielle pour faciliter l'analyse de la littérature existante en termes de modélisation et d'incorporation de paramètres liés aux émissions de carbone dans les modèles mathématiques d'aide à la décision. Nous proposons ensuite de contribuer à la littérature en développant de nouveaux modèles de conception de chaîne logistique sous la législation de la taxe carbone, en proposant une meilleure intégration de cette réglementation. Nous considérons alors dans nos modèles, d'une part, la non homogénéité des taxes carbone entre les pays, puis d'autre part, la progressivité de ce système législatif. A travers la résolution analytique et numérique de nos modèles, nous étudions l'impact de la taxe carbone sur les décisions stratégiques des entreprises et leurs performances. Nous mettons ainsi l'accent sur l'efficacité de cet outil législatif, ainsi que sur les nouvelles directives à mettre en place par les gouvernements pour mieux inciter les entreprises à minimiser leurs impacts indésirables sur l'environnement. Finalement, nous initions la modélisation sous incertitude du problème d'investissement stratégique dans le cadre de la législation de taxe carbone, en considérant d'abord une demande client aléatoire, puis des taxes carbone évolutives et incertaines. Nous proposons une évaluation de nos modèles stochastiques développés en les exploitant sur des exemples numériques et en les comparant aux modèles déterministes largement étudiés dans la littérature.

**Mots-clés** : *chaîne logistique à faible teneur en carbone, législation de taxe carbone, taxe carbone dynamique, fuite de carbone, incertitude, modélisation stochastique.*

## **Abstract:**

Government regulations and responsible customers' behavior are key drivers for businesses to adopt respectful management strategies towards the environment and reduce the overall carbon emissions of their supply chains.

Under a strict carbon emissions legislation and the increased awareness of customers about carbon emissions issues, companies are now pushed to improve their environmental performance to achieve better profits. Thus, they need to make optimal decisions within their Supply Chain Management to reduce the carbon emissions that are generated from their various activities.

In this context, we identify the issue of the low carbon supply chain management. In this thesis, our objective is first to study this problem and to identify its key drivers. We then aim to review the literature and to study how quantitative models have addressed this problem and its related constraints. We therefore develop new models of low carbon supply design problems under the carbon tax legislation, which is recognized to be one of the relevant applied carbon legislations. In our proposed models, we particularly emphasize on the features of this carbon regulation that have been ignored within the literature. We first study strategic decisions of the company taking into consideration the non-homogeneous carbon tax scheme between countries. We then, study the investment decision of the company under a progressive carbon tax strategy. Through analytical and numerical analyses, we study the impact of such carbon legislations schemes on strategic decisions of the company and its performances. We aim to provide companies with a decision support tool to help them make optimal strategic decisions under this carbon legislation. We also provide recommendations to governments, as to which carbon tax legislations are the most efficient. Finally, we initiate the development of stochastic models to study the strategic investment problem in such an environmental context. We first consider a random customer demand, and then a dynamic and uncertain carbon tax regulation. We proceed to the evaluation of our developed stochastic models through numerical examples and comparisons of their results to those of deterministic models that are widely studied within the literature.

**Keywords:** *Low carbon supply chain management, carbon legislation, carbon taxes, carbon leakage, progressive carbon taxes, uncertainty, stochastic modeling.*

# Table des matières

Liste des abréviations .....	XIV
Introduction Générale.....	15
Chapitre I : Caractérisation du problème de gestion des chaînes logistiques à faible teneur en carbone .....	20
1.1. Présentation du problème de gestion de chaîne logistique à faible teneur en carbone .....	21
1.1.1. Définition de la gestion de chaîne logistique verte (GCLV) .....	21
1.1.2. Définition de la gestion de chaîne logistique à faible teneur en carbone (GCLFTC) .....	23
1.2. Modèle conceptuel du problème GCLFTC .....	24
1.3. Revue de la littérature.....	28
1.3.1. Catégorie Management Opérationnelle (GO).....	30
1.3.2. Catégorie Investissement Technologique (IT) .....	34
1.3.3. Catégorie Conception de Chaîne Logistique et Coordination (CCL-C).....	37
Chapitre II : Sur la modélisation du problème de gestion des chaînes logistiques à faible teneur en carbone .....	40
2.1. Intégration des contraintes législatives sur les émissions de carbone .....	41
2.1.1. Vue générale sur les politiques environnementales déployées par les gouvernements .....	41
2.1.2. Sur la modélisation des législations de carbone dans les modèles mathématiques de GCLFTC.....	46
2.2. Intégration de la demande clients avec considération des émissions de carbone dans les modèles mathématiques de GCLFTC.....	48
2.2.1. Vue générale sur les techniques de modélisation de la demande endogène sensible aux émissions de carbone.....	48
2.2.2. Sur la modélisation de la demande clients dans le cadre de GCLFTC.....	52
2.3. Intégration des différentes sources d'émission de carbone au niveau des chaînes logistiques ..	53
2.3.1. Techniques de modélisation des émissions de carbone générées par les activités des chaînes logistiques.....	54
2.3.2. Fréquence de modélisation de chaque source d'émission de carbone dans les modèles de GCLFTC.....	56
2.4. Limites des modèles existants et perspectives.....	58
2.4.1. Pistes d'amélioration des modèles existants.....	58

2.4.2. Futurs orientations du problème de GCLFTC.....	61
Chapitre III : Analyse de l'impact de la non homogénéité des taxes carbone sur les décisions stratégiques des chaînes logistiques et leurs performances .....	64
3.1. Définition du problème et hypothèses .....	65
3.2. Présentation du modèle MDL1 : CCL sous une taxe carbone domestique et sans taxe carbone offshore.....	67
3.3. Résolution du modèle <i>MDL1</i> .....	68
3.3.1. Résolution analytique du modèle <i>MDL1</i> .....	68
3.3.2. Résolution numérique de <i>MDL1</i> .....	73
3.4. Problème de conception de chaîne logistique sous une taxe carbone domestique et une subvention pour la production locale verte .....	77
3.4.1. Présentation du modèle <i>MDL2</i> .....	77
3.4.2. Résolution analytique et numérique du modèle <i>MDL2</i> .....	77
3.4.2.1. Somme des coûts fixes et opérationnels moins importante en offshore ( $W \leq 0$ ).....	78
3.4.2.2. Coûts fixes et opérationnels plus importants en Offshore ( $W > 0$ ) .....	79
3.5. Problème de conception de chaîne logistique sous une taxe carbone domestique et une taxe carbone de frontière.....	84
3.5.1. Présentation du modèle <i>MDL3</i> .....	84
3.5.2. Résolution analytique du modèle <i>MDL3</i> : Somme des coûts fixes et opérationnels moins importante en offshore ( $W \leq 0$ ) .....	86
3.5.3. Résolution numérique de <i>MDL3</i> : Somme des coûts fixes et opérationnels moins importante en offshore ( $W \leq 0$ ) .....	91
3.5.4. Résolution analytique du modèle <i>MDL3</i> : Somme des coûts fixes et opérationnels plus importante en offshore ( $W > 0$ ) .....	95
3.5.5. Résolution numérique de <i>MDL3</i> : Coûts fixes et opérationnels plus importants en offshore ( $W > 0$ ).....	98
Chapitre IV : Analyse de l'impact d'une taxe carbone progressive sur la décision d'investissement stratégique des chaînes logistiques et leurs performances.....	102
4.1. Présentation de la problématique.....	104
4.2. Présentation du modèle multi-périodes de choix de technologie de production sous une taxe carbone progressive : <i>MDL4</i> .....	105
4.3. Etude des décisions d'investissement en technologie verte sous la taxe carbone progressive en fonction de son surcoût et son apport en réduction d'émission de carbone .....	107

4.3.1. Technologies ordinaire et verte permettant de générer du profit positif sur tout l'horizon	108
4.3.2. Technologie ordinaire ne permet pas de générer du profit positif sur tout l'horizon	111
4.3.2.1. Présentation des stratégies faisables	111
4.3.2.2. Caractérisation des stratégies faisables	112
4.3.2.3. Technologie avec un taux de réduction d'émission de carbone faible, $\beta$ proche de 1 ( $l\beta = n$ )	115
4.3.2.4. Technologie verte permettant de générer du profit positif au-delà de l'année n ( $l(\beta) \geq 1$ )	122
4.3.2.5. Exemple illustratif appliquant l'algorithme 4.1 et 4.2	125
4.3.3. Expérimentations numériques	129
4.3.3.1. Impact du surcoût et du taux de réduction des émissions de carbone de la technologie verte sur les décisions d'investissement	129
4.3.3.2. Impact de la taxe carbone progressive linéaire sur les décisions d'investissement	131
4.3.3.3. Impact de la taxe carbone progressive linéaire sur les décisions d'investissement pour deux secteurs différents (propre vs polluant)	134
4.4. Etude de l'impact de différentes stratégies de taxation progressive de carbone sur les décisions d'investissement et les performances de la CL	137
4.4.1. Présentation de différentes formes de taxation progressive de carbone considérées	137
4.4.2. Impact des stratégies dynamiques de taxation de carbone sur les décisions d'investissement : résolution analytique	138
4.4.2.1. Stratégie de taxe carbone constante	138
4.4.2.2. Stratégie de taxe carbone progressive linéaire	139
4.4.2.3. Stratégie de taxe carbone convexe	140
4.4.2.4. Stratégie de taxe carbone concave	141
4.4.3. Impact des stratégies dynamiques de taxation du carbone sur les décisions d'investissement et les performances de la CL: analyse multicritères	142
4.4.3.1. Définition de la fonction utilité	142
4.4.4. Analyse de sensibilité	143
4.4.4.1. Analyse de sensibilité sur la performance environnementale ( $\beta$ ) et le poids du bénéfice ( $u$ )	143
4.4.4.2. Analyse de sensibilité sur le surcoût de la technologie verte ( $\gamma$ ) et le poids du profit ( $u$ )	145

Chapitre V : Sur la prise en considération de l'incertitude dans la conception des chaînes logistiques à faibles teneurs en carbone .....	148
5.1. Principales sources d'incertitude à considérer.....	149
5.1.1. Incertitude de la demande client.....	149
5.1.2. Incertitude de la législation de la taxe carbone.....	150
5.2. Problème de choix de technologie de production sous une demande client incertaine dans le cadre de la législation de taxe carbone .....	151
5.2.1. Définition du problème.....	151
5.2.2. Modèle de choix de technologie sous une demande incertaine et la législation de taxe carbone ( <i>MDL5</i> ) .....	152
5.2.3. Résolution numérique de <i>MDL5</i> .....	154
5.3. Modèle multi-périodes stochastique de choix de technologie sous une taxe carbone progressive et incertaine ( <i>MDL6</i> ) .....	161
5.3.1. Résolution numérique du modèle <i>MDL6</i> et analyses .....	163
Conclusion Générale .....	174

# Liste des figures

Figure 1.1. Les filières de recherche de la GCLV .....	22
Figure 1.2. Exemples de labels de l’empreinte carbone .....	26
Figure 1.3. Framework du problème de gestion de chaîne logistique à faible teneur en carbone.....	28
Figure 1.4. Evolution du nombre de publications entre 2007 et 2016.....	29
Tableau 1.1: Evolution des publications en GCLFTC pour chaque catégorie .....	30
Figure 2.1. Les techniques de modélisation des législations de carbone dans la littérature .....	47
Figure 2.3. Les techniques de modélisation de la demande client .....	53
Figure 2.4. Les techniques de modélisation des sources d’émission de carbone dans la CL.....	56
Figure 2.5. Modélisation des sources d’émission de carbone dans les trois catégories d’articles.....	58
Figure 4.1 : Détermination des courbes d’investissement pour l’Exemple 1 .....	110
Figures 4.2. Illustration des stratégies d’investissement faisables en fonction de la segmentation du plan $(\beta, \gamma)$ en plages de $[\beta_i ; \beta_i - 1[$ .....	115
Figure 4.3 : Position relative des courbes d’investissement pour le premier cas .....	118
Figure 4.4 : Position relative des courbes d’investissement pour le deuxième cas .....	119
Figure 4.5: Algorithme 4.1 de détermination de solution optimale.....	121
Figure 4.6 : Algorithme 4.2 de détermination de solution optimal .....	124
Figure 4.7 : Les courbes d’investissement faisables et optimales pour $\beta \in [\beta_0 ; 1]$ . .....	126
Figure 4.8. Les courbes de décisions d’investissement et de production optimale pour $\beta \in [0,618 ; 0,824[$ .....	126
Figure 4.9. Les courbes de décisions d’investissement et de production optimale pour $\beta \in [0,494 ; 0,618[$ .....	127
Figure 4.10. Les courbes de décisions d’investissement et de production optimale pour $\beta \in [0 ; 0,494[$ .....	128
Figure 4.11. Les courbes de décisions d’investissement et de production optimale pour $\beta \in [0 ; 1]$ ... ..	129
Figure 4.12: Les décisions optimales d’investissement sous une taxe carbone progressive linéaire $Q(t)=10.t$ .....	130
Figure 4.13 : Les décisions d’investissement optimales sous différentes législations de taxe carbone progressive $Q(t) = 10. t$ et $Q(t) = 15. t$ .....	132
Figure 4.14 Les décisions d’investissement optimales sous la législation de taxe carbone progressive $Q(t) = 30. t$ .....	133

Figure 4.15: Les décisions d'investissement optimales pour une industrie polluante et une industrie plus propre sous la taxe carbone progressive $Q(t) = 15. t$ .....	135
Figure 4.16: Les décisions d'investissement optimales pour une industrie polluante et une industrie plus propre sous la taxe carbone progressive $Q(t) = 30. t$ .....	135
Figure 4.17. Les quatre formes de taxe carbone dynamiques considérées.....	142
Figure 4.18: Impact de la performance environnementale et de la pondération du critère profit sur les performances de l'entreprise sous les différentes formes de taxation du carbone.....	145
Figure 4.19: Impact du surcoût des technologies vertes et du poids du profit sur la fonction utilité pour les différentes stratégies de taxation du carbone.....	145

# Liste des tableaux

Tableau 1.2. Classification des articles de la catégorie GO .....	32
Tableau 1.3. Classification des articles de la catégorie IT .....	36
Tableau 1. 4. Classification des articles de la catégorie CCL-C .....	38
Tableau 2.1. Classification de la modélisation des législations de carbone .....	48
Tableau 2.2: Classification de la modélisation de la demande client en demande stochastique ou déterministe .....	53
Tableau 2.3: Classification de la modélisation de la demande client en demande exogène ou endogène .....	53
Tableau 2.4. Classification de la modélisation des sources d'émission de carbone de la CL .....	57
Tableau 3.1. Tableau des notations pour la résolution du modèle MDL1 .....	68
Tableau 3.2. Expression des taxes carbone domestiques déterminantes pour les décisions stratégiques de l'entreprise (cas $W \geq 0$ ) .....	72
Tableau 3.3 : Décisions optimales de CCL sous une taxe carbone domestique et en absence de taxe carbone en offshore .....	74
Tableau 3.4. Tableau des notations pour la résolution du modèle MDL2 .....	77
Tableau 3.5. Variation de la subvention locale verte en fonction de la taxe carbone et de surcoût de la technologie verte .....	79
Tableau 3.6. Variation des subventions locales vertes minimales et des taxes carbone imposées en fonction des subventions accordées pour différents surcoûts de la technologie verte .....	82
Tableau 3.7. Décisions stratégiques de CCL en fonction de la variation de la subvention locale verte et des taxes carbone pour 3 valeurs du surcoût de la technologie verte ( $\gamma$ ) .....	83
Tableau 3.8. Variation des subventions locales vertes minimales et des taxes carbone imposées en fonction des subventions accordées pour différents surcoûts de la technologie verte .....	84
Tableau 3.9. Tableau des notations pour la résolution du modèle MDL3 .....	85
Tableau 3.10 : Décisions optimales de conception de CL sous une taxe carbone domestique et une taxe carbone de frontière pour $W \leq 0$ .....	92
Tableau 3.11 Impact des taxes carbone domestique et de frontière sur les décisions et performances des entreprises disposant ou non de subvention locale .....	93
Tableau 3.12. Décisions optimales de CCL sous une taxe carbone domestique et une taxe carbone de frontière pour $W \leq 0$ .....	98
Tableau 4.1 : Détermination des nombres d'années de production en fonction de $\beta$ .....	125
Tableau 5.1 : Fonction de répartition de la loi uniforme sur l'intervalle $[a ; b]$ .....	154

Tableau 5.2 : Fonction de répartition de la demande uniforme sur [10000 ; 14000].	154
Tableau 5.3 : Données numériques : paramètres et coûts du modèle	155
Tableau 5.4 : Résultats des modèles stochastique et déterministe	155
Tableau 5.5 : Calcul des regrets déterministe et stochastique	157
Tableau 5.6 : Comparaison entre les modèles stochastique et déterministe	157
Tableau 5.7. Calcul du regret déterministe et stochastique pour $\gamma = 2,5$	159
Tableau 5.8 : Comparaison des deux modèles déterministe et stochastique pour $\gamma = 2,5$	159
Tableau 5.9. Calcul du regret déterministe et stochastique pour $\gamma = 1,5$	160
Tableau 5.10 : Comparaison des deux modèles déterministe et stochastique pour $\gamma = 1,5$	160
Tableau 5.11 : Scénarios considérés de la taxe carbone du modèle stochastique	162
Tableau 5.12: Décisions optimales d'investissement et profit des entreprises pour le modèle déterministe et stochastique	164
Tableau 5.13 : Ensemble des scénarios considérés de la réalisation de la taxe carbone	166
Tableau 5.14 : Comparaison des performances des modèles stochastique et déterministe pour différents scénarios de la taxe carbone ( $\beta = 0,8$ et $\gamma = 4$ )	169

# Liste des abréviations

CDP : Carbon Disclosure Project

COP : Conference of Parties

CCL-C: Conception de chaîne logistique-coordination

CCLFTC: Conception de chaîne logistique à faible teneur en carbone

CL: Chaîne logistique

CLFTC: Chaîne logistique à faible teneur en carbone

CLV : Chaîne logistique verte

CRC : Carbon Reduction Commitment

C&T : Cap and trade

GCLFTC: Gestion de chaîne logistique à faible teneur en carbone

GCLV: Gestion de chaîne logistique verte

GO : Gestion opérationnelle

GSCM : Green supply chain management

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

IT : Investissement technologique

LCSCD: Low carbon supply design

LCSCM: Low carbon supply chain management

MO : Management opérationnel

MP : Matière première

QE : Qualité environnementale

QEM : Quadratique à Entiers Mixtes

RGGI: Regional Greenhouse Gas Initiative

RO : Recherche opérationnelle

# **Introduction Générale**

Les changements climatiques représentent la question déterminante de notre époque et nous sommes à un moment décisif (www.un.org). La réduction des émissions de carbone, reconnue comme la cause principale du problème de réchauffement climatique, est de nos jours, au cœur des préoccupations majeures de tous les acteurs économiques, industriels, sociaux, et politiques, ainsi que les chercheurs académiques. Nul ne peut nier la part importante des activités industrielles dans les émissions indésirables dans l'atmosphère; 30% des émissions mondiales en  $CO_2$  en 2010 proviennent de l'activité manufacturière (Dussud, Wong et Duvernoy, 2015). Malheureusement, au cours des trois dernières décennies, les émissions de ce gaz nocif ont considérablement augmenté, d'environ 90%. De plus, les émissions de carbone résultant de la combustion de combustibles fossiles et des processus industriels représentent environ 78% de l'augmentation totale des émissions de carbone entre 1970 à 2011 (EPA, 2013). Afin de préserver notre planète, il est primordial de faire face à ces menaces grandissantes et de favoriser la réduction des émissions de carbone des activités manufacturières.

### ❖ **Problématique fondamentale**

Dans ce contexte, plusieurs gouvernements ont promulgué des législations environnementales telles que la taxe carbone ou le marché de carbone pour inciter les entreprises à minimiser leurs émissions et encourager l'investissement dans les technologies non polluantes, dites « vertes ». Les clients de leurs côtés, deviennent de plus en plus sensibles à la protection de l'environnement et cherchent à acheter des produits qui ont un moindre impact indésirable sur l'environnement. Sous plusieurs pressions externes exercées par les parties prenantes, les entreprises se trouvent obligées de repenser leurs décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles de gestion de leurs chaînes logistiques dans l'objectif de répondre au mieux à ces pressions et à ces nouvelles contraintes.

Dans nos travaux de recherche, nous nous intéressons à ces problématiques environnementales par le biais de l'optimisation des décisions liées aux chaînes logistiques. Notre thèse est intitulée « **Sur la conception des chaînes logistiques à faible teneur en carbone** ». Nos travaux de recherche abordent cette problématique particulière de réduction des émissions de carbone des chaînes logistiques qui s'intègre dans le domaine de recherche de la gestion de chaîne logistique verte (GCLV). Les questions fondamentales que nous abordons sont de déterminer quelles décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles l'entreprise doit prendre pour réduire au mieux les émissions de carbone issues des différentes activités de sa CL et répondre aux pressions externes exercées par les parties prenantes ? Quels impacts peuvent avoir ces décisions logistiques qui visent la réduction des émissions de carbone sur les performances économique et environnementale des CL ?

### ❖ **Objectifs généraux**

Pour répondre à ces questions, il reste primordial de commencer par analyser cette problématique de la gestion de Chaîne logistique à faible teneur en carbone (GCLFTC), de spécifier et de caractériser les paramètres cruciaux et les contraintes particulières liées à ce problème. Pour ce faire, nous commençons par une étude exhaustive de la littérature existante autour du problème de GCLFTC.

A l'issue de cette étude et de l'analyse de la littérature, nous proposons d'aborder la problématique de conception de chaînes logistiques à faible teneur en carbone (CCLFTC), en considérant tout particulièrement la législation de taxe carbone et en mettant l'accent sur les aspects de cette réglementation environnementale qui ont été négligés dans les travaux existants.

Dans cet objectif, nous cherchons à développer des modèles de CCLFTC performants et robustes dans un contexte environnemental de plus en plus rigide, exigeant et incertain. Dans un premier lieu, à travers les modèles développés, nous abordons le problème de fuite de carbone engendré par la non homogénéité des taxes carbone entre les pays. Ensuite, nous mettons l'accent sur les avantages et les limites des stratégies de taxation progressives de carbone. Finalement, nous proposons de prendre en compte les incertitudes liées aux pressions externes, exercées sur l'entreprise, notamment par ses clients responsables et par le gouvernement afin d'inciter à la réduction de ses émissions de carbone. Dans cette perspective, nous considérons le cadre législatif actuel de la taxe carbone et ses éventuelles évolutions mais aussi la forte incertitude sur la demande client.

Suite au développement et à la résolution de ces modèles, nous cherchons à comprendre l'impact de ces aspects de la taxe carbone, et des incertitudes liées aux pressions externes exercées, sur les décisions logistiques et sur les performances des entreprises. Les réponses à ces interrogations, nous permettront d'en déduire des recommandations et de fournir des outils d'aide à la décision pour les entreprises afin de les aider dans des décisions stratégiques complexes. Nos résultats peuvent également s'adresser aux gouvernements en mettant l'accent sur les performances des systèmes législatifs existants, et donc les nouvelles directives à mettre en place pour inciter les entreprises à minimiser leurs impacts indésirables sur l'environnement.

#### ❖ **Positionnement par rapport à la littérature**

La littérature dédiée aux problématiques de GCLFTC est de plus en plus dense et variée. Nous avons identifié 83 articles publiés entre 2007 et 2016. Soulignons que le nombre d'articles publiés par année, est passé de seulement 2 articles en 2007 à plus de 21 articles publiés en 2016, ce qui met en évidence l'importance accrue accordée à ces problématiques. Puis, selon les décisions logistiques étudiées dans ces travaux, nous avons pu les classer en 3 catégories d'articles : la catégorie « Gestion opérationnelle » (GO), la catégorie « Investissement technologique » (IT), et la catégorie « Conception de chaîne logistique et coordination » (CCL-C). La majorité des publications entre 2007 et 2015, a traité le problème de la gestion opérationnelle de la CL sous les considérations des émissions de carbone. Néanmoins, à partir de 2016, les problèmes de CCLFTC, traités par les catégories IT et CCL-C, ont commencé à gagner de l'ampleur.

En premier lieu, nous avons identifié un framework qui identifie les différents facteurs clés du problème de GCLFTC. Ensuite, nous avons analysé la littérature existante, en Recherche Opérationnelle (RO) et en Management Opérationnel (MO) dans ce domaine de recherche en termes d'intégration des facteurs identifiés dans le framework. Dans cette optique, nous avons analysé et critiqué la modélisation des sources d'émission de carbone, des législations de carbone et de la demande des clients sensibles aux émissions de carbone est d'évaluer l'efficacité des modèles mathématiques développés à traduire et prendre en considération les contraintes réelles de ces problèmes complexes. Une telle analyse permet d'élucider les nouvelles approches et techniques de modélisation à développer afin d'améliorer la qualité des modèles existants et d'établir de nouveaux modèles abordant les problématiques ignorées tout en garantissant une meilleure intégration et approximation des contraintes et des paramètres des émissions de carbone dans les modèles quantitatifs d'aide à la décision.

#### ❖ **Intérêt du travail et contribution**

Dans la littérature, plusieurs travaux qui ont porté sur la GCLFTC se sont intéressés à l'étude du problème de CCLFTC sous la législation de taxe carbone. Cependant, ces travaux

contiennent de nombreuses simplifications au niveau de la modélisation de cette législation de carbone.

Premièrement, de nombreux travaux ont ignoré l'incertitude de la législation, qui constitue un aspect crucial du problème de GCLFTC et que nous proposons d'aborder dans ce travail. Deuxièmement, le caractère dynamique de la législation de taxe carbone, qui a été négligé, mérite d'être mis en relief et de recevoir plus d'intérêt dans les travaux futurs. L'élaboration de modèles multi-périodes de CCLFTC est une autre piste prometteuse que nous exploitons dans la présente thèse. Troisièmement, l'étude de la non homogénéité des taxes carbone entre les pays et ses conséquences doit prendre plus d'ampleur pour répondre aux besoins décisionnels des entreprises. En effet, le problème de fuite de carbone engendré par ce caractère de non homogénéité des taxes carbone a été identifié dans les rapports et analyses récemment publiés comme un problème potentiel qui contraint l'efficacité de la législation actuelle de tarification de carbone.

De telles améliorations dans la modélisation des législations de carbone pourraient fournir aux responsables et aux législateurs une analyse plus réaliste et objective de ces outils réglementaires afin de contribuer à l'amélioration de leur efficacité en matière de réduction des émissions de carbone et réduire leurs impacts négatifs sur la rentabilité des entreprises. Dans cette perspective, nos modèles d'aide à la décision stratégiques serviront aussi bien aux industriels qu'aux gouvernements pour faire converger tous les efforts vers l'ultime objectif de préservation de l'environnement.

#### ❖ Plan de lecture

Dès lors, ce manuscrit est organisé comme suit :

Après l'introduction générale, nous dédions le premier chapitre à une étude générale autour du problème de GCLFTC. Nous présentons en premier lieu les définitions des notions de base qui identifient le sujet de nos travaux de recherche. Nous élaborons ensuite un modèle conceptuel du problème de GCLFTC, grâce auquel nous précisons les facteurs clés de ce problème. Ce modèle conceptuel constitue aussi un framework d'analyse, que nous utilisons pour la revue de la littérature, afin d'analyser et comparer les modèles quantitatifs de GCLFTC existants d'une façon structurée et pragmatique.

Dans le deuxième chapitre, nous analysons les techniques de modélisation des facteurs clés de ce problème de GCLFTC. En se référant au framework développé, nous nous intéressons à la modélisation des législations de carbone, de la demande client sensible aux émissions de carbone et des différentes sources d'émissions de carbone de la CL. L'objectif est de mettre l'accent sur la difficulté de simplifier et d'approximer de tels composants pertinents et de les intégrer dans les modèles mathématiques d'aide à la décision. A l'issue de ces deux premiers chapitres, nous identifions les perspectives pour les travaux futurs. Dans cette optique, nous précisons les axes que nous choisissons de traiter dans nos travaux de recherche. Nous contribuons ainsi à la littérature par l'étude du problème de **CCLFTC sous la législation de la taxe carbone** en proposons une meilleure modélisation de cette réglementation environnementale.

Dans le chapitre 3, nous étudions le problème de la non-homogénéité des taxes carbone entre les pays. Nous mettons ainsi l'accent sur le problème de fuite de carbone qui en résulte à travers la modélisation et la résolution d'un problème de localisation et de choix de technologie de production. Puis, dans une perspective de faire face à cette problématique de fuite de carbone, nous étudions deux outils législatifs complémentaires à la taxe carbone, à

savoir les subventions locales vertes et les taxes carbone de frontière, et nous analysons ainsi leurs impacts sur les décisions stratégiques des CL et leurs performances.

Le chapitre 4 est dédié à l'analyse du caractère dynamique des taxes carbone et son impact sur les décisions stratégiques des entreprises en étudiant en particulier la décision de choix de technologie de production sous une taxe carbone progressive. Nous considérons le modèle de la taxe carbone linéaire adopté par le gouvernement Canadien pour résoudre analytiquement le modèle et comprendre le comportement de l'entreprise sous de telles contraintes législatives évolutives. Puis nous envisageons d'autres formes d'évolution de la taxe carbone, que nous proposons de comparer en considérant deux critères principaux, à savoir le profit de l'entreprise et le niveau de réduction de ses émissions de carbone.

Dans le dernier chapitre, nous abordons le problème d'incertitude de la CCLFTC sous la taxe carbone, en considérant les incertitudes liées aux pressions externes exercées par les parties prenantes sur l'entreprise dans ce cadre. Dans un premier temps, nous étudions l'incertitude de la demande client, puis nous traitons l'incertitude de la taxe carbone. Nous nous focalisons dans cette partie sur l'évaluation des performances des décisions des modèles stochastiques développés par rapport aux décisions des modèles déterministes, largement utilisés dans la littérature dans l'étude des problèmes de CCLFTC.

Enfin, en conclusion générale, nous reprenons les grandes lignes de ce travail de thèse et nous suggérons de nouvelles pistes de recherche.

**Chapitre I : Caractérisation du  
problème de gestion des chaînes  
logistiques à faible teneur en carbone**

## Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la terminologie et les définitions des notions de base qui identifient le sujet de nos travaux de recherche. En effet notre thèse s'intègre dans le domaine d'optimisation des chaînes logistiques vertes. Nous abordons alors en premier lieu la définition générale de la notion de la **gestion de chaîne logistique verte (GCLV)**, une notion qui est apparue il y a plus d'une décennie et qui est bien établie dans la littérature. Nous précisons ensuite, une notion plus récente et plus spécifique à savoir la **gestion de chaîne logistique à faible teneur en carbone (GCLFTC)** et ses caractéristiques. Ces définitions permettent de mieux cibler nos champs d'intérêt et préciser les problématiques que nous cherchons à résoudre à travers nos travaux de recherche. Dans ce contexte, nous continuons par l'élaboration d'un modèle conceptuel du problème de GCLFTC, grâce auquel nous précisons et présentons les facteurs clés de ce problème. Ce modèle conceptuel constitue aussi un framework d'analyse, que nous utilisons pour la revue de la littérature, afin d'analyser et comparer les modèles quantitatifs de GCLFTC existants d'une façon structurée et pragmatique. A travers ce chapitre, nous cherchons alors à caractériser le sujet de recherche, à mettre l'accent sur ses spécificités et ainsi à bien définir les problématiques qu'il faut aborder pour contribuer au développement des recherches élaborées dans le domaine de GCLFTC.

### 1.1. Présentation du problème de gestion de chaîne logistique à faible teneur en carbone

Nous commençons par présenter la notion de GCLV connue aussi par le « green supply chain management : GSCM ». Ensuite, nous définissons la notion particulière de la GCLFTC, connue aussi par le « low carbon supply chain management : LCSCM ».

#### 1.1.1. Définition de la gestion de chaîne logistique verte (GCLV)

Au cours des trois dernières décennies, la production, le transport, le stockage et la consommation accrue de biens ont provoqué de graves problèmes environnementaux. L'impact des activités industrielles sur l'épuisement des ressources naturelles et la production de différentes formes de déchets est maintenant clairement établi. Les conséquences dangereuses de ces activités sur l'environnement ont incité les parties prenantes, en particulier les gouvernements et les consommateurs conscients, à exercer de la pression sur les entreprises pour les encourager ou les inciter à adopter un comportement responsable et minimiser les dégâts de leurs activités sur l'environnement (Chelly et al., 2018).

Les entreprises se trouvent alors obligées de reconsidérer leurs pratiques de gestion des CLs pour faire face à ces nouveaux défis environnementaux. Toutefois, de telles pratiques qui prennent en considération les performances environnementales peuvent avoir un impact négatif sur la rentabilité et la compétitivité des entreprises. Les managers des CLs doivent alors adapter leurs décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles à ce contexte environnemental de plus en plus rigide et exigent tout en assurant un équilibre entre leur rentabilité et leur performance environnementale.

Dans ce contexte est apparue le **concept de gestion de chaîne logistique verte (CLV)** que Srivastava (2007) définit comme « l'intégration de la conscience environnementale dans la gestion de la chaîne logistique, en incluant la phase de conception du produit, l'extraction et le choix des matériaux et matières premières, le processus et les procédés de fabrication, la livraison du produit fini au client ainsi que la gestion de la fin de vie du produit ». Dans une autre définition plus récente, donnée par Sarkis et al. (2011), les auteurs précisent que

« l'intégration de la conscience environnementale dans la gestion de la chaîne logistique » consiste en « l'intégration d'un ensemble de pratiques responsables telles que l'élimination ou la réduction du gaspillage, d'énergie, de l'épuisement des ressources naturelles, des émissions, des déchets dangereux des produits chimiques et des déchets solides, dans les processus de gestion de la chaîne logistique directe et inverse ». Pour Andic et al. (2012) la GCLV consiste à minimiser voire même éliminer les effets négatifs des activités de la CL sur l'environnement. En effet, dans leur revue de la littérature sur la définition du « Green Supply Chain Management », Ahi et Searcy (2013) ont identifié 22 définitions distinctes de la GCLV. Nous concluons alors que cette notion a été largement étudiée dans la littérature, ce qui lui a permis de gagner de la maturité avec l'avancée des recherches dans ce domaine. Cependant, cette diversité met en évidence la difficulté à fournir une définition unique de la GCLV. Nous estimons, que cette notion de GCLV constitue un large domaine de recherche qui peut être caractérisé par plusieurs aspects et peut couvrir une large sphère de problématiques auxquelles l'entreprise est confrontée dans un contexte environnemental de plus en plus précis et strict, ce qui rend sa définition complexe et même confuse. Toutefois, Ahi et Searcy (2013) ont souligné que toutes ces définitions de la GCLV, en dépit de leurs différences, se basent sur **l'intégration de la pensée environnementale dans les pratiques de la gestion de CL**. Nous proposons alors de subdiviser ce large domaine de recherche de la GCLV en des filières de recherches plus spécifiques et mieux orientées. En décortiquant les critères environnementaux d'une CL, on arrive à mieux mettre en relief cette notion de « l'intégration de la pensée environnementale dans les pratiques de la gestion de CL ». En considérant que les émissions de carbone sont l'un des critères environnementaux de base pour une entreprise, on identifie **la gestion de chaîne logistique à faible teneur en carbone**, comme l'une des filières de recherche intéressantes de la GCLV, qu'on vise à étudier et explorer dans nos travaux de recherche. Une telle spécification nous permet de mener des analyses plus approfondies et structurées dans le domaine de GCLV. La figure 1.1 ci-dessous présente quelques filières de recherche du domaine de la GCLV.

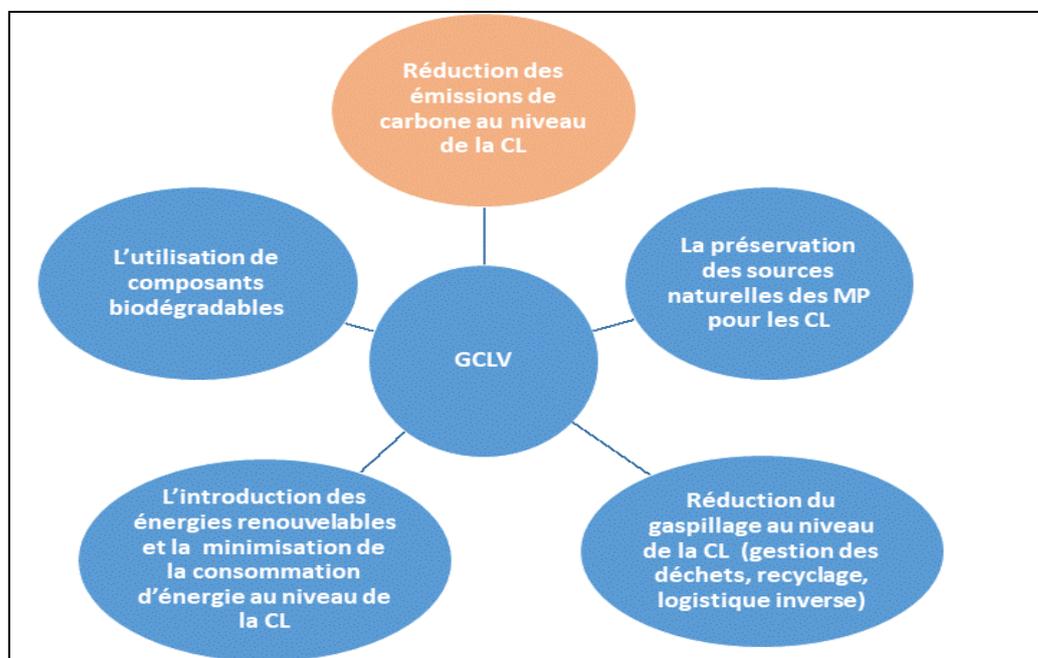


Figure 1.1. Les filières de recherche de la GCLV

### **1.1.2. Définition de la gestion de chaîne logistique à faible teneur en carbone (GCLFTC)**

Les impacts des industries sur l'environnement sont divers et différent d'un secteur à un autre. Par conséquent, afin d'évaluer la performance environnementale d'une industrie dans un secteur donné, de nombreux critères et paramètres environnementaux ont été identifiés, notamment les émissions de gaz à effet de serre (GES), l'efficacité énergétique, la conservation des ressources naturelles, l'utilisation de composants naturels et biogéniques, etc. Chaque entreprise, selon son secteur d'activité, définit les facteurs clés qui influent le plus sur sa performance environnementale globale. Alors que pour certaines industries, la minimisation de la consommation d'eau se voit une priorité, notamment pour les tanneries ou les industries textile, l'utilisation de composants bio se voit comme une action essentielle pour le secteur agroalimentaire ou cosmétique. Néanmoins, les émissions de GES ont été identifiées comme l'une des principales préoccupations environnementales de tous au cours de la dernière décennie (Fahimnia et al., 2016). En effet, ces émissions nocives sont reconnues être la principale cause du dangereux phénomène du réchauffement climatique que l'organisation des Nations Unies considère comme la question déterminante de l'époque (<https://www.un.org/fr/sections/issues-depth/climate-change/index.html>). L'Agence de Protection de l'environnement des États-Unis a affirmé que 76% des émissions de GES sont constituées du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) (EPA, 2013). Nul ne peut nier la part importante des activités des chaînes logistiques dans ces émissions nocives, 30% des émissions mondiales en  $CO_2$  en 2010 proviennent de l'activité manufacturière (Dussud, Wong et Duvernoy, 2015). Les experts ont estimé qu'une hausse de la température mondiale moyenne inférieure à 2°C peut freiner et même éviter les impacts climatiques les plus graves du phénomène du réchauffement climatique. Pour atteindre cet objectif, il faut réduire considérablement les émissions de carbone dans l'atmosphère de 54 gigatonnes en 2012 (GtCO<sub>2</sub>e) à 32GtCO<sub>2</sub>e en 2050. Les experts ont alors estimé qu'au cours des 35 prochaines années, des investissements supplémentaires d'environ 40 000 milliards de dollars US seront nécessaires pour assurer la transition vers une économie mondiale globale sobre en carbone. Par conséquent, des actions politiques, des législations environnementales, des stratégies entrepreneuriales sociétales, des initiatives associatives ou des comportements individuels conscients, constituent l'ensemble d'actions et de réactions pour remédier à ce problème environnemental. Sous la pression des mouvements législatifs, écologistes et le comportement des consommateurs conscients, les entreprises doivent prioriser la réduction de leurs émissions de carbone (Krass et al., 2013; Lin et al., 2013; Brécard et al. 2009). Dans cette optique, ils sont contraints de prendre des décisions logistiques adéquates qui permettent de réduire les émissions de carbone tout au long de leur chaîne logistique afin d'améliorer leur performance environnementale et économique. Nous prenons comme définition de cette thématique, celle donnée par Wang et Sarkis, (2013), qui considèrent que la gestion de la chaîne logistique à faible teneur en carbone (CLFTC) consiste à mettre en œuvre des pratiques écologiques et à repenser les décisions de la gestion de la CL en vue de réduire les émissions de carbone. Ce domaine de recherche vise à aider les entreprises à prendre les bonnes décisions en matière de gestion de CL tout en réduisant leurs émissions de carbone dans le but d'améliorer leurs performances économiques globales (Wang et Sarkis, 2013).

Plusieurs multinationales ont mis en pratique des stratégies de GCLFTC. IBM a été leader dans la lutte contre le changement climatique par le biais de ses programmes de conservation de l'énergie et de réduction d'émission de carbone lancés depuis des décennies. L'entreprise a bien souligné qu'environ 99% des émissions de carbone associées aux activités de sa chaîne logistique proviennent de l'utilisation d'électricité et de carburant dans ses activités. IBM a

alors réussi à mettre en pratique des programmes à long terme visant la conservation et l'efficacité énergétique. Entre 1990 et 2017, IBM a économisé 7,4 millions de mégawattheures de consommation d'électricité, ce qui lui a permis d'éviter 4,4 millions de tonnes métriques de carbone et d'économiser 616 millions de dollars grâce à ses actions annuelles de conservation de l'énergie. En octobre 2018, IBM a défini de nouveaux objectifs visant à réduire davantage ses émissions de carbone, basés principalement sur la transition énergétique de l'entreprise à travers l'acquisition d'énergie renouvelable de deuxième génération. De son côté, Wal-Mart, le géant américain de la distribution, a lancé en 2017 son projet Gigatonne qui a pour objectif de réduire les émissions de carbone de sa chaîne logistique mondiale d'un milliard de tonnes de carbone vers l'an 2030. L'entreprise a réussi à coopérer avec 1 000 fournisseurs provenant de 40 pays qui se sont joints au projet ([www.newswire.ca](http://www.newswire.ca)). Tout récemment, lors du grand sommet sur le climat de la COP24 organisé par l'ONU en Pologne en 2018, des dizaines de grandes marques de luxe et d'autres parties prenantes de l'industrie du textile et de la mode ont signé une charte ambitieuse qui prévoit une réduction de 30% de leurs émissions totales de carbone entre 2018 et 2030. Les signataires de cette charte comptent parmi les plus grandes marques de mode au monde, notamment Inditex (propriétaire de Zara), H&M, Adidas, Burberry, Levi's, Esprit, Guess, Gap, Puma et Kering (propriétaire de Gucci et Yves Saint Laurent, et d'autres marques). Avec une telle initiative, l'industrie du textile, l'un des secteurs les plus émetteurs de carbone avec environ 1,2 milliard de tonnes d'équivalent de carbone en 2015, réalise que réduire ses émissions de carbone est une nécessité et non pas une option. Ce projet ambitieux nécessitera des recherches avancées pour assister ces entreprises à optimiser la gestion d'une CLFTC (Bain, 2018).

Nos travaux de recherche, s'intègrent dans cette vision. Nous cherchons à concevoir et développer des modèles mathématiques d'optimisation de CLFTC performantes et robustes, dans un contexte environnemental de plus en plus exigeant et évolutif. Dans cet objectif, nous prenons en considération les différentes contraintes réelles liées aux émissions de carbone, auxquelles les entreprises font face, afin de les assister dans leurs décisions complexes. Toutefois, ce problème de GCLFTC a été bien étudié par les chercheurs en RO et MO ces dernières années. De nombreux articles ont développé des modèles mathématiques d'optimisation de chaîne logistique en prenant en considération des contraintes particulières d'émission de carbone dans leurs modèles. Dans la revue de la littérature, nous avons sélectionné 83 articles publiés dans le domaine de la GCLFTC sur une période de 10 ans (2007 à 2016). Nous estimons qu'il est utile, afin de bien analyser cette littérature et mieux contribuer au développement de la recherche dans cette filière, de créer un modèle conceptuel qui permet à la fois de faciliter la compréhension du problème de GCLFTC et de nous assister dans l'analyse des travaux existants en identifiant les éléments clés de ce problème.

## **1.2. Modèle conceptuel du problème GCLFTC**

La GCLFTC est un projet assez complexe pour les entreprises pour diverses raisons. D'une part, afin de réduire aux mieux les émissions de carbone d'une chaîne logistique, il est primordial de connaître les différentes sources d'émissions de carbone et leurs différentes parts dans les émissions globales. De plus, une fois les sources d'émission de carbone connues, plusieurs décisions logistiques peuvent être prises, à savoir des pratiques de gestion opérationnelles, et/ou des décisions stratégiques à moyen ou à long terme, dans le but de réduire aux mieux les émissions de carbone d'une source donnée. Il est ainsi évident que ces décisions peuvent avoir des impacts différents sur l'efficacité de réduction des émissions de carbone de la CL et sur sa rentabilité.

Dans cette perspective, et afin de faciliter la compréhension du problème de GCLFTC, nous avons élaboré un framework qui précise les différents facteurs clés de cette problématique et établit les relations entre ces facteurs. Ce framework permet d'identifier les différentes sources d'émissions de carbone au sein de la CL, ainsi que les différentes contraintes et pressions exercées par les parties prenantes. Il permet aussi de classer les principales décisions logistiques qui affectent les émissions de carbone à travers tout le processus de gestion de la CL.

Les gouvernements et les clients conscients exercent des pressions externes sur les entreprises pour les inciter à reconsidérer leurs décisions en matière de gestion de la CL afin de réduire leurs émissions de carbone (Kleindorfer et al., 2005; Sarkis et al., 2011). Toutefois, quel impact ces pressions externes auront sur la rentabilité des entreprises ?

D'une part, plusieurs gouvernements ont promulgué des législations environnementales pour inciter les entreprises à minimiser leurs émissions et encourager l'investissement dans les technologies vertes (He et al., 2014). A travers de telles législations de carbone, les gouvernements offrent des incitations ou des subventions ou imposent des coûts et / ou des seuils maximums aux émissions de carbone (Chelly et al., 2018). Outre les subventions, les législations de carbone qui ont été pratiquées dans le monde, comptent les seuils de carbone, les marchés de carbone connus aussi sous le nom de système d'échange de quotas de carbone et les taxes carbone. Soumises à de telles lois de carbone, les entreprises supportent des coûts supplémentaires qu'ils doivent minimiser en réduisant leurs émissions de carbone. Les managers des CLs doivent prendre les décisions opérationnelles ou stratégiques nécessaires pour une GCLFTC optimisée. Dans ce contexte, afin de prendre les meilleures décisions leur permettant de se conformer aux législations exercées par les gouvernements et réduire leur émission de carbone à moindre coût, les entreprises ont besoin d'un outil d'aide à la décision. Les communautés de chercheurs en RO et MO ont largement contribué à assister les entreprises à résoudre ce problème en développant et résolvant des modèles mathématiques d'optimisation de chaîne logistique sous des contraintes législatives d'émission de carbone. Tout de même, nous admettons que l'intégration d'une telle contrainte dans les modèles mathématiques de GCLFTC demeure une tâche complexe. Il est à signaler que les législations de carbone ont été implémentées par la majorité des pays développés ainsi que certains pays en voie de développement. Toutefois, différents mécanismes d'implémentation de la taxe carbone et différentes stratégies de taxation ont été adoptées par ces pays. Par conséquent, l'efficacité des législations de carbone varie considérablement d'un pays à un autre. Nous proposons donc une revue sur les législations de carbone appliquées dans le monde. Ensuite, nous analysons les approches de modélisation de cette contrainte et son intégration dans les modèles mathématiques. Une telle analyse permet de mettre l'accent sur les limites des modèles développés à étudier, les caractéristiques des outils législatifs existants ainsi que leur efficacité dans la résolution du problème de réduction des émissions de carbone des CLs.

D'autre part, certains clients conscients de l'impact important des activités industrielles sur les émissions de carbone, adoptent un comportement responsable et cherchent à acheter des produits qui génèrent le minimum d'émission de carbone à travers leurs processus de fabrication et d'approvisionnement. Sous cette perspective, plusieurs entreprises se sont engagées à réduire leurs émissions de carbone et à communiquer à ces clients conscients, désignés également par les « clients verts » leurs efforts et leurs engagements. A travers des certifications spécifiques, des tierces entreprises attestent du niveau d'émission de carbone du produit, dit aussi empreinte carbone du produit, afin de rassurer les clients « verts » sur la qualité environnementale de ce produit. Ainsi, de nombreux labels pour l'empreinte carbone

sont apparus ces dernières années. La figure 1.2 illustre quelques labels de l’empreinte carbone à travers le monde.



Figure 1.2. Exemples de labels de l’empreinte carbone

En réduisant leurs émissions de carbone et en offrant aux ‘clients verts’ des produits à faible empreinte carbone, les entreprises peuvent élargir leurs parts de marché et créer de nouvelles opportunités pour maximiser leurs ventes. Par contre, négliger une telle contrainte, peut nuire à l’image de marque de l’entreprise et même lui provoquer des pertes de parts de marché. Compte tenu de ce contexte, les entreprises doivent prendre les décisions logistiques optimales afin de réduire leurs émissions de carbone par rapport à leurs concurrents et convaincre leurs clients des efforts entretenus envers l’environnement. Les recherches en RO et MO, ont abordé ces problématiques et ont ainsi intégré les contraintes de la demande des « clients verts » dans les modèles quantitatifs de GCLFTC. Nous proposons, par la suite, d’analyser la modélisation d’une telle demande endogène dans les modèles mathématiques de GCLFTC afin de souligner les limites des modèles développés. Une telle analyse permet de mettre en relief les pistes d’amélioration de la modélisation de cette contrainte dans l’objectif de garantir une meilleure étude de l’impact d’une demande sensible aux émissions de carbone sur les décisions des entreprises et leurs performances.

Ces émissions de carbone sont générées au niveau de toutes les activités de la CL (Hua et al., 2011; Chen et al., 2013). Elles peuvent alors être regroupées en trois sources principales d’émission : le transport, la production et le stockage. Ces activités génèrent différentes quantités de carbone en fonction de leur consommation d’énergie. En conséquence, les décisions logistiques pour la gestion de ces activités auront des degrés d’efficacité différents en termes de réduction des émissions de carbone de la CL. Chaque entreprise, selon son contexte, sa localisation géographique, son secteur, etc., doit déterminer les décisions logistiques optimales à mettre en place pour réduire efficacement ses émissions globales de carbone au moindre coût. En effet, chaque décision logistique prise par une entreprise, qu’elle soit opérationnelle, tactique ou stratégique, induira différents niveaux de coûts et de difficultés au niveau de la gestion de la CL. Dans ce contexte, la multinationale Coca-Cola qui a été pionnière dans la GCLFTC, a bâti sa stratégie de réduction des émissions de carbone sur la réduction des émissions de transport de sa CL. D’une part l’optimisation des livraisons lui a permis d’économiser 2,2 millions de kilomètres depuis 2010, soit environ 30 % d’émissions de carbone chaque année, en favorisant les livraisons directes et la mutualisation du transport avec les clients. D’autre part, Coca-cola a également opté pour la substitution de ses camions ordinaires par les trains moins émetteurs de carbone, et pour l’investissement dans des camions à gaz naturel. Toutefois en déterminant la part de chaque activité de sa CL dans les émissions globales de carbone, l’entreprise a découvert que les émissions du transport n’en représentent que 6%, alors que la fabrication est responsable de 8%, les

ingrédients et la réfrigération de 18 % chacun et les matériaux d'emballage de 50%. Il n'est pas du coup évident que le transport soit le bon levier pour améliorer aux mieux les performances environnementales de Coca-Cola. L'entreprise a opté alors pour l'investissement technologique dans une nouvelle chaîne de production dans l'une de ses usines estimant pouvoir atteindre l'objectif de recycler 48 000t de plastique chaque année. La situation de cette multinationale met en relief le dilemme auquel les entreprises font face pour optimiser la gestion d'une CLFTC efficace et rentable (Kerbrat, 2015).

Dans ce contexte, les résultats de l'enquête annuelle conduite en 2013 par le Carbon Disclosure Project (CDP) sur la gestion des émissions de carbone, qui a fait participer plus de 6000 entreprises, montrent que 69% de ces entreprises ont mené des décisions d'investissement stratégique dans la réduction des émissions carbone, contre seulement 39% des entreprises enquêtées en 2011 (Carbon Disclosure Project, 2013).

D'une façon générale, les entreprises peuvent considérer et revoir leurs pratiques de gestion opérationnelle (GO) et / ou leurs stratégies d'investissement ainsi que leurs décisions de collaboration avec leurs partenaires (Benjaafar et al., 2013) afin de réduire les émissions de carbone globales générées par leur système de CL. Ces décisions ne génèrent pas les mêmes coûts supplémentaires pour l'entreprise, n'ont pas la même efficacité en termes de réduction des émissions de carbone, et nécessitent la disponibilité de différents niveaux de compétences managériales pour être bien maîtriser et efficacement mises en œuvre.

Nombreux modèles quantitatifs ont étudié les décisions logistiques que les entreprises peuvent considérer pour répondre efficacement aux contraintes d'émissions de carbone. Nous avons opté pour une classification de ces modèles en 3 catégories selon la décision logistique abordée et étudiée :

- la catégorie « Gestion opérationnelle » (GO) ;
- la catégorie « Investissement technologique » (IT) ;
- la catégorie « Conception de chaîne logistique et coordination » (CCL-C).

La catégorie (GO) regroupe l'ensemble des articles qui ont étudié le problème de management des opérations à court terme de la CL sous des contraintes d'émission de carbone. La catégorie (GO) étudie alors les problèmes de production, de transport et de gestion des stocks au sein des CL (Chen et al., 2013) en prenant en considération des contraintes liées aux émissions de carbone. Les travaux liés à cette catégorie ont étudié comment les CLs doivent gérer leurs décisions logistiques à court terme sous les pressions externes exercées par les gouvernements et / ou les consommateurs verts pour minimiser leurs émissions tout au long de la CL et rester efficaces.

La deuxième catégorie (IT) regroupe les articles qui ont abordé la décision d'investissement technologique dans le but de réduire les émissions de carbone d'une CL. Compte tenu des réglementations et de la sensibilité des consommateurs aux émissions de carbone, les entreprises ne doivent plus choisir leurs technologies en considérant seulement leurs coûts et leurs capacités. Les performances environnementales des technologies disponibles, en termes d'émission de carbone, sont aussi déterminantes que les coûts ou les capacités des technologies pour garantir à l'entreprise l'investissement optimal afin de mieux répondre aux pressions externes.

Finalement la troisième catégorie (CCL-C) regroupe tous les articles qui ont étudié et abordé d'autres décisions stratégiques de conception de chaîne logistique outre l'investissement dans de nouvelles technologies, et nécessitant particulièrement la coopération et la coordination

avec les partenaires de la CL. La catégorie CCL-C comporte les articles qui ont étudié des décisions stratégiques de localisation des installations (par exemple pour la production, le stockage, la distribution et la vente au détail), d'affectation des capacités de production aux différentes installations, de sélection des fournisseurs, de choix de mode de transport (Kouvelis et al., 2006) tout en intégrant les contraintes liées aux émissions de carbone.

Nous admettons qu'avec une telle classification des modèles mathématiques de GCLFTC, nous couvrons principalement l'ensemble de décisions complexes auxquelles l'entreprise a recours pour lancer sa stratégie de réduction des émissions de carbone de sa CL, et nous facilitons également le benchmarking de ces modèles existants et des problématiques abordées.

Finalement, à travers la figure 1.3 ci-dessous, nous présentons le framework du problème de GCLFTC, qui regroupe tous les composants de ce problème qu'on vient de décrire et détailler.

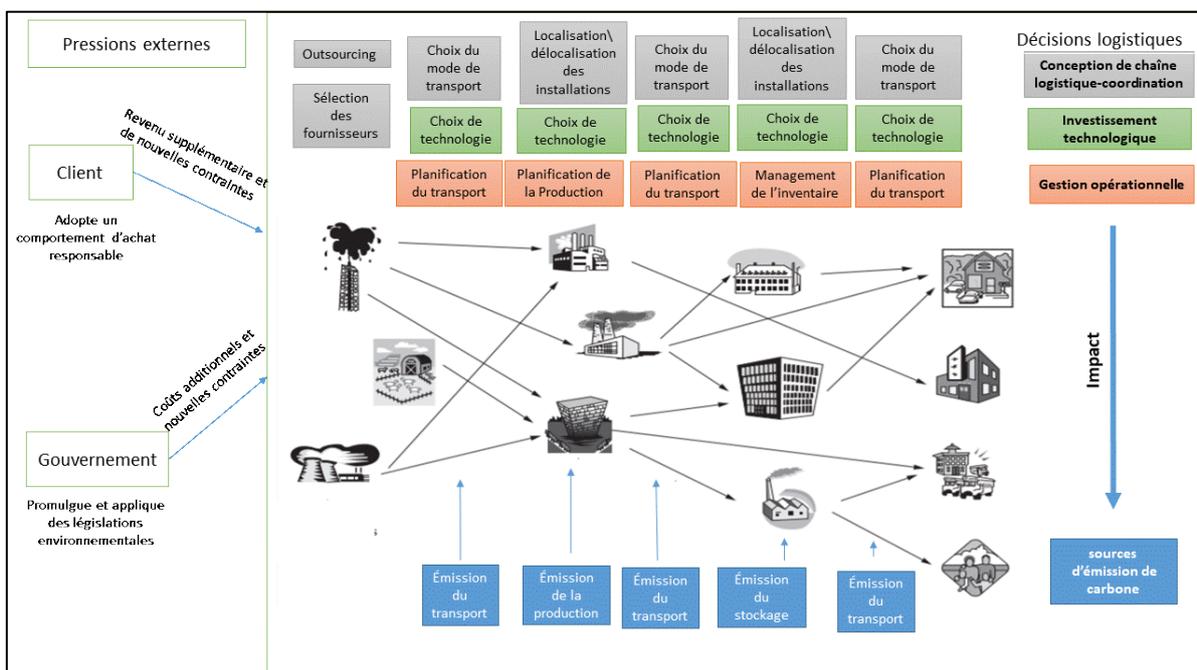


Figure 1.3. Framework du problème de gestion de chaîne logistique à faible teneur en carbone

Dans la section suivante, nous analysons l'apport de chaque catégorie d'articles, notamment la catégorie (GO), (IT), (CCL-C), dans la littérature de la GCLFTC.

### 1.3. Revue de la littérature

Dans la recherche bibliographique, nous nous sommes référés aux revues internationales les plus répandues (Scopus, Web of Science, Google Scholar) en utilisant des mots-clés tels que « supply chain + carbon emission », « supply chain + carbon legislation ». Nous avons ensuite limité notre sélection aux publications apparues entre 2007 et 2016. Nous n'avons retenu que les papiers ayant développé des modèles mathématiques et qui ont intégré les émissions de carbone dans leurs modèles. Nous avons ainsi identifié 83 articles. Au cours de cette dernière décennie, le nombre d'articles en Recherche Opérationnelle (RO) et Management Opérationnel (RO) qui ont développé des modèles mathématiques de GCLFTC a considérablement augmenté. Le nombre d'articles publiés par année, a augmenté de

seulement 2 articles en 2007 à plus de 21 articles publiés en 2016. La majorité des publications entre 2007 et 2015, a traité le problème de la gestion opérationnelle de la CL sous les considérations des émissions de carbone, avec une moyenne de 5 articles publiés par année appartenant au groupe GO. La moyenne des articles publiés par année entre 2007 et 2015 n'est que de 2 articles par année pour le groupe IT et 3 articles pour le groupe CCL-C. Cependant, le nombre d'articles publiés dans le groupe GO a diminué de 10 articles en 2015 à seulement 7 articles en 2016. Alors que les nombres des articles publiés dans les deux autres catégories ont augmenté de 2 articles publiés en 2015 à 7 articles publiés en 2016 pour chaque catégorie.

D'une façon générale, le nombre total de publications dans la catégorie GO est de 38 articles, alors que le nombre de publications dans la catégorie IT n'est que de 22 articles et de 23 articles pour la catégorie CCL-C. Cette constatation met en évidence qu'au cours de la dernière décennie, les chercheurs ont donné plus d'importance au volet de la gestion opérationnelle de la CL à faible teneur en carbone qu'à l'étude des décisions d'investissement technologiques ou de conception des chaînes logistiques. Par conséquent, comme cette catégorie a eu plus d'intérêt, ce qui lui a permis de gagner plus de maturité en 2016, le nombre de travaux publiés dans cette catégorie a diminué alors que les nombres de travaux dans les deux autres catégories d'articles ont augmenté. De plus, avec 22 articles qui étudient la décision de choix de technologie en intégrant les contraintes des émissions de carbone représentés par la catégorie IT, contre 23 articles qui étudient toutes les autres décisions stratégiques de conception de CL sous ces contraintes, regroupés dans la catégorie CCL-C, le problème d'investissement technologique avec considération des émissions de carbone a gagné plus d'ampleur que les autres problèmes stratégiques dans la filière de GCLFTC.

La figure 1.4 illustre l'évolution des publications dans le domaine de gestion de CLFTC entre 2007 et 2016. Le tableau 1.1 détaille l'évolution des publications dans ce domaine de recherche pour chaque catégorie d'articles qu'on a identifiée.

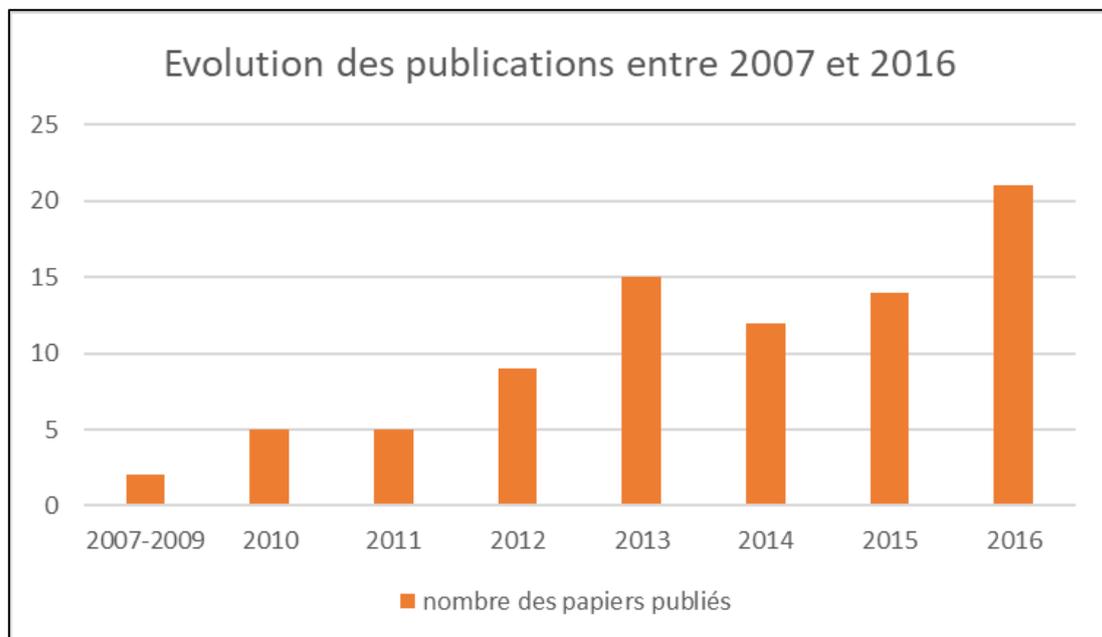


Figure 1.4. Evolution du nombre de publications entre 2007 et 2016

Tableau 1.1: Evolution des publications en GCLFTC pour chaque catégorie

Année	2007-2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Moyenne des publications par année entre 2007 et 2015
GO	0	3	1	3	7	7	10	7	5
IT	1	1	2	4	4	1	2	7	2
CCL-C	1	1	2	2	4	4	2	7	3

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons les principaux travaux de chaque catégorie. Nous analysons les problématiques abordées, ainsi que les modèles développés.

### 1.3.1. Catégorie Management Opérationnelle (GO)

Les articles de la catégorie GO, se sont intéressés à étudier le problème de la gestion opérationnelle de la CL avec considération des émissions de carbone. Ils ont ainsi analysé l'impact de cette contrainte environnementale sur les ajustements opérationnels de la CL. Ensuite ils ont discuté l'efficacité de ces décisions d'ajustements opérationnels à réduire les émissions de carbone de la CL et à garantir à l'entreprise de se conformer aux législations de carbone ou/et de satisfaire les exigences de leurs clients verts, au moindre coût.

De nombreux articles de la catégorie GO ont essentiellement abordé le problème de la planification de la production. Ainsi, les auteurs ont utilisé diverses méthodes et techniques de modélisation pour formuler une nouvelle version du problème de planification de la production sous des contraintes particulières d'émission de carbone, sur la base du modèle EOQ (Economic Order Quantity) (Hua et al., 2011; Du et al., 2013; Zakeri et al., 2014a; He et al., 2015; Wang et Choi 2015; Zhou 2013; etc.).

Miao et al. (2016) et Yenipazarli (2015) ont traité le problème du recyclage et de la planification de la production sous des contraintes législatives de carbone.

Hong et al. (2016) ont étudié le problème de planification de la production en considérant que l'entreprise dispose de deux technologies de production : ordinaire et verte.

Chen et Hao (2014) ont analysé non seulement la décision de production mais aussi la décision de tarification sous la législation de taxe carbone et en intégrant la contrainte de concurrence.

Tous ces travaux mentionnés ci-dessus, se sont concentrés sur l'étude de la décision de la production ou de dimensionnement des lots sans détailler les décisions liées au transport et ses contraintes relatives.

Néanmoins, Gurtu et al. (2014) ont modifié les modèles de « EOQ » afin d'appliquer une taxe carbone sur les émissions du transport et inclure des coûts de transport croissants afin d'étudier l'impact de ces coûts sur les diverses stratégies de production et de gestion de stock.

Knour et al. (2014) ont formulé un problème de gestion de stock et de transport sous quatre réglementations différentes de carbone.

Tous ces papiers mentionnés, ont considéré une chaîne logistique à un seul échelon, et ont ainsi négligé l'aspect de coordination.

Néanmoins, certains auteurs soulignent l'importance de prendre en compte les aspects de coordination lors de la réduction des émissions de carbone à travers le management des opérations (Jaber et al., 2013; Zaroni et al., 2014b; Gosh et al., 2016; Tao et al., 2016).

Hammami et al. (2015) et Memari et al. (2016) sont les seuls travaux qui ont étudié le problème de gestion de la production et de stock sous des contraintes d'émission de carbone en considérant un système multi-échelons de CL et en étudiant l'effet de la coordination entre les différents partenaires de ce système.

Nous fournissons à travers le tableau 1.2 ci-dessous, une analyse détaillée des travaux réalisés dans la catégorie GO. En se référant aux éléments clés du problème de GCLFTC identifiés par le framework du problème, nous précisons pour chaque article, les sources d'émission de carbone modélisées, les législations de carbone considérées, et la structure de la demande client adoptée tout en précisant également l'horizon de modélisation pris en compte par ces travaux.

Tableau 1.2. Classification des articles de la catégorie GO

Articles	Sources d'émission			Législation				Structure de la demande				Horizon	
	Transport	Production	Inventaire	Cap	C&T	Taxe	Subvention	Exog	Sen /QE	Sen/Prix	Sen/Conc	1-période	Multi périodes
Hammami et al. (2015)	X	X	X	X		X		X					X
Gong and Zhou (2013)		X			X			X					X
Zhang and Xu. (2013)		X			X			X				X	
Du et al. (2013)		X			X			X				X	
Du et al. (2016)		X			X				X			X	
Liu et al. (2015)		X		X	X	X		X				X	
Hua et al. (2011)	X		X		X			X				X	
Zhou et al. (2015)					X			X					X
Yenipazarli. (2015)		X				X			X	X			
Meamri et al. (2016)	X			X				X					X
Chen et al. (2010)		X			X			X					X
Tang et al. (2014)	X		X					X				X	
Wang and Choi. (2015)		X		X	X			X				X	
Bauer et al. (2010)	X							X				X	
García-Alvarado et al. (2014)		X			X			X					X
Jawad et al. (2016)		X	X			X				X		X	
Manikas and Godfrey (2010)		X			X			X				X	
Miao et al. (2016)		X			X	X	X			X		X	
Konur et al. (2014)	X	X	X	X	X	X		X				X	
Parohit et al. (2015)	X	X	X		X			X					X
Jaber et al. (2013)		X				X		X				X	
Bouchery et al. (2012)	X	X		X		X		X					
Zanoni et al.(2014b)						X		X					

## Chapitre I : Caractérisation du problème de gestion des chaînes logistiques à faible teneur en carbone

Benjaafar et al. ( 2013)	X	X	X	X	X	X		X					X
Absi et al. (2013)	X	X			X			X					X
Gosh et al. (2016)	X	X	X	X	X	X		X				X	
Song and Leng. (2012)		X		X	X	X		X				X	
Garcia-Alvarado et al. (2015)		X			X			X					X
Chen et al. (2015)		X		X	X			X				X	
Hong et al. (2016)		X		X	X			X					X
Tao et al. (2016)	X		X			X		X					X
Chen et Hao. (2014)		X				X				X	X	X	
Chen et al. (2013)	X	X	X	X	X	X		X				X	
Zakeri et al. (2014)	X	X	X		X	X		X					X
He et al. (2015)	X	X	X		X	X		X					X
Gurtu et al. (2014)	X					X		X				X	
Bazan, Jaber and Zanoni (2015)	X	X				X		X				X	
Du et al. (2015)		X			X			X				X	

### 1.3.2. Catégorie Investissement Technologique (IT)

Les articles de la catégorie IT ont étudié la décision du choix de technologie en prenant en considération les performances environnementales des technologies disponibles en termes d'émission de carbone comme critère essentiel dans ce choix stratégique. En effet, les législations de carbone sont conçues pour inciter les entreprises à investir dans des technologies propres. Les travaux de cette catégorie ont intégré dans les modèles classiques de choix de technologies les contraintes législatives et/ou de la demande sensible aux émissions de carbone pour étudier leurs impacts sur les décisions d'investissement stratégique de la CL et sa performance économique et environnementale.

Bouchery et al. (2011) ont utilisé un modèle bi-objectif pour évaluer et comparer l'efficacité des options d'ajustement opérationnel et d'investissement technologique dans la réduction des coûts et des émissions de carbone de la CL.

Jiang et Klabjan (2012) ont été parmi les premiers auteurs à intégrer l'incertitude de la demande dans le problème de sélection de technologies de production.

Wang et al. (2013) ont développé un programme dynamique stochastique sur un horizon infini. Les auteurs étudient les décisions de choix de technologie (entre deux technologies disponibles) et de planification de la capacité de production afin de répondre à une demande incertaine.

Dans Drake et al. (2015) et Song et al. (2016), les auteurs ont intégré une autre source d'incertitude, à savoir l'incertitude de la législation de carbone.

Tous les articles mentionnés ci-dessus, ont considéré une structure de CL à un seul échelon.

Dans une autre perspective, Dong et al. (2016) ont étudié une CL décentralisée à deux échelons où le fabricant décide d'abord de la qualité environnementale du produit, en choisissant son investissement en technologie de production, puis le commerçant décide de sa commande en vertu de la législation du marché de carbone.

Xu et al. (2016) ont également étudié les décisions de production et d'investissement pour réduire les émissions de carbone globales dans la CL d'un fabricant et d'un détaillant soumis à la législation de marché de carbone.

Sur la base du modèle de Stackelberg, et en intégrant à la fois une subvention pour l'investissement vert et une législation de taxe carbone, Zhuo et Wei (2016) ont conçu une CL verte à deux échelons et ont analysé l'impact combiné des législations de carbone et de l'incertitude de la demande sur les décisions des différents acteurs de la CL.

En outre, certains auteurs ont intégré la pression des consommateurs sensibles aux émissions de carbone dans les contraintes du problème de choix de technologies.

Glock et al. (2012) ont présenté un modèle de GCLFTC qui illustre les compromis entre qualité environnementale des produits, demande, coûts et profit dans une CL.

Zanoni et al. (2014a) ont développé un modèle intégré de gestion de la production et de stock pour une CL à deux échelons (vendeur-acheteur) dans lequel un investissement est nécessaire pour améliorer la performance environnementale des produits fabriqués. Ils ont ainsi envisagé une fonction de demande sensible au prix unitaire du produit et à sa qualité environnementale.

Liu et al. (2012) ont utilisé le paradigme du jeu dynamique pour étudier l'impact de la sensibilité des clients aux émissions de carbone et à la concurrence sur la rentabilité des différents acteurs de la CL.

Xiong et al. (2016) ont analysé les impacts, de la sensibilité des clients aux problématiques environnementales, de la taxe carbone et de la concurrence, sur les performances économiques et environnementales d'une CL formée par un fabricant et un détaillant.

Liu et al. (2013) se sont intéressés à intégrer la contrainte de la concurrence dans le problème de choix de technologie. Ils ont alors étudié les conditions dans lesquelles le gouvernement peut définir de manière stratégique une taxe carbone afin d'inciter les entreprises à adopter une technologie verte, et favoriser (ou entraver) une barrière à l'entrée.

Yalabik et Fairchild (2011) ont étudié les effets combinés de la réglementation, de la sensibilité des clients aux émissions de carbone et de la compétitivité sur la décision d'investissement technologique dans un contexte de comportement stratégique du client.

Plus récemment, Jiang et Chen (2016) ont examiné le même problème en ignorant la contrainte de la législation de carbone mais en soulignant le caractère incertain de la demande sensible aux émissions de carbone.

Enfin, Bazan et al. (2015) ont étudié le problème du choix de technologie avec la considération des émissions de carbone pour une chaîne logistique en boucle fermée. Ce travail a été parmi les premiers à élaborer un modèle de gestion de CL inverse respectueuse de l'environnement et moins émettrice de carbone.

Dans le tableau 1.3, nous fournissons une classification des articles de cette catégorie en se référant au framework développé pour préciser comment ces travaux ont considéré les facteurs clés du problème de GCLFTC.

Tableau 1.3. Classification des articles de la catégorie IT

Articles	Sources d'émission			Législation				Structure de la demande				Horizon	
	Transport	Production	Inventaire	Cap	C&T	Taxe	Subvention	Exog	Sen /QE	Sen/Prix	Sen/Conc	1-période	Multi périodes
Wang et al. (2013)		X						X					X
Liu et al. (2012)		X							X	X		X	
Bazan et al. (2015)	X	X				X		X				X	
Xiong et al. (2016)		X				X			X	X		X	
Dong et al. (2016)		X			X				X			X	
Subramanian et al. (2007)		X			X					X		X	
Drake et al. (2010)		X			X	X	X	X					
Bouchery et al. (2011)	X			X		X		X				X	
Yalabik and Fairchild (2011)		X				X	X		X	X	X	X	
Toptal et al. (2013)	X	X	X	X	X	X		X				X	
Krass et al. (2013)		X				X	X			X		X	
Garcia-Alvarado et Chaabane (2016)		X			X			X					X
Xu et al. (2016)		X			X				X	X		X	
Jiang and Klabjan (2012)		X		X	X	X		X				X	X
Jiang and Chen (2016)		X							X	X		X	
Song et al. (2016)		X			X	X		X				X	
Drake et al. (2015)		X			X	X		X				X	
Glock et al. (2012)		X							X	X		X	
Zanoni et al. (2014a)									X	X		X	
Zhuo and Wei (2016)							X			X		X	
Liu et al. (2013)		X				X		X				X	
He et al. (2012)		X			X	X		X					X

### **1.3.3. Catégorie Conception de Chaîne Logistique et Coordination (CCL-C)**

La catégorie CCL-C regroupe des articles ayant travaillé sur des décisions de conception de CL nécessitant une coordination avec les partenaires de la CL afin de prendre des décisions stratégiques optimales avec considération des émissions de carbone.

L'un des problèmes étudiés dans cette catégorie est le problème de sélection des fournisseurs (Xin et al., 2016; Rosic et Jammerneegg 2013; Choi 2013).

La sélection du mode de transport constitue un autre type de problème étudié dans cette catégorie (Harris et al., 2011; Hoen et al., 2014; Validi et al., 2013; Validi et al., 2014; Kim et al., 2009; Zheng et al., 2016).

Dans une autre perspective plus intégrée, certains auteurs ont étudié plus d'une décision stratégique de conception de CL (Jin et al., 2013; Diabat et al., 2010; Tarek et al., 2011; Chaabane et al., 2012; Fahimnia et al., 2014a; Fahimnia et al., 2014b; Fahimnia et al., 2015; Huang et al., 2016; Noura et al., 2016).

Dans une autre initiative, Drake (2012) a modélisé un problème de localisation et d'investissement technologique pour mettre l'accent sur le problème des fuites de carbone.

Les incertitudes liées au problème de conception de CL en considérant les émissions de carbone ont été examinées dans Shaw et al. (2016). Les auteurs ont proposé un modèle de conception de CLFTC en prenant en considération les incertitudes liées à la demande et aux capacités des fournisseurs, des usines et des entrepôts.

Reazee et al. (2015) ont présenté un modèle stochastique en deux étapes pour concevoir une CLFTC sous la législation de marché de carbone. Ils ont étudié l'impact des incertitudes du prix du carbone et de la demande client sur les décisions stratégiques de la CL et ses performances.

Nous fournissons une classification des articles étudiés dans le tableau 1.4 ci-dessous, en précisant pour chaque article les facteurs clés du problème de GCLFTC qu'il a considérés, conformément au framework d'analyse.

Tableau 1. 4. Classification des articles de la catégorie CCL-C

Articles	Sources d'émission			Législation				Structure de la demande				Horizon	
	Transport	Production	Inventaire	Cap	C&T	Taxe	Subvention	Exog	Sen /QE	Sen/Prix	Sen/Conc	1-période	Multi périodes
Jin et al. (2013)	X	X		X	X	X		X				X	
Zheng et al. (2016)	X				X				X	X		X	
Kim et al. (2009)	X			X				X				X	
Huang et al. (2016)	X	X								X		X	
Rosic et Jammernegg (2013)	X				X	X		X				X	
Drake (2012)	X	X				X		X				X	
Xin et al. (2016)		X				X		X					X
Hoen et al. (2014)	X					X		X				X	
Harris et al. (2011)	X		X					X				X	
Chaabane et al. (2012)	X	X			X			X				X	
Nouira et al. (2016)	X	X							X			X	
Shaw et al. (2016)	X	X		X		X		X				X	
Fahimnia et al. (2015)	X	X	X	X		X		X					X
Fahimnia et al. (2014a)	X	X		X		X		X					X
Fahimnia et al. (2014b)	X	X		X		X		X					X
Rezaee et al. (2015)	X	X			X			X				X	
Diabat et al. (2010)	X	X	X	X				X				X	
Validi et al. (2013)	X							X				X	
Validi et al. (2014)	X							X				X	
Tarek et al. (2011)	X	X	X		X			X				X	
Li et al. (2016)	X	X			X	X		X				X	
Park et al. (2016)	X		X			X		X				X	
Choi (2013)	X	X				X		X				X	X

## **Conclusion**

A travers ce chapitre, nous avons réussi à définir et déterminer le contexte de la problématique de gestion de chaîne logistique à faible teneur en carbone (GCLFTC) que nous cherchons à aborder et résoudre à travers nos travaux de recherche par le biais d'optimisation des chaînes logistiques. Dans ce contexte, nous avons initié à travers ce chapitre une revue de la littérature en RO et MO qui traite la modélisation de CLFTC. Nous avons pu identifier les problématiques abordées et les décisions qui ont été étudiées.

Dans le chapitre suivant, nous proposons donc d'analyser et critiquer la modélisation des sources d'émission de carbone, des législations et de la demande des clients verts en mesure d'évaluer l'efficacité des modèles mathématiques développés à traduire et prendre en considération les contraintes réelles de ces problèmes complexes. Une telle analyse pourra élucider les nouvelles approches et techniques de modélisation à développer afin d'améliorer la qualité des modèles existants et d'établir de nouveaux modèles abordant les problématiques ignorées tout en garantissant une meilleure intégration des contraintes des émissions de carbone dans les modèles quantitatifs d'aide à la décision.

**Chapitre II : Sur la modélisation du  
problème de gestion des chaînes  
logistiques à faible teneur en carbone**

## Introduction

Afin de mieux contribuer à la littérature de la GCLFTC et concevoir des modèles d'optimisation de CL performants et robustes sous les contraintes d'émission de carbone, il est primordial d'analyser les techniques de modélisation des facteurs clés de ce problème. Une telle analyse permet de mettre l'accent sur les limites des techniques de modélisation et des simplifications utilisées dans la littérature existante, afin de les améliorer dans les futurs travaux. En se référant au framework du problème de GCLFTC, nous nous intéressons à la modélisation des législations de carbone, de la demande sensible aux émissions de carbone et des différentes sources d'émissions de carbone de la CL. L'objectif est de mettre l'accent sur la difficulté de simplifier et d'approximer de tels composants pertinents et de les intégrer dans les modèles mathématiques d'aide à la décision. A l'issue de ce chapitre, nous cherchons à compléter l'analyse et revue de la littérature initiée dans le chapitre précédent, par l'identification de pistes d'amélioration de la modélisation des facteurs clés d'un problème de GCLFTC.

## 2.1. Intégration des contraintes législatives sur les émissions de carbone

Dans cette section, nous donnons d'abord un aperçu sur les législations de carbone appliquées à travers le monde en soulignant leurs principes et leurs limites. Ensuite, nous étudions comment les modèles mathématiques existants de GCLFTC ont considéré ces réglementations environnementales. L'objectif est d'évaluer dans quelle mesure les modèles quantitatifs d'aide à la décision existants reflètent les situations et problématiques réelles.

### 2.1.1. Vue générale sur les politiques environnementales déployées par les gouvernements

Depuis plusieurs années, des efforts énormes ont été mis en œuvre pour réduire les émissions de GES. En 1995, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)) a publié le protocole de Kyoto qui vient s'ajouter à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques de 1992. **Ce protocole de Kyoto est un accord international visant la réduction des émissions de GES d'au moins 5% (dans les pays engagés) par rapport aux niveaux d'émission de 1990.** En 1997, lors de la troisième conférence annuelle des Parties (COP3), ce protocole a été signé par 37 pays et membres de l'UE. Il est ensuite entré en vigueur le 16 février 2005, lorsqu'il a réussi à être ratifié par 55 pays développés générant ensemble 55% des émissions mondiales de GES en 1990 (Hoen, 2014, Kossoy et al., 2015). Le Protocole repose sur le principe de responsabilités communes mais différenciées, car les différents membres ont contribué différemment à la formation de GES dans l'atmosphère et ont des capacités variables d'adaptation et de contribution à la réduction des émissions de GES. En fait, la plus grande partie des émissions de carbone est émise par un petit nombre de pays. En 2010, 10 pays étaient responsables d'environ 70% des émissions de carbone provenant de la combustion de combustibles fossiles et des processus industriels (Kossoy et al., 2015). **S'engageant à adopter et respecter les objectifs de ce protocole, les pays et les régions membres de cet accord ont implémenté diverses réglementations sur les émissions de carbone** (EPA 2013; Konur, 2014).

Les législations de carbone qui ont été adoptées sont principalement **les subventions, les seuils d'émission, le marché de carbone connu aussi sous le nom de C&T ou le système d'échange de quotas de carbone et la taxe carbone** (Toptal et al., 2013). Les législations de

C&T et de la taxe carbone, désignées par les législations de tarification du carbone, comptent parmi les réglementations environnementales les plus répandues et mises en œuvre dans le monde (Kossoy et al., 2015). Nous analysons par la suite le principe de ces législations de tarification de carbone pour comprendre leurs systèmes et mettre l'accent sur leurs apports et limites.

❖ Aperçu sur les législations de tarification de carbone

La législation de C&T repose sur **un principe de plafonnement et d'échange des droits d'émission**. Dans le cadre de ce programme, des quotas, dits des permissions d'émission de carbone, sont alloués aux industries par l'intermédiaire d'un organisme de réglementation, puis échangés entre les entreprises au moyen de **transactions sur le marché de carbone** afin de compenser leurs besoins en émissions de carbone (EPA, 2012). Le nombre total des quotas d'émission de carbone permis est limité par **un seuil maximal prédéterminé**, qui est **progressivement resserré au fil du temps** (EPA, 2012).

Le marché de carbone de l'UE (ETS), lancé en 2005, est **le premier et le plus grand marché de carbone au monde**. Jusqu'à 2010, l'UE ETS couvrait 11000 centrales électriques et industrielles dans 30 pays (Commission européenne, 2013) et impliquait plus de 50% des émissions totales de carbone dans l'UE (Commission européenne, 2008; Union européenne, 2013; Benjaafar et al., 2013). Depuis son introduction, le prix d'une allocation carbone varie entre 0 et 30€/tonne de carbone (Nachmany et al., 2014). Les industries soumises à la législation C&T incluent toutes les installations du secteur de l'énergie, de la production de fer et d'acier, de l'industrie des minéraux et de l'industrie du bois, du papier et du carton. Ce mécanisme a été modifié à plusieurs reprises pour l'étendre à de nouveaux secteurs, tels que l'aviation (Nachmany et al., 2014). Afin de préserver la compétitivité de certains secteurs industriels polluants soumis à cette législation, ces secteurs reçoivent relativement plus de quotas gratuits que les autres secteurs. Plusieurs marchés de carbone ont été établis à travers le monde dont on peut citer le système C&T de Tokyo, ou encore le « Carbon Reduction Commitment (CRC) », le programme d'efficacité énergétique relatif à l'engagement de la réduction des émissions de carbone du Royaume-Uni.

En outre, **les deux plus grands émetteurs de GES dans le monde, à savoir la Chine et les États-Unis, ont tous les deux opté pour des marchés régionaux de carbone**. Aux États-Unis, les marchés de carbone qui sont lancés et continuent à se développer en Californie, dans les dix états du Nord-Est américain membres du Regional Greenhouse Gas Initiative (RGGI) et dans d'autres états, couvrent 0,5 GtCO<sub>2</sub>e (gigaton d'équivalent CO<sub>2</sub>) (Nachmany et al., 2014). En janvier 2014, le marché de carbone californien a été connecté au marché de carbone québécois et la première transaction a eu lieu en novembre 2014. Le champ d'application des deux programmes a été élargi en 2015 pour inclure les carburants du transport. Ce changement a étendu la couverture à 85% des émissions totales de GES de la Californie et du Québec (Nachmany et al., 2014). **En Chine, sept systèmes pilotes d'échange de quotas de carbone (C&T)** ont été combinés pour former la plus grande initiative nationale de tarification du carbone au monde en termes de volume, couvrant 1,3 GtCO<sub>2</sub>e. En 2015, la Chine a annoncé son intention de passer à un système national d'échange de quotas d'émission de carbone en 2019. Promesse tenue, la Chine a officialisé le lancement d'un marché de carbone à l'échelle nationale en 2017 qui est estimé être totalement opérationnel en 2020. Le pays introduit ainsi un mécanisme de marché de carbone qui s'appliquera à 1700 centrales électriques qui émettent, selon l'agence de planification chinoise, 3,3 milliards de tonnes de carbone, soit le tiers des émissions annuelles du pays en 2016. Une fois opérationnel, ce

marché chinois de quotas carbone sera le plus important du monde, supplantant le marché européen - l'ETS (Cossardeaux, 2017).

Défendue comme un outil législatif alternatif de réduction des émissions de carbone, **la législation de la taxe carbone est beaucoup plus facile à mettre en œuvre que le système de C&T** (Drake et al., 2015). Soumises à une taxe carbone, les entreprises paient chaque tonne de leurs émissions de carbone à un prix de taxe donné et connu (He et al., 2014). La Finlande et la Suède ont été les premiers pays à adopter une taxe carbone au début des années 90. Depuis lors, la politique de taxe carbone a été largement adoptée par de nombreux pays.

En France, la première version de la proposition de taxe carbone, qui prévoyait une taxe de 17€/tonne de carbone, a été bloquée par le Conseil Constitutionnel en décembre 2009 pour des raisons d'inégalités fiscales (Nachmany et al., 2014). Des politiques plus précises, nommées conjointement Grenelle II, complétant et détaillant la politique précédente par objectif et par secteur ont été votées en 2010. Cependant, cette politique a été abandonnée par le gouvernement pour des raisons de compétitivité économique nationale (Nachmany et al., 2014). Néanmoins, **la taxe carbone française a été lancée en avril 2014 imposant un taux de taxe carbone de 7€/ tonne de carbone** sur l'utilisation de combustibles fossiles non couverts par le marché de carbone européen (EU ETS). Un plan d'augmentation progressive de la taxe a été annoncé, déclarant que **le taux de la taxe carbone augmente à 14,5€/ tonne de carbone en 2015 et à 22€/ tonne de carbone en 2016** (Nachmany et al., 2014). Ensuite, en 2015, la France a officiellement adopté sa loi sur la transition énergétique vers la croissance verte. Cette loi fixe des objectifs à long terme et une trajectoire pour que le niveau de la taxe carbone du pays atteigne 56€/ tonne de carbone en 2020 et 100€/tonne de carbone en 2030 (Kossov et al., 2015). Suivant des révisions annuelles et la stratégie de sa progression annoncée, **en 2018 cette taxe a pu atteindre 44,6€/ tonne de carbone comme prévu**. Toutefois, **suite au mouvement des Gilets jaunes, cette taxe n'a pas été réévaluée en 2019** et sa trajectoire d'évolution programmée par la loi de finances 2018 pour passer à 65,4€ en 2020 et 86,20€ en 2022 a été retirée de la loi de finances 2019.

Au Canada, une taxe carbone nationale vient d'être récemment appliquée en 2018. Auparavant, la Colombie-Britannique était la seule province canadienne à avoir mis en œuvre la législation de la taxe carbone depuis 2008 à un taux initial de 10 \$/ tonne de carbone. En juillet 2014, cette taxe carbone a été portée à 25\$/ tonne de carbone (Carbon Tax Centre, 2015). C'est en 2016 que le gouvernement Canadien a annoncé son plan d'appliquer une taxe carbone nationale progressive, qui est prévu d'être **lancée en 2018 avec un taux de 10\$ / tonne de carbone et augmentera linéairement chaque année pour atteindre 50\$ / tonne de carbone en 2022**.

En Australie, le mécanisme de tarification du carbone tel que légiféré en 2011 est un système hybride, incorporant des éléments des modèles d'échange de quotas d'émission de carbone (C&T) et de la taxe carbone. Afin de contribuer à la réalisation des objectifs d'une économie sobre en carbone, les régulateurs australiens ont mis en place **un mécanisme en deux étapes**. Dans un premier temps, les entreprises sont soumises à **un système de taxation du carbone mis en place en 2012** (Fahimnia et al., 2014a; Jotzo et al., 2012). Dans le cadre de cette taxe carbone, les industries émettant plus de 25 000 tonnes de carbone par an (les "grands pollueurs") doivent acheter des autorisations pour chaque tonne de carbone émise ou s'acquitter d'une commission de déficit. Le mécanisme de tarification du carbone a couvert environ 60% des émissions nationales de l'Australie et a imposé des obligations à plus de 350 grands émetteurs à travers le pays (Nachmany et al., 2014). En 2012, le prix du carbone en Australie a d'abord été fixé à **23 AUD / tonne de carbone avec une augmentation planifiée**

**de 2,5% par an.** À partir de 2015, il a été prévu que **le système de tarification de carbone passe à un système d'échange de quotas d'émission de carbone**, désignée par «la période du prix flottant », où le prix du carbone sera déterminé par l'achat et la vente de permis d'émissions. Toutefois le gouvernement Australien avait encore prévu, sous ce système de C&T, d'imposer un seuil et un plancher de prix du carbone pour les trois premières années jusqu'en 2018, dans l'objectif de limiter l'impact de l'incertitude du prix du carbone sur les industries. De plus, il a été convenu, que les quotas d'émission de carbone attribués par le gouvernement aux industries, peuvent être vendus à d'autres entités avec des obligations de conformité ou être retournés au gouvernement, mais ne peuvent pas être mis en réserve. Cette stratégie progressive de taxation de carbone n'a pas pu être appliquée, car **en 2014 la taxe carbone a été abolie en Australie** suite aux pressions exercées par les grands pollueurs du pays. Ainsi, le gouvernement n'a pas réussi à appliquer ce système hybride de tarification de carbone qui était conçu pour garantir un changement fluide vers un système de marché de carbone. Reste à signaler que tout récemment, à l'approche des élections fédérales, les catastrophes naturelles qui ont frappé l'Australie les derniers mois de 2018 ont placé la question du changement climatique au cœur de l'opinion. Par conséquent, certaines voies se sont élevées pour demander de **réintroduire une taxe carbone en Australie**, dont on peut citer le géant énergétique australien Woodside aussi bien que les industries minières du pays ([www.lemondedelenergie.com](http://www.lemondedelenergie.com)).

Les législations de tarification de carbone ont donc été mises en place par **des stratégies différentes et en déployant divers mécanismes**. Néanmoins, on admet qu'en absence d'un accord international solide visant l'homogénéisation entre les mécanismes de tarification du carbone, la réduction des émissions de carbone peut être garantie par la mise en œuvre de réglementations plus simples et plus pratiques (Nachmany et al., 2014). Dans ce contexte, **les subventions pour l'adoption d'énergies propres** pourraient constituer une bonne solution de substitution pour favoriser l'acquisition de technologies vertes et la réduction des émissions de carbone.

#### ❖ Limites des législations de tarification de carbone actuellement appliquées

En août 2015, environ 40 juridictions nationales et plus de 20 États et régions représentant près du quart des émissions mondiales de carbone ont adopté des mécanismes de tarification de carbone (Kossoy et al., 2015). Ensemble, les instruments de tarification du carbone couvrent environ la moitié des émissions de ces pays, ce qui représente environ 12% des émissions mondiales. Cette statistique représente un progrès significatif : le nombre d'instruments de tarification du carbone a augmenté de 90% depuis 2012 (Kossoy et al., 2015). Cependant, des efforts supplémentaires doivent être déployés pour couvrir une plus grande partie des émissions de carbone générées dans l'atmosphère.

En outre, les mécanismes et les législations de tarification du carbone sont différents dans le monde. Les prix du carbone varient considérablement, de moins de 1USD/tonne de carbone à 130USD/tonne de carbone (Kossoy et al., 2015). Malgré cette fourchette relativement large, 99% des émissions sont vendues à moins de 30USD/tonne de carbone et 85% à moins de 10USD/tCO<sub>2e</sub>, ce qui est considérablement inférieur au prix estimé par les modèles économiques pour atteindre les 2 °C de réduction de température, objectif de stabilisation du climat recommandé par les scientifiques (Kossoy et al., 2015). Pour atteindre cet objectif, la plupart des analyses de scénarios indiquent que le prix moyen mondial du carbone requis d'ici 2030 doit varier entre 80USD/ tonne de carbone et 120USD/tonne de carbone (Kossoy et al., 2015). La différence entre cette fourchette de prix du carbone estimée nécessaire par les

modèles économiques, et les prix actuellement observés donne une indication de l'ampleur du défi à venir.

La tarification du carbone n'étant pas mise en œuvre de manière uniforme dans le monde entier, provoque le problème de « fuite de carbone ». Ce phénomène correspond à l'augmentation des émissions de carbone d'une CL suite à la délocalisation de ses installations vers des pays où aucune politique équivalente n'est mise en place (Drake, 2012). En fait, afin de protéger leurs compétitivités et de maximiser leurs rentabilités sous les législations de tarification de carbone, les entreprises déplacent leurs unités de production ou redirigent leurs investissements vers d'autres juridictions où les coûts d'émission sont plus bas, augmentant ainsi les émissions globales de leurs CL (Kosoy et al., 2015). Dans de tels cas, les mécanismes de tarification de carbone dont l'objectif est de réduire les émissions de carbone, engendrent des effets inverses et causent l'augmentation des émissions globales de carbone de la CL. Par conséquent, pour faire face à ce problème de fuite, il est essentiel de mettre en pratique des politiques adjointes aux systèmes de tarification de carbone, tels que les allocations gratuites aux secteurs à risques élevés, les exemptions, les rabais, les mesures d'ajustement des tarifs de carbone aux frontières, etc. Parmi les mesures suggérées pour faire face à ce phénomène de fuite de carbone, s'avère l'imposition d'une taxe sur l'empreinte carbone du produit (Larsen et al., 2012). Le principe d'une telle taxe sur l'empreinte carbone du produit, est de pénaliser les émissions de carbone générées par tout le processus d'approvisionnement, de production et de livraison du produit, en prenant en considération les émissions générées par la production mais aussi les émissions de carbone générées par les longues distances parcourues par le produit pour être mis sur le marché (Gemechu et al., 2012 ; Choi, 2013). Toutefois, aucune taxe sur l'empreinte carbone n'a été mise en place jusqu'à nos jours. Certes, la mise en place d'une telle directive nécessite une infrastructure administrative développée et une coopération accrue entre les pays développés et les pays en voie de développement (Kosoy et al., 2015). Néanmoins, une telle coopération entre les pays pourrait entraîner la croissance d'une économie mondiale sobre en carbone, en assistant les pays en voie de développement, dont certains pourraient ne pas disposer des ressources nécessaires pour moderniser leur économie. On estime que de telles coopérations sont primordiales afin de favoriser le terrain pour un système de tarification de carbone unifié et homogène à travers le monde capable de lutter contre le phénomène de fuite de carbone.

Un autre problème fondamental des mécanismes de tarification du carbone réside dans l'incertitude associée au prix du carbone et aux niveaux de réductions d'émissions qui seront obtenues grâce à ces instruments. D'une part, le prix du carbone dans un système d'échange de quotas de carbone dépend des transactions, de la loi de l'offre et de la demande du marché. D'autre part, la manière dont les taxes carbone sont annoncées et légiférées, les rend sensibles au risque de l'évolution réglementaire liée à l'évolution continue des circonstances sociales, économiques et politiques des pays. Par exemple, les taux de taxe carbone imposés peuvent être modifiés pour refléter le niveau d'avancement des réductions d'émissions, et l'offre de quotas d'émission peut être modifiée pour influencer les prix. Sous de telles limites, il faudra peut-être créer de nouvelles institutions pour limiter l'impact négatif de l'incertitude sur l'efficacité des législations de tarification du carbone. Une des initiatives pour faire face à la fluctuation et l'incertitude des prix de carbone était lancée par le système d'échange de quotas de carbone Californien, qui consiste à imposer des mesures de stabilisation des prix de carbone bien conçue, telles qu'un prix plancher et un prix plafond modéré (Kosoy et al., 2015). Néanmoins, des efforts supplémentaires doivent être entretenus dans cette direction pour limiter l'impact négatif de l'incertitude des législations de tarification de carbone sur les CLs.

Finalement, on note que la majorité des rapports récents d'analyse de l'efficacité des systèmes législatifs de tarification de carbone soulignent qu'une législation plus stricte doit être élaborée pour dépasser les limites des législations actuelles et renforcer leur efficacité à atteindre les objectifs de réduction des émissions de carbone fixées.

Nous admettons alors que la modélisation mathématique peut jouer un rôle important pour aider les législateurs à atteindre de tels objectifs. Par le biais de modélisation et de résolution des problèmes d'optimisation des CLFTC sous les contraintes législatives de carbone, et en analysant l'impact de ces législations sur les décisions des entreprises et leurs performances, les recherches en RO et MO peuvent assister les gouvernements dans l'évaluation des systèmes législatifs existants, et donc suggérer des nouvelles directives à mettre en place pour améliorer l'efficacité de ces outils. Nous discutons plus en détail de cette idée dans le paragraphe qui suit, qui présente les différentes techniques de modélisation des législations de carbone déployées pour incorporer cette contrainte dans les modèles mathématiques de GCLFTC.

### **2.1.2. Sur la modélisation des législations de carbone dans les modèles mathématiques de GCLFTC**

Dans les modèles mathématiques développés, de nombreuses techniques de modélisation ont été utilisées pour illustrer le principe des législations de carbone. La taxe carbone et la législation C&T, les deux législations les plus répandues dans le monde, sont les deux principaux types de législation de carbone étudiés dans la littérature. Dans certains articles, les auteurs modélisent la législation de carbone telle qu'elle est appliquée (Fahminia et al., 2014a; Jin et al., 2013). Ces modèles cherchent à analyser les performances environnementales et économiques des entreprises soumises à de telles législations. L'un des principaux résultats de ces modèles est également d'évaluer les performances des réglementations existantes et de fournir aux décideurs une évaluation sur l'efficacité de ces lois appliquées. Dans une autre perspective, certains auteurs étudient de nouvelles formes de législation non encore appliquées. Le but de ces travaux de recherche est de fournir aux législateurs un outil d'aide à la décision pour les aider à concevoir de nouvelles réglementations et à évaluer leur efficacité. En fait, la taxe carbone a été largement modélisée à l'aide d'un paramètre monétaire représentant le coût de la taxe par tonne d'émission de carbone (Xiong et al., 2016; Bouchery et al., 2011; Yalabik et Fairchild, 2011; Jawad et al., 2016; Tao et al., 2016; Gurtu et al., 2014; Wang et al., 2013; Liu et al., 2012; Krass et al., 2013). Néanmoins, dans de nombreux articles (Jaber et al., 2013; Zanoni et al., 2014b; et Bazan et al., 2015), les auteurs ont ajouté une contrainte supplémentaire imposée à la législation de la taxe carbone, consistant en des pénalités par paliers (selon une fonction progressive) sur les émissions dépassant les seuils d'émission autorisés. On peut supposer que ces pénalités correspondent au coût d'achat des permissions d'émission par rapport au plafond autorisé.

La majorité des articles ont développé des modèles mono-période. En dépit de la présence de quelques papiers qui ont développé des modèles multi-périodes de GCLFTC, aucun de ces papiers n'a considéré la modélisation du caractère progressif et dynamique des taxes carbone telles qu'elles sont légiférées dans la pratique.

De plus, à l'exception de Park et al. (2016), tous les travaux existants ont développé des modèles déterministes de GCLFTC sous la taxe carbone. Cependant, comme nous l'avons souligné dans le paragraphe précédent, la taxe sur les émissions de carbone demeure un paramètre incertain en raison de l'évolution des circonstances politiques, sociales et économiques.

Parallèlement, des efforts récents ont été déployés pour modéliser la législation C&T avec plus de précision. Garcia-Alvarado et Chaabane (2016) ont utilisé une équation paramétrique pour présenter cette législation de C&T, en intégrant des paramètres plus sophistiqués, comme par exemple le pourcentage minimum de réduction des émissions entre deux périodes consécutives pour pouvoir vendre des permis d'émissions.

Alors que presque tous les articles ont supposé que les prix de vente et d'achat du carbone sous un système de C&T est le même (Dong et al., 2016; Toptal et al., 2013; Xu et al., 2016; etc.), certains autres articles ont utilisé deux variables différentes pour modéliser ces deux prix et ainsi pouvoir analyser la sensibilité du problème à ces coûts aussi fluctuants (He et al., 2011; Liu et al., 2015; Rosic et Jammerneegg, 2013 et Jin et al., 2013).

De plus, certains travaux ont pris en considération l'incertitude liée au système d'échange de quotas de carbone. Ils ont alors développé des modèles stochastiques qui prennent en considération soit l'aspect incertain du prix du carbone dans un système de C&T, soit l'incertitude de la disponibilité des permissions d'émissions (Song et al., 2016; Drake et al., 2015; Reazee et al., 2015).

Il est aussi à souligner que la littérature existante a principalement utilisé la législation d'imposition de seuils d'émission de carbone comme législation de référence pour la comparer aux autres législations de tarification de carbone. Il est à mentionner que cette législation n'est pas adoptée par les gouvernements aussi souvent que les deux autres types de législation de tarification du carbone. Pour modéliser les seuils d'émissions, dans les travaux de Absi et al. (2013), différentes techniques ont été étudiées, à savoir les seuils périodiques, cumulatifs, globaux et glissants. Benjaafar et al. (2013), Tarek et al. (2011) et Fahimnia et al. (2014a) ont suggéré un seuil d'émissions pour chaque installation et un seuil global pour toute la chaîne.

Malgré son importance, le problème des fuites de carbone, a rarement été abordé à travers des modèles quantitatifs. Drake (2012) et Choi (2013) sont parmi les rares travaux qui ont initié l'étude de cette problématique en intégrant dans leurs modèles de GCLFTC une taxe carbone appliquée aux produits fabriqués localement, et une autre taxe carbone appliquée aux produits importés.

Enfin, les subventions sont le type de législation le plus négligé dans la littérature.

La figure 2.1 et le tableau 2.1 illustrent les différentes techniques de modélisation des législations de carbone dans la littérature.

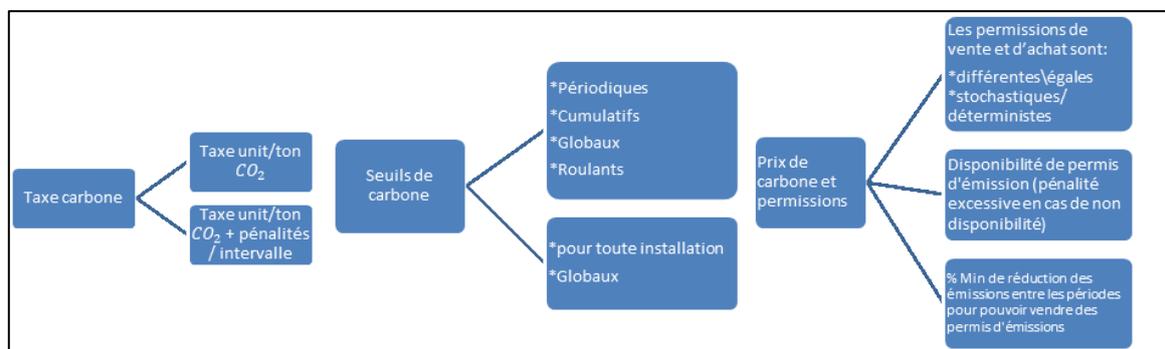


Figure 2.1. Les techniques de modélisation des législations de carbone dans la littérature

Tableau 2.1. Classification de la modélisation des législations de carbone

Législations	Nombre de papiers			
	GO	IT	CCL-C	Total
C&T	25	9	6	40
Taxe	20	11	11	42
Seuil d'émission imposé	12	3	7	22
Subventions	4	6	0	10
Modèle mono-période	20	19	18	57
Modèle multi-périodes	14	3	5	22

## 2.2. Intégration de la demande clients avec considération des émissions de carbone dans les modèles mathématiques de GCLFTC

A travers le modèle conceptuel (framework) du problème de GCLFTC, on a pu identifier la pression des clients conscients comme un facteur clé qui pousse l'entreprise à réviser ses décisions en faveur de la réduction de ses émissions de carbone. Certains modèles mathématiques développés ont alors considéré une demande endogène afin de modéliser cette pression externe exercée par les clients conscients sur les entreprises. Nous nous intéressons alors à analyser la modélisation de la demande clients dans ces modèles pour souligner leurs apports et leurs limites à étudier l'impact de la sensibilité des clients aux émissions de carbone sur les décisions des entreprises et leurs performances.

### 2.2.1. Vue générale sur les techniques de modélisation de la demande endogène sensible aux émissions de carbone

Il est aujourd'hui convenu et approuvé qu'ils existent certains clients dits « clients verts » qui, en adoptant un comportement d'achat responsable envers l'environnement, jouent un rôle important pour encourager et même inciter les entreprises à réduire leurs émissions de carbone. L'enquête de la Commission européenne (2013) a révélé que quatre consommateurs sur dix (40,7%) affirmaient que les performances environnementales des biens ou des services avaient une influence sur leurs décisions d'achat (Zanoni et al., 2014b). Le nombre de ces clients verts augmente au fil du temps, avec l'avancée des recherches sur le développement durable et le progrès des efforts associatifs et éducatifs de sensibilisation des individus aux effets des émissions de GES sur l'environnement (Luchs et al. 2010; Thøgersen et al. 2012). Par conséquent, cette sensibilité accrue à la qualité environnementale des produits et tout particulièrement aux émissions de carbone générées à travers les processus d'approvisionnement, de production et de distribution, pousse les entreprises à donner plus d'importance à l'empreinte carbone de leurs produits en optimisant leurs décisions de gestion de CL en faveur d'une GCLFTC (Xiong et al., 2016). Une telle stratégie permet aux entreprises de se différencier, d'améliorer leur image de marque et de créer des avantages concurrentiels. Dans une telle perspective, ils réussissent à gagner de nouvelles parts de marché et à booster leur rentabilité tout en satisfaisant ce segment de clients verts (Nagurney et Nagurney 2010; Xiong et al., 2016). Dans cette optique, la multinationale Samsung a opté vers la labélisation « Carbon trust » qui représente l'empreinte carbone de ses smartphones lancés à partir de 2012 afin de refléter à ses clients ses valeurs de responsabilité et son

engagement pour la protection de l'environnement. Optant pour une autre stratégie de différenciation, l'entreprise suédoise du prêt à porter H&M, a lancé parallèlement à sa gamme ordinaire de produits, une nouvelle gamme « Conscious » de produits labélisés verts, conçus par des processus d'approvisionnement, de production et de livraison durables et moins émetteurs de carbone (Actions conscientes de H&M, rapport de développement durable (2010) et (2013)). Ces deux stratégies, bien qu'elles soient différentes, s'intègrent dans le même objectif de satisfaire les exigences des clients verts et permettent ainsi aux entreprises de stimuler la demande du marché et d'obtenir un avantage concurrentiel parmi leurs concurrents.

Reste à souligner que cette sensibilité des clients aux émissions de carbone des produits peut varier considérablement d'un secteur à l'autre, comme elle peut évoluer dans le temps. De plus, elle peut différer d'un groupe de consommateurs à l'autre en fonction de leur démographie, de leur âge, sexe et de leur niveau éducatif (Laroche et al., 2001 Carlson, 2005). L'émergence de ce segment de clients sensibles aux émissions de carbone, crée alors de nouveaux défis pour les entreprises et doit impérativement être pris en considération par les décideurs afin de mieux se positionner sur le marché et bien gérer ces nouvelles contraintes et opportunités.

La sensibilité des consommateurs aux émissions de carbone ne doit donc pas être négligée dans la modélisation des CLFTC (Dong et al., 2016). En analysant l'ensemble des modèles sélectionnés pour la revue de la littérature, nous constatons que plusieurs méthodes et approches de modélisation de la demande client ont été adoptées pour incorporer une demande endogène sensible aux émissions de carbone des produits. Nous discutons dans ce qui suit des hypothèses considérées et des approches utilisées pour modéliser cette demande endogène dans les modèles de GCLFTC.

#### ❖ **Corrélation entre la qualité environnementale des produits et leurs coûts de production**

La majorité des travaux ont estimé que la production des produits « verts », générant moins d'émission de carbone, est plus coûteuse que la production des produits ordinaires, principalement à cause du coût d'investissement associé (Conrad, 2005; Liu et al., 2012). Par contre, l'hypothèse inverse reste également défendable. En effet, certains travaux ont supposé que les produits verts sont moins chers à fabriquer. Yenipazarli (2015) a étudié ce problème en considérant que les produits recyclés présentent une meilleure qualité environnementale et sont bien entendu moins coûteux que les nouveaux produits. Pour défendre son hypothèse, l'auteur suppose que le recyclage permet de réduire les besoins en matériaux et en énergie pour la fabrication d'une unité de produit, et donc garantit la réduction des émissions de carbone de l'entreprise et ainsi l'empreinte carbone de ce produit. Par exemple, l'entreprise californienne de vêtements techniques éco-conçus de sports de montagne et de surf, Patagonia, indique que le fait d'utiliser des vêtements usés pour fabriquer un vêtement neuf au lieu de le produire à partir de matériaux vierges entraîne une réduction de 71% des émissions de carbone (Yenipazarli, 2015). Par rapport à une cartouche neuve composée de nouveaux plastiques, l'utilisation de plastiques recyclés pour la fabrication d'une nouvelle cartouche à jet d'encre permet de réduire l'empreinte carbone de cette cartouche de 46% (Yenipazarli, 2015).

Si certains auteurs affirment qu'un produit vert nécessite plus d'investissement et peut engendrer des coûts de maintenance plus importants pour défendre que leurs coûts de production unitaires sont plus importants, d'autres auteurs estiment que la production verte consomme moins d'énergie, moins d'heures de travail, moins de matière ce qui lui permet d'être moins coûteuse. Les avis sur ce point restent différents et on ne peut pas encore

trancher qu'un produit vert est plus coûteux qu'un produit ordinaire. Des études réelles comparatives par secteur peuvent mieux répondre à cette question.

#### ❖ **Corrélation entre la sensibilité des clients à la qualité environnementale des produits et leurs prix de vente**

Certains admettent que plus les consommateurs sont sensibles à la qualité environnementale des produits, plus ils sont prêts à payer plus cher ces produits écologiques. En effet, les consommateurs verts, conscients des menaces environnementales, cherchent à acheter des produits avec des empreintes carbone réduites, et sont ainsi prêts à les payer plus cher (Chitra, 2007; Xiong et al, 2016; Moon et al., 2002). A titre d'exemple, les prix des voitures hybrides, pour lesquelles Toyota (2007) affirme que cela a conduit à réduire les émissions de carbone de sa CL d'environ 3,5 millions de tonnes à partir de 2007, sont vendues au moins une fois et demi plus chères que leurs homologues à essence (Yakita, 2009). En 2008, 75% des Européens étaient prêts à acheter des produits verts plus chers, contre seulement 31% en 2005 (Commission européenne, 2009).

Le rapport « BBMG Conscious Consumer Report (2007) » indique que 67% des Américains pensent qu'il est important d'acheter des produits présentant des avantages pour l'environnement et que 51% affirment qu'ils sont prêts à payer plus pour les produits écologiques (Bemporad et Baranowski, 2007). On note que certains clients, bien qu'ils optent pour le choix de produits verts, ne sont pas prêts à les payer plus chers que le produit ordinaire. A titre d'exemple, les produits recyclés, qui sont considérés comme des produits verts, étant donné qu'ils émettent moins de carbone dans leurs processus de production, sont perçus par les clients comme des produits de qualité inférieure. Il est à noter que ces produits recyclés sont proposés à des prix inférieurs aux prix de nouveaux produits ordinaires. Dans son article, Yenipazarli (2015), l'auteur a supposé que le recyclage peut entraîner une baisse du prix du produit de l'ordre de 30 à 40% par rapport à un nouveau produit similaire. Il a estimé que bien que les produits recyclés présentent généralement des caractéristiques de qualité et de performance identiques ou similaires à celles des nouveaux produits, et une meilleure performance environnementale, il existe de nombreuses preuves que les consommateurs ne les considèrent pas comme des produits de substitution parfaits.

Nous soulignons donc que cette corrélation entre la sensibilité des clients à la qualité environnementale des produits et leur volonté à les payer plus chers que les produits ordinaires n'est pas encore définitivement attestée.

Dans ces conditions, la modélisation de la demande endogène dans les modèles de GCLFTC présente de vrais dilemmes et constitue une piste de recherche intéressante. Nous proposons dans ce qui suit de présenter les principales formulations développées de la fonction demande endogène.

#### ❖ **Modélisation de la fonction demande endogène dans les modèles de GCLFTC**

Dans le papier Dong et al. (2016), les auteurs ont considéré une demande client incertaine, sensible à la qualité environnementale du produit, illustrée par l'effort de réduction des émissions de l'entreprise par rapport à son niveau d'émission initial (et non sensible au prix). Le prix du produit a été considéré comme un paramètre fixe, imposé par le marché, et non comme une variable de décision. Ils ont supposé que le coût d'investissement de la technologie verte est une fonction quadratique en fonction de sa performance environnementale.

Dans Xu et al. (2016) comme dans Liu et al. (2012), les auteurs ont estimé que la qualité environnementale du produit est un facteur d'augmentation de la demande. Cette demande a

été alors modélisée par une fonction linéaire en fonction du prix et de la qualité environnementale, traduite par le niveau de réduction des émissions de carbone de l'entreprise. En supposant que les consommateurs sont disposés à payer plus chers pour des produits plus verts, le prix a été considéré comme une variable de décision liée à la qualité environnementale du produit. L'expression utilisée pour une telle modélisation de la demande est la suivante :  $D = d + \alpha.e - \beta.p$  ; où  $d$  est la demande initiale,  $\alpha$  est la sensibilité à la réduction des émissions de carbone  $e$  et  $\beta$  est la sensibilité au prix de vente  $p$ .

Dans d'autres travaux, tels que ceux de Glock et al. (2012), Yalabik et Fairchild (2011), Jiang et Chen (2016), Xiong et al. (2016) et Zheng et al. (2016), les auteurs ont supposé que la demande totale diminue linéairement avec le niveau croissant des émissions de carbone du produit. En fait, l'empreinte carbone d'un produit est un standard de caractérisation de la qualité environnementale des produits dans de nombreuses industries. Cependant, il est difficile de savoir dans quelle mesure les consommateurs observent ou prennent en compte ce critère dans leurs choix et décision d'achat. Ainsi, ces travaux ont considéré que les clients sont sensibles au niveau d'émission de carbone de l'entreprise. Plus le niveau d'émission de carbone de l'entreprise augmente, plus sa demande risque de diminuer. Admettons que les consommateurs sont aussi sensibles au prix, ces travaux ont modélisé la demande comme une fonction linéaire décroissante, illustrée par la fonction suivante :  $D = d - \alpha.o - \beta.p$  ; où  $d$  est la demande initiale,  $\alpha$  est la sensibilité au niveau d'émission  $o$  et  $\beta$  est la sensibilité au prix de vente  $p$ .

On note bien que dans ces deux cas, la demande client augmente en fonction de la réduction des émissions de carbone de l'entreprise

Le facteur de sensibilité  $\alpha$  est un paramètre du problème. Certains auteurs ont suggéré que ce facteur peut être influencé par les régulateurs par le biais de l'éducation et la sensibilisation aux questions environnementales (Xiong et al., 2016). Cependant, aucun modèle n'illustre une telle relation et corrélation entre le rôle des gouvernements et le comportement des clients. Dans Jiang et Chen (2016), les auteurs ont considéré que la sensibilité des clients au niveau d'émission de carbone de l'entreprise est un paramètre incertain et l'ont modélisé à l'aide d'une variable aléatoire. Nous pensons qu'une telle initiative est très intéressante car nous ne connaissons pas suffisamment ce facteur de sensibilité pour le modéliser dans un contexte déterministe.

Dans une autre approche, Zanoni et al. (2014b) expriment la qualité environnementale du produit en fonction du montant de l'investissement, ce qui correspond également au coût de la réduction des émissions de carbone. Ils supposent que l'investissement est une fonction exponentielle du niveau de réduction des émissions de carbone, puis illustrent la sensibilité de la demande à la qualité environnementale des produits grâce à sa sensibilité à l'investissement vert. L'équation de la demande est la suivante:  $G = \gamma.ln(I)$  et  $D = d + \alpha.G - \beta.p$ , où  $\gamma \in (0, 1)$  est un paramètre de la fonction et  $I$  est le montant de l'investissement vert.

En outre, Noura et al. (2015), en étudiant un problème de conception de CL, supposent que les consommateurs sont sensibles à l'empreinte carbone des produits achetés. Néanmoins, la détermination de l'empreinte carbone d'un produit, dans un modèle de conception de CL, où la configuration de la CL et les flux de produits ne sont pas connus à l'avance, demeure une tâche critique. Noura et al. (2015) ont estimé que la demande client diminue linéairement de  $D_{max}$  à  $D_{min}$  en fonction de l'augmentation des émissions par unité de produit dans l'intervalle  $[E_{min}, E_{max}]$ . Ils ont représenté alors la demande totale sous forme d'une fonction linéaire par morceaux en fonction de l'émission par unité du produit final (l'empreinte

carbone du produit). La figure 2.2 ci-dessous illustre la fonction demande qu'ils ont adoptée dans leur modèle de conception de CL.

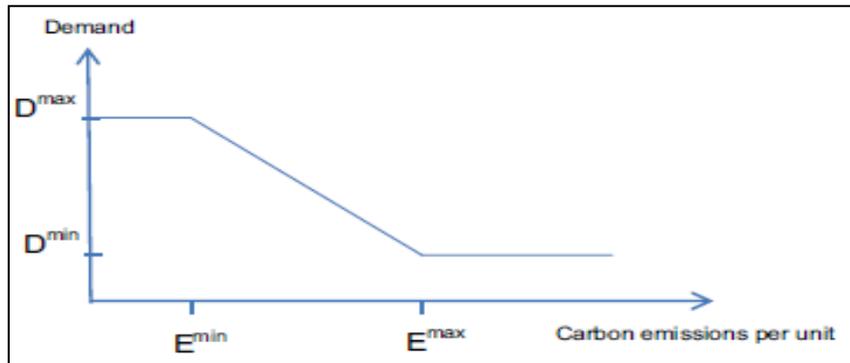


Figure 2.2. Modélisation de la demande client en fonction linéaire par morceaux en fonction de l'empreinte carbone du produit (Nouira et al., 2015)

### 2.2.2. Sur la modélisation de la demande clients dans le cadre de GCLFTC

Suite à l'analyse des techniques de modélisation de la demande endogène dans le cadre de GCLFTC, nous constatons que la modélisation de la sensibilité des clients à la qualité environnementale des produits et leur comportement d'achat demeure difficile et complexe car il n'existe pas de méthode unique ni de règle générale pour choisir les paramètres à intégrer et la manière de les intégrer dans la fonction demande du client. Nous proposons dans ce qui suit quelques statistiques qui analysent les modèles mathématiques développés de GCLFTC en termes de leur approche de modélisation de la demande client pour souligner l'hétérogénéité dans ces modèles et mettre l'accent sur les directives pour les futurs travaux.

Globalement, 77% des articles ont considéré une demande exogène alors que seulement 24% des articles étudiés ont intégré une demande endogène. De plus, 84% de ces articles intégrant une demande endogène, ont pris en compte la sensibilité de la demande au prix de vente des produits. Cependant, seulement 63% de ces travaux intégrant une demande endogène ont pris en considération la sensibilité des clients à la qualité environnementale (QE) des produits (seulement 12 articles sur 83). Nous remarquons que cette intégration de la sensibilité des clients à la qualité environnementale des produits dans les modèles mathématiques a reçu plus d'intérêt au cours de ces dernières années, et ainsi, les chercheurs en RO et MO sont de plus en plus conscients de la nécessité d'intégrer le comportement des consommateurs lors de l'étude des problèmes de GCLFTC.

En outre, nous pensons que le comportement des clients vis-à-vis de l'environnement est l'une des principales raisons de l'incertitude de la demande en raison du manque d'informations lié à ce comportement de la part des entreprises. Dans les modèles développés, 36% des articles publiés présentent des fonctions de demande stochastiques alors que 64% en considèrent des fonctions déterministes. Les tableaux 2.2, 2.3 et la figure 2.3 présentent plus de détails et de statistiques sur les techniques et approches utilisées pour la modélisation de la demande client dans les articles étudiés.

Tableau 2.2: Classification de la modélisation de la demande client en demande stochastique ou déterministe

La fonction de la demande	Nombre de papiers			
	GO	IT	CCL-C	Total
Demande stochastique	14	9	7	30
Demande déterministe	25	13	15	53

Tableau 2.3: Classification de la modélisation de la demande client en demande exogène ou endogène

La fonction de la demande	Nombre de papiers			
	GO	IT	CCL-C	Total
Demande exogène	33	11	20	64
Demande endogène	5	11	3	19

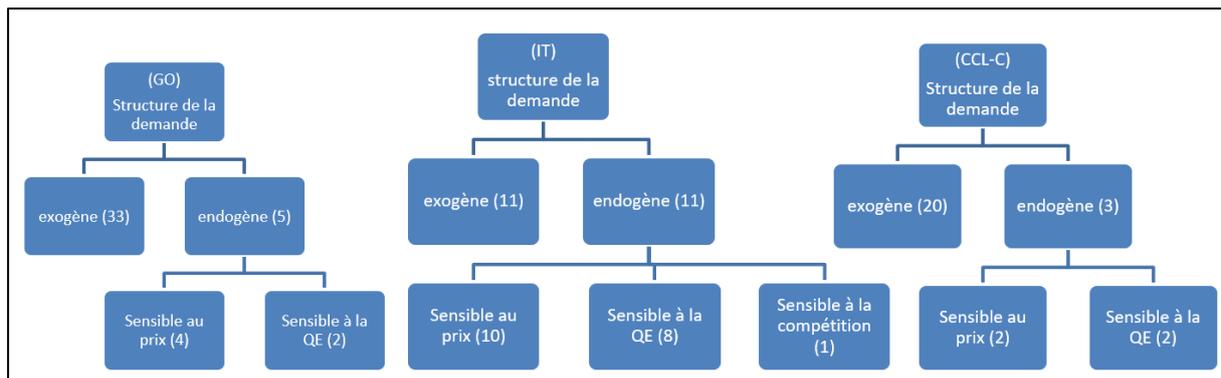


Figure 2.3. Les techniques de modélisation de la demande client

### 2.3. Intégration des différentes sources d'émission de carbone au niveau des chaînes logistiques

A travers le modèle conceptuel du problème de GCLFTC, on a déjà établi que les émissions de carbone générées par les activités de la CL peuvent se classer en trois sources d'émissions de carbone : la production, le transport et le stockage. Dans les modèles mathématiques existants, certains travaux ne considèrent qu'une ou deux de ces sources d'émission de carbone. Dans d'autres travaux, avec une vision plus intégrée, les trois sources d'émission ont été prises en considération. Nous proposons alors d'analyser les différentes techniques de modélisation des sources d'émission de carbone dans les modèles mathématiques développés. Ensuite, nous évaluons l'importance accordée à chaque source d'émission de carbone en étudiant leur fréquence de modélisation et leurs méthodes d'incorporation. Cette étude nous permet d'identifier, quelles sources d'émissions de carbone doivent être étudiées davantage dans les futurs travaux.

### **2.3.1. Techniques de modélisation des émissions de carbone générées par les activités des chaînes logistiques**

Comme convenu, nous considérons les activités de production, de transport et de stockage comme les trois principales sources d'émission de carbone à travers la CL. Il est évident que ces émissions de carbone doivent être modélisées différemment. En effet, pour chaque source d'émission de carbone, différents paramètres peuvent affecter la quantité d'émission générée par l'activité en question. Nous cherchons alors à déterminer comment ces émissions de carbone ont été modélisées et intégrées dans les modèles mathématiques. Nous énumérons ces différentes méthodes établies dans la littérature afin de fournir une liste exhaustive de référence sur les techniques de modélisation des émissions de carbone.

Certains articles ont utilisé la notion de l'empreinte carbone « carbon footprint » pour modéliser les émissions de carbone d'une CL. Cette notion, mesure la quantité de carbone générée par un produit en prenant en considération toutes les sources d'émissions de carbone de son processus d'approvisionnement, de production et de distribution (Benjaafar et al., 2013). Une telle mesure demeure difficile à calculer dans un contexte de mondialisation et de gestion de CL intégrée. Toutefois, plusieurs entreprises se sont engagées dans un tel projet de calculer l'empreinte carbone de leurs produits, dans un objectif de la communiquer à leurs clients, ou encore afin de vérifier leur conformité aux réglementations environnementales en vigueur (Benjaafar et al., 2013). Ces efforts sont soutenus par l'émergence de normes, telles que les labels de l'empreinte carbone, permettant de mesurer et d'attribuer les émissions aux produits et aux processus (Benjaafar et al., 2013). Ils sont également soutenus par la disponibilité accrue de données sur les émissions de carbone pour certains processus standards, matériaux, carburants et modes de transport, grâce aux outils de calcul disponibles et partagés. Parmi ces outils, on peut citer l'outil de calcul fourni par le GHG Protocol, les facteurs d'émission établis et communiqués par l'agence de protection environnementale des États-Unis « Environmental Protection Agency (EPA) » ou encore les systèmes de base de données partagés des offices nationaux sur les émissions standards des différents secteurs industriels. Cette technique a été exploitée dans Xin et al. (2016) et Chaabane et al. (2012) qui ont utilisé un facteur d'émission unitaire conformément aux directives du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Houghton, 1996). Cependant, nous constatons que cette technique de modélisation ne permet pas d'analyser la sensibilité des émissions de carbone, issues des différentes activités, aux décisions logistiques. Par conséquent, d'autres approches de modélisation ont été adoptées, consistant à modéliser chaque source d'émissions de carbone séparément afin de prendre en compte les différents facteurs dont elles dépendent. Dans les modèles existants, nous avons constaté que les émissions de carbone de l'activité de production dépendent principalement de la quantité produite, de l'énergie utilisée ou du temps de traitement. Les émissions de carbone liées au transport dépendent du mode de transport, de la distance parcourue, des caractéristiques du produit (volume et poids) et de la quantité transportée. Les émissions de carbone des stocks dépendent de la surface du dépôt, de la quantité stockée ou de l'énergie consommée.

En outre, nous sommes intéressés par l'analyse des différentes méthodes utilisées pour lier la quantité d'émissions de carbone d'une source donnée à ces facteurs.

Les émissions de l'activité de la production ont été principalement modélisées comme une fonction linéaire qui augmente avec les variables de décision associées, à savoir la quantité produite (Drake et al., 2015 ; Song et al., (2016) ; etc.). D'autres auteurs ont utilisé une fonction linéaire pour estimer la quantité d'émissions de carbone de la production, en la supposant proportionnelle au temps de traitement nécessaire pour produire une unité du

produit fini (Zakeri et al., 2014). Avec cette approche de modélisation, il a été supposé que les machines plus anciennes peuvent prendre plus de temps pour traiter un produit fini et produire ainsi plus d'émissions de carbone. Une autre technique, utilisée par Tarek et al. (2011), consiste à considérer que les émissions de carbone de la production sont proportionnelles à l'électricité consommée et peuvent être exprimées en tonnes / KWh d'exploitation. Dans d'autres contextes, les auteurs ont intégré un facteur d'émission fixe et ont donc utilisé la fonction affine pour modéliser les émissions de carbone de la production. Cette quantité fixe d'émissions de carbone peut être le résultat de la configuration de la machine, qui peut différer d'une technologie à l'autre. En outre, certains auteurs ont utilisé une représentation non linéaire des émissions de carbone de production, en utilisant une fonction convexe en termes de quantité produite. Plus de détails sur cette technique de modélisation sont fournis dans les travaux de Clock et al. (2012), Jaber et al. (2013) et Bazan et al. (2015). Nous notons que cette technique de modélisation a permis aux auteurs de fournir des résultats différents des modèles qui considéraient une modélisation linéaire des émissions de carbone de la production en fonction de la quantité produite.

Nous avons également trouvé diverses techniques de modélisation des émissions de carbone issues de l'activité de transport de la CL. Tarek et al. (2011) et Zakeri et al. (2014) ont supposé que les émissions de carbone du transport sont proportionnelles à la distance parcourue. Dans la même optique, Harris et al. (2011) ont utilisé une formulation basée sur la distance parcourue, développée par le Département de l'environnement, de l'alimentation et des affaires rurales (DEFRA) (2005). Lerhlaly et al. (2016) ont également supposé que les émissions de carbone du transport sont proportionnelles à la distance parcourue, mais en considérant aussi le poids du véhicule. Dans cet article, 5 scénarios pour décrire si le véhicule est bien chargé ou pas ont été considérés pour en déduire leurs consommations de carburant et ainsi leurs émissions de carbone. Hoen et al. (2014) ont utilisé la méthode NTM (Network for Transport & Environment) qui spécifie les émissions de carbone de l'activité du transport selon le mode de transport utilisé : aérien, routier, ferroviaire et maritime. Ces auteurs ont considéré un paramètre d'émission de carbone variable mais pas de paramètre d'émission fixe par voyage, car le transport est sous-traité à un fournisseur de services logistiques tiers. Ensuite, pour un type de véhicule spécifique, il existe deux étapes pour déterminer les émissions de carbone générées d'une unité transportée par ce véhicule. Tout d'abord, les émissions du véhicule avec une charge moyenne sont déterminées, puis les émissions du véhicule chargé sont attribuées à une unité du produit, en fonction du poids. Validi et al. (2014), Gurtu et al. (2014), Bazan et al. (2015) et Park et al. (2016) ont utilisé la consommation de carburant comme paramètre d'entrée pour déduire la quantité d'émission du transport. Dans Validi et al. (2014), les auteurs se sont référés aux directives du Département de l'environnement (2008) sur les facteurs de conversion des émissions de GES afin de déduire les émissions de carbone du véhicule diesel sur la base de la quantité de diesel consommée et du facteur d'émission de carbone. Les émissions de carbone du transport ont été alors exprimées en tonnes/litre de carburant brut. Dans Gurtu et al. (2014) et Bazan et al. (2015), les auteurs ont ajouté la charge de camions comme un autre facteur ayant un impact sur les émissions de carbone provenant de l'activité de transport. Rosic et al. (2013) ont utilisé un outil de calcul des émissions de carbone pour le transport appelé EcoTransIT (2010), afin d'estimer les émissions de carbone résultant de l'expédition de matières premières provenant d'un fournisseur offshore ou local utilisant différents types de véhicules et prenant en compte le poids moyen des marchandises.

Peu de travaux ont considéré les émissions de carbone résultant des stocks. Les articles qui ont modélisé les émissions de carbone de cette source ont supposé que les émissions de

carbone provenant des stocks sont proportionnelles à la quantité stockée (Benjaafar et al., 2013). Tarek et al. (2011) ont supposé que les émissions de carbone d'un entrepôt sont proportionnelles à son volume et pouvaient être exprimées en tonnes / $m^3$ . Harris et al. (2011) ont estimé la consommation annuelle moyenne d'électricité (kWh / $m^2$ ) par dépôt afin de déduire les émissions de carbone générées par le stockage. Pour convertir les données énergétiques en émissions de carbone pour un dépôt basé au Royaume-Uni, ils ont utilisé un facteur de conversion disponible sur le site du « Department for Environment Food & Rural Affairs, », DEFRA (2005) et en ont déduit les émissions unitaires de carbone générées par les produits stockés en  $kg/m^2$ .

Quant aux travaux qui ont considéré l'empreinte carbone du produit, ils ont supposé que les émissions de carbone de l'entreprise sont proportionnelles à la quantité produite, tout comme la technique utilisée pour modéliser les émissions de carbone de la production dans certains papiers.

Finalement, certains travaux se sont aussi intéressés à la modélisation du niveau de réduction des émissions de carbone des produits et de son coût associé. Ils ont ainsi considéré une relation quadratique entre les coûts fixes ou les coûts d'acquisition d'une nouvelle technologie et son aptitude à la réduction des émissions de carbone par unité de produit fini (Xu et al., 2016; Xiong et al., 2016; Jiang et al., 2012; Zaroni et al., 2014b; Jiang et Chen., 2016; Yalabick et Fairchild, 2011; Zhuo et Wei, 2016).

La figure 2.4 résume toutes les techniques de modélisation utilisées et les facteurs intégrés pour la modélisation des émissions de carbone dans les activités de CL.

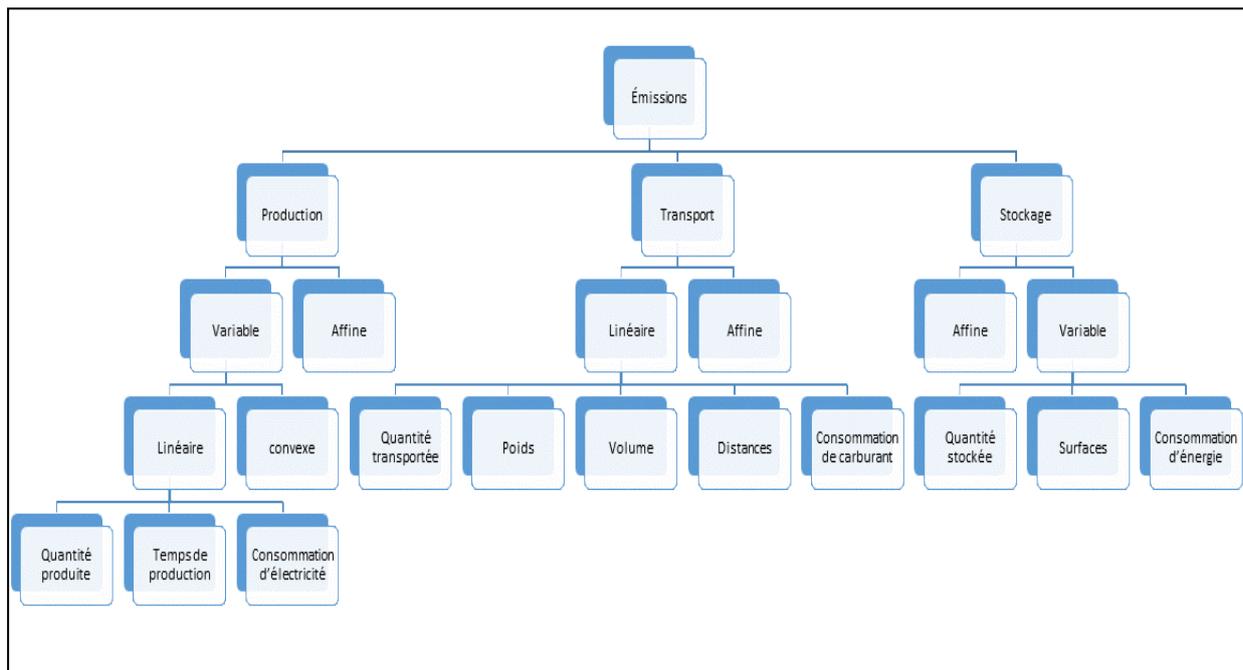


Figure 2.4. Les techniques de modélisation des sources d'émission de carbone dans la CL

### 2.3.2. Fréquence de modélisation de chaque source d'émission de carbone dans les modèles de GCLFTC

Dans cette section, nous étudions la fréquence de modélisation de chaque source d'émission de carbone au sein des modèles de GCLFTC existants. Nous analysons ainsi l'importance

accordée à chaque activité de la CL responsable des émissions de carbone dans les entreprises.

Les émissions de carbone issues de la production sont les plus étudiées dans les modèles développés. Cette source d'émission de carbone a été intégrée dans 65 articles (soit 77% des articles étudiés). Nous confondons les émissions de l'empreinte carbone et les émissions de carbone issues de la production, car les deux sont modélisés selon la même technique et supposées être proportionnelles à la quantité produite.

Les émissions de carbone des transports ont attiré moins d'attention (seulement 50% des papiers). Dans la littérature existante, seuls 3 articles ont intégré les émissions liées au transport dans les articles de la catégorie IT. En effet 86% des articles de la catégorie IT se sont concentrés sur la modélisation des émissions de production ou de l'empreinte carbone. Toutefois, certains auteurs ont souligné que les entreprises qui émettent plus de carbone par l'activité du transport que par les activités de production pourraient tirer profit plutôt de l'investissement dans les technologies vertes de transport (Bazan et al. 2015).

Le même constat peut être étendu à la catégorie GO, où 79% des papiers ont modélisé les émissions de la production, 44% des papiers ont modélisé les émissions des transports et 25% seulement des papiers étudiés ont intégré les trois sources d'émissions à la fois. Nous admettons, que les travaux intégrant les trois sources d'émission de carbone fournissent une vue plus complète de la structure des émissions de carbone d'une entreprise au sein de sa CL. En fait, lors de l'étude d'un problème de planification de la production avec considération des contraintes d'émission de carbone, non seulement les émissions de production seront affectées, mais également les émissions de transport et les émissions des stocks. Les décisions à prendre dans le cadre de ce problème affectent aussi bien la quantité à produire que les fréquences de livraisons et les niveaux des stocks.

Le tableau 2.4 et la figure 2.5 montrent la répartition des articles étudiés en fonction des sources d'émissions de carbone et des types de décisions qu'ils prennent en compte.

*Tableau 2.4. Classification de la modélisation des sources d'émission de carbone de la CL*

Sources d'émission de carbone	Nombre de papiers			
	GM	TI	SCD-C	Total
Emission du transport	17	3	22	42
Emission de la production	31	19	15	65
Emission du stockage	12	1	5	18

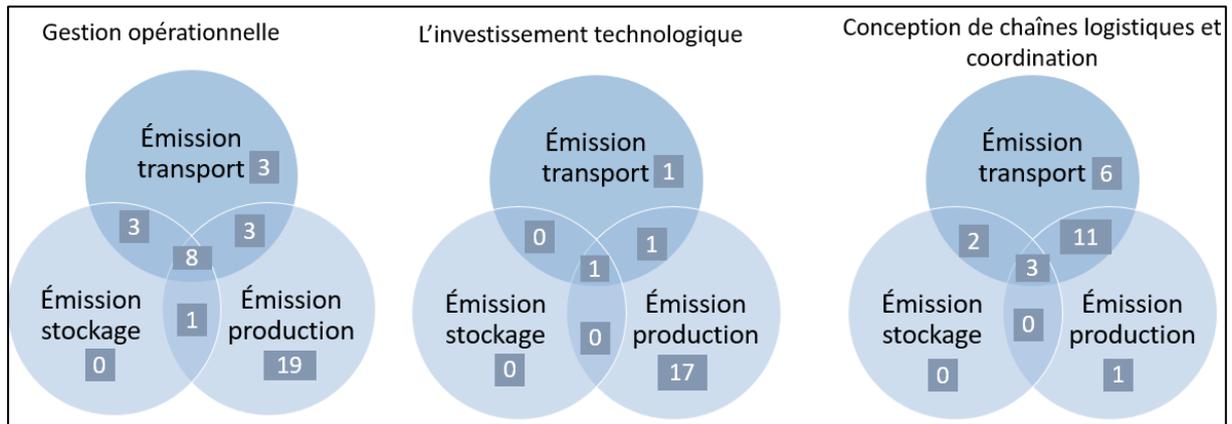


Figure 2.5. Modélisation des sources d'émission de carbone dans les trois catégories d'articles

## 2.4. Limites des modèles existants et perspectives

Dans cette section, nous discutons d'abord quelques propositions pour améliorer les modèles existants en mettant l'accent sur leurs limites en termes d'hypothèses et de simplifications des conditions réelles. Ensuite, nous suggérons quelques problématiques intéressantes à aborder dans les travaux futurs que nous estimons avoir été ignorées dans la littérature existante.

### 2.4.1. Pistes d'amélioration des modèles existants

Dans les modèles développés, de nombreux problèmes ont été simplifiés en ignorant certaines de leurs contraintes réelles. Avec l'avancée de la recherche dans cette filière de la GCLFCT, il serait intéressant d'étendre les modèles existants tout en réintégrant ces contraintes réelles qui ont été ignorées. À titre d'exemple, en étudiant le problème de choix de technologie de production, la contrainte liée au délai d'installation de nouvelles capacités a été généralement simplifiée. Cependant, une telle contrainte peut avoir une influence significative sur les décisions de planification de la production, sur la satisfaction des clients et sur les performances productives de l'entreprise en général.

En outre, nous pensons qu'une meilleure modélisation de la fonction coût de la CL, en détaillant les différents coûts (le coût de la main d'œuvre, le coût de la maintenance, le coût de l'énergie et le coût des émissions), dans les modèles de GCLFCT pourrait constituer une piste intéressante pour l'amélioration des modèles existants. En fait, la majorité des travaux existants ont considéré qu'en produisant avec des technologies plus propres, ou vertes, le coût de revient des produits augmente (Drake et al., 2015). Cependant, ces technologies propres, permettent la réduction de la consommation d'énergie, ce qui peut entraîner une réduction des coûts opérationnels, de production et d'émission. Peut-on alors admettre que le coût de revient d'un produit diminue en optant pour des technologies vertes moins consommatrices d'énergie et moins émettrices de carbone ? Nous soulignons alors qu'une modélisation détaillée de la fonction coût de l'entreprise, pourra donner des éléments de réponses à de telles questions qui ne sont pas encore résolues dans la littérature.

Dans une autre perspective, nous notons que la modélisation des facteurs clés du problème de GCLFCT, à savoir les pressions externes et les émissions de carbone, présente certaines limites qui doivent être abordées dans les modèles futurs. Toutefois, les améliorations des modèles existants pourraient déboucher sur de nouveaux modèles plus sophistiqués, ce qui nécessitera des efforts supplémentaires pour développer les solutions adéquates.

Dans ce qui suit, nous discutons des limites identifiées dans la modélisation de la législation de carbone, de la demande endogène et des émissions de carbone de la CL. Nous proposons ainsi des idées sur la manière d'améliorer l'incorporation de ces facteurs clés de la GCLFTC dans des modèles mathématiques.

❖ Modélisation de la législation de carbone :

Nous pensons que les travaux existants contiennent de nombreuses simplifications au niveau de la modélisation de la législation de carbone.

Premièrement, de nombreux travaux ont ignoré l'incertitude de la législation, qui constitue un aspect crucial du problème de GCLFTC. Les quelques travaux qui ont développé des modèles stochastiques de GCLFTC sous la législation de C&T, ont considéré soit des prix de carbone incertains, soit l'incertitude sur la disponibilité des permissions d'émission. Toutefois, nous pensons que l'étude de l'effet combiné de telles incertitudes du système du marché de carbone sur les décisions prises par les entreprises peut être plus éclairante dans les travaux futurs. Mais en général, la législation de taxe carbone est considérée comme un système de tarification de carbone plus sûre et fiable, en termes de certitude du prix de carbone, en le comparant au système C&T qui obéit aux fluctuations de la loi de l'offre et de la demande. Nous avons pourtant souligné à travers les exemples de certaines taxes carbone appliquées à travers le monde, que cet outil législatif demeure incertain sur le long terme vu sa sensibilité aux évolutions des circonstances politiques, sociales et économiques. L'étude de l'impact de l'incertitude de la taxe carbone sur les décisions des CL reste donc une perspective intéressante. Dans ce contexte, plus de modèles stochastiques doivent être développés pour prendre en compte les différentes sources d'incertitude des outils législatifs.

Deuxièmement, le caractère dynamique de la législation de carbone doit être mis en relief dans les travaux futurs. L'élaboration de modèles multi-périodes de conception de CL à faible teneur en carbone est une autre piste prometteuse.

Troisièmement, il est recommandé de développer des modèles mathématiques d'investigation pour aider les décideurs politiques à tester et à concevoir de nouvelles législations de carbone capable de résoudre et de faire face au problème de fuite de carbone, à savoir les législations « d'ajustement à la frontière » (Drake, 2015). En effet, ce problème de fuite de carbone doit être étudié davantage, étant donné qu'il a été identifié dans les rapports et analyses récemment publiés comme un problème potentiel qui contraindre l'efficacité de la législation actuelle de tarification de carbone.

Enfin, étant donné les limites des réglementations de tarification du carbone, notamment le problème de fuite de carbone et les problèmes d'incertitude, les subventions peuvent constituer une bonne alternative afin de résoudre ces problèmes. Nous admettons alors que les travaux futurs pourraient se poursuivre dans cette direction, en étudiant le problème de GCLFTC intégrant non seulement des législations de tarification de carbone, mais aussi différentes formes de subvention.

De telles améliorations dans la modélisation des législations de carbone pourraient fournir aux responsables et aux législateurs une analyse plus réaliste et objective de ces outils législatifs afin de contribuer à l'amélioration de leur efficacité en matière de réduction des émissions de carbone.

❖ Modélisation de la demande endogène

L'incorporation du comportement environnemental des clients dans les modèles mathématiques de GCLV demeure un nouveau domaine de recherche. À notre connaissance,

les chercheurs n'ont pas encore établi clairement comment la sensibilisation des clients à l'environnement, en particulier en ce qui concerne les émissions de carbone, pourrait avoir une incidence sur la demande. Il s'agit d'un sujet de recherche difficile car le résultat dépendrait du type de produits, du secteur, du niveau de conscience des clients, de leur sexe ou âge, etc. Il est alors essentiel de mener des recherches empiriques avancées sur l'étude et la caractérisation de la demande client sensible aux produits verts pour mieux identifier et clarifier la relation entre les produits à faibles émissions de carbone, leurs coûts de production, la sensibilité des clients aux émissions de carbone des produits et leur volonté de les payer plus chers. En absence de définition claire de ces relations, la modélisation quantitative doit continuer à creuser dans toutes les directions.

D'autres formes d'équations liant la demande à la qualité environnementale des produits, telles que les fonctions exponentielles, peuvent s'avérer aussi intéressantes que les équations linéaires largement utilisées (Nouira et al., 2016). Cependant, les chercheurs doivent explorer davantage cette direction pour trouver des solutions aux modèles non linéaires obtenus.

Finalement, il est à noter que le comportement des clients vis-à-vis de l'environnement est l'une des principales raisons de l'incertitude de la demande surtout à cause du manque d'informations liées à ce comportement. Bien que la plupart des articles aient considéré que la sensibilité des consommateurs aux émissions de carbone représente un paramètre déterministe et fixe du problème, nous pensons qu'il est loin d'être connu. Ainsi, les techniques de modélisation non déterministes sont plus appropriées et constituent une perspective intéressante.

#### ❖ Modélisation des émissions de carbone

A travers la revue de la littérature, nous avons réussi à recenser les différentes approches de modélisation des émissions de carbone de la CL qui ont été adoptées. Nous avons ainsi souligné la diversité de ces approches et mis en évidence la complexité de la simplification de tels paramètres pertinents pour développer des modèles de GCLFTC fiables et performants.

Dans un premier lieu, nous trouvons utile que les recherches futures développent des modèles de comparaison, en utilisant plusieurs techniques pour modéliser la même source d'émissions de carbone au sein de la CL, afin de déterminer l'effet de la modélisation des émissions sur les résultats des modèles et de déterminer quelle technique est la plus appropriée.

Ensuite, on peut conclure à travers nos résultats, que la plupart des travaux ont étudié le problème de gestion de la production en tant que principale décision logistique visant la réduction des émissions de carbone de la CL, par le biais d'ajustements opérationnels ou d'investissements dans des nouvelles technologies de production. Néanmoins, les émissions des transports sont devenues responsables d'une part substantielle des émissions totales de carbone de la CL et d'une part encore plus importante de l'augmentation attendue des émissions de carbone dans l'atmosphère (Hoen et al., 2014). Ces résultats mettent en relief l'importance de prendre en compte les émissions de carbone de l'activité du transport lors de l'étude du problème de GCLFTC.

Puis, une analyse approfondie sur les sources d'émission de carbone de chaque CL, considérant les parts d'émission de chaque activité de production, de transport et de stockage, et l'intégration de ces paramètres dans les modèles mathématiques de GCLFTC reste intéressante. En particulier, nous suggérons pour les futurs travaux de développer plus de modèles de CL intégrées en considérant simultanément et d'une façon explicite les trois sources d'émission de carbone de la CL pour couvrir toutes les émissions du réseau. Une telle

approche de modélisation des émissions de carbone de la CL peut aider les entreprises à faire le meilleur choix pour investir dans les technologies appropriées de production, de transport ou de stockage et atteindre l'optimum de réduction de ses émissions de carbone.

Nous sommes persuadés qu'une meilleure modélisation et intégration des émissions de carbone de la CL dans les modèles mathématiques de GCLFTC peut aboutir à des modèles plus fiables, plus précis et plus proches des problèmes de la vie réelle, et ainsi demeure indispensable pour garantir la qualité et l'efficacité des résultats de ces outils d'aide à la décision.

#### **2.4.2. Futurs orientations du problème de GCLFTC**

Au-delà des limites identifiées précédemment, dans cette section, nous soulignons certains problèmes qui doivent susciter plus d'intérêt dans les futurs travaux de GCLFTC.

##### **❖ Etudier le problème de recyclage pour la réduction des émissions de carbone**

Bien que le problème de recyclage ait reçu une grande importance par rapport à d'autres domaines de recherche du problème de la GCLV, il n'a pas été suffisamment étudié du point de vue de la GCLFTC. Il sera alors intéressant d'étudier la gestion de CL en boucle fermée et son impact sur la réduction des émissions de carbone. Le seul papier qui a abordé cette problématique dans la littérature, a considéré que le recyclage demeure une option pour réduire les émissions de carbone et les coûts de production de l'entreprise en raison d'une réduction de la consommation des matériaux et d'énergie. Toutefois, ni les émissions de carbone résultant de la collecte des produits usagés, ni leurs coûts associés n'ont été pris en compte. Puis, en étudiant le problème de recyclage avec considération des émissions de carbone, il est intéressant d'analyser la perception du consommateur à l'égard de ces produits recyclés en se basant sur des études de marché récentes. Finalement, dans ces modèles, il serait intéressant de considérer non seulement les législations de carbone en vigueur, mais également les législations relatives au recyclage, pour donner une vue complète de l'outil législatif environnemental.

##### **❖ Intégrer plus de décisions stratégiques de conception de CL**

Les décisions GO et IT ont reçu le plus d'attention, les travaux futurs doivent aborder les décisions de conception de CL, telles que la décision de sélection des fournisseurs, le choix du mode de transport, la localisation des installations, etc. En fait, l'étude de ces décisions stratégiques se trouvent de plus en plus intéressantes et nécessaires vu le contexte de mondialisation et d'internationalisation des entreprises d'aujourd'hui. Désormais, la conception de CL intégrée à faible teneur en carbone doit être développée dans les futurs travaux afin d'aider les entreprises à mieux gérer et optimiser leur stratégie de réduction des émissions de carbone tout au long de leur CL et produire des produits finis différenciés avec des empreintes carbone réduites.

##### **❖ Etudier les décisions de prix en considérant différentes structures de marché et en intégrant la pression de la concurrence**

La majorité des travaux de recherche existants ont considéré que le prix de vente n'est qu'un paramètre du marché et une donnée d'entrée dans les modèles mathématiques de GCLFTC. Toutefois, en fonction du secteur industriel et de la taille des entreprises, d'autres structures de marché, telles que les environnements de marché monopoliste, duopolistique ou oligopolistique, doivent être explorés.

Le prix du produit peut être un outil puissant pour que les entreprises obtiennent un avantage concurrentiel pour leurs clients. Compte tenu des contraintes législatives d'émission de carbone qui augmenteront les coûts de l'entreprise, la décision du prix de vente peut constituer une solution potentielle pour répercuter l'augmentation des coûts sur les clients. Les futurs travaux peuvent déterminer dans quelle mesure cette pratique peut être efficace.

En outre, les entreprises font face aujourd'hui plus que jamais à une concurrence féroce qui les pousse à intégrer la GCLFTC dans leurs stratégies concurrentielles. Il serait donc intéressant d'étudier des systèmes de CL à plusieurs fabricants qui sont en concurrence sur les prix et la qualité environnementale de leurs produits. Cette extension de la CL permettra d'analyser l'impact des stratégies de réduction des émissions de carbone et les décisions de prix d'une entreprise donnée sur le comportement de ses concurrents sur le marché dans un contexte environnemental de plus en plus strict et concurrentiel.

#### ❖ **Intégrer la composante du management du risque dans les modèles de GCLFTC**

La gestion des risques environnementaux a été négligée dans la littérature de GCLFTC, ce qui représente une direction prometteuse pour les futures recherches. Les modèles à développer peuvent prendre en compte non seulement le problème de maximisation des bénéfices ou de réduction des émissions de carbone, mais également la stabilité des revenus ainsi que la gestion des risques et des catastrophes. Enfin, l'intégration de l'incertitude dans les taux d'émission de différentes sources d'émission de carbone, notamment les modes de transport ou les systèmes de production peut également constituer une perspective de recherche intéressante.

### **Conclusion**

A l'issue de ces deux premiers chapitres, nous avons d'une part présenté la problématique générale de nos travaux de recherche, à savoir la gestion de chaîne logistique à faible teneur en carbone et nous l'avons positionné par rapport aux recherches dans le domaine de gestion de chaîne logistique verte. D'autre part, nous avons mené une analyse approfondie de la littérature existante de la modélisation de CLFTC. Ceci nous a permis de mettre l'accent sur les facteurs pertinents de cette problématique de caractériser l'avancée des recherches dans cette filière et ainsi identifier les besoins pour les travaux de recherche futurs.

De nombreuses perspectives pour les travaux futurs ont été identifiées, soulignant l'importance de cette filière de recherche, qui continuera d'attirer plus d'attention auprès des chercheurs académiques en dépit de la maturité qu'elle a acquise au cours de la dernière décennie.

A travers les résultats de la revue de la littérature, nous avons choisi de traiter, dans nos travaux de recherche, le problème de **conception de chaîne logistique à faible teneur en carbone (CCLFTC) sous la législation de la taxe carbone** en proposant une meilleure modélisation de cette réglementation environnementale.

Dans le chapitre 3, nous étudions le problème de la non-homogénéité des taxes carbone entre les pays et nous mettons ainsi l'accent sur le problème de fuite de carbone à travers la modélisation et la résolution d'un problème de localisation et de choix de technologie de production.

Dans le chapitre 4, nous analysons le caractère dynamique des taxes carbone et son impact sur les décisions stratégiques des entreprises en étudiant en particulier la décision de choix de technologie de production sous une taxe carbone progressive.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous abordons le problème d'incertitude de CCLFTC sous la taxe carbone, en considérant dans un premier temps l'incertitude de la demande client, puis dans une seconde étape, l'incertitude de la taxe carbone.

**Chapitre III : Analyse de l'impact  
de la non homogénéité des taxes  
carbone sur les décisions  
stratégiques des chaînes logistiques  
et leurs performances**

## Introduction

Face à la taxe carbone, les entreprises peuvent opter pour la modernisation de leurs unités de production en installant des technologies plus propres et moins émettrices de carbone afin de minimiser leurs coûts d'émission. Toutefois, si cette décision s'avère coûteuse, l'entreprise peut avoir recours à la décision de délocalisation des unités de production dans des régions non soumises à la taxe carbone et échapper ainsi aux coûts des émissions de carbone. Dans ce cas, la décision de délocalisation peut engendrer l'augmentation des émissions de carbone de la CL, un problème connu sous le nom de « fuites de carbone ». Nous proposons dans ce chapitre, de caractériser les conditions sous lesquelles, les taxes carbone non homogènes entre les pays, encouragent les entreprises à se localiser en offshore provoquant ainsi les fuites de carbone. En d'autres termes, étant donné les taxes carbone non homogènes, nous étudions sous quelles valeurs de ces taxes et pour quelles performances des technologies de production, les entreprises choisissent la solution de la délocalisation. Puis, dans une perspective de faire face à cette problématique, nous testons deux outils législatifs complémentaires à la taxe carbone, à savoir les subventions locales vertes et les taxes carbone de frontière afin de booster l'efficacité des réglementations existantes pour réduire les émissions des CLs. L'objectif est d'analyser l'apport et les limites de telles mesures pour faire face à ce problème de fuite de carbone.

### 3.1. Définition du problème et hypothèses

Nous considérons le cas d'une entreprise qui veut ouvrir une nouvelle unité de production pour se lancer dans la fabrication d'une famille de produits finis. Nous supposons que sa capacité initiale de production est nulle. Le prix de vente du produit est fixé par le marché. Nous estimons que la demande, suite à des études de prévisions de vente, est connue. Elle sera ainsi considérée déterministe, constante et exogène.

Cette entreprise peut installer sa nouvelle unité de production en domestique, et ainsi elle sera soumise à la taxe carbone en vigueur. Cette taxe est fixée et communiquée par le gouvernement et s'applique à chaque tonne de carbone émise localement par l'entreprise. Elle peut aussi décider d'installer son unité de production en offshore, dans un pays où la taxe carbone n'est pas appliquée, et elle échappe ainsi à la taxe carbone domestique. En raison de coûts d'installation moins élevés, l'ouverture d'un site de production en offshore coûte moins chère que son ouverture en domestique.

En outre, cette entreprise peut choisir entre deux technologies disponibles sur le marché dont la capacité de production de chacune est suffisamment grande pour permettre à l'entreprise de satisfaire sa demande client. L'une de ces deux technologies est moins émettrice de carbone et plus chère que l'autre quel que soit son lieu d'installation. On désigne cette technologie par la technologie verte ou green. Néanmoins, nous admettons que le coût d'installation d'une technologie donnée en domestique est moins important que son coût d'installation en offshore. Dans leur revue de la littérature, Hammami et al. (2008), ont recommandé de prendre en compte le coût des transferts technologiques, le coût de transport des technologies en offshore ainsi que les coûts de formation qui font que le coût d'installation des technologies en offshore peut être plus important que leur coût d'installation en domestique.

Quant au coût unitaire de production, il est considéré identique pour les deux technologies utilisées pour une même localisation. Pour émettre une telle hypothèse, nous nous sommes basés sur les résultats de l'analyse de la littérature existante de GCLFTC, qui n'a pas tranché définitivement sur la comparaison entre le coût de production avec une technologie verte et le

coût de production avec une technologie ordinaire (Chelly et al., 2018). Toutefois, il est convenu que le coût de production en offshore reste moins élevé qu'en domestique quelle que soit la technologie utilisée, ordinaire ou verte, grâce aux coûts réduits de la MO et de l'énergie.

Nous faisons abstraction de la décision de choix du mode de transport. En effet, compte tenu de la localisation offshore choisie, le moyen de transport à envisager s'avère le transport maritime. En domestique, le transport des produits finis aux clients est à la charge des clients eux-mêmes, ainsi nous ne considérons ni les émissions de carbone ni les coûts d'émission liés aux transports des produits finis aux clients en domestique. Seules les émissions de carbone issues de la production en domestique sont taxées.

Ces hypothèses peuvent bien s'appliquer sur le cas d'une entreprise Française qui peut considérer l'option de s'installer en Tunisie, pour échapper à cette taxe carbone appliquée en France. Ou encore le cas d'une entreprise Canadienne, qui peut envisager de s'installer au Maroc pour échapper à la taxe carbone qui vient récemment d'être mise en œuvre au Canada.

Cette entreprise cherche alors à déterminer les décisions stratégiques optimales de localisation de son site de production et de choix de technologie, compte tenu des différents coûts opérationnels et fixes qui caractérisent les choix dont elle dispose, mais aussi en considérant le cadre législatif particulier de la taxe carbone, qui impose une taxe carbone sur les émissions de carbone domestiques alors qu'en offshore aucune taxe carbone n'est appliquée.

Résumant alors les hypothèses de notre problème de localisation et de choix de technologie de production sous une taxe carbone domestique et en absence de taxe carbone offshore :

- Une localisation du site de production est notée  $l$  avec  $l = o$  pour la localisation offshore et  $l = d$  pour la localisation domestique ;
  - ✓ Le coût d'ouverture du site de production en offshore est moins important,  $L_o \leq L_d$  ;
- Une technologie de production est notée  $f$  avec  $f = 1$  pour la technologie ordinaire et  $f = 2$  pour la technologie verte;
  - ✓ Le coût d'installation d'une technologie  $f$  donnée en domestique est moins important que son coût d'installation en offshore  $K_{df} < K_{of} \forall f = \{1,2\}$ .
  - ✓ Le coût d'installation de la technologie verte est plus important que celui de la technologie ordinaire quelle que soit son lieu d'installation  $K_{l2} = \gamma * K_{l1}$  avec  $\gamma \geq 1 \forall l = \{d, o\}$  ;
  - ✓ L'émission unitaire, exprimée en Kg de carbone/unité de produit fini, de la technologie verte est moins élevée que celle de la technologie ordinaire  $e_2 = \beta * e_1$  avec  $\beta \in [0; 1]$
- ✓ Le coût de production unitaire de la technologie verte et celui de la technologie ordinaire sont considérés égaux dans une même localisation,  $C_{d1} = C_{d2} = C_d$  et  $C_{o1} = C_{o2} = C_o$
- ✓ Le coût de production unitaire en offshore est moins important qu'en domestique quelle que soit la technologie,  $C_d > C_o$ .

Dans ce qui suit, on cherche à modéliser et à résoudre ce problème de conception de Chaîne Logistique (CCL) sous des taxes carbone non homogènes afin d'assister cette entreprise dans sa prise de décision optimale.

### 3.2. Présentation du modèle MDL1 : CCL sous une taxe carbone domestique et sans taxe carbone offshore

Dans cette partie, on traduit le problème décrit ci-dessus en un modèle mathématique de localisation et de choix de technologie de production sous la législation de taxe carbone domestique. Nous développons un modèle mono-objectif de maximisation de profit. Nous présentons dans ce qui suit, les paramètres, les variables de décisions, les contraintes ainsi que la fonction objectif de ce modèle.

Au-delà des paramètres  $L_l$ ,  $K_{lf}$ ,  $C_{lf}$ ,  $e_f$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  définis avant, nous introduisons les paramètres ci-dessous :

- **Paramètres**

$B$ : Un nombre très grand

$\tau$ : Émission unitaire de carbone issue lors du transport d'une unité de produit fini du site de production offshore au client ;

$CT$ : Coût unitaire de transport d'une unité de produit fini du site de production offshore au client ;

$P$ : Prix de vente unitaire fixe et connu ;

$D$ : Demande exogène et déterministe ;

$Q_d$  : Taxe carbone domestique exprimée en unité monétaire par tonne de carbone ( $\$/\text{tonne } CO_2$ ) ;

- **Variables de décisions**

$y_l$ : Variable binaire qui est égale à 1 si le site est ouvert dans la localisation  $l$  et 0 sinon;

$z_{lf}$ : Variable binaire qui est égale à 1 si la technologie de production  $f$  est installée dans le site localisé en  $l$  et 0 sinon ;

$x_{lf}$ : Quantité de produit fini à fabriquer sur la technologie  $f$  dans le site localisé en  $l$ ;

- **Fonction objectif**

Compte tenu des différents paramètres et coûts du problème, le profit de l'entreprise noté  $\pi$  s'exprime comme suit :

$\pi =$   
*revenue – coût fixe d'ouverture du site de production –*  
*coût fixe d'installation de la technologie de production –*  
*coût variable de la production – coût de transport – coût d'émission*

La fonction objectif de maximisation de profit s'écrit alors comme suit :

$$\max \pi = \max \left\{ \sum_{l \in \{d,o\}} \sum_{f \in \{1,2\}} x_{lf} \cdot (P - C_{lf}) - \left( \sum_{l \in \{d,o\}} L_l \cdot y_l + \sum_{l \in \{d,o\}} \sum_{f \in \{1,2\}} K_{lf} \cdot z_{lf} + \sum_{f \in \{1,2\}} CT \cdot x_{of} + \sum_{f \in \{1,2\}} e_f \cdot x_{df} \cdot Q_d \right) \right\} \quad (3.1)$$

• **Contraintes du modèle**

$$\sum_{l \in \{d, o\}} \sum_{f \in \{1, 2\}} x_{lf} \leq D \quad (3.2)$$

$$x_{lf} \leq B * \sum_{l \in \{d, o\}} z_{lf} \quad \forall l \in \{d, o\} \quad \forall f \in \{1, 2\}; \quad (3.3)$$

$$z_{lf} \leq y_l \quad \forall l \in \{d, o\} \quad \forall f \in \{1, 2\}; \quad (3.4)$$

$$x_{lf} \geq 0 \quad (3.5)$$

$$y_l \in \{0; 1\} \quad (3.6)$$

$$z_{lf} \in \{0; 1\} \quad (3.7)$$

Dans un contexte de maximisation de profit, ou la surproduction n'est pas pénalisée, la contrainte (3.2) garantit que la quantité totale du produit fini fabriquée par toutes les technologies installées dans tous les sites de production ouverts ne dépasse pas la demande. La contrainte (3.3) vérifie que chaque machine ne peut être utilisée que si elle est installée. La contrainte (3.4) garantit qu'une machine ne peut être installée que dans un site ouvert. Finalement, les contraintes (3.5), (3.6) et (3.7) sont des contraintes de non négativité et des contraintes binaires.

### 3.3. Résolution du modèle *MDLI*

Dans cette partie on commence par résoudre analytiquement le modèle *MDLI* pour comprendre le comportement des entreprises face aux taxes carbone non homogènes et mettre l'accent sur les conséquences de cette non homogénéité sur les performances des CLs. Ensuite à travers des expérimentations numériques, on étudie les décisions stratégiques de l'entreprise et leurs sensibilités aux paramètres du problème, notamment à la taxe carbone et aux performances des technologies vertes disponibles, ce qui nous permet de dégager quelques recommandations aussi bien pour le gouvernement que pour l'entreprise.

Dans cette partie, nous introduisons différentes notations qu'on résume dans le tableau 3.1 suivant, et qu'on explique ultérieurement lors de la résolution du modèle *MDLI*.

Tableau 3.1. Tableau des notations pour la résolution du modèle *MDLI*

Notations	Significations
$M$	Différence entre les coûts opérationnels de la localisation offshore et domestique
$W$	Somme des différences entre les coûts fixes et opérationnels de l'installation et l'utilisation de la technologie ordinaire entre la localisation offshore et domestique
$Q_{d-vert}$	Taxe carbone domestique minimale qui incite à l'investissement vert
$Q_{d(o1 \setminus d1)}$	Taxe carbone domestique minimale qui favorise la stratégie « o1 » sur « d1 »
$Q_{d(o1 \setminus d2)}$	Taxe carbone domestique minimale qui favorise la stratégie « o1 » sur « d2 »

#### 3.3.1. Résolution analytique du modèle *MDLI*

L'entreprise cherche à déterminer la décision optimale qui représente la stratégie de localisation et d'investissement lui permettant de maximiser son profit. Toute stratégie sera désignée par «  $lf$  » avec :

- $l = d$  si le site est en domestique et  $l = o$  si le site est en offshore ;

- $f = 1$  si la technologie ordinaire est installée et  $f = 2$  si la technologie green est installée ;

Nous désignons par les coûts fixes, les coûts d'ouverture de site et d'installation de technologies de production. Nous appelons coûts opérationnels, les coûts variables autres que les coûts liés aux émissions de carbone, notamment les coûts de production et de transport. Notons qu'en absence de taxe carbone en offshore, il ne sera jamais rentable pour l'entreprise d'installer la technologie verte en offshore, ainsi la stratégie « o2 » ne sera pas considérée dans ce cas. Nous cherchons à déterminer les conditions, particulièrement en termes de valeurs de taxe carbone domestique, sous lesquelles chaque stratégie de localisation et d'investissement s'avère optimale.

**Proposition 3.1 : La stratégie « o1 » s'avère optimale pour l'entreprise quelle que soit la valeur de taxe carbone domestique ( $\forall Q_d \geq 0$ ) lorsque la somme des coûts fixes et opérationnels de la technologie ordinaire en offshore est moins importante qu'en domestique, autrement dit quand  $W \leq 0$  avec  $W = (L_o - L_d) + (K_{o1} - K_{d1}) + M$  et  $M = D[(C_{o1} + C_T) - C_{d1}] = D[(C_o + C_T) - C_d]$ .**

*Preuve :*

En effet, en absence de taxe carbone (domestique et offshore), il sera toujours plus rentable d'installer la technologie ordinaire. Toutefois, pour déterminer la localisation optimale de cette technologie, il suffit de comparer les sommes des coûts opérationnels (de production et de transport) et fixes (d'ouverture de site et d'installation de technologie) des deux localisations. Nous désignons par  $M$ , la différences de coûts opérationnels entre l'offshore et le domestique, telle que  $M = D[(C_{o1} + C_T) - C_{d1}] = D[(C_o + C_T) - C_d]$ . Ensuite, nous désignons par  $W$ , la somme des différences des coûts opérationnels et fixes entre les deux localisations offshore et domestique, telle que  $W = (L_o - L_d) + (K_{o1} - K_{d1}) + M$ . En absence de taxe carbone (domestique et offshore), comme il n'y aura pas de coût d'émission, le signe de cette entité  $W$  détermine la stratégie optimale. Il est évident que si  $W \leq 0$ , la stratégie d'installation de technologie ordinaire en offshore « o1 » est la stratégie la plus rentable. Par conséquent, dans ce cas (pour  $W \leq 0$ ), quelle que soit la taxe carbone domestique imposée, la stratégie optimale sera à fortiori toujours de s'installer en offshore avec la technologie ordinaire. ■

Dans l'énoncé de la proposition 3.1, on précise que la somme des coûts opérationnels et fixes de la technologie ordinaire en offshore est moins importante qu'en domestique ( $W \leq 0$ ). Dans ce cas, où la délocalisation est plus avantageuse en absence de taxe carbone, le gouvernement n'a pas intérêt à instaurer une taxe carbone domestique. Une telle taxe carbone ne fera qu'augmenter les coûts des entreprises installées en domestique et par conséquent favoriser davantage la délocalisation dans des pays détaxés et l'investissement dans des technologies ordinaires et non respectueuses de l'environnement.

Dans ce contexte, on peut citer le cas de nombreuses entreprises européennes du secteur de confection, tel que Benetton, Diesel, le temps de cerise, etc., qui ont installé leurs unités de production en Tunisie, depuis plusieurs années, bien avant l'instauration des législations de tarification de carbone dans les pays européens, et ce grâce aux coûts réduits fixes et opérationnels dans cette localisation offshore. Bien que le secteur textile compte parmi les secteurs les plus polluants en termes d'émission de carbone, il est évident que les outils de tarification de carbone, notamment la taxe carbone, telle qu'elle est appliquée aujourd'hui, ne favorisera pas la réduction de l'empreinte carbone d'une paire de jeans fabriquée en Tunisie puis vendue en Europe.

Il est évident, que pour garantir l'efficacité des législations de taxe carbone à réduire les émissions de carbone des CLs dans de telles conditions et surtout en absence de taxe carbone en offshore, la taxe carbone domestique doit être accouplée avec d'autres mesures législatives, telle que les subventions locales vertes ou les taxes carbone de frontières que nous étudierons par la suite.

**Proposition 3.2 : Lorsque la somme des coûts fixes et opérationnels de la technologie ordinaire de la technologie ordinaire en offshore est plus importante qu'en domestique ( $W > 0$ ) :**

- Pour  $W < \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{1-\beta}$ , nous posons  $Q_{d(o1\d1)} = \frac{W}{De_1}$ ,

pour des valeurs de taxes carbone domestiques  $Q_d \leq Q_{d(o1\d1)}$ , la stratégie « d1 » est la stratégie optimale pour l'entreprise, sinon pour des valeurs de taxes carbone domestiques  $Q_d \geq Q_{d(o1\d1)}$ , la stratégie de délocalisation « o1 » s'avère la stratégie optimale;

- Pour  $W \geq \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{1-\beta}$ , nous posons  $Q_{d-vert} = \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{De_1(1-\beta)}$  et  $Q_{d(o1\d2)} = \frac{W+K_{d1}(1-\gamma)}{De_1\beta}$ ,

pour des valeurs de taxes carbone domestiques  $Q_d$  telle que :

- ✓  $Q_d \leq Q_{d-vert}$ , la stratégie optimale pour l'entreprise est « d1 »,
- ✓  $Q_{d-vert} \leq Q_d \leq Q_{d(o1\d2)}$ , la stratégie « d2 » devient la stratégie optimale pour l'entreprise,
- ✓ et finalement, pour  $Q_d \geq Q_{d(o1\d2)}$ , la stratégie de délocalisation « o1 » devient la stratégie optimale.

*Preuve :*

En effet, dans le cas où  $W > 0$ , la somme des coûts fixes et opérationnels de la technologie ordinaire en offshore est plus importante qu'en domestique, et la meilleure stratégie est alors « d1 » en absence de taxe carbone domestique. Néanmoins quand les émissions domestiques sont taxées, l'entreprise peut optimiser ses coûts en réduisant son coût d'émission grâce à l'installation d'une technologie plus propre en domestique. Elle peut également optimiser ses coûts en échappant au coût d'émission de carbone et en choisissant d'investir en technologie ordinaire en offshore. Ensuite, pour déterminer laquelle des stratégies (l'installation de technologie verte en domestique « d2 » ou de localisation en offshore « o1 ») est meilleure que la stratégie « d1 » pour une taxe carbone domestique, on évalue les profits de l'entreprise sous chacune de ces stratégies « d2 » et « o1 » et on les compare chacune au profit de l'entreprise avec la stratégie « d1 ».

En comparant les profits des stratégies « d2 » et « d1 », c'est-à-dire en résolvant l'inégalité  $profit(d2) \geq profit(d1)$ , on détermine la valeur minimale de la taxe carbone domestique qu'on note  $Q_{d-vert}$  à partir de laquelle l'entreprise trouve plus rentable d'installer la technologie verte que d'installer la technologie ordinaire en domestique. On déduit ainsi que  $Q_{d-vert} = \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{De_1(1-\beta)}$ .

En comparant les profits des stratégies « o1 » et « d1 », c'est à dire en résolvant l'inégalité  $profit(o1) \geq profit(d1)$ , on détermine la valeur de la taxe carbone domestique notée  $Q_{d(o1\d1)}$  à partir de laquelle l'entreprise trouve plus rentable d'installer la technologie

ordinaire en offshore que de l'installer en domestique. On déduit alors que  $Q_{d(o1\backslash d1)} = \frac{W}{De_1}$ . A ce stade, afin de déterminer la stratégie optimale que l'entreprise doit adopter en fonction de la valeur de taxe carbone domestique imposée, on compare  $Q_{d-vert}$  et  $Q_{d(o1\backslash d1)}$ , et on résout ainsi l'inégalité  $\frac{W}{De_1} \leq \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{De_1(1-\beta)}$  :

- Si  $W < \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{1-\beta}$ , il s'avère que  $Q_{d-vert} > Q_{d(o1\backslash d1)}$ , la décision optimale pour l'entreprise dans ce cas s'avère la délocalisation « o1 » pour des valeurs de taxe carbone domestique supérieures à  $Q_{d(o1\backslash d1)}$ . En effet, à partir de cette valeur de taxe carbone  $Q_{d(o1\backslash d1)}$ , on atteint déjà la valeur de taxe qui favorise la localisation offshore sur la localisation domestique. Par conséquent, quel que soit la valeur de la taxe carbone domestique au-delà de cette valeur, la stratégie « o1 » reste toujours la stratégie optimale pour l'entreprise, puisqu'elle est invariante face à la taxe carbone domestique;
- Sinon, si  $\geq \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{1-\beta}$ , il s'avère alors que  $Q_{d-vert} \leq Q_{d(o1\backslash d1)}$ , la décision optimale pour des valeurs de taxe carbone domestique supérieures à  $Q_{d-vert}$  est d'installer la technologie verte en domestique. Toutefois, il est évident qu'il existe une valeur limite de taxe carbone domestique, au-delà de laquelle il ne sera plus rentable de produire en domestique même avec la technologie verte, à cause du coût excessivement élevé d'émission de carbone. Dans ce cas il sera plus rentable à l'entreprise de se localiser en offshore et d'échapper ainsi à la taxe carbone. En résolvant ainsi l'inégalité  $profit(o1) \geq profit(d2)$ , on détermine cette valeur de taxe carbone domestique limite  $Q_{d(o1\backslash d2)}$  qui pousse les entreprises à la localisation offshore, et on déduit que  $Q_{d(o1\backslash d2)} = \frac{W+K_{d1}(1-\gamma)}{De_1\beta}$ . ■

Pour certains secteurs industriels, tels que les industries lourdes, l'installation de leurs unités de production en domestique s'avère plus rentable en raison de coûts fixes et opérationnels moins importants en domestique qu'en offshore en absence de taxe carbone domestique. Toutefois, en instaurant une taxe carbone domestique, censée inciter à l'investissement local vert et pousser les entreprises à minimiser leurs émissions de carbone, ces entreprises peuvent reconsidérer la décision de localisation en offshore qui risque de devenir envisageable et plus rentable sous certaines valeurs de taxes carbone domestique. Sur le plan pratique, certaines études ont souligné le risque de délocalisation pour les sites de production de l'industrie de ciment en Europe, qui est plutôt soumise à la législation de système d'échange de quotas d'émission de carbone, et dont la compétitivité a été affectée par les coûts d'émission de carbone imposés. Bien que les coûts fixes pour installer un tel site de production en offshore s'avèrent importants, les coûts opérationnels et l'absence de coût d'émission, peuvent rentabiliser cette stratégie.

Dans le tableau 3.2 ci-dessous on récapitule les trois valeurs de taxe carbone domestiques qu'on a déterminées à partir de la résolution analytique du problème et qui déterminent les décisions optimales des entreprises en fonction des données et paramètres du problème.

Tableau 3.2. Expression des taxes carbone domestiques déterminantes pour les décisions stratégiques de l'entreprise (cas  $W \geq 0$ )

Taxes carbone limites et optimalité des décisions	Expression de la taxe carbone
Taxe carbone à partir de laquelle la délocalisation est meilleure que l'investissement ordinaire en domestique	$Q_{d(o1\backslash d1)} = \frac{W}{De_1}$
Taxe carbone qui favorise l'investissement vert par rapport à l'ordinaire en domestique	$Q_{d-vert} = \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{De_1(1-\beta)}$
Taxe carbone qui favorise la délocalisation par rapport à l'investissement vert en domestique	$Q_{d(o1\backslash d2)} = \frac{W+K_{d1}(1-\gamma)}{De_1\beta}$

A partir de l'expression de la taxe carbone  $Q_{d(o1\backslash d1)} = \frac{W}{De_1}$ , qui compare la stratégie « o1 » à « d1 », on déduit que plus la somme des différences entre les coûts opérationnels et fixes de la technologie ordinaire entre les localisations est importante, plus la valeur de taxe carbone qui favorise la délocalisation est élevée (plus  $W$  est grand, plus la valeur  $Q_{d(o1\backslash d1)}$  est grande). Ainsi, plus  $W$  est important moins le problème de fuite de carbone est critique. Ensuite, plus la quantité totale d'émission de carbone augmente ( $De_1$ ), plus cette taxe carbone  $Q_{d(o1\backslash d1)}$  est faible. Pour les secteurs très polluants, la délocalisation est alors favorisée même pour des petites valeurs de taxe carbone domestique. On souligne que les secteurs très polluants sont plus concernés par le problème de fuite de carbone, car ils font recours à la délocalisation au plus tôt.

A partir de l'expression de la taxe carbone  $Q_{d-vert} = \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{De_1(1-\beta)}$ , plus les technologies vertes sont coûteuses comparées aux technologies ordinaires (plus  $\gamma$  est important), plus la valeur de la taxe carbone qui incite l'investissement vert augmente. Pour les secteurs disposant de technologies vertes très chères par rapport aux ordinaires, il faut imposer une taxe carbone domestique élevée pour inciter à l'investissement vert. En outre, plus les technologies vertes sont performantes et moins émettrices de carbone que les technologies ordinaires (plus  $\beta$  est petit), plus la taxe carbone qui favorise l'investissement vert diminue. Pour les secteurs disposant de technologies vertes performantes, il suffit d'imposer une taxe carbone relativement faible pour inciter à l'investissement vert. Enfin, plus les émissions globales de l'entreprise augmentent ( $De_1$  grand), plus la valeur de la taxe carbone qui pousse vers l'investissement vert diminue ; il n'est pas ainsi utile de taxer plus les entreprises polluantes pour qu'elles passent aux technologies vertes.

En comparant  $Q_{d(o1\backslash d1)} = \frac{W}{De_1}$  à  $Q_{d(o1\backslash d2)} = \frac{W+K_{d1}(1-\gamma)}{De_1\beta}$ , on déduit que le problème de délocalisation est plus critique dans la cas où l'entreprise n'est pas incitée à l'investissement vert en domestique sous les taxes carbone appliquées. La délocalisation s'avère la solution optimale lorsque les entreprises ne peuvent pas avoir recours à l'investissement vert en domestique, sous des valeurs de taxes carbone beaucoup plus petites que si elles avaient ce choix. Par conséquent, le problème de fuite de carbone est d'autant plus critique dans le cas où  $W < \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{1-\beta}$ , autrement dit lorsque les technologies vertes disponibles sont très chères par rapport aux technologies ordinaires ( $\gamma$  grand), ou que leurs taux de réduction d'émission de carbone est faible ( $\beta$  est proche de 1). A travers nos analyses numériques, nous mettons l'accent sur de tels résultats.

### 3.3.2. Résolution numérique de MDL1

Afin d'illustrer le problème qu'on a présenté dans la section 3.1, nous considérons un exemple numérique dérivé de l'industrie du textile (Nouira et al., 2014). On considère que l'entreprise cherche à se lancer dans un projet de fabrication de la Fouta, une serviette de bain fabriquée en tissant des fibres de coton. On estime que les prévisions de vente de l'entreprise s'élèvent à  $D=12000$  unités. Le prix unitaire de vente de cet article est fixé à  $P=10\$$ . Les émissions de carbone générées par la fabrication d'une unité de ce produit fini en utilisant une technologie conventionnelle (ordinaire) s'élèvent à  $e_1 = 40kg\backslash\text{unité de produit fini}$  (Ball, 2008). Le transport d'une unité de produit fini par la voie maritime dégage une émission unitaire de  $\tau = 5kg\backslash\text{unité transportée}$ . Afin d'illustrer nos hypothèses de coûts présentées dans la définition du problème (section 3.1), on considère que :

- le coût unitaire de production avec la technologie ordinaire ou verte en domestique est  $C_{d1} = C_{d2} = 6\$\backslash\text{unité de produit fini}$
- le coût unitaire de production avec la technologie ordinaire ou verte en offshore est  $C_{o1} = C_{o2} = 4\$\backslash\text{unité de produit fini}$
- le coût unitaire de transport par unité de produit transportée est  $C_T = 2,5\$\backslash\text{unité de produit transportée}$
- le coût d'installation de la technologie ordinaire en offshore est  $K_{o1} = 4500\$$  alors que son coût d'installation en domestique est  $K_{d1} = 2500\$$ .

Dans un premier cas, on considère que la somme des coûts opérationnels et fixes en offshore est moins importante qu'en domestique. On estime ainsi que le coût d'ouverture du site de production en domestique est 27% plus important que son coût d'ouverture en offshore ( $L_o = 30\ 000\$$  et  $L_d = 38\ 000\$$ ). Dans ces conditions, la différence entre les coûts opérationnels et fixes est nulle ( $W = 0$ ) et ainsi la décision d'investir en technologie ordinaire en offshore « o1 » est la stratégie optimale pour l'entreprise, en absence ou en présence de taxe carbone domestique. En s'installant en offshore avec une technologie ordinaire, les émissions de carbone générées par l'entreprise s'avèrent 14% plus importantes que les émissions de carbone émises en s'installant en domestique avec la même technologie ordinaire et 72% plus importantes que les émissions de carbone de l'entreprise si elle investit en technologie verte en domestique.

Dans un objectif d'instaurer des législations environnementales efficaces capables d'inciter les entreprises à réduire leurs émissions de carbone, il est primordial pour les gouvernements de faire face à ce problème de délocalisation, que la taxe carbone ne fait qu'aggraver dans ce contexte de non homogénéité. Les gouvernements doivent plutôt mettre en place des subventions pour l'investissement local et des programmes d'appui pour réduire les différences entre les coûts fixes et opérationnels entre les localisations.

Dans un deuxième cas, nous estimons que le coût d'ouverture du site de production en domestique peut être réduit suite à des aides gouvernementales pour favoriser l'investissement local. Nous estimons alors qu'une subvention de 10% du coût d'ouverture du site peut être accordée à l'entreprise et ainsi, ce coût devient  $L_d = 34\ 000\$$  alors que le coût d'ouverture du site en offshore garde la même valeur avec  $L_o = 30\ 000\$$ . Dans ce cas,  $W = 4000$  et ainsi on vérifie bien que la somme des différences des coûts opérationnels et fixes est positive ( $W > 0$ ). Dans ces conditions, en absence de taxe carbone domestique, l'installation de la technologie ordinaire en domestique s'avère la meilleure stratégie pour l'entreprise. Dans ce cas, instaurer la taxe carbone en domestique peut pousser les entreprises

à investir en technologie verte en domestique pour maximiser leurs profits, ou dans d'autres cas les pousser à se localiser dans un pays en offshore pour échapper à la taxe carbone domestique. A partir des équations décrites dans la partie de résolution analytique, les performances des technologies vertes disponibles, à savoir le surcoût de la technologie verte,  $\gamma$ , et le taux de réduction des émissions de carbone par la technologie verte caractérisé par le paramètre  $\beta$ , sont deux paramètres déterminants pour évaluer laquelle des stratégies « o1 » ou « d2 » sera plus rentable que « d1 » face à une taxe carbone domestique.

❖ **Impact des performances des technologies vertes disponibles sur les décisions stratégiques et les performances de la CL**

Pour illustrer le comportement des entreprises pour différentes valeurs de taxes carbone domestiques en fonction des performances des technologies disponibles, on considère 4 situations distinctes :

- Dans la première situation, la technologie verte disponible est très coûteuse et peu performante par rapport à l'ordinaire ( $\gamma$  grand et  $\beta$  proche de 1) ;
- Dans la deuxième situation, la technologie verte disponible est très coûteuse toutefois performante en termes d'émission de carbone par rapport à l'ordinaire ( $\gamma$  grand et  $\beta$  proche de 0) ;
- Dans la troisième situation, la technologie verte disponible est peu coûteuse et peu performante par rapport à l'ordinaire ( $\gamma$  petit et  $\beta$  proche de 1) ;
- Dans la quatrième situation, la technologie verte disponible est peu coûteuse mais performante par rapport à l'ordinaire ( $\gamma$  petit et  $\beta$  proche de 0).

A travers notre exemple numérique, et en faisant varier  $\gamma$  et  $\beta$ , nous illustrons dans le tableau 3.3, le comportement stratégique optimal de l'entreprise en fonction de différentes valeurs de taxe carbone domestiques déterminantes pour chaque situation.

Tableau 3.3 : Décisions optimales de CCL sous une taxe carbone domestique et en absence de taxe carbone en offshore

Conditions		Décisions optimales
$L_d = 38\ 000\$ ; L_o = 30\ 000\$ ; W = 0$		
$L_o = 30\ 000\$ ;$ $L_d = 34\ 000\$ ;$ $W = 4\ 000$	$\gamma = 2,5 ; \beta = 0,33 \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{1-\beta} = 5597$	
	$\gamma = 2,5 ; \beta = 0,8$ $\frac{K_{d1}(\gamma-1)}{1-\beta} = 7500$	
	$\gamma = 1,5 ; \beta = 0,8$ $\frac{K_{d1}(\gamma-1)}{1-\beta} = 6250$	
	$\gamma = 1,5 ; \beta = 0,33$ $\frac{K_{d1}(\gamma-1)}{1-\beta} = 1\ 866$	

A partir de ces résultats, on illustre que lorsque le surcoût de la technologie verte est élevé ( $\gamma = 2,5$ ), quelle que soit son niveau d'émission, l'investissement en technologie verte ne peut pas être une option rentable pour l'entreprise. La valeur élevée du surcoût de la technologie verte fait que  $W < \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{1-\beta}$ . Dans ce cas, l'entreprise opte pour la localisation de son site de production en offshore lorsque la taxe carbone dépasse la valeur de  $Q_{d(o1\backslash d1)}$ . Il est à noter que cette valeur de taxe carbone  $Q_{d(o1\backslash d1)}$  ne dépend que de la différence des coûts fixes et opérationnels entre la localisation en domestique et en offshore ( $W$ ) ainsi que du niveau de pollution de l'industrie ( $De_1$ ), mais ne dépend pas des performances de la technologie verte disponible. En effet, pour des secteurs où les technologies vertes disponibles sont très coûteuses par rapport aux technologies ordinaires, autrement dit quand  $\gamma$  est relativement grand, on aura plus de chance d'avoir  $W < \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{1-\beta}$ , et ainsi l'imposition de la taxe carbone ne résout pas le problème, car dans ces conditions la taxe carbone peut désavantager la stratégie « d1 » et favoriser « o1 » et provoquer ainsi le problème de fuite de carbone.

Toutefois, lorsque le surcoût de la technologie verte n'est pas très élevé par rapport à l'ordinaire ( $\gamma = 1,5$ ), l'entreprise ne peut envisager l'investissement local vert sous certaines valeurs de taxes carbone domestiques, que lorsque le taux de réduction des émissions de carbone de cette technologie verte disponible par rapport à la technologie ordinaire est important ( $\beta = 0,33$ ).

Pour des secteurs, dont les technologies vertes ne permettent pas une réduction importante du taux unitaire d'émission de carbone de la technologie de production, autrement quand  $\beta$  est proche de 1, le terme  $\frac{K_{d1}(\gamma-1)}{1-\beta}$  devient grand et ainsi on aura plus de chance d'avoir  $W < \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{1-\beta}$ , ce qui signifie que pour une plage de taxe carbone domestique donnée, la localisation en offshore, à savoir « o1 » est la stratégie optimale. Néanmoins, lorsque les industries disposent de technologies vertes assez performantes en termes de réduction d'émission de carbone, autrement pour  $\beta$  proche de 0, le terme  $\frac{K_{d1}(\gamma-1)}{1-\beta}$  reste plutôt petit et donc on aura plus chance de satisfaire l'inégalité  $W \geq \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{1-\beta}$ . Ainsi, instaurer une taxe carbone domestique bien définie entre  $Q_{d-vert}$  et  $Q_{d(o1\backslash d2)}$  favorise l'investissement local vert, à savoir la stratégie « d2 ».

On conclut alors, que pour garantir l'efficacité de la taxe carbone domestique, comme un outil incitant à l'investissement vert, il faut garantir l'accessibilité des entreprises aux technologies vertes performantes. Autrement, si dans un secteur donné, les technologies vertes disponibles ne sont pas assez performantes en termes de réduction des émissions de carbone, en dépit de leur coût d'investissement intéressant, les entreprises, face à la taxe carbone domestique, peuvent décider de se localiser dans des pays offshores détaxés.

Dans ce qui suit, nous considérons que le taux de réduction des émissions unitaires de la technologie verte est tel que le paramètre  $\beta = 0,33$ . On se propose d'étudier l'impact de la taxe carbone domestique sur les décisions et performances des entreprises en fonction du surcoût de la technologie verte disponible. Lorsque la technologie verte coûte une fois et demi plus chère que l'ordinaire ( $\gamma = 1,5$ ), on détermine qu'il suffit d'une taxe carbone domestique supérieure à  $Q_{d-vert} = 5,18\$/tCO_2$  et inférieure à  $Q_{d(o1\backslash d2)} = 23,15\$/tCO_2$ , pour que la stratégie d'investissement local vert « d2 » soit la stratégie optimale pour l'entreprise.

Lorsqu'on considère que la technologie verte coûte deux fois plus chère que la technologie ordinaire, ( $\gamma = 2$ ), la stratégie « d2 » est la meilleure stratégie, lorsque que la taxe domestique est supérieure à  $Q_{d-vert} = 10,36\$/tCO_2$  et inférieure à  $Q_{d(o1\d2)} = 12,63\$/tCO_2$ . On souligne que lorsque le surcoût de la technologie verte augmente ( $\gamma$  augmente), il faut augmenter la taxe carbone domestique imposée pour pousser à l'investissement local vert ( $Q_{d-vert}$  augmente proportionnellement). De plus, avec l'augmentation des surcoûts de la technologie verte, la plage de la taxe carbone qui pousse vers la stratégie « d2 » se restreint car plus  $\gamma$  augmente, la valeur de taxe carbone qui favorise « o1 » par rapport à « d2 » diminue, ( $Q_{d(o1\d2)}$  diminue inversement proportionnelle à  $\gamma$ ). Puis, quand la technologie verte coûte deux fois et demi plus chère que la technologie ordinaire ( $\gamma = 2,5$ ), la plage de taxe carbone qui favorise la stratégie « d2 » se restreint au point de s'annuler. On a déjà souligné que la stratégie « d2 » ne peut plus être avantageuse par rapport aux autres stratégies pour un pareil surcoût de la technologie verte.

A titre d'exemple, on considère que le gouvernement impose une taxe domestique  $Q_d = 10\$/t CO_2$ . Pour les entreprises disposant de technologie verte une fois et demi plus chère que l'ordinaire ( $\gamma = 1,5$ ), la stratégie optimale est « d2 », alors que lorsque  $\gamma = 2$  et  $\gamma = 2,5$ , la décision optimale dans les deux cas est la délocalisation « o1 ». En augmentant la taxe carbone à  $Q_d = 11,2\$/tCO_2$ , lorsque  $\gamma = 1,5$ , la stratégie optimale reste toujours « d2 », même pour  $\gamma = 2$ . Avec cette augmentation de taxe carbone domestique, le profit de l'entreprise diminue de 3% alors que ses émissions diminuent considérablement de 67%. Néanmoins, pour  $\gamma = 2,5$ , la stratégie optimale devient « o1 », et ainsi le profit de l'entreprise diminue plutôt de 5% et les émissions de carbone de la CL augmentent de 16%.

Nous concluons que pour garantir l'efficacité de la taxe carbone imposée, il est recommandé de vérifier que les surcoûts des technologies vertes par rapport aux technologies ordinaires ne les désavantagent pas face à la taxe carbone. Une des recommandations aux gouvernements est d'accoupler la législation de taxe carbone avec des subventions pour les technologies vertes.

A travers les résultats de cette partie, nous avons mis l'accent sur l'impact de la non homogénéité de la taxe carbone sur les décisions stratégiques des CL et leurs performances. Nous avons déterminé et illustré à travers des exemples, les conditions qui poussent les entreprises à se localiser en offshore afin d'échapper à la taxe carbone. Cette solution engendre le problème de fuites de carbone et affecte alors négativement l'efficacité de la législation de taxe carbone comme outil de lutte contre la pollution industrielle. Il est recommandé aux gouvernements de bien étudier les situations des entreprises et les prendre en considération lors de la promulgation de la taxe carbone. Dans certaines conditions, il est nécessaire de coupler cette législation avec d'autres lois pour garantir l'efficacité de cet outil législatif qui a été largement adopté dans le monde depuis les années 90 et dont la réussite reste toujours conditionnelle comme nous l'avons souligné à travers notre étude. Dans ce qui suit, nous allons étudier deux mesures de lutte contre le problème de fuites de carbone que le gouvernement peut adopter avec la taxe carbone, à savoir les subventions pour la production locale verte et la taxe carbone de frontière (ou aussi connue sous le nom de taxe carbone de barrière).

### 3.4. Problème de conception de chaîne logistique sous une taxe carbone domestique et une subvention pour la production locale verte

Pour étudier cette problématique, nous développons le modèle *MDL2* que nous présentons puis résolvons dans ce qui suit.

#### 3.4.1. Présentation du modèle *MDL2*

Dans cette partie, nous supposons que le gouvernement opte pour un système législatif qui est composé d'une taxe carbone domestique  $Q_d/t CO_2$  appliquée à chaque tonne de carbone émise localement par l'entreprise ainsi qu'une subvention locale verte, accordée à l'entreprise lorsqu'elle investit en technologie verte en domestique, exprimée en pourcentage du coût d'acquisition de cette technologie verte. On considère ainsi, une nouvelle variable  $a$  qui modélise cette subvention locale verte tel que la subvention accordée est de valeur  $a * K_{d2}$ .

Le problème de l'entreprise reste toujours de déterminer les décisions optimales de localisation et d'investissement en technologie de production en considérant ce système législatif qui joint la législation de taxe carbone et de subvention. Afin de modéliser ce nouveau problème, on développe un modèle qu'on note *MDL2*, dont les contraintes restent les mêmes que celles du modèle *MDL1* de (3.2) à (3.7), avec une nouvelle fonction objectif qu'on détaille dans l'équation (3.8) suivante :

$$\max \pi = \max \{ \sum_{l \in \{d,o\}} \sum_{f \in \{1,2\}} x_{lf} \cdot (P - C_{lf}) - (\sum_{l \in \{d,o\}} L_l \cdot y_l + (\sum_{f \in \{1,2\}} K_{of} \cdot y_{of} + K_{d1} \cdot z_{d1} + (1 - a) * K_{d2} \cdot z_{d2}) + \sum_{f \in \{1,2\}} CT \cdot x_{of} + \sum_{f \in \{1,2\}} e_f \cdot x_{df} \cdot Q_d \} \quad (3.8)$$

Nous proposons à ce stade de résoudre ce modèle pour étudier les décisions stratégiques de CCL sous un tel système législatif de taxe carbone domestique couplée à une subvention locale verte.

#### 3.4.2. Résolution analytique et numérique du modèle *MDL2*

Dans la première partie, en résolvant le modèle *MDL1*, nous avons souligné que la taxe carbone domestique peut avoir des impacts différents sur les décisions et performances des entreprises selon que les coûts fixes et opérationnels sont plus ou moins importants en offshore qu'en domestique  $W > 0$  ou  $W \leq 0$ . Dans la même perspective, nous considérons ces deux cas, pour résoudre le modèle *MDL2* et étudier l'apport et les limites de la législation complémentaire de la subvention locale verte dans chacun de ces deux cas.

Nous introduisons le tableau 3.4 ci-dessous qui résume les différentes notations qu'on a utilisées dans la résolution du modèle *MDL2*, et qui seront expliquées par la suite.

Tableau3.4. Tableau des notations pour la résolution du modèle *MDL2*

Notations	Significations
$a^*$	Subvention minimale pour que la stratégie « d2 » soit rentable
$a_{d2}(Q_d)$	Subvention minimale pour que la stratégie « d2 » soit optimale sous la taxe carbone domestique imposée
$Q_{d(d2 \setminus d1)}(a)$	Taxe carbone domestique minimale qui incite l'investissement vert en accordant la subvention $a$
$Q_{d(o1 \setminus d2)}(a)$	Taxe carbone domestique minimale qui favorise la stratégie « o1 » sur « d2 » en accordant la subvention $a$

Notations	Significations
$Q_{d(o1\d1)}$	Taxe carbone domestique minimale qui favorise la stratégie « o1 » sur « d1 »

### 3.4.2.1. Somme des coûts fixes et opérationnels moins importante en offshore ( $W \leq 0$ )

Rappelons que dans le cas où  $W \leq 0$ ; la stratégie « o1 » est plus rentable que la stratégie « d1 » en absence de taxe carbone domestique et de subvention. Dans ce cas imposer seulement une taxe carbone domestique ne peut que favoriser davantage cette stratégie de localisation en offshore comme on l'avait souligné précédemment. Néanmoins, avec une subvention bien étudiée pour l'investissement local vert, en dépit de la présence de taxe carbone domestique, les entreprises peuvent être encouragées à s'installer en domestique avec une technologie verte.

Nous étudions alors la relation qui doit exister entre ces deux législations environnementales de taxe carbone et de subvention pour réussir à rentabiliser la stratégie « d2 » par rapport à la stratégie « o1 » qui est la meilleure en absence de ces législations environnementales.

**Proposition 3.3 : Pour une taxe carbone domestique donnée,  $Q_d$ , lorsque la subvention locale verte accordée  $\alpha \geq \alpha_{d2}(Q_d)$ , la stratégie « d2 » est la stratégie optimale pour l'entreprise sinon la stratégie de localisation en offshore « o1 » est la stratégie optimale avec  $\alpha_{d2}(Q_d) = \frac{D \cdot \beta \cdot e_1}{\gamma K_{d1}} Q_d - \frac{W}{\gamma K_{d1}} - \frac{1}{\gamma} + 1$ .**

*Preuve :*

En effet, en résolvant l'inégalité *profit* [stratégie (d2)]  $\geq$  *profit* [stratégie (o1)], on déduit l'expression de subvention minimale à accorder à l'entreprise en fonction de la taxe carbone domestique imposée pour que la stratégie « d2 » soit plus rentable que la stratégie « o1 ». Il est à noter, qu'avec une telle mesure de subvention locale verte, l'entreprise ne peut pas considérer la stratégie « d1 ». Ce système législatif ne permet que de favoriser la stratégie « d2 » sur « o1 » pour certaines valeurs de taxes carbone domestiques et de subventions locales vertes. Le gouvernement peut donc fixer une valeur de subvention locale verte donnée. Lorsque la subvention minimale qui permet de favoriser l'investissement local vert sur la délocalisation dépasse cette valeur de subvention, la stratégie optimale reste la délocalisation. ■

A partir de l'expression de la subvention locale verte minimale en fonction de la taxe carbone domestique, on note que plus la taxe carbone domestique appliquée augmente plus la subvention pour pousser vers la stratégie « d2 » doit augmenter.

En plus, pour les secteurs polluants (plus  $De_1$  est grand), pour une même taxe carbone domestique appliquée, il faut accorder une plus grande subvention locale verte pour encourager ces entreprises à s'installer en domestique avec une technologie verte.

Il est aussi clair que moins les technologies vertes disponibles sont performantes en termes de réduction des émissions de carbone par rapport au niveau d'émission de la technologie ordinaire, plus les subventions locales vertes doivent être élevées pour rentabiliser la stratégie « d2 ».

En outre, pour une taxe carbone donnée, plus  $\gamma$  augmente (le surcoût de la technologie verte), plus la subvention locale verte doit augmenter pour favoriser « d2 ». Le tableau 3.5 illustre la variation de la subvention locale verte minimale en fonction de la taxe carbone domestique imposée pour différentes valeurs de surcoûts de la technologie verte disponible.

Tableau 3.5. Variation de la subvention locale verte en fonction de la taxe carbone et de surcoût de la technologie verte

$\gamma$	Subvention locale verte minimale ( $a_{de}(Q_d)$ )		
	$Q_d = 10\$$	$Q_d = 15\$$	$Q_d = 20\$$
1,5	65,0%	80,9%	96,7%
2	73,8%	85,6%	97,5%
2,5	79,0%	88,5%	98,0%
3	82,5%	90,4%	98,3%

Pour que le profit de l'entreprise avec la stratégie d'investir en technologie verte en domestique soit supérieur à celui qu'elle génère en investissant dans une technologie ordinaire en offshore, il faut que la subvention locale verte minimale arrive à réduire les coûts de l'entreprise en domestique. Rappelons que ces derniers sont à la base plus importants qu'en offshore et incluent la somme des coûts opérationnels, fixes et d'émission sous la taxe carbone domestique imposée. Il est évident dans ce cas, où  $W \leq 0$ , qu'une valeur de subvention donnée est nécessaire pour contrebalancer cette inégalité des coûts entre le domestique et l'offshore. Cette valeur de subvention augmente lorsque les coûts de l'entreprise en domestique augmente à cause de l'instauration d'une taxe carbone alors que les coûts en offshore restent les même en absence de taxe carbone offshore. Par conséquent, lorsque la taxe carbone domestique impliquée est élevée, il faut accorder des subventions suffisamment intéressantes pour atteindre l'équilibre du coût qui rentabilise la stratégie « d2 ». A titre d'exemple, pour un surcoût de la technologie verte  $\gamma = 3$ , avec une taxe carbone domestique  $Q_d = 10\$/tCO_2$  pour favoriser la stratégie « d2 », une subvention minimale de 82,5% du coût d'installation de la technologie verte doit être accordée à l'entreprise. De plus, si la taxe augmente à  $Q_d = 20\$/tCO_2$  la subvention minimale passe à 98,3%. On souligne que dans ce cas, où la somme des coûts fixes et opérationnels de la technologie ordinaire en offshore est moins importante qu'en domestique, il est plutôt recommandé de mettre en place des subventions locales vertes sans appliquer de taxe carbone en domestique.

L'intérêt de coupler la taxe carbone avec la subvention locale verte sera plus mis en évidence dans la partie suivante, lorsque l'investissement local est la stratégie la plus rentable en absence de taxe carbone domestique, et que pour certains cas la taxe carbone peut pousser les entreprises à la délocalisation et engendrer ainsi le problème de fuite de carbone.

#### 3.4.2.2. Coûts fixes et opérationnels plus importants en Offshore ( $W > 0$ )

Rappelons que dans le cas où  $W > 0$ ; en absence de taxe carbone domestique et de subvention locale verte, la stratégie « d1 » est la stratégie la plus rentable pour l'entreprise. Dans ce cas, imposer une taxe carbone domestique bien définie peut pousser les entreprises vers l'investissement vert en domestique. Toutefois comme c'est un outil qui va augmenter les charges de l'entreprise, il peut s'avérer plus intéressant à partir d'un niveau donné de taxe carbone de plutôt se localiser en offshore en investissant dans une technologie ordinaire. La subvention pour l'investissement local vert ne peut que favoriser la stratégie « d2 » pour certains couples de valeurs de taxe carbone domestique et de subvention locale verte. Quelle relation doit-elle exister entre la taxe carbone domestique imposée et la subvention locale verte accordée pour garantir l'investissement local vert ? Dans quels cas, en dépit de la

présence de ces deux mesures législatives la stratégie de délocalisation peut-elle être la plus rentable ?

**Proposition 3.4 :** On pose  $a^* = \frac{\gamma-1}{\gamma} - \frac{W(1-\beta)}{\gamma \cdot K_{d1}}$ .

Quand la subvention locale verte accordée  $a \leq a^*$ , pour une taxe carbone domestique supérieure à  $Q_{d(o1 \setminus d1)} = \frac{W}{De_1}$ , la stratégie optimale pour l'entreprise est l'investissement en technologie ordinaire en offshore « o1 » ;

En posant  $Q_{d(d2 \setminus d1)}(a) = \frac{K_{d1}(\gamma(1-a)-1)}{De_1(1-\beta)}$  et  $Q_{d(o1 \setminus d2)}(a) = \frac{\gamma \cdot K_{d1}(a-1) + K_{d1} + W}{D\beta e_1}$  on obtient les résultats suivants :

Quand la subvention locale verte accordée  $a \geq a^*$ ,

- lorsque la taxe carbone domestique imposée  $Q_d \leq Q_{d(d2 \setminus d1)}(a)$ , l'investissement en technologie ordinaire en domestique « d1 » est la stratégie optimale,
- sinon pour une taxe carbone domestique  $Q_{d(d2 \setminus d1)}(a) \leq Q_d \leq Q_{d(o1 \setminus d2)}(a)$ , la stratégie d'investissement local vert « d2 » est la stratégie optimale,
- sinon si la taxe carbone domestique  $Q_d \geq Q_{d(o1 \setminus d2)}(a)$ , la stratégie d'investissement en technologie ordinaire en offshore « o1 » est la stratégie optimale.

*Preuve :*

En effet, on rappelle qu'en absence de taxe carbone domestique et de subvention locale verte, la stratégie « d1 » est la stratégie optimale pour l'entreprise vu que les coûts fixes et opérationnels en domestique sont moins importants qu'en offshore. Néanmoins, en imposant un système législatif qui joint une subvention locale verte à une taxe carbone, dans un but de maximisation de profit, l'entreprise peut opter pour la stratégie « d2 » ou « o1 », ou même garder la stratégie « d1 », selon les valeurs de taxe carbone domestique imposée et de subvention accordée. On commence ainsi par comparer à la stratégie « d1 » les deux autres stratégies envisageables pour l'entreprise, à savoir « d2 » et « o1 ». D'un côté, en résolvant l'inégalité *profit stratégie (d2) ≥ profit stratégie (d1)*, on déduit que pour une subvention donnée  $a$ , l'entreprise décide de s'installer en domestique et d'investir en technologie verte lorsque les valeurs de taxes carbone  $Q_d$  sont supérieures à  $Q_{d(d2 \setminus d1)}(a)$ , où  $Q_{d(d2 \setminus d1)}(a) = \frac{K_{d1}(\gamma(1-a)-1)}{De_1(1-\beta)}$ . De l'autre côté, en résolvant l'inégalité *profit stratégie (o1) ≥ profit stratégie (d1)*, on trouve que c'est plus rentable pour l'entreprise de se localiser en offshore et d'investir en technologie ordinaire que de s'installer en domestique avec une technologie ordinaire pour des valeurs de taxes carbone domestiques supérieures à  $Q_{d(o1 \setminus d1)}$ , avec  $Q_{d(o1 \setminus d1)} = \frac{W}{De_1}$ .

A ce stade, pour déterminer la stratégie optimale pour l'entreprise face à la taxe carbone domestique imposée et bénéficiant d'une subvention pour l'investissement local vert, on compare  $Q_{d(d2 \setminus d1)}(a)$  à  $Q_{d(o1 \setminus d1)}$  et on déduit ainsi la condition nécessaire sur la subvention locale verte minimale pour que la stratégie « d2 » soit aussi intéressante que les autres stratégies pour certaines valeurs de taxes carbone domestiques.

- lorsque  $a < a^* = \frac{\gamma-1}{\gamma} - \frac{W(1-\beta)}{\gamma \cdot K_{d1}}$ , l'inégalité  $Q_{d(d2 \setminus d1)}(a) \geq Q_{d(o1 \setminus d1)}$  est vérifiée. Donc, la décision optimale pour l'entreprise s'avère « o1 » si la taxe carbone

domestique imposée avec cette subvention est supérieure à  $Q_{d(o1/d1)}$ , sinon la stratégie « d1 » est la stratégie optimale.

- lorsque  $a \geq a^* = \frac{\gamma-1}{\gamma} - \frac{W(1-\beta)}{\gamma.K_{d1}}$ , l'inégalité  $Q_{d(d2/d1)}(a) < Q_{d(o1/d1)}$  est vérifiée. Autrement, à partir des valeurs de taxe carbone domestique supérieures à cette valeur de  $Q_{d(d2/d1)}(a)$ , la décision « d2 » est plus rentable que la décision « d1 ». En analysant l'équation  $Q_{d(d2/d1)}(a) = \frac{K_{d1}(\gamma(1-a)-1)}{D\beta e_1(1-\beta)}$ , on voit bien qu'il s'agit d'une équation linéaire décroissante en fonction de la subvention  $a$ , autrement dit plus la taxe augmente plus il faut diminuer la subvention locale verte pour garantir l'investissement en technologie verte en domestique. Toutefois, il est évident qu'il existe une certaine valeur de taxe carbone domestique, qui en dépit de la subvention locale verte, au-delà de laquelle il peut s'avérer plus intéressant de se localiser en offshore avec une technologie ordinaire. On étudie alors la variation de la taxe carbone domestique en fonction de la subvention locale verte qui favorise « o1 » sur « d2 » en résolvant l'inégalité *profit stratégie (o1) ≥ profit stratégie (d2)*. On déduit alors que pour des taxes carbone domestiques supérieures à  $Q_{d(o1/d2)}(a)$  telle que  $Q_{d(o1/d2)}(a) = \frac{\gamma.K_{d1}(a-1)+K_{d1}+W}{D\beta e_1}$ , l'entreprise décide de se localiser en offshore bien que  $a \geq a^*$ . En analysant cette équation  $Q_{d(o1/d2)}(a) = \frac{\gamma.K_{d1}(a-1)+K_{d1}+W}{D\beta e_1}$ , contrairement au résultat précédent, on voit bien qu'il s'agit d'une équation linéaire croissante en fonction de la subvention  $a$ . Autrement, plus la taxe carbone domestique augmente, plus il faut augmenter la subvention locale verte pour garantir l'investissement en technologie verte en domestique. ■

#### ❖ *Impact des performances des technologies vertes disponibles sur les décisions stratégiques et performances de la CL*

Dans ce qui suit, nous proposons d'analyser l'impact des performances de la technologie verte disponible sur les décisions des entreprises sous les législations environnementales de taxe carbone et de subvention locale verte. Pour cela, nous reprenons l'exemple numérique adopté dans la section 3.1. dans un premier temps, afin de souligner l'impact du surcoût de la technologie verte disponible, nous fixons  $\beta = 0,33$ , et nous faisons varier  $\gamma$ .

Lorsque le gouvernement accorde une subvention  **$a$  inférieure à la subvention minimale  $a^*$** , si la taxe carbone imposée ne dépasse pas la taxe  $Q_{d(o1/d1)}$  dont la valeur est indépendante de cette subvention, la stratégie optimale est « d1 », sinon c'est la localisation en offshore « o1 », qui devient la stratégie la plus rentable à l'entreprise.

Prenons l'exemple où le gouvernement décide d'accorder une subvention de 10% du coût d'acquisition de la technologie verte en domestique en la couplant avec une taxe carbone de  $Q_d = 11,5\$/tCO_2$ . Pour un premier secteur donné, dont la technologie verte ne coûte qu'une fois et demi plus chère que l'ordinaire ( $\gamma = 1,5$  ; et dont  $a^* < 0$ ), la stratégie optimale pour les entreprises de ce secteur s'avère la stratégie « d2 ». Toutefois, pour un deuxième secteur, dont le surcoût de la technologie verte disponible est deux fois et demi plus chère que l'ordinaire ( $\gamma = 2,5$  ; et dont  $a^* = 17,1\%$ ), la localisation en offshore d'une technologie ordinaire « o1 » est la décision optimale pour les entreprises de ce secteur, puisque la taxe imposée est supérieure à  $Q_{d(o1/d1)} = 11,1\$/tCO_2$ . Il est ainsi évident, que le surcoût de la technologie verte disponible a un impact sur les décisions des entreprises sous de tels systèmes législatifs.

Afin d'étudier l'impact du surcoût de la technologie verte ( $\gamma$ ) sur l'efficacité de l'outil législatif, on considère différentes valeurs de ce surcoût et on détermine pour chaque cas, la valeur de la subvention minimale qu'il faut accorder pour rentabiliser la stratégie « d2 » sous certaines valeurs de taxes carbone imposées. Ensuite, on fixe une valeur de subvention  $a_1$ , accordée par le gouvernement, supérieure à cette subvention minimale  $a^*$ . On détermine pour cette valeur,  $a_1$ , la plage des taxes carbone pour lesquelles la stratégie « d2 » est optimale. Ensuite, on considère une deuxième subvention  $a_2$  plus élevée que la subvention  $a_1$ , on recalcule la plage de taxe carbone domestique favorisant l'investissement local vert par rapport aux autres stratégies. Les résultats de cette étude sont illustrés dans le tableau 3.6 ci-dessous.

Tableau 3.6. Variation des subventions locales vertes minimales et des taxes carbone imposées en fonction des subventions accordées pour différents surcoûts de la technologie verte

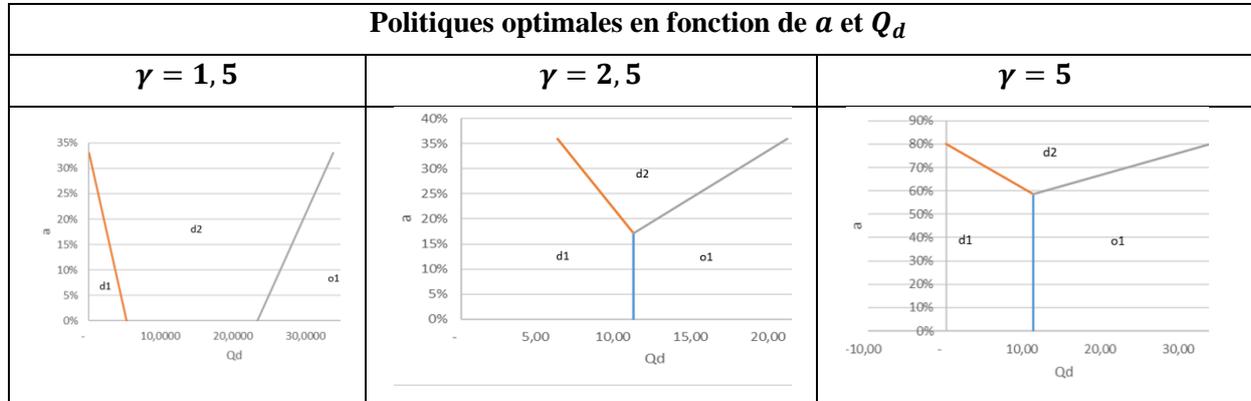
$\gamma$	$a^*$	$a_1$	$Q_{d(d2 \setminus d1)}(a_1)$	$Q_{d(o1 \setminus d2)}(a_1)$	$a_2$	$Q_{d(d2 \setminus d1)}(a_2)$	$Q_{d(o1 \setminus d2)}(a_2)$
1,5	-38,1%	3%	4,7160	24,10	6%	4,2496	25,04
2	-3,6%	6%	9,1211	15,15	10%	8,2919	16,84
2,22	6,7%	10%	10,3441	12,67	20%	8,0431	17,34
2,5	17,1%	20%	10,3648	12,63	40%	5,1824	23,15
3	30,9%	40%	8,2919	16,84	60%	2,0730	29,46
5	58,6%	60%	10,3648	12,63	80%	0	33,67

On souligne que plus le surcoût de la technologie verte augmente ( $\gamma$  augmente), plus la subvention minimale augmente également ( $a^*$  augmente). Pour éviter le problème de fuite de carbone, il est recommandé aux gouvernements d'accorder des subventions plus importantes pour les secteurs qui sont plus exposés au risque de fuite de carbone, disposant de technologies vertes relativement coûteuses par rapport aux ordinaires.

Selon l'étude numérique effectuée, si on considère que la technologie verte coûte seulement une fois et demi plus chère que la technologie ordinaire ( $\gamma = 1.5$ ), la subvention minimale locale verte est négative, ce qui veut dire que le coût de la technologie verte est suffisamment intéressant, pour inciter l'entreprise à l'installer sous certaines valeurs de la taxe carbone qui varient entre  $Q_{d(d2 \setminus d1)}(a^*) = 4,716\$/tCO_2$  à  $Q_{d(o1 \setminus d2)}(a^*) = 24,1\$/tCO_2$ , sans pour autant avoir besoin d'une subvention locale verte supplémentaire. Toutefois, pour une technologie verte qui coûte deux fois et demi plus chère que l'ordinaire ( $\gamma = 2.5$ ), il faut que le gouvernement accorde aux entreprises une subvention minimale locale verte de  $a^* = 17,1\%$  du coût d'investissement en technologie verte en domestique, en imposant de plus une taxe carbone domestique  $Q_d$  comprise entre  $Q_{d(d2 \setminus d1)}(a^*) = 11,0904\$/tCO_2$  et  $Q_{d(o1 \setminus d2)}(a^*) = 11,15\$/tCO_2$  pour que le gouvernement garantisse que l'entreprise investit en technologie verte en domestique. On souligne que la plage de taxe carbone domestique qui favorise la stratégie « d2 » est très restreinte lorsque la subvention accordée est proche de la subvention minimale. En effet, en accordant une subvention de 17,1%, et en imposant une taxe carbone de  $Q_d = 11\$/tCO_2$ , la stratégie optimale pour l'entreprise reste « d1 ». Par contre, en imposant une taxe carbone  $Q_d = 11,1\$/tCO_2$ , la stratégie optimale pour l'entreprise devient l'investissement local vert **qui garantit à l'entreprise de réduire ses émissions de carbone de la CL de 67%**. Enfin, si la taxe carbone passe à  $Q_d = 11,2\$/tCO_2$ , la localisation en

offshore avec une technologie ordinaire est la stratégie optimale, engendrant ainsi le problème de fuite de carbone, en augmentant les émissions de la CL de 250%. Ces résultats sont mieux illustrés à travers le tableau 3.7 ci-dessous.

Tableau 3.7. Décisions stratégiques de CCL en fonction de la variation de la subvention locale verte et des taxes carbone pour 3 valeurs du surcoût de la technologie verte ( $\gamma$ )



En outre, on note que, pour un surcoût de la technologie verte donné ( $\gamma$  fixe), plus la subvention accordée augmente, plus la plage de taxe carbone qui favorise l'investissement local vert s'élargit. En effet la taxe  $Q_{d(d2 \setminus d1)}(a)$  varie inversement proportionnellement à la subvention alors que la taxe  $Q_{d(o1 \setminus d2)}(a)$  varie proportionnellement à la subvention. Dans ce cas, on prend l'exemple d'un secteur dont la technologie verte disponible est excessivement chère par rapport à l'ordinaire ( $\gamma = 5$ ), on déduit que la subvention locale verte minimale va jusqu'à  $a^* = 58,6\%$ . En accordant aux entreprises de ce secteur une subvention de  $a = 60\%$ , et en imposant une taxe domestique comprise entre  $Q_{d(d2 \setminus d1)}(a) = 10,365\$/tCO_2$  et  $Q_{d(o1 \setminus d2)}(a) = 12,63\$/tCO_2$ , le gouvernement garantit que la stratégie « d2 » soit la meilleure pour l'entreprise. En accordant, une subvention allant jusqu'à  $a = 80\%$  du coût d'acquisition de la technologie verte en domestique, l'entreprise décide d'investir en technologie verte en domestique même en absence de taxe carbone ou en présence de taxe carbone inférieure à  $Q_{d(o1 \setminus d2)}(a) = 33,67\$/tCO_2$ . Il est clair que lorsque le surcoût de la technologie verte est important, il faut accorder des subventions importantes pour dépasser la valeur de la subvention minimale. Néanmoins, plus la subvention accordée est grande, plus le gouvernement peut diminuer la valeur de la taxe carbone imposée et garantir ainsi l'acceptation de tel outil et son efficacité à réduire les émissions de carbone des CLs. Pour une première réflexion, on peut penser que lorsque le gouvernement impose des taxes carbone réduites, il n'a pas besoin de les coupler avec la subvention pour garantir leur acceptation, et encore qu'il faut augmenter les subventions en augmentant les taxes carbone imposées. Néanmoins, nous avons remarqué à travers notre analyse, que lorsque la taxe carbone diminue, il est recommandé d'augmenter la subvention locale verte pour favoriser la stratégie « d2 ». Quand la taxe carbone est faible, elle n'incite pas les entreprises à l'investissement vert, et dans ce cas augmenter les subventions locales vertes peut avantager la stratégie « d2 ».

Enfin, on note que, pour une même subvention accordée ( $a$  fixe), plus le surcoût de la technologie verte augmente ( $\gamma$  augmente), plus les plages de taxe carbone qui favorisent la stratégie « d2 » sont restreintes. A titre d'exemple, considérons un gouvernement qui décide d'accorder une subvention locale verte de 6% du coût d'acquisition de la technologie verte en domestique. Pour un premier secteur, dont les entreprises disposent de technologie verte une fois et demi plus chère que l'ordinaire ( $\gamma = 1,5$ ), la plage de taxe carbone qui pousse vers la

stratégie « d2 » s'étend de  $Q_{d(d2\backslash d1)}(a) = 4,25\$/tCO_2$  à  $Q_{d(o1\backslash d2)}(a) = 25\$/t CO_2$ . Cependant, pour un deuxième secteur, dont les entreprises disposent de technologie verte deux fois plus chère que l'ordinaire ( $\gamma = 2$ ), la plage de taxe carbone domestique qui incite à l'investissement local vert est comprise entre  $Q_{d(d2\backslash d1)}(a) = 9,12\$/tCO_2$  et  $Q_{d(o1\backslash d2)}(a) = 15,15\$/t CO_2$ . On conclut que si le gouvernement accorde une subvention de 6% avec une taxe carbone de  $Q_d = 8\$/tCO_2$ , les industries du 1<sup>er</sup> secteur sont incitées à l'investissement local vert, alors que les industries du deuxième secteur continuent à choisir la stratégie « d1 » sous de telles conditions pour maximiser leurs profits.

Dans la même optique, nous menons des analyses de sensibilité sur le paramètre  $\beta$ , qui permet de caractériser le taux de réduction des émissions de carbone de la technologie verte par rapport à l'ordinaire. On obtient des résultats en cohérence avec les résultats précédents, qu'on illustre à travers le tableau 3.8 ci-dessous.

Tableau 3.8. Variation des subventions locales vertes minimales et des taxes carbone imposées en fonction des subventions accordées pour différents surcoûts de la technologie verte

$\beta$	$a^*$	$a_1$	$Q_{d(d2\backslash d1)}(a_1)$	$Q_{d(o1\backslash d2)}(a_1)$	$a_2$	$Q_{d(d2\backslash d1)}(a_2)$	$Q_{d(o1\backslash d2)}(a_2)$
0,20	-14%	3%	8,16	22,92	6%	7,64	25,00
0,33	-4%	6%	9,12	15,15	12%	7,88	17,68
0,50	10%	12%	10,56	11,67	30%	5,56	16,67
0,70	26%	30%	9,26	11,90	40%	4,63	13,89
0,80	34%	40%	6,94	12,15	60%	-6,94	15,63
0,90	42%	60%	-13,89	13,89	80%	-41,67	16,98

On illustre à travers ces résultats, l'importance de bien étudier les valeurs et la concordance entre les taxes carbone imposées et les subventions accordées pour garantir l'efficacité de telles législations environnementales pour les différents secteurs industriels en prenant en considération tout particulièrement les performances des technologies vertes dont ils disposent.

### 3.5. Problème de conception de chaîne logistique sous une taxe carbone domestique et une taxe carbone de frontière

Nous étudions dans cette section, le cas où les gouvernements décident de coupler la taxe de carbone locale avec une taxe de frontière. Notons qu'en présence de cette taxe carbone de frontière la stratégie « o2 », d'investissement en technologie verte en offshore peut devenir intéressante dans certaines conditions. Nous cherchons à déterminer les stratégies de localisation et d'investissement optimales en fonction des taxes carbone domestique et de frontière imposées. Pour ce faire, nous développons le modèle *MDL3*, que nous présentons puis résolvons dans ce qui suit.

#### 3.5.1. Présentation du modèle *MDL3*

Dans cette partie, nous supposons qu'en plus de la taxe carbone domestique imposée sur les émissions générées par la production domestique, une taxe carbone de frontière, notée  $Q_{fr}$ , est appliquée sur chaque tonne de carbone émise par la production et le transport des produits fabriqués en offshore. Le problème de l'entreprise reste toujours de déterminer les décisions

de localisation et d'investissement optimales afin de maximiser son profit sous un tel système législatif qui impose des taxes carbone domestiques et de frontière. Pour résoudre cette nouvelle problématique de l'entreprise, nous développons le modèle *MDL3*, dont la fonction objectif est détaillée dans l'équation (3.9) ci-dessous et qui adopte les mêmes contraintes (3.2) à (3.7) que les deux autres modèles *MDL1* et *MDL2*.

• **Fonction objectif**

$$\max \pi = \max \left\{ \sum_{l \in \{d,o\}} \sum_{f \in \{1,2\}} x_{lf} \cdot (P - C_{lf}) - \left( \sum_{l \in \{d,o\}} L_l \cdot y_l + \sum_{l \in \{d,o\}} \sum_{f \in \{1,2\}} K_{lf} \cdot z_{lf} + \sum_{f \in \{1,2\}} CT \cdot x_{of} + \sum_{f \in \{1,2\}} e_f \cdot x_{df} \cdot Q_d + \sum_{f \in \{1,2\}} (e_f + \tau) \cdot x_{of} \cdot Q_{fr} \right) \right\} \quad (3.9)$$

En résolvant ce modèle nous cherchons à déterminer comment doit varier la taxe carbone de frontière en fonction de la taxe carbone domestique imposée pour pousser les entreprises à l'investissement local vert ? Dans quelles conditions, de telles taxes carbone de frontière et domestique, peuvent-elles favoriser l'investissement vert en offshore? Quel impact aura une telle décision sur les performances de la CL en termes de réduction de carbone ?

Dans la même perspective de résolution du modèle *MDL1* et *MDL2*, nous distinguons deux cas selon que les coûts fixes et opérationnels sont plus ou moins importants en offshore qu'en domestique :  $W > 0$  ou  $W \leq 0$ . Nous cherchons à analyser l'efficacité des législations des taxes carbone domestique et de frontière dans chacun de ces deux cas.

Nous introduisons le tableau 3.9 ci-dessous qui résume les différentes notations qu'on utilise dans la résolution du modèle *MDL3*, et qui seront expliquées par la suite.

Tableau 3.9. Tableau des notations pour la résolution du modèle *MDL3*

Notations	Significations
$Q_{d-vert}$	Taxe carbone domestique minimale qui incite l'investissement vert en domestique
$Q_{fr-vert}$	Taxe carbone de frontière minimale qui incite l'investissement vert en offshore
$Q_{d-stop}$	Taxe carbone domestique minimale au-delà de laquelle l'entreprise ne peut plus dégager un bénéfice en domestique
$Q_{fr-stop}$	Taxe carbone de frontière minimale au-delà de laquelle l'entreprise ne peut plus dégager un bénéfice en offshore
$Q_{d(o1 \setminus d2)}$	Taxe carbone domestique minimale qui favorise la stratégie « o1 » sur « d2 »
$Q_{fr(d1 \setminus o2)}(Q_d)$	Taxe carbone de frontière minimale qui favorise la stratégie « d1 » sur « o2 » sous la taxe carbone domestique $Q_d$
$Q_{fr(d2 \setminus o2)}(Q_d)$	Taxe carbone de frontière minimale qui favorise la stratégie « d2 » sur « o2 » sous la taxe carbone domestique $Q_d$
$Q_{fr(d1 \setminus o1)}(Q_d)$	Taxe carbone de frontière minimale qui favorise la stratégie « d1 » sur « o1 » sous la taxe carbone domestique $Q_d$
$Q_{fr(d1 \setminus o2)}(Q_d)$	Taxe carbone de frontière minimale qui favorise la stratégie « d1 » sur « o2 » sous la taxe carbone domestique $Q_d$
$Q_d^*$	Taxe carbone domestique à partir de laquelle, il faut comparer la meilleure stratégie en domestique à la stratégie d'investissement vert en offshore

### 3.5.2. Résolution analytique du modèle MDL3 : Somme des coûts fixes et opérationnels moins importante en offshore ( $W \leq 0$ )

Dans cette partie, afin de déterminer la stratégie de localisation et d'investissement optimale, nous commençons par comparer les stratégies d'investissement dans une localisation donnée, en technologie verte ou ordinaire, en fonction de la taxe carbone en vigueur dans cette localisation (domestique ou de frontière). En effet, en absence de taxe carbone domestique et de frontière, quelle que soit la localisation choisie, domestique ou offshore, installer la technologie ordinaire est toujours meilleur pour l'entreprise. Lorsque le gouvernement impose un couple de taxe carbone domestique et de frontière donné, on peut déduire à partir des valeurs de ces taxes carbone laquelle des deux stratégies d'investissement en technologie verte ou ordinaire est meilleure pour chaque localisation. Ensuite, en comparant la rentabilité de la meilleure stratégie en offshore (« o1 » ou « o2 ») à la meilleure stratégie en domestique (« d1 » ou « d2 »), on peut déduire la stratégie optimale de localisation et d'investissement sous les taxes carbone domestique et de frontière en vigueur, ce qui sera l'objectif de la proposition 3.5.

Dans la partie de résolution du modèle MDL1, nous avons souligné qu'en domestique, il existe une taxe carbone domestique qu'on a notée  $Q_{d-vert}$  telle que  $Q_{d-vert} = \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{D e_1(1-\beta)}$ , à partir de laquelle la stratégie « d2 » s'avère plus rentable que « d1 ». Cette stratégie « d2 » peut permettre à l'entreprise de maximiser son profit sous certaines valeurs de taxe carbone domestique qui vont jusqu'à  $Q_{d-stop}$ . En fait pour des valeurs de taxe carbone domestique supérieures à  $Q_{d-stop} = \frac{D(P-C_d)-L_d-\gamma.K_{d1}}{D.e_1.\beta}$ , même avec la technologie verte l'entreprise ne peut plus dégager un profit positif. On conclut alors, qu'en domestique :

- la stratégie « d2 » est la meilleure stratégie lorsque la taxe carbone domestique appliquée  $Q_{d-vert} \leq Q_d \leq Q_{d-stop}$ .
- la stratégie « d1 » est la meilleure stratégie en domestique si la taxe carbone domestique est  $Q_d \leq Q_{d-vert}$ .
- l'entreprise n'a pas intérêt à investir en domestique, si la taxe carbone domestique  $Q_d \geq Q_{d-stop}$ .

De la même façon, on considère la localisation offshore, en comparant les profits des deux stratégies d'investissement offshore et en résolvant l'inégalité  $profit(o2) \geq profit(o1)$ , on déduit qu'il existe une valeur de taxe carbone de frontière qu'on note  $Q_{fr-vert}$ , au-delà de laquelle l'installation de la technologie verte en offshore s'avère plus rentable que l'installation de la technologie ordinaire en offshore avec  $Q_{fr-vert} = \frac{K_{o1}(\gamma-1)}{D.e_1.(1-\beta)}$ . De plus, il est évident qu'il existe une taxe carbone de frontière encore plus importante qu'on note  $Q_{fr-stop}$ , au-delà de laquelle l'entreprise ne peut plus dégager un profit positif en offshore, même en utilisant la technologie verte. En déterminant la valeur de taxe carbone de frontière maximale sous laquelle l'entreprise peut dégager un profit positif avec la technologie verte, on déduit que  $Q_{fr-stop} = \frac{D(P-C_o-C_T)-L_o-\gamma.K_{o1}}{D(e_1.\beta+\tau)}$ . On conclut alors que :

- en offshore, la stratégie « o2 » est la meilleure stratégie lorsque la taxe carbone de frontière appliquée  $Q_{fr-vert} \leq Q_{fr} \leq Q_{fr-stop}$ ,
- sinon lorsque la taxe carbone de frontière appliquée  $Q_{fr} \leq Q_{fr-vert}$ , la stratégie « o1 » est la meilleure stratégie,

- finalement si la taxe carbone de frontière  $Q_{fr} \geq Q_{fr-stop}$  l'entreprise n'a pas intérêt à investir en offshore.

A ce stade, après avoir comparé les stratégies locales et offshores deux à deux, nous cherchons à comparer la meilleure stratégie en offshore et la meilleure stratégie en domestique pour déduire la stratégie optimale pour l'entreprise en fonction des valeurs de taxes carbone domestique et de frontière.

Dans cette partie, nous supposons qu'il existe une plage de taxe carbone non nulle, domestique et de frontière, qui favorise les stratégies d'investissement en technologies vertes en domestique et en offshore respectivement. Nous admettons alors, que les technologies vertes disponibles sont assez performantes ( $\gamma$  pas très élevé et  $\beta$  proche de 0) pour qu'elles soient une solution rentable pour les entreprises sous certaines valeurs de taxes carbone domestique et de frontière imposées.

Rappelons que lorsque  $W \leq 0$ , en absence de taxe carbone domestique et de frontière, il est plus rentable de s'installer en offshore avec une technologie ordinaire « o1 ». De plus, quand seulement une taxe carbone domestique est appliquée, la décision optimale reste toujours la stratégie « o1 ». En accordant une subvention locale verte avec la taxe carbone domestique, la seule stratégie alternative s'avère la stratégie d'investissement local vert « d2 », qui peut être plus rentable que « o1 » sous certaines valeurs de taxes carbone et de subventions. Toutefois, en appliquant une taxe carbone de frontière avec la taxe carbone domestique, toutes les stratégies « o2 », « d1 », « d2 » et « o1 » peuvent être intéressantes et permettent de maximiser le profit de l'entreprise selon les valeurs des taxes carbone de frontière et domestique imposées. Nous proposons alors d'étudier les décisions optimales pour l'entreprise selon la variation de la taxe carbone de frontière en fonction de la taxe carbone domestique,  $Q_{fr} = f(Q_d)$ .

**Proposition 3.5 :** Lorsque  $\frac{\gamma-1}{De_1(1-\beta)} \left( \frac{e_1}{e_1+\tau} K_{d1} - K_{o1} \right) < \frac{W}{D(e_1+\tau)}$ ,

- pour des taxes carbone locales  $Q_d \leq Q_{d-vert}$ , si la taxe carbone de frontière appliquée est supérieure à  $Q_{fr(d1\setminus o1)}(Q_d) = \frac{e_1}{e_1+\tau} \cdot Q_d - \frac{W}{D(e_1+\tau)}$ , la stratégie « d1 » est la stratégie optimale pour l'entreprise, sinon la stratégie « o1 » est la stratégie optimale ,
- pour des taxes carbone locales  $Q_{d-vert} \leq Q_d \leq Q_d^*$ , si la taxe carbone de frontière est supérieure à  $Q_{fr(d2\setminus o1)}(Q_d)$ , la stratégie « d2 » est la stratégie optimale, sinon la stratégie « o1 » est la stratégie optimale, avec  $Q_{fr(d2\setminus o1)}(Q_d) = \frac{e_1}{e_1+\tau} \cdot \beta \cdot Q_d - \frac{W+K_{d1}(1-\gamma)}{D(e_1+\tau)}$ ,  $Q_{fr(d2\setminus o1)}(Q_d^*) = Q_{fr-vert}$  ce qui implique  $Q_d^* = \frac{e_1+\tau}{\beta e_1} (Q_{fr-vert} + \frac{W+K_{d1}(1-\gamma)}{D(e_1+\tau)})$  ;
- pour des taxes carbone locales  $Q_d^* \leq Q_d \leq Q_{d-stop}$ , si la taxe carbone de frontière est supérieure à  $Q_{fr(d2\setminus o2)}(Q_d) = \frac{\beta \cdot e_1}{\beta \cdot e_1 + \tau} \cdot Q_d - \frac{W+(K_{d1}-K_{o1}) \cdot (1-\gamma)}{D(e_1+\tau)}$  la stratégie « d2 » est la stratégie optimale pour l'entreprise, sinon la stratégie « o2 » est la stratégie optimale,
- finalement, pour des taxes carbone domestiques  $Q_d \geq Q_{d-stop}$ , et des taxes carbone de frontière  $Q_{fr} \geq Q_{fr-stop}$ , ne pas se lancer dans le business » est la stratégie optimale.

**Preuve :**

En absence de taxes carbone de frontière et domestique, puisque les coûts fixes et opérationnels en offshore sont moins importants ( $W \leq 0$ ), la meilleure stratégie est « o1 ». En imposant, des taxes carbone de frontière qui restent inférieures à  $Q_{fr-vert}$  (la valeur de taxe carbone qui favorise l'investissement vert en offshore), la stratégie « o1 » reste plus rentable en offshore que la stratégie « o2 ». Néanmoins, en imposant des taxes carbone de frontière qui dégrade la rentabilité des stratégies offshore, les stratégies de localisation en domestique peuvent devenir plus rentables. Toutefois, le gouvernement, impose également des taxes carbone domestiques. Si ces dernières sont inférieures à  $Q_{d-vert}$ , la stratégie à considérer en domestique est « d1 », puisque la taxe carbone domestique n'est pas suffisamment élevée pour inciter à l'investissement local vert. Ainsi on compare la stratégie « o1 » qui est la meilleure en offshore pour des taxes carbone de frontière inférieures à  $Q_{fr-vert}$ , à la stratégie « d1 » pour des taxes carbone locales imposées inférieures à  $Q_{d-vert}$ . On résout l'inégalité  $profit(d1) \geq profit(o1)$  et on déduit la valeur de taxe carbone de frontière minimale à imposer en fonction de la valeur de taxe carbone domestique imposée pour rentabiliser la stratégie « d1 » sur « o1 » :  $Q_{fr(d1 \setminus o1)} = f(Q_d)$ . Pour cette proposition, en supposant que  $\frac{\gamma-1}{De_1(1-\beta)} \left( \frac{e_1}{e_1+\tau} K_{d1} - K_{o1} \right) < \frac{W}{D(e_1+\tau)}$ , on garantit que, pour toute taxe carbone domestique  $Q_d$  inférieure à  $Q_{d-vert}$ , la taxe carbone de frontière minimale à imposer pour favoriser « d1 » sur « o1 » :  $Q_{fr(d1 \setminus o1)}(Q_d)$ , reste inférieure à  $Q_{fr-vert}$ , la taxe carbone de frontière à partir de laquelle, la stratégie « o2 » est plus rentable que « o1 » en offshore.

Ensuite, pour des valeurs de taxe domestiques  $Q_d$ , plus importantes, telle que  $Q_{d-vert} \leq Q_d \leq Q_{d-stop}$ , « d2 » est meilleure que « d1 » en domestique. Ainsi, il faut comparer cette stratégie « d2 » à la stratégie de localisation offshore « o1 ». En comparant  $profit(d2) \geq profit(o1)$ , on détermine la fonction  $Q_{fr(d2 \setminus o1)} = f(Q_d)$  qui calcule pour chaque valeur de taxe carbone domestique imposée supérieure à  $Q_{d-vert}$ , la valeur de la taxe carbone de frontière qu'il faut imposer au minimum pour rentabiliser la stratégie « d2 » sur « o1 ». On admet que sur l'intervalle de taxe carbone domestique  $Q_d \in [Q_{d-vert}, Q_{d-stop}[$ , il existe une taxe carbone domestique qu'on note  $Q_d^*$ , telle que  $Q_{fr(d2 \setminus o1)}(Q_d^*) = Q_{fr-vert}$ . En effet, en imposant cette valeur de taxe carbone domestique  $Q_d^*$ , pour favoriser la stratégie « d2 » sur la stratégie « o1 », il faut imposer au minimum une taxe carbone de frontière  $Q_{fr(d2 \setminus o1)}(Q_d^*)$  qui s'avère égale à  $Q_{fr-vert}$ , la taxe carbone de frontière qui favorise la stratégie d'investissement vert sur l'ordinaire en offshore. Par conséquent, à partir de cette taxe carbone domestique  $Q_d^*$ , il faut plutôt comparer la rentabilité des stratégies « d2 » et « o2 » pour déduire la stratégie optimale pour l'entreprise en fonction des taxes carbone imposées. Par conséquent, pour des taxes carbone domestiques  $Q_d$  telle que  $Q_d^* \leq Q_d < Q_{d-stop}$ , en comparant  $profit(d2) \geq profit(o2)$ , on déduit l'équation  $Q_{fr(d2 \setminus o2)} = f(Q_d)$  qui calcule la valeur de taxe carbone de frontière pour chaque valeur de taxe carbone domestique qu'il faut au minimum imposer pour que la stratégie « d2 » s'avère meilleure que « o2 ».

Finalement, on mentionne que quand les taxes carbone domestique et de frontière dépassent respectivement  $Q_{d-stop}$  et  $Q_{fr-stop}$ , ne pas se lancer dans ce business s'avère la stratégie optimale. ■

**Proposition 3.6 :** Lorsque  $\frac{\gamma-1}{De_1(1-\beta)} \left( \frac{e_1}{e_1+\tau} K_{d1} - K_{o1} \right) \geq \frac{W}{D(e_1+\tau)}$ ,

- pour des taxes carbone locales  $Q_d \leq Q_d^*$ , si la taxe carbone de frontière appliquée  $Q_{fr} \geq Q_{fr(d1\setminus o1)}(Q_d)$ , la stratégie « d1 » est la stratégie optimale pour l'entreprise, sinon « o1 » est la stratégie optimale, avec  $Q_{fr(d1\setminus o1)}(Q_d) = \frac{e_1}{e_1+\tau} Q_d - \frac{W}{D(e_1+\tau)}$  et  $Q_{fr(d1\setminus o1)}(Q_d^*) = Q_{fr-vert}$  ce qui implique que  $Q_d^* = \frac{e_1+\tau}{e_1} \left( Q_{fr-vert} + \frac{W}{D(e_1+\tau)} \right)$  ;
- pour des taxes carbone domestiques  $Q_d^* \leq Q_d \leq Q_{d-vert}$ , si la taxe carbone de frontière appliquée est supérieure à  $Q_{fr(d1\setminus o2)}(Q_d) = \frac{e_1}{\beta \cdot e_1+\tau} \cdot Q_d - \frac{W+K_{o1}(1-\gamma)}{D(e_1+\tau)}$ , « d1 » est la stratégie optimale pour l'entreprise, sinon la stratégie « o2 » est optimale,
- pour des valeurs de taxe carbone locale  $Q_{d-vert} \leq Q_d \leq Q_{d-stop}$ , si la taxe carbone de frontière est supérieure à  $Q_{fr(d2\setminus o2)}(Q_d) = \frac{\beta \cdot e_1}{\beta \cdot e_1+\tau} \cdot Q_d - \frac{W+(K_{d1}-K_{o1}) \cdot (1-\gamma)}{D(e_1+\tau)}$ , la stratégie « d2 » est optimale pour l'entreprise, sinon c'est la stratégie « o2 » qui s'avère optimale,
- finalement ne pas se lancer dans le business est la stratégie optimale quand  $Q_d > Q_{d-stop}$  et  $Q_{fr} > Q_{fr-stop}$ .

*Preuve :*

Pour cette proposition, en supposant que  $\frac{\gamma-1}{De_1(1-\beta)} \left( \frac{e_1}{e_1+\tau} K_{d1} - K_{o1} \right) \geq \frac{W}{D(e_1+\tau)}$ , on garantit qu'il existe une valeur de taxe carbone domestique  $Q_d \setminus Q_d \leq Q_{d-vert}$ , qu'on note  $Q_d^*$ , pour laquelle on obtient  $Q_{fr(d1\setminus o1)}(Q_d^*) = Q_{fr-vert}$ . Par conséquent, pour des taxes carbone domestiques inférieures à  $Q_d^*$ , la fonction  $Q_{fr(d1\setminus o1)} = f(Q_d)$  permet de déduire en fonction des valeurs de taxe carbone de frontière imposées laquelle des stratégies « o1 » ou « d1 » est optimale. Toutefois, à partir de cette taxe carbone domestique,  $Q_d^*$ , il faut comparer les stratégies « d1 » et « o2 » pour déterminer la stratégie optimale pour l'entreprise quand  $Q_d \in [Q_d^*; Q_{d-vert}]$ . En comparant  $profit(d1) \geq profit(o2)$ , on déduit l'équation  $Q_{fr(d1\setminus o2)} = f(Q_d)$ , qui détermine pour chaque valeur de taxe carbone domestique, la valeur de taxe carbone de frontière qu'il faut au minimum imposer pour que la stratégie « d1 » soit meilleure que « o2 ». Ensuite, pour des taxes carbone locales  $Q_d$  plus importantes telles que  $Q_{d-vert} \leq Q_d < Q_{d-stop}$ , on compare la rentabilité des stratégies « d2 » et « o2 », pour déduire l'équation  $Q_{fr(d2\setminus o2)} = f(Q_d)$ , qui détermine pour chaque valeur de taxe carbone domestique, la valeur de taxe carbone de frontière qu'il faut au minimum imposer pour que la stratégie « d2 » soit meilleure que « o2 ».

Finalement, en imposant des taxes carbone locales supérieures à  $Q_{d-stop}$  et des taxes carbone de frontière supérieures à  $Q_{fr-stop}$ , la décision optimale pour l'entreprise consistera à ne pas se lancer dans le business. ■

A ce stade, une fois qu'on a étudié les décisions de CCL optimales des entreprises en fonction des valeurs de taxe carbone domestiques et de frontière, pour les deux cas identifiés (propositions 3.6 et 3.7), nous proposons d'analyser les résultats obtenus, pour mieux comprendre le comportement des entreprises sous un tel système législatif.

❖ *Impact de la différence des coûts fixes en offshore et en domestique*

A travers cette observation, on cherche à mettre en relief les différences entre le comportement stratégique optimal de l'entreprise pour chacun des deux cas identifiés avec les deux propositions 3.5 et 3.6, selon la condition qu'on a établie ;  $\frac{\gamma-1}{De_1(1-\beta)} \left( \frac{e_1}{e_1+\tau} K_{d1} - K_{o1} \right) < \frac{W}{D(e_1+\tau)}$  (i) ou  $\frac{\gamma-1}{De_1(1-\beta)} \left( \frac{e_1}{e_1+\tau} K_{d1} - K_{o1} \right) \geq \frac{W}{D(e_1+\tau)}$  (ii).

On note par  $N = \frac{\gamma-1}{e_1(1-\beta)} \left( \frac{e_1}{e_1+\tau} K_{d1} - K_{o1} \right)$ . On résume alors que :

- Pour la proposition 3.5, lorsque  $N < \frac{W}{D(e_1+\tau)}$  (i), il existe une taxe carbone domestique  $Q_d^* \in ]Q_{d-vert}; Q_{d-stop}[$  telle que  $Q_{fr(d2\setminus o1)}(Q_d^*) = Q_{fr-vert}$ . On souligne que dans ces conditions, l'entreprise peut migrer vers la stratégie « d2 » plus tôt (pour des plus petites valeurs de taxe carbone domestique). En fait, il existe une plage de taxe carbone domestique ( $Q_{d-vert} \leq Q_d < Q_d^*$ ) que le gouvernement peut imposer avec des taxes carbone de frontières précises  $Q_{fr(d2\setminus o1)}(Q_d)$  pour favoriser l'investissement local vert « d2 » sur la stratégie d'investissement en technologie ordinaire en offshore « o1 », sans risquer de favoriser l'investissement vert en offshore « o2 ».
- Alors que pour la proposition 3.6, lorsque  $N \geq \frac{W}{D(e_1+\tau)}$  (ii), la taxe carbone domestique  $Q_d^* \in ]0; Q_{d-vert}[$  est déterminée par l'expression  $Q_{fr(d1\setminus o1)}(Q_d^*) = Q_{fr-vert}$ . Dans ce cas, l'entreprise peut migrer vers la stratégie « d2 » un peu plus tard (pour de plus grandes valeurs de taxes carbone domestique et de frontière). En effet, afin de favoriser l'investissement local vert, le gouvernement doit imposer des taxes carbone locales élevées supérieures à la fois à  $Q_d^*$  et  $Q_{d-vert}$ , avec des taxes carbone de frontière élevées également  $Q_{fr(d2\setminus o2)}(Q_d)$  qui favorisent la stratégie « d2 » sur la stratégie « o2 ». En effet, pour une même taxe carbone domestique  $Q_d$  dans cet intervalle, l'investissement vert en offshore peut être la solution optimale lorsque la taxe carbone de frontière est supérieure à  $Q_{fr-vert}$  mais inférieure à  $Q_{fr(d2\setminus o2)}(Q_d)$ .

Afin de valider l'inégalité  $N < \frac{W}{D(e_1+\tau)}$  (i), et garantir l'investissement local vert pour des petites valeurs de taxes carbone, sachant que d'une part  $N = \frac{\gamma-1}{e_1(1-\beta)} \left( \frac{e_1}{e_1+\tau} K_{d1} - K_{o1} \right)$ , et d'autre part  $W = (L_o - L_d) + (K_{o1} - K_{d1}) + D[(C_o + C_T) - C_d]$ , le gouvernement a intérêt à faire tendre  $W$  vers 0. Dans les hypothèses du problème (section 3.1), nous avons bien précisé que le coût d'ouverture du site de production en offshore est moins important qu'en domestique ( $L_o \leq L_d$ ). Néanmoins, le coût d'installation de la technologie de production est plus important en offshore qu'en domestique ( $K_{o1} \geq K_{d1}$ ).

Par conséquent, à  $(L_o - L_d)$  fixe, plus la différence entre les coûts fixes d'installation des technologies ordinaires en domestique et en offshore est importante, plus  $(K_{o1} - K_{d1})$  augmente, plus  $W$  tend vers 0 et l'inégalité (i) sera validée.

Pour  $(K_{o1} - K_{d1})$  fixe, plus la différence entre les coûts fixes d'installation des technologies ordinaires en domestique et en offshore est faible, plus  $(L_o - L_d)$  diminue, plus  $W$  tend vers 0 et l'inégalité (i) sera validée.

Il est ainsi recommandé aux gouvernements de réduire les coûts fixes en domestique en optant vers des subventions pour l'investissement local afin de valider l'inégalité (i).

❖ *Analyses des fonctions  $Q_{fr} = f(Q_d)$*

Toutes les fonctions  $Q_{fr} = f(Q_d)$  sont des fonctions linéaires croissantes. Plus la taxe carbone domestique augmente, plus la taxe carbone de frontière doit augmenter, proportionnellement, pour pousser les entreprises à se localiser en domestique et faire face au problème de fuite de carbone.

On note que la pente de l'équation qui étudie la rentabilité entre les stratégies de localisation offshore (« o1 » ou « o2 ») et la stratégie d'investissement local vert « d2 » est moins importante que celle qui étudie la rentabilité entre les stratégies de localisation offshore (« o1 » ou « o2 ») et la stratégie d'investissement local ordinaire « d1 » de  $\beta$  fois. Nous concluons de ceci que pour une même augmentation de la taxe carbone domestique, une augmentation plus importante est nécessaire pour la taxe carbone de frontière pour passer de « o1 » (ou « o2 ») à « d1 » que pour passer de « o1 » (ou « o2 ») à « d2 ». Ceci s'explique par le fait que quand les taxes carbone augmentent et deviennent importantes, les décisions des entreprises deviennent très sensibles à la variation des taxes carbone. Il suffit d'une faible variation pour pousser les entreprises à se localiser en domestique, lorsque les taxes carbone sont élevées. Alors que pour les petites valeurs de taxe carbone, il faut une augmentation importante de cette taxe domestique suivie d'une augmentation proportionnelle de la taxe carbone de frontière pour favoriser la production domestique.

On note également que les valeurs de  $Q_d^*$  ainsi que  $Q_{d-inf}$  varient proportionnellement à  $\gamma$ , ce qui implique que pour les secteurs disposants de technologies vertes plus coûteuses que d'autres secteurs ( $\gamma$  plus important), le gouvernement doit leur imposer des taxes carbone locale et de frontière plus importantes pour les inciter à l'investissement local vert.

Toutefois,  $Q_{d-inf}$  varie proportionnellement à  $\beta$  et  $Q_d^*$  varie inversement proportionnelle à  $\beta$ . Par conséquent, pour des secteurs ayant des technologies vertes performantes avec un taux de réduction des émissions de carbone élevé par rapport aux technologies ordinaires, le gouvernement n'a pas besoin d'appliquer des taxes carbone assez élevées pour conduire à « d2 ». Néanmoins, il faut que la taxe carbone soit assez élevée pour dépasser  $Q_{d-inf}$  et ainsi favoriser « d2 ». Taxer les entreprises disposant de technologies vertes performantes est plus simple pour les gouvernements (plages de taxe plus étendues pour favoriser « d2 »).

### **3.5.3. Résolution numérique de MDL3 : Somme des coûts fixes et opérationnels moins importante en offshore ( $W \leq 0$ )**

Pour cette partie, nous adoptons le même exemple numérique détaillé dans la section 3.3.2 pour lequel on fixe  $\gamma = 1,5$  et  $\beta = 0,33$ . Puis, nous choisissons de fixer  $(L_o - L_d)$  et de faire varier  $(K_{o1} - K_{d1})$  pour valider tout d'abord l'inégalité (i) puis (ii).

Dans un premier temps, on estime que la différence entre les coûts d'installation des technologies en offshore et en local est de 44,4% du coût d'installation de la technologie en offshore, et on obtient ainsi l'inégalité (i) (on considère les mêmes coûts d'installation de la technologie ordinaire en offshore et en domestique que dans l'exemple 3.3.2). Dans ce cas, on suppose que le gouvernement accorde une subvention à l'entreprise, qu'on désigne par subvention locale, si elle investit en domestique. Une telle subvention permet de réduire le coût d'installation des technologies en domestique et ainsi favoriser la différence entre les coûts d'installation des technologies en offshore et en domestique.

Dans un deuxième temps, on estime que la différence entre les coûts d'installation des technologies en offshore et en locale est de seulement 11% du coût d'installation de la technologie en offshore, et on obtient alors l'inégalité (ii). On suppose alors que le coût

d'installation de la technologie ordinaire en offshore garde la même valeur :  $K_{o1} = 4500\$$ , et le coût d'installation de la technologie ordinaire en domestique augmente en passant à  $K_{d1} = 4000\$$ . Dans ce cas, on suppose que le gouvernement n'accorde pas de subvention à l'investissement local.

Nous illustrons dans le tableau 3.10 ci-dessous les décisions optimales de CCL en fonction des valeurs de taxes carbone domestique et de frontière pour ces deux cas. A travers le tableau 3.11, on compare entre le comportement stratégique et les performances de l'entreprise pour ces deux cas sous les mêmes valeurs de taxe carbone.

Tableau 3.10 : Décisions optimales de conception de CL sous une taxe carbone domestique et une taxe carbone de frontière pour  $W \leq 0$

Cas	Variations des taxes carbone de frontières en fonction des taxes carbone domestiques
<p>Premier cas</p> $\frac{N < W}{D(e_1 + \tau)}$	<p>Variation de la taxe carbone de frontière en fonction de la taxe carbone domestique pour le premier cas</p>
<p>Deuxième cas</p> $\frac{N \geq W}{D(e_1 + \tau)}$	<p>Variation de la taxe carbone de frontière en fonction de la taxe carbone domestique pour le deuxième cas</p>

Tableau 3.11 Impact des taxes carbone domestique et de frontière sur les décisions et performances des entreprises disposant ou non de subvention locale

$Q_d$	$Q_{fr}$	Premier cas : Avec subvention locale			Deuxième cas : sans subvention locale		
		Décision	Profit (\$)	Emission (t)	Décision	Profit (\$)	Emission (t)
5,19	4,45	« d2 »	5633.43	118,8	« o1 »	5631	420
7	9,33	« d2 »	5418,4	118,8	« o2 »	3581,8	178,8
7	10	« d2 »	5418,4	118,8	« d1 »	3480	360
10	9,5	« d2 »	5062	118,8	« o2 »	3551	178,8
30	9	« o1 »	3720	420	« o1 »	3720	420
30	10	« o2 »	3462	178.8	« o2 »	3462	178.8
30	14,35	« d2 »	2686	118,8	« o2 »	2684	178.8

Dans le premier cas, où la différence entre les coûts d'installation des technologies en offshore et en domestique est importante (44%), il suffit d'imposer une taxe carbone domestique  $Q_d = Q_{d-vert} = 5,19\$/tCO_2$ , avec une taxe carbone de frontière  $Q_{fr} = Q_{fr(d1\o1)}(Q_{d-vert}) = 4,45\$/tCO_2$ , pour inciter l'entreprise à l'investissement local vert. Cependant, sous de telles valeurs de taxes carbone domestique et de frontière, la décision optimale pour l'entreprise dans le deuxième cas, où la différence entre les coûts d'installation des technologies en offshore et en domestique est faible (11%), s'avère la localisation en offshore avec une technologie ordinaire « o1 ». Avec la subvention locale, le coût d'installation de la technologie ordinaire en domestique est réduit à 2500\$ au lieu de 4000\$. Le gouvernement réussit ainsi à faire face au problème de fuite de carbone et à pousser l'entreprise à réduire les émissions de carbone de sa CL de 71% pour une baisse de profit de seulement 0,03% par rapport au profit généré sans la subvention locale sous ces valeurs de taxe carbone domestique et de frontière.

Considérons maintenant que le gouvernement impose une taxe carbone domestique  $Q_d = 7\$/tCO_2$  avec une taxe carbone de frontière  $Q_{fr} = 9,33\$/tCO_2$ .

Dans le premier cas, avec la subvention locale, étant donné que la taxe carbone domestique est supérieure à  $Q_{d-vert}$  et inférieure à  $Q_d^*$ , avec la taxe carbone de frontière imposée, la décision optimale est « d2 ». En fait, sous une taxe carbone domestique  $Q_d = 7\$/tCO_2$  lorsque la taxe carbone de frontière imposée est supérieure à  $Q_{fr(d2\o1)}(7) = 4,96\$/tCO_2$  la décision optimale est « d2 ». sinon la stratégie optimale est « o1 ».

Néanmoins, pour le deuxième cas, sans la subvention locale, la taxe carbone domestique imposée est supérieure à  $Q_d^*$  et inférieure à  $Q_{d-vert}$ . Par conséquent, si la taxe carbone de frontière imposée ne dépasse pas  $Q_{fr-vert}$ , la stratégie « o1 » s'avère la meilleure, sinon « o2 » devient la stratégie optimale jusqu'à une valeur de taxe de frontière  $Q_{fr(d1\o2)}(7) = 9,89\$/tCO_2$ , au-delà de laquelle « d1 » est plutôt la stratégie optimale. On conclut alors que pour les valeurs de taxes carbone de notre exemple, la décision optimale pour l'entreprise est « o2 ». En imposant de telles valeurs de taxes carbone, le gouvernement réussit à inciter à l'investissement vert en offshore et à pousser l'entreprise à réduire ses émissions globales de 57% par rapport au niveau d'émission avec la stratégie « o1 ».

Dans un deuxième temps, on considère que pour la même taxe carbone domestique  $Q_d = 7\$/tCO_2$ , la taxe carbone de frontière imposée passe à  $10\$/tCO_2$ .

La décision optimale dans ces conditions, pour le premier cas, reste toujours « d2 ». Toutefois, dans le deuxième cas, le gouvernement pousse l'entreprise à s'installer en domestique avec une technologie ordinaire « d1 ». Sous de telles conditions, cette stratégie engendre à l'entreprise une baisse de son profit de 2% avec une augmentation des émissions de sa CL de 101% par rapport à son profit et à ses émissions engendrés sous la stratégie « o2 ». On déduit que de telles valeurs de taxes carbone domestique et de frontière, bien qu'elles favorisent l'investissement local, engendrent un double impact négatif sur l'entreprise : ne permettent pas de réduire les émissions globales des CLs et génèrent une baisse du profit des entreprises.

On considère dans un autre exemple une taxe carbone domestique  $Q_d = 10\$/tCO_2$  et une taxe carbone de frontière  $Q_{fr} = 9,5\$/tCO_2$ .

Pour le premier cas, pour une taxe carbone domestique  $Q_d = 10\$/tCO_2$ , on déduit que  $Q_{fr(d2\setminus o1)}(10) = 5,83\$/tCO_2$ . En imposant une taxe carbone de frontière de  $Q_{fr} = 9,5\$/tCO_2$ , la stratégie optimale est « d2 ».

Pour le deuxième cas, sans la subvention locale, la stratégie optimale s'avère « o2 ». Afin de favoriser l'investissement local vert « d2 », pour le deuxième cas, il faut imposer une taxe carbone de frontière supérieure à  $Q_{fr(d2\setminus o2)}(10) = 13,635\$/tCO_2$ .

Il est évident que le système législatif qui permet de favoriser l'investissement local vert, dans ce cas, où la différence des coûts fixes entre les localisations est faible, dégrade considérablement les performances économiques des entreprises et nuit à leur compétitivité, étant donné qu'il faut imposer des taxes carbone domestiques et par conséquent de frontières élevées pour inciter à l'investissement local vert. On note bien que dans ce cas, pour faire face au problème de fuite de carbone, le gouvernement peut favoriser l'investissement vert en offshore pour certaines valeurs de taxe carbone locale et de frontières peu élevées permettant de réduire au mieux les émissions de carbone de la CL pour un minimum de baisse de profit par rapport aux stratégies « o1 » et « d1 ».

Pour le premier cas, lorsqu'on considère une taxe carbone domestique supérieure à  $Q_d^*$ , telle que  $Q_d = 30\$/tCO_2$ , avec une taxe de frontière de  $9\$/tCO_2$ , la stratégie « o1 » est optimale, alors que pour une taxe de frontière de  $10\$/tCO_2$ , la stratégie « o2 » est la plus rentable. Cependant, pour favoriser l'investissement local vert « d2 », il faut imposer une taxe de frontière allant jusqu'à  $14,34\$/tCO_2$ . Nous concluons, qu'en optant vers la réduction des coûts fixes en domestique, le gouvernement peut réussir à favoriser l'investissement local vert pour des faibles valeurs de taxes carbone domestique et de frontières. Dans ce cas, il est plutôt recommandé au gouvernement de ne pas imposer des taxes carbone locales assez élevées pour ne pas dépasser  $Q_d^*$  et être par conséquent obligé d'imposer des taxes carbone de frontière très élevées pour favoriser l'investissement vert en domestique plutôt qu'en offshore.

Finalement, on note que le gouvernement réussit à inciter à l'investissement local vert pour des valeurs de taxes carbone de frontière inférieures aux valeurs de taxes carbone domestiques imposées pour le premier cas, en réduisant les coûts fixes en domestique. Toutefois, lorsque la différence entre les coûts d'installation des technologies en offshore et en locale est faible, pour que les taxes carbone de frontière imposées désavantagent la stratégie la plus polluante « o1 » en faveur des autres stratégies « o2 », ou « d1 », ou encore « d2 », elles doivent être supérieures aux taxes carbone locales imposées.

On illustre ainsi que le gouvernement peut parvenir à réduire les coûts fixes en domestique par le biais des subventions locales, et ainsi réussir à inciter les entreprises à l'investissement local vert pour des plus petites valeurs de taxes carbone domestique et de frontière.

Dans ce qui suit, nous étudions l'impact des taxes carbone domestiques et de frontière, dans le cas où les coûts fixes et opérationnels sont plus importants en offshore qu'en domestique.

### 3.5.4. Résolution analytique du modèle *MDL3* : Somme des coûts fixes et opérationnels plus importante en offshore ( $W > 0$ )

En résolvant le modèle *MDL1*, qui n'intègre qu'une taxe carbone domestique, et en considérant que la somme des coûts fixes et opérationnels de la technologie ordinaire est moins importante en domestique qu'en offshore ( $W > 0$ ), nous avons bien souligné qu'une telle législation peut être efficace dans certains cas en incitant à l'investissement local vert et poussant les entreprises à réduire ainsi leurs émissions de carbone. Toutefois, nous avons également remarqué que cet outil législatif de taxe carbone domestique peut pousser les entreprises dans certains autres cas à se localiser en offshore afin d'échapper à la taxe carbone, provoquant ainsi le problème de fuite de carbone. Ce problème a été repéré dans deux cas de figures différents :

- Dans le premier cas, lorsque  $< \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{1-\beta}$ , autrement dit la technologie verte disponible est très chère par rapport à l'ordinaire ( $\gamma$  grand), il existe une taxe carbone domestique qu'on a notée  $Q_{d(o1\d1)}$  à partir de laquelle l'installation de la technologie ordinaire en offshore devient plus rentable qu'en domestique. Néanmoins, en imposant en plus une taxe carbone de frontière, le gouvernement peut défavoriser la décision de délocalisation en faveur de l'investissement local. Nous proposons d'étudier sous quelles conditions un tel système législatif de taxes carbone locale et de frontière peut faire face aux fuites de carbone?
- Dans un deuxième cas, lorsque  $\geq \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{1-\beta}$ , autrement dit pour les secteurs qui disposent de technologie verte pas très chère par rapport à l'ordinaire, lorsque le gouvernement impose une taxe carbone domestique assez élevée qui dépasse la valeur de  $Q_{d(o1\d2)}$ , l'entreprise décide de s'installer en offshore avec une technologie ordinaire pour échapper aux coûts excessifs des émissions de carbone. Nous admettons, que lorsque le gouvernement impose avec les taxes carbone domestiques supérieures à  $Q_{d(o1\d2)}$ , des taxes carbone de frontières bien précises, il peut réussir à faire face à la délocalisation et au problème de fuite de carbone.

Dans la même optique, nous continuons à distinguer ces deux cas sous lesquels on a repéré le problème de fuite de carbone, selon que le surcoût de la technologie verte disponible est élevé ou pas, pour étudier les décisions optimales de CCL en fonction des variations des taxes carbone locales et de frontières imposées.

Commençons par considérer des secteurs pour lesquels les technologies vertes disponibles ne sont pas très chères par rapport aux technologies ordinaires.

**Proposition 3.7 :** Lorsque la somme des coûts fixes et opérationnels de la technologie ordinaire en offshore est plus importante qu'en domestique, ( $W > 0$ ) et pour des secteurs disposant de technologie verte pas très chère par rapport à l'ordinaire ( $W \geq \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{1-\beta}$ ),

- pour des taxes carbone domestiques  $Q_d \leq Q_{d-vert}$ , la stratégie « d1 » est optimale quelle que soit la taxe carbone de frontière appliquée,

- pour des taxes carbone domestiques  $Q_{d-vert} \leq Q_d \leq Q_{d(o1\d2)}$ , la stratégie « d2 » est la stratégie optimale pour l'entreprise quelle que soit la taxe carbone de frontière appliquée,
- pour des taxes carbone domestiques  $Q_{d(o1\d2)} \leq Q_d \leq Q_d^*$  la stratégie « d2 » est optimale pour l'entreprise lorsque la taxe carbone de frontière est inférieure à  $Q_{fr(o1\d2)}(Q_d)$ , avec  $Q_{fr(o1\d2)}(Q_d) = \frac{e_1}{e_1+\tau} \cdot \beta \cdot Q_d - \frac{W+K_{d1}(1-\gamma)}{D(e_1+\tau)}$  et  $Q_{fr(o1\d2)}(Q_d^*) = Q_{fr-vert}$  ce qui implique que  $Q_d^* = \frac{e_1+\tau}{\beta e_1} (Q_{fr-vert} + \frac{W+K_{d1}(1-\gamma)}{D(e_1+\tau)})$  ;
- Pour des taxes carbone domestiques  $Q_d^* \leq Q_d \leq Q_{d-stop}$ , la stratégie « d2 » est la stratégie optimale pour l'entreprise lorsque la taxe carbone de frontière est supérieure à  $Q_{fr(o2\d2)}(Q_d) = \frac{\beta \cdot e_1}{\beta \cdot e_1 + \tau} \cdot Q_d - \frac{W+(K_{d1}-K_{o1}) \cdot (1-\gamma)}{D(e_1+\tau)}$ ,
- Quand  $Q_d > Q_{d-stop}$  et  $Q_{fr} > Q_{fr-stop}$ , ne pas se lancer dans le «business » est la stratégie optimale.

*Preuve :*

Lorsque la taxe carbone domestique impliquée est inférieure à  $Q_{d(o1\d2)}$ , les stratégies d'investissement locales restent toujours meilleures que la stratégie de délocalisation. Dans ce cas, quelle que soit les taxes carbone de frontière appliquées, qui ne font que désavantager les stratégies offshores, seules les valeurs de taxe carbone domestique déterminent si « d1 » ou « d2 » est la stratégie optimale. Par conséquent, lorsque la taxe carbone domestique est inférieure à  $Q_{d-vert}$ , la stratégie « d1 » est la meilleure, alors que pour des taxes carbone supérieures à  $Q_{d-vert}$  et inférieures à  $Q_{d(o1\d2)}$ , la stratégie « d2 » devient optimale. Pour des valeurs de taxe carbone domestique supérieures à  $Q_{d(o1\d2)}$  et en absence de taxe carbone de frontière, la délocalisation s'avère une solution plus rentable aux entreprises. Toutefois, en imposant des taxes carbone de frontière, les coûts des produits fabriqués en offshore augmentent et risquent d'être plus importants que ceux des produits fabriqués en domestique sous certaines valeurs de taxe carbone de frontière et domestique. A partir de taxes carbone domestiques supérieures à  $Q_{d(o1\d2)}$ , pour que le gouvernement réussisse à faire face au problème de fuite de carbone, il faut que le profit de l'entreprise avec la stratégie « o1 » sous la taxe carbone de frontière imposée soit inférieur au profit de l'entreprise avec la stratégie « d2 » sous la taxe carbone domestique considérée. On déduit alors pour vérifier que  $profit(d2) \geq profit(o1)$ , il faut imposer une taxe carbone domestique  $Q_d$  supérieure à  $Q_{d(o1\d2)}$  avec une taxe carbone de frontière supérieure à  $Q_{fr(o1\d2)}(Q_d) = \frac{e_1}{e_1+\tau} \cdot \beta \cdot Q_d - \frac{W+K_{d1}(1-\gamma)}{D(e_1+\tau)}$ . Néanmoins, en imposant une taxe carbone domestique  $Q_d$  supérieure à  $Q_d^*$ , vérifiant  $Q_{fr(o1\d2)}(Q_d^*) = Q_{fr-vert}$ , il faut comparer les profits de l'entreprise avec la stratégie « o2 » et « d2 » pour déduire la stratégie optimale. On déduit alors que lorsque la taxe carbone domestique imposée  $Q_d$  est supérieure à  $Q_d^*$ , la stratégie « o2 » est optimale lorsque la taxe carbone de frontière appliquée est supérieure à  $Q_{fr(o2\d2)}(Q_d) = \frac{\beta \cdot e_1}{\beta \cdot e_1 + \tau} \cdot Q_d - \frac{W+(K_{d1}-K_{o1}) \cdot (1-\gamma)}{D(e_1+\tau)}$ .

Finalement, lorsque la taxe carbone appliquée dépasse  $Q_{d-stop}$  et la taxe carbone de frontière dépasse  $Q_{fr-stop}$ , il s'avère que l'entreprise n'aura plus intérêt à investir dans ce projet. ■

Regardons maintenant l'impact des taxes carbone domestiques et de frontière, lorsque le surcoût de la technologie verte est très élevé par rapport à l'ordinaire.

**Proposition 3.8.** Lorsque la somme des coûts fixes et opérationnels de la technologie ordinaire en offshore est plus importante qu'en domestique ( $W > 0$ ) et pour des secteurs disposant de technologie verte très chère par rapport à l'ordinaire ( $W < \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{1-\beta}$ ),

- pour des taxes carbone domestiques  $Q_d \leq Q_{d(o1\d1)}$ , la stratégie « d1 » est la stratégie optimale quelle que soit la taxe carbone de frontière appliquée,
- pour des taxes carbone domestiques  $Q_{d(o1\d1)} \leq Q_d \leq Q_{d-vert}$ , la stratégie « d1 » est optimale pour l'entreprise lorsque la taxe carbone de frontière est inférieure à  $Q_{fr(o1\d1)}(Q_d) = \frac{e_1}{e_1+\tau} \cdot Q_d - \frac{W}{D(e_1+\tau)}$ ,
- pour des taxes carbone domestiques  $Q_{d-vert} \leq Q_d \leq Q_d^*$ , la stratégie « d2 » est optimale pour l'entreprise lorsque la taxe carbone de frontière est supérieure à  $Q_{fr(o1\d2)}(Q_d) = \frac{e_1}{e_1+\tau} \cdot \beta \cdot Q_d - \frac{W+K_{d1}(1-\gamma)}{D(e_1+\tau)}$ ,
- pour des taxes carbone locales  $Q_d^* \leq Q_d \leq Q_{d-stop}$ , la stratégie « d2 » est optimale pour l'entreprise lorsque la taxe carbone de frontière est supérieure à  $Q_{fr(o2\d2)}(Q_d) = \frac{\beta \cdot e_1}{\beta \cdot e_1 + \tau} \cdot Q_d - \frac{W+(K_{d1}-K_{o1}) \cdot (1-\gamma)}{D(e_1+\tau)}$  ;
- quand  $Q_d > Q_{d-stop-2}$  et  $Q_{fr} > Q_{fr-stop-2}$ , ne pas se lancer dans « le business » est la stratégie optimale.

*Preuve :*

Dans le cas où on considère que les technologies disponibles sont assez chères par rapport aux technologies ordinaires, autrement dit on admet que  $W < \frac{K_{d1}(\gamma-1)}{1-\beta}$ , imposer une taxe carbone domestique au-delà de la valeur de  $Q_{d(o1\d1)}$  favorise la stratégie de délocalisation « o1 » sur la stratégie « d1 ». Toutefois, lorsque le gouvernement implique une taxe carbone de frontière, avec une taxe carbone domestique supérieure à  $Q_{d(o1\d1)}$  et qui reste inférieure à  $Q_{d-vert}$ , il réussit à rentabiliser la stratégie « d1 » pour qu'elle soit optimale pour l'entreprise pourvu que la taxe carbone de frontière appliquée dépasse  $Q_{fr(o1\d1)}(Q_d) = \frac{e_1}{e_1+\tau} \cdot Q_d - \frac{W}{D(e_1+\tau)}$ . Plus encore, imposer une taxe carbone domestique plus élevée accompagnée d'une taxe carbone de frontière adéquate peut avantager la stratégie « d2 », qui n'était pas envisageable lorsque les technologies vertes disponibles sont très chères. Lorsque le gouvernement impose une taxe carbone domestique  $Q_d$  supérieure à  $Q_{d-vert}$ , la stratégie « d2 » est optimale pour l'entreprise à condition que la taxe carbone de frontière dépasse  $Q_{fr(o1\d2)}(Q_d) = \frac{e_1}{e_1+\tau} \cdot \beta \cdot Q_d - \frac{W+K_{d1}(1-\gamma)}{D(e_1+\tau)}$ . De plus, pour une taxe carbone domestique supérieure ou égale à  $Q_d^*$  telle que  $Q_{fr(o1\d2)}(Q_d^*) = Q_{fr-vert}$ , la stratégie « o2 » peut s'avérer plus intéressante que « d2 » pour certaines valeurs de taxe carbone de frontières. En fait, « d2 » reste la stratégie optimale pour l'entreprise, pourvu qu'elle permette à l'entreprise d'atteindre un meilleur profit qu'avec la stratégie « o2 » sous les taxes carbone appliquées. Dans ce cas, il faut imposer avec la taxe carbone domestique  $Q_d$  qui est supérieure ou égale à

$Q_d^*$ , une taxe carbone de frontière supérieure à

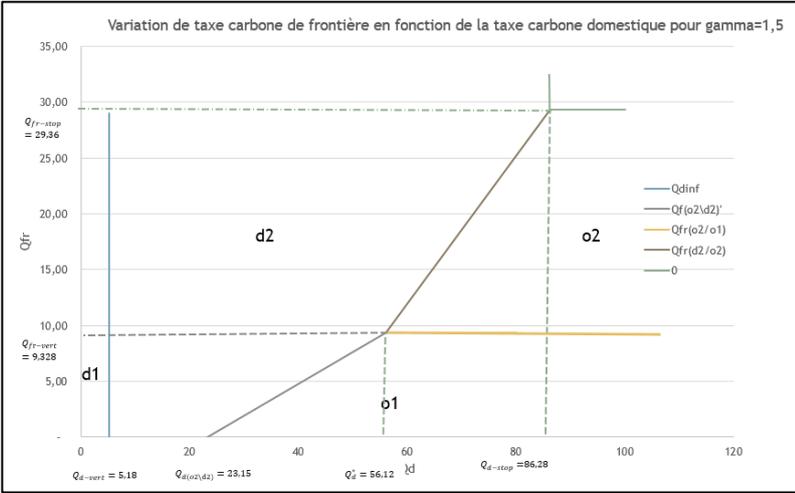
$$Q_{fr(o2\d2)}(Q_d) = \frac{\beta \cdot e_1}{\beta \cdot e_1 + \tau} \cdot Q_d - \frac{W + (K_{d1} - K_{o1}) \cdot (1 - \gamma)}{D(e_1 + \tau)}$$

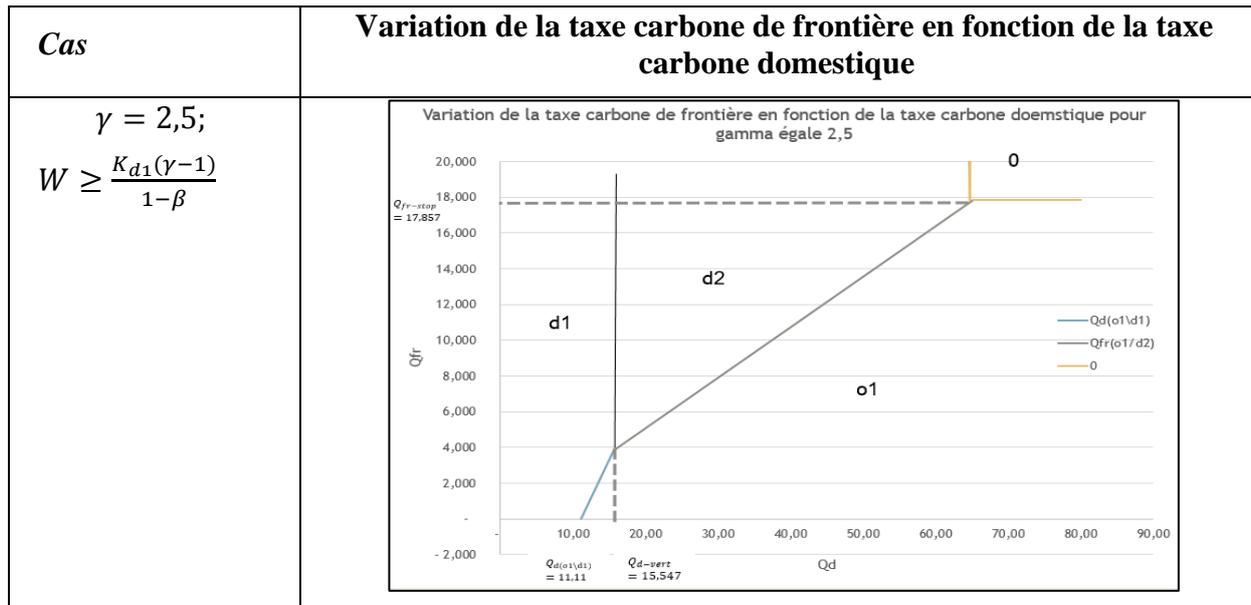
Finalement lorsque la taxe carbone domestique dépasse  $Q_{d-stop}$  et la taxe carbone de frontière dépasse  $Q_{fr-stop}$ , il s'avère que l'entreprise n'aura plus intérêt à investir dans ce projet. ■

### 3.5.5. Résolution numérique de MDL3 : Coûts fixes et opérationnels plus importants en offshore ( $W > 0$ )

Pour cette partie, on adopte le même exemple numérique détaillé dans 3.1 qui permet de vérifier que  $W > 0$ . Puis, pour le premier cas, afin de vérifier que la technologie verte disponible n'est pas très chère par rapport à l'ordinaire et ainsi  $W < \frac{K_{d1}(\gamma - 1)}{1 - \beta}$ , on fixe  $\gamma = 1,5$ . Pour le deuxième cas, afin de vérifier que la technologie verte disponible est assez chère par rapport à l'ordinaire, et ainsi  $W \geq \frac{K_{d1}(\gamma - 1)}{1 - \beta}$ , on fixe  $\gamma = 2$ . On résout le modèle MDL3, pour ces deux exemples numériques, et on illustre nos résultats dans le tableau 3.12 ci-dessous.

Tableau 3.12. Décisions optimales de CCL sous une taxe carbone domestique et une taxe carbone de frontière pour  $W \leq 0$

Cas	Variation de la taxe carbone de frontière en fonction de la taxe carbone domestique
$\gamma = 1,5$ ; $W < \frac{K_{d1}(\gamma - 1)}{1 - \beta}$	 <p>Variation de taxe carbone de frontière en fonction de la taxe carbone domestique pour gamma=1,5</p> <p>Le graphique illustre la relation entre la taxe carbone domestique (<math>Q_d</math>) sur l'axe des abscisses (0 à 120) et la taxe carbone de frontière (<math>Q_{fr}</math>) sur l'axe des ordonnées (0 à 35). La courbe principale, <math>Q_{fr(o2\d2)}</math>, est une fonction linéaire croissante. Des seuils critiques sont indiqués par des lignes verticales et horizontales : <math>Q_{d-vert} = 5,18</math>, <math>Q_{d(o2\d2)} = 23,15</math>, <math>Q_d = 56,12</math>, et <math>Q_{d-stop} = 86,28</math> sur l'axe des abscisses ; <math>Q_{fr-vert} = 9,328</math> et <math>Q_{fr-stop} = 29,36</math> sur l'axe des ordonnées. Les zones d1, d2, o1 et o2 sont délimitées par ces seuils. Une légende à droite identifie les courbes : <math>Q_{dinf}</math> (bleue), <math>Q_{fr(o2\d2)}</math> (noire), <math>Q_{fr(o2/o1)}</math> (orange), <math>Q_{fr(d2/o2)}</math> (verte), et 0 (grise).</p>



D'une façon générale, on note que dans les deux cas, la taxe carbone de frontière élargit la zone du plan où la stratégie « d2 » est optimale. Ainsi pour favoriser la production locale verte, le gouvernement peut varier la taxe carbone de frontière proportionnellement à la taxe carbone domestique à partir de la valeur de taxe carbone domestique qui en absence de taxe de frontière poussait les entreprises à se délocaliser.

Considérons une taxe carbone domestique,  $Q_d = 11,12\$/tCO_2$ . Il s'avère que pour le premier cas, pour lequel l'entreprise dispose de technologie verte pas très chère par rapport à l'ordinaire ( $\gamma = 1,5$ ), la décision optimale est l'investissement en technologie verte en domestique même en absence de taxe carbone de frontière. Cependant, pour le deuxième cas, où l'entreprise dispose de technologie verte qui est chère par rapport à l'ordinaire ( $\gamma = 2,5$ ), l'entreprise choisit la délocalisation en offshore avec une technologie ordinaire sous une telle taxe carbone domestique et en absence de taxe carbone de frontière. On note ainsi que les secteurs qui disposent de technologies vertes très chères par rapport aux ordinaires sont plus disposés au risque des fuites de carbone. Il est aussi à noter que la valeur de la taxe carbone domestique considérée est inférieure à  $Q_{d-vert}$  dans le deuxième cas, sachant que  $Q_{d-vert} = 15,55\$/tCO_2$ . Par conséquent, pour faire face à ce problème de délocalisation sous cette taxe carbone domestique imposée  $Q_d = 11,12\$/tCO_2$ , le gouvernement doit imposer une taxe carbone de frontière, supérieure ou égale à  $Q_{fr(d1\o1)} = 0,076\$/tCO_2$ , pour pousser l'entreprise à la stratégie « d1 », et ainsi à réduire ses émissions de 14% pour une baisse de profit de 0,04% par rapport aux émissions et au profit engendrés par la stratégie « o1 ». Pour les entreprises de ce secteur ( $\gamma = 2,5$ ), il faut imposer une taxe carbone domestique  $Q_d$  supérieure à  $Q_{d-vert} = 15,55\$/tCO_2$  avec une taxe carbone de frontière au moins égale à  $Q_{fr(d2\o1)}(Q_d)$ . A titre d'exemple, en imposant une taxe carbone domestique  $Q_d = 16\$/tCO_2$ , il faut imposer une taxe carbone de frontière d'au moins  $Q_{fr(d2\o1)}(Q_d) = 3,93\$/tCO_2$  pour inciter les entreprises de ce secteur à l'investissement local vert.

Pour les entreprises du premier cas ( $\gamma = 1,5$ ), en imposant une taxe carbone domestique de valeur supérieure ou égale à  $Q_{d(o1\o2)} = 23,15\$/tCO_2$ , et en absence de taxe carbone de frontière, l'entreprise décide de s'installer en offshore avec une technologie ordinaire. Par contre, en imposant une taxe carbone de frontière de  $Q_{fr} = 0,5\$/tCO_2$ , la décision optimale pour l'entreprise devient « d2 » au lieu de « o1 », permettant ainsi à l'entreprise de réduire ses

émissions de carbone de 72% pour une baisse de profit de 0,003%. En effet, avec une taxe carbone domestique  $Q_d = 23,15\$/tCO_2$ , il suffit d'imposer une taxe carbone de frontière supérieure à  $Q_{fr(d2\setminus o1)}(23,15) = 0,0005\$/tCO_2$ , pour que le gouvernement puisse faire face à la délocalisation des entreprises et au problème de fuite de carbone en rentabilisant la stratégie « d2 » sur « o1 ».

Sous cette taxe carbone domestique de  $Q_d = 23,15\$/tCO_2$ , la décision optimale pour une entreprise qui dispose de technologies vertes très chères par rapport à l'ordinaire ( $\gamma = 2,5$ ), est également l'investissement en technologie ordinaire en offshore « o1 » en absence de taxe carbone de frontière. Toutefois, pour inciter cette entreprise à l'investissement local vert, en dépit du surcoût de la technologie ordinaire, le gouvernement doit imposer une taxe carbone de frontière supérieure ou égale à  $Q_{fr(d2\setminus o1)} = 5,96\$/tCO_2$ .

Il est à noter que pour les entreprises de ce secteur qui disposent de technologies vertes chères ( $\gamma = 2,5$ ), l'investissement vert en offshore ne peut pas être envisageable. En effet, pour une taxe carbone supérieure à  $Q_{fr-stop} = 4,19\$/tCO_2$ , l'entreprise ne peut plus dégager un profit positif en offshore avec la technologie verte. Dans ce cas, l'entreprise continue à utiliser la technologie ordinaire en offshore pourvu qu'elle soit plus rentable que les stratégies d'investissement local sous les taxes carbone imposées, et qu'elle permet à l'entreprise de générer un profit positif. Pour ce cas, on note  $Q_{fr-stop}$  la taxe carbone de frontière au-delà de laquelle l'entreprise ne dégage pas un profit positif avec la stratégie « o1 ».

Cependant, pour les entreprises disposant de technologie verte pas très chère par rapport à l'ordinaire, le risque de favoriser l'investissement vert en offshore sous certaines valeurs de taxe carbone peut être considéré à partir de valeurs de taxe carbone domestique supérieures à  $Q_d^* = 56,12\$/tCO_2$ . A titre d'exemple, en imposant une taxe carbone domestique  $Q_d = 60\$/tCO_2$ , avec une taxe carbone de frontière supérieure à  $Q_{fr-vert} = 9,33\$/tCO_2$ , et inférieure à  $Q_{fr(d2\setminus o2)}(Q_d) = 11,9\$/tCO_2$ , la stratégie optimale est « o2 ». Pour le deuxième cas, afin de favoriser l'investissement local vert sous une taxe carbone domestique de  $Q_d = 60\$/tCO_2$ , il faut imposer une taxe carbone de frontière supérieure à  $Q_{fr(d2\setminus o1)}(Q_d) = 16,38\$/tCO_2$ .

D'une façon générale, on souligne que dans ces deux cas, la taxe carbone de frontière s'avère bien une solution de recours pour faire face aux problèmes de fuites de carbone dus à la non homogénéité entre les taxes carbone dans le monde.

Dans les travaux de Drake (2012), l'auteur a utilisé l'hypothèse que les taxes carbone domestique et de frontière sont égales dans une alternative d'homogénéiser les taxes carbone afin d'étudier le problème de fuite de carbone. Néanmoins, dans nos travaux, nous venons de montrer que la taxe carbone de frontière ne doit pas être égale à la taxe carbone domestique pour être efficace pour faire face au problème de fuite de carbone. En effet, nous venons de démontrer analytiquement que la taxe carbone de frontière nécessaire pour booster la production locale verte peut être inférieure à la taxe domestique imposée. Nous avons illustré à travers les exemples que dans certains cas, il suffit d'une très faible valeur de taxe carbone de frontière pour balancer les coûts de production des entreprises domestiques et offshore et favoriser l'investissement local vert.

Toutefois, il est à signaler qu'une telle mesure de taxe carbone de frontière peut prendre du temps pour être appliquée et envisagée, vu qu'elle vient en contradiction avec les conventions de l'OMS à propos du libre-échange des marchandises et qu'elle nécessite une infrastructure administrative développée pour assurer la traçabilité et le Reporting des émissions de carbone

des produits fabriqués en offshore. Néanmoins, sous les menaces environnementales grandissantes engendrées par les émissions de carbone, les prochaines COP pourront peut-être favoriser un terrain d'entente entre ces conventions et les mesures de taxation de carbone nécessaires pour garantir l'efficacité de cet outil.

### **Conclusion**

A travers ce chapitre, nous avons mis en évidence un aspect crucial de la législation de la taxe carbone, à savoir la non homogénéité de cette législation entre les pays et son impact sur les décisions stratégiques des entreprises et leurs performances. En modélisant et résolvant un problème de localisation et de choix de technologie dans le contexte de taxe carbone non homogène, nous avons mis l'accent sur la problématique de fuite de carbone et ses circonstances. Nous pensons que nos résultats peuvent servir aux entreprises afin de les assister dans leurs prises de décisions stratégiques optimales, comme ils peuvent fournir aux gouvernements des pistes d'amélioration des législations de carbone existantes en mettant l'accent sur leurs apports et limites. Cette piste de recherche reste prometteuse vu l'enjeu qui se cache derrière le problème de fuite de carbone et son impact sur l'efficacité de l'outil législatif environnemental. Dans le chapitre suivant, nous abordons une nouvelle problématique de CCL sous la législation de taxe carbone, tout en mettant en relief un autre aspect fondamental de cette législation à savoir sa progressivité et son caractère dynamique qui a été négligé dans la littérature existante.

**Chapitre IV : Analyse de l'impact  
d'une taxe carbone progressive sur  
la décision d'investissement  
stratégique des chaînes logistiques et  
leurs performances**

## Introduction

Le principe de la législation de taxe carbone est d'imposer des coûts supplémentaires sur les émissions de carbone des entreprises, dans l'objectif de les inciter à l'investissement vert qui leur permet de réduire leurs émissions et ainsi les coûts d'émission imposés par cette taxe. Dans cette optique, afin de garantir l'acceptation d'un tel outil par les industriels et dans le but de leur fournir les bonnes conditions pour une transition fluide vers des technologies vertes moins émettrices de carbone, les gouvernements optent généralement pour des stratégies de taxation de carbone progressives. Ils lancent ainsi la législation de taxe carbone avec des prix plus au moins bas, et communiquent leurs plans d'incrémentation du prix de carbone au cours des années afin d'atteindre des prix de carbone cibles au bout d'un horizon bien défini (Chelly et al., 2018b).

De telles législations progressives auront un impact sur les décisions stratégiques d'investissement technologique de la CL. En effet, il peut s'avérer intéressant pour l'entreprise d'investir en technologie verte dès la première année d'imposition de la taxe carbone afin de profiter de la performance environnementale de cette technologie et réduire au mieux ses coûts d'émission. Comme il peut s'avérer plus rentable de retarder cette décision d'investissement à l'année où l'augmentation du prix de carbone devient importante au point de favoriser l'investissement vert. L'entreprise peut aussi décider de ne pas investir en technologie verte, et même d'arrêter son business, si la valeur de la taxe carbone cible à atteindre sur l'horizon de planification se trouve très élevée. Dans ce contexte, il est crucial pour les entreprises d'étudier leurs décisions d'investissement en prenant en considération cet aspect progressif de la taxe carbone afin de déterminer le moment opportun d'investissement en green.

Il est à souligner, qu'à travers l'étude de la littérature, nous avons bien mis en évidence que cet aspect dynamique de la taxe carbone a été négligé dans les travaux existants. A travers ce chapitre, nous contribuons à la littérature en développant un modèle multi-périodes de choix de technologie sous une législation de taxe carbone progressive. Dans un premier lieu, en adoptant un modèle de taxe carbone similaire au modèle de taxe carbone Canadien, nous résolvons analytiquement et numériquement le modèle proposé afin d'analyser l'impact de cette taxe carbone progressive sur les décisions stratégiques et les performances des entreprises. Nous développons ainsi un algorithme de résolution qui permet à l'entreprise de choisir la décision d'investissement optimale sous une taxe carbone progressive linéaire donnée. Puis, nous proposons d'étudier d'autres formes de taxes carbone, constante et progressive, notamment une taxe carbone convexe et concave. Enfin, nous utilisons une approche d'analyse multicritère pour évaluer et comparer les performances de ces différentes formes progressives de taxation de carbone.

Dans ce chapitre, l'objectif est d'étudier les avantages et les limites de la taxation progressive de carbone à inciter les entreprises à l'investissement vert et à réduire ainsi la pollution de la CL. Une telle étude peut servir aussi bien les entreprises que les gouvernements. Nos résultats peuvent assister les entreprises à prendre les décisions optimales de choix d'investissement étant soumises à une législation de taxe carbone progressive, comme ils peuvent être utiles aux gouvernements en mettant l'accent sur les performances des systèmes législatifs existants, et donc les nouvelles directives à mettre en place pour inciter les entreprises à minimiser leurs impacts indésirables sur l'environnement.

## 4.1. Présentation de la problématique

Aujourd'hui, il est évident que pour décider d'investir dans de nouveaux projets, ou d'installer de nouvelles technologies de production, il est important de prendre en considération non seulement les valeurs actuelles de la taxe carbone imposée, mais également son évolution planifiée et communiquée par les gouvernements. Dans le but d'aborder le problème de décision stratégique de la CL sous une législation dynamique de taxe carbone, nous considérons le cas d'une entreprise qui souhaite ouvrir un nouveau site de production pour se lancer dans la production d'un seul type de produit. Nous supposons alors que sa capacité initiale de production est nulle. Dans cette partie, nous supposons que l'entreprise a décidé de se localiser en domestique, et ainsi nous faisons abstraction de la décision de localisation. La problématique de cette entreprise s'avère alors le choix de technologie de production à installer. Il est à noter, que dans ce pays, le gouvernement a annoncé son plan d'appliquer une législation de taxe carbone progressive sur un horizon de  $T$  années, qu'on note  $Q(t)$ . Dans notre étude, nous nous basons sur un système législatif similaire au système législatif canadien de la taxe carbone. On considère alors une fonction de taxe carbone progressive linéaire, de pente  $q$ , tel que  $Q(t) = q \cdot t \forall t \in [1..T]$ .

Le prix de vente du produit est un paramètre du problème, imposé par le marché et qu'on estime fixe durant les  $T$  années et ainsi  $P(t) = P$ . Nous estimons que la demande, dans ce contexte de concurrence, est approximée par une valeur moyenne annuelle de la part de marché estimée pour cette entreprise. Cette demande moyenne annuelle est considérée déterministe, constante et exogène,  $D(t) = D$ .

L'entreprise peut choisir entre deux technologies de production différentes qu'on désigne par  $f$ . On admet que ces technologies ont des capacités de production infinies. On estime que les coûts d'installation et de production des technologies disponibles seront considérés fixes dans le temps. La première technologie ( $f = 1$ ) est une technologie ordinaire, caractérisée par son coût d'investissement,  $K_1$ , son coût de production,  $C_1$ , et son taux d'émission unitaire de carbone dégagé par la production d'une unité de produit fini,  $e_1$ . La deuxième technologie ( $f = 2$ ) est une technologie verte moins émettrice de carbone, néanmoins plus coûteuse en terme de coût d'investissement. En fait, pour comparer les performances de ces deux technologies, nous gardons les mêmes hypothèses adoptées dans le chapitre précédent. Nous admettant alors que :

- Le coût d'investissement de la technologie verte est  $\gamma$  fois plus cher que celui de la technologie ordinaire  $K_2 = \gamma \cdot K_1 ; \gamma \geq 1$ ,
- L'émission unitaire de carbone engendrée par la production d'une unité de produit fini avec cette technologie verte est de  $\beta$  fois moins important que l'émission unitaire de carbone de la technologie ordinaire,  $e_2 = \beta \cdot e_1 ; \beta \in [0; 1]$ ,
- Le coût de production est supposé égal quelle que soit la technologie utilisée 1 ou 2, étant donné que la littérature est divisée entre ceux qui estiment que le coût de production sur la technologie verte est moins important et ceux qui estiment qu'il est plus important  $C_2 = C_1 = C$ .

Nous considérons un horizon de planification de  $T$  années, qui correspond à la période de taxation progressive de carbone. L'entreprise peut avoir recours à un amortissement linéaire du coût d'investissement de son matériel sur cet horizon à partir de la date d'achat. Par exemple, si l'entreprise décide d'investir en technologie  $f$  à l'année 2, seulement la somme de  $[\frac{(T-2+1)}{T} * K_f]$  est comptabilisée dans la fonction coût de l'entreprise.

En outre, il est convenu que la stratégie de taxation progressive de carbone est mise en pratique pour donner aux entreprises de meilleures conditions d'adaptation à de tels outils législatifs et notamment plus de flexibilité en termes de capacité d'investissement. Par conséquent, sous une telle législation, l'entreprise peut lancer son projet avec la technologie ordinaire et retarder l'investissement dans la technologie verte jusqu'à l'année où une augmentation significative de la taxe carbone est atteinte. Dans ces conditions, nous supposons que l'entreprise peut vendre la technologie ordinaire à un second marché si elle décide d'investir ultérieurement dans la technologie verte. Le prix de vente de la technologie ordinaire est estimé à son coût d'investissement non encore amorti au début de l'année de vente. En fait, si l'entreprise décide d'investir dans la technologie verte à la troisième année, cela signifie qu'elle a installé la technologie ordinaire la première année et qu'elle la vendra la troisième année à un prix de vente de  $[\frac{3}{T} * K_1]$ . Par conséquent, nous ne comptabilisons dans la fonction coût de l'entreprise que la somme de  $[\frac{2}{T} * K_1]$ . En effet, nous admettons qu'il est possible de trouver un second marché à cette technologie ordinaire, probablement dans des pays où les émissions de carbone ne sont pas pénalisées. De plus, cette technologie reste une technologie conventionnelle, vendue à un prix intéressant par rapport à son prix d'acquisition initial et qui ne nécessite pas de compétence particulière de main d'œuvre et d'ingénierie.

Par contre, nous supposons que la technologie verte ne peut pas être vendue à un second marché, puisqu'il s'agit d'une nouvelle technologie, moins répandue et maîtrisée, et aussi plus chère par rapport à la technologie ordinaire conventionnelle. Notons que, si dans certains cas, il peut s'avérer intéressant d'installer une technologie verte, et qu'au bout d'un certain temps suite à l'augmentation de la taxe carbone, l'entreprise ne peut plus l'utiliser et ne peut pas la vendre sous nos hypothèses, d'autres solutions pourraient être envisageables telles que la délocalisation dans des pays détaxés, la demande de subvention, la négociation avec le gouvernement sur les taux de taxe, etc. Pour des raisons de simplicité, nous faisons abstraction de l'étude de cette problématique dans notre modèle.

L'objectif de l'entreprise est alors de définir l'année optimale d'investissement en technologie verte sous la législation progressive de taxe carbone disposant de choix entre une technologie de production ordinaire et une technologie verte.

En étudiant ce problème, nous cherchons à analyser l'impact de la taxe carbone progressive sur la décision d'investissement de l'entreprise compte tenu des performances de la technologie verte disponible, en termes de son surcoût et son taux de réduction des émissions de carbone par rapport à la technologie ordinaire. Il est évident que l'efficacité de la taxe carbone en matière d'encouragement de l'investissement dans les technologies vertes n'est pas la même lorsque les entreprises disposent ou non de technologies vertes performantes par rapport aux technologies ordinaires disponibles. Dans cette optique, nous cherchons à clarifier cette relation et à la mettre en évidence pour comprendre le comportement stratégique des entreprises dans différents secteurs industriels en fonction de la disponibilité d'une technologie verte « peu ou très chère » et « peu ou aussi » polluante que la technologie ordinaire.

## **4.2. Présentation du modèle multi-périodes de choix de technologie de production sous une taxe carbone progressive : *MDLA***

Dans cette section, nous présentons le modèle multi-périodes de sélection de technologies sous la législation de taxe carbone progressive, *MDLA*.

La problématique pour l'entreprise dans ce contexte dynamique consiste à déterminer quand investir et quelles technologies installer, en tenant compte de la stratégie de taxe carbone progressive annoncée. Les principales décisions sont alors :

- Les technologies à installer modélisées par la variable binaire  $y_{ft}$  qui est égale à 1 si la technologie  $f$  est installée l'année  $t$  et égal à 0 sinon,
- La quantité à produire en utilisant la technologie  $f$  pendant l'année  $t$ , modélisée par  $x_{ft}$ .
- La vente de la technologie ordinaire quand elle devient inutile. Cette décision est modélisée par la variable binaire  $z_t$ , qui est égale à 1 si l'entreprise décide de vendre la technologie ordinaire déjà installée depuis l'année 1 à l'année  $t$ ,  $t > 1$ , et 0 sinon.

L'objectif de l'entreprise est de maximiser son profit global généré sur tout l'horizon de planification en intégrant la taxe carbone progressive linéaire. Nous développons alors un modèle multi-périodes de maximisation de profit, qu'on note *MDLA*, pour lequel on détaille dans ce qui suit la fonction objectif et les contraintes.

### Fonction Objectif

$$\text{Max}\{\sum_{t=1}^T([x_t * (P - C)] - [Q(t) * E_t] - [\sum_{f=1}^2 y_{ft} * (T - t + 1) * \frac{1}{T} * K_f + (T - t + 1) * K_1 * \frac{1}{T} * z_t])\} \quad (4.1)$$

### Contraintes

$$x_t = \sum_{f=1}^2 x_{ft} \quad \forall t \in [1.. T] \quad (4.2)$$

$$x_t \leq D \quad \forall t \in [1.. T] \quad (4.3)$$

$$E_t = \sum_{f=1}^2 e_f * x_{ft} \quad \forall t \in [1.. T] \quad (4.4)$$

$$\sum_{t=1}^T y_{ft} \leq 1 \quad \forall f = 1, 2 \quad (4.5)$$

$$\sum_{v=1}^{t-1} y_{1v} \geq z_t \quad \forall t \in [2.. T] \quad (4.6)$$

$$\sum_{t=1}^T z_t \leq 1 \quad (4.7)$$

$$x_{ft} \leq B * y_{ft} \quad \forall f = 1, 2; \quad \forall t \in [1.. T] \quad (4.8)$$

$$Q(t) = a * t \quad \forall t \in [1.. T] \quad (4.9)$$

$$x_{ft} \geq 0 \quad \forall f = 1, 2; \quad \forall t \in [1.. T] \quad (4.10)$$

$$y_{ft} \in \{0; 1\} \quad \forall f = 1, 2; \quad \forall t \in [1.. T] \quad (4.11)$$

$$z_t \in \{0; 1\}. \quad \forall t \in [1.. T] \quad (4.12)$$

La *contrainte (4.2)* calcule la quantité du produit fini fabriquée. Dans un contexte de maximisation de profit, où la surproduction n'est pas pénalisée, la *contrainte (4.3)* garantit qu'on ne dépasse pas la demande annuelle pour chaque année  $t$ . La *contrainte (4.4)* calcule la quantité d'émission de carbone générée chaque année  $t$  par les technologies de production installées. La *contrainte (4.5)* garantit que chaque technologie ne peut être installée qu'une seule fois sur tout l'horizon de planification. La *contrainte (4.6)*, permet de vérifier que la technologie ordinaire ne peut être vendue que si elle a été déjà installée auparavant. La *contrainte (4.7)*, impose que la technologie ordinaire ne peut être vendue qu'une seule fois sur

l'horizon de planification. La *contrainte (4.8)* vérifie que chaque technologie ne peut être utilisée que si elle est installée. La *contrainte (4.9)* modélise la taxe carbone linéaire progressive sur l'horizon  $T$ . Finalement les *contraintes (4.10)*, *(4.11)* et *(4.12)*, sont des contraintes de non-négativité et de restrictions binaires.

En résolvant le modèle *MDLA*, nous cherchons à déterminer quand et quelles technologies installer afin de maximiser le profit de l'entreprise sur l'horizon de planification étant soumise à la taxe carbone progressive linéaire. Nous proposons de résoudre ce modèle analytiquement pour mieux comprendre le comportement stratégique de l'entreprise en fonction des paramètres du problème. Ensuite nous intégrons des expérimentations numériques dans le but de souligner à travers des exemples l'apport et les limites de la taxation progressive de carbone.

### **4.3. Etude des décisions d'investissement en technologie verte sous la taxe carbone progressive en fonction de son surcoût et son apport en réduction d'émission de carbone**

Sous une taxe carbone progressive, l'entreprise doit prendre les décisions d'investissement stratégiques lui permettant de maximiser son profit sur l'horizon de planification. A travers ce chapitre, nous cherchons à développer un outil d'aide à la décision permettant aux entreprises de prendre de telles décisions stratégiques d'investissement. Nous cherchons donc à déterminer les réponses aux questions suivantes : Sous la taxe carbone progressive imposée et compte tenu des technologies disponibles sur le marché, l'entreprise aura-t-elle intérêt à investir dans le projet ? Aura-t-elle intérêt à investir en green ? Si oui, quel est le moment opportun d'installation de la technologie verte ?

La décision d'investissement dépend de la législation de taxe carbone et son évolution au cours du temps. De plus, cette décision stratégique d'investissement dépend des performances des technologies disponibles. Il est convenu que la technologie verte a de meilleures performances environnementales que la technologie ordinaire, toutefois elle est plus coûteuse. Dans le modèle *MDLA*, nous quantifions les différences entre les technologies ordinaires et les technologies vertes par  $\beta$  (tel que  $(1 - \beta)$  représente le taux de réduction des émissions de la technologie verte) et  $\gamma$  (surcoût de la technologie verte).

La technologie verte engendre un coût d'investissement supplémentaire par rapport à la technologie ordinaire, mais elle permet à l'entreprise de réduire ses coûts d'émission sous une même valeur de taxe carbone appliquée. Ainsi, pour que le choix de la technologie verte et son installation à l'année  $t \in [1..T]$ , soit le meilleur choix pour l'entreprise, le gain engendré par la réduction du coût d'émission sur l'horizon de planification doit être supérieur au coût d'investissement supplémentaire engendré par l'investissement dans cette technologie.

L'entreprise cherche alors à déterminer quand et quelles technologies installer et utiliser durant l'horizon de planification, sous la législation de la taxe carbone progressive appliquée afin de maximiser son profit global. La question qui se pose est quelles performances la technologie verte devraient alors avoir pour favoriser son installation à une année donnée, pas avant ni plus tard, sous la législation de taxe carbone progressive considérée afin de permettre à l'entreprise de maximiser son profit sur tout l'horizon ?

Dans cette partie, l'objectif est donc de déterminer, pour une technologie verte disponible donnée, caractérisée par  $\beta$  (tel que  $(1 - \beta)$  représente son taux de réduction des émissions de carbone) et  $\gamma$  (son surcoût), la décision d'investissement technologique optimale sous la taxe carbone progressive linéaire. Ensuite, nous cherchons à étudier l'impact de la taxation

progressive de carbone sur les décisions stratégiques de CCL en fonction des valeurs du niveau de réduction des émissions  $\beta$  et du surcoût  $\gamma$  et de la technologie verte disponible par rapport à la technologie ordinaire.

Pour déterminer la décision d'investissement optimale pour l'entreprise, nous développons un outil d'aide à la décision, qui est un algorithme de résolution inspiré de la méthodologie de résolution Branch and Bound. Cet algorithme de détermination **de la solution optimale** consiste tout d'abord à énumérer toutes les décisions d'investissement et de production faisables pour l'entreprise, que nous désignons par « stratégies d'investissement ». Dans la deuxième étape, l'algorithme exécute un ensemble de comparaisons entre les stratégies d'investissement faisables deux à deux, progressivement, jusqu'à **déduction de la stratégie d'investissement optimale**, compte tenu des valeurs de  $\beta$ ,  $\gamma$  et de la taxe carbone considérée.

Dans un premier temps, nous considérons le cas pour lequel l'entreprise est capable de générer un profit positif quelle que soit la technologie utilisée, même sous la valeur de la taxe carbone la plus élevée atteinte à l'année  $T$ . Ensuite, dans un second scénario, nous abordons le problème d'investissement stratégique lorsque l'entreprise n'est pas en mesure de dégager un profit positif en utilisant la technologie ordinaire sur tout l'horizon sous les valeurs de taxes carbone appliquées. Dans ce cas, l'entreprise peut générer un profit positif en utilisant la technologie verte sur une période plus étendue de l'horizon, pourvu que les performances de cette technologie verte disponible le permettent.

Nous allons dans ce qui suit décrire et caractériser les décisions optimales pour chaque scénario possible.

#### **4.3.1. Technologies ordinaire et verte permettant de générer du profit positif sur tout l'horizon**

Dans cette section, nous supposons que, sous la réglementation de taxe carbone progressive considérée, les deux technologies (verte et ordinaire) permettent à l'entreprise de générer des profits positifs à l'année  $T$ . De plus, quelle que soit la technologie utilisée, l'entreprise génère le même revenu en produisant et en vendant sa demande client chaque année jusqu'à l'année  $T$ . L'utilisation de la technologie verte ne peut être plus rentable que si elle permet à l'entreprise de minimiser ses coûts, notamment en réduisant au mieux ses coûts d'émission grâce à une meilleure performance environnementale par rapport à l'augmentation du coût d'investissement qu'elle engendre. Afin de minimiser ses coûts, quelles performances minimales la technologie verte devrait-elle avoir pour que l'entreprise décide de l'installer l'année 1, ou 2, ou 3, ..., ou  $T$  ou pour quelles performances elle décide de ne pas y investir ?

Nous désignons par  $\{m\}$  la stratégie d'investir en technologie verte l'année  $m$ , tel que ( $m=1, 2, \dots, T$ ). La stratégie de ne pas investir en technologie verte est désignée par  $\{0\}$ . Ne pas investir en green implique que l'entreprise installe la technologie ordinaire l'année 1 et la garde sur tout l'horizon d'étude. La décision optimale d'investissement technologique pour l'entreprise lorsque la technologie ordinaire permet à l'entreprise de dégager un profit positif sur tout l'horizon est déterminée selon la proposition 4.1 énoncée ci-dessous.

***Proposition 4.1:*** **Sous une taxe carbone progressive linéaire, pour un taux de réduction des émissions de carbone donné de la technologie verte ( $\beta$  donné), la décision optimale est d'investir en technologie verte à l'année  $m$ , lorsque le surcoût  $\gamma$  de cette technologie verte est inférieur à  $\gamma_{\max(m \setminus m+1)}(\beta) = 1 + \frac{m \cdot q \cdot e_1 \cdot D \cdot T}{k_1} (1 - \beta)$  (4.13)**

**Preuve :**

En effet, lorsque l'entreprise décide d'investir dans la technologie verte à l'année  $m, \forall m \in [1..T]$ , sa fonction coût total sur l'horizon se calcule de la façon suivante :

$$\text{Coût}(m) = \frac{m-1}{T} \cdot k_1 + \frac{T-m+1}{T} \cdot \gamma \cdot k_1 + \sum_{t=1}^{m-1} q \cdot t \cdot e_1 \cdot D + \sum_{t=m}^T q \cdot t \cdot e_1 \cdot D \cdot \beta$$

En résolvant l'inégalité  $\{\text{coût}(m) \leq \text{coût}(m+1)\}$ , on détermine les valeurs de  $\gamma_{\max(m \setminus m+1)}(\beta)$ ; autrement la valeur du surcoût maximal ( $\gamma_{\max}$ ) en fonction de ( $\beta$ ), le paramètre qui caractérise le taux de réduction des émissions de carbone, pour laquelle la politique d'investir en technologie verte en période  $m$  est meilleure que celle de retarder cet investissement à l'année  $m+1$ . On obtient  $\gamma_{\max(m \setminus m+1)}(\beta) = 1 + \frac{m \cdot q \cdot e_1 \cdot D \cdot T}{k_1} \cdot (1 - \beta)$ . Par conséquent, pour  $m = 1$ , cette équation détermine, pour un niveau de réduction d'émission de carbone de la technologie verte par rapport à l'ordinaire ( $\beta$ ), la valeur de  $\gamma_{\max(1 \setminus 2)}(\beta)$ , en dessous de laquelle il est optimal d'investir la première année en technologie verte et au-delà de laquelle il est optimal d'investir en technologie verte la deuxième année ou plus, sous la taxe carbone linéaire progressive considérée. Pour  $m = 2$ , l'équation obtenue définit pour chaque valeur de  $\beta$ , la valeur de  $\gamma_{\max(2 \setminus 3)}(\beta)$ , en dessous de laquelle l'investissement en technologie verte est plus rentable à la deuxième année et au-dessus de laquelle il est préférable d'investir en technologie verte en année 3 ou plus, et ainsi de suite jusqu'à ce que  $m = T - 1$ . On obtient alors l'équation qui détermine les valeurs  $\gamma_{\max(T-1 \setminus T)}(\beta)$ , en dessous desquelles investir dans la technologie verte l'année  $(T-1)$  est plus rentable que de reporter l'investissement en technologie verte à l'année  $T$ . La dernière étape consiste donc à déterminer, pour un niveau de réduction d'émission de carbone donné de la technologie verte ( $\beta$ ), la valeur du surcoût de la technologie verte  $\gamma_{\max}(\beta)$ , au-delà de laquelle il est plus rentable pour l'entreprise de ne pas investir dans la technologie verte que d'y investir à l'année  $T$ . Nous déterminons alors le coût de la stratégie de ne pas investir en green telle que  $\text{coût}(0) = k_1 + \sum_{t=1}^T q \cdot t \cdot e_1 \cdot D$ . Nous résolvons l'inégalité  $\{\text{coût}(T) \leq \text{coût}(0)\}$  et nous obtenons donc l'équation suivante :  $\gamma_{\max(T \setminus 0)}(\beta) = 1 + \frac{q \cdot o_1 \cdot D \cdot T^2}{k_1} \cdot (1 - \beta)$ . D'où on conclut la proposition 4.1. ■

A partir de l'équation (4.14), on déduit l'équation (4.15) détaillée ci-dessous, qui exprime la décision d'investir en green, représentée par l'année optimale d'investissement en technologie verte ( $m$ ) en fonction des autres paramètres;

$$m = \lfloor \frac{K_1(\gamma-1)}{q \cdot e_1 \cdot D \cdot T \cdot (1-\beta)} \rfloor \quad (4.14)$$

De cette équation, on conclut que :

- Plus la valeur de la pente de la taxe carbone progressive linéaire augmente ( $q$  augmente), plus l'investissement dans la technologie verte avance ( $m$  est plus petite et donc l'investissement se fait au plus tôt) ;
- Pour une performance environnementale donnée de la technologie verte ( $\beta$  donné), lorsque le surcoût de la technologie verte augmente ( $\gamma$  augmente), il est préférable de retarder l'investissement en technologie verte ( $m$  augmente) ;
- Pour un surcoût donné de la technologie verte ( $\gamma$  donné), lorsque le taux de réduction des émissions de carbone de la technologie verte augmente ( $\beta$  augmente), la décision d'investissement en technologie verte est retardée ( $m$  augmente).

Finalement nous intégrons, un exemple numérique illustratif de la proposition 4.1 (noté *Exemple 1*), en nous référant à l'exemple numérique de l'industrie du textile déjà introduit au chapitre 3. Nous considérons dans ce cas que l'entreprise peut opter pour une technologie ordinaire caractérisée par son coût d'investissement qui est de  $K_1 = 2500\$$ , et son émission unitaire de carbone  $e_1 = 30kg/unité$ . Le produit à fabriquer est vendu à un prix unitaire de  $P = 10\$/unité$  et on estime que son coût de production s'élève à  $C = 6\$/unité$  quelle que soit la technologie utilisée. La demande moyenne annuelle est  $D = 12000$  unités. Finalement on adopte le modèle de taxe carbone progressive linéaire Canadien et on estime que  $Q(t) = 10 \cdot t$  avec  $t \in [1..5]$ . Avec cet exemple, on vérifie bien que l'entreprise peut générer un profit positif avec la technologie ordinaire sous tout l'horizon. L'objectif est de déterminer la décision d'investissement optimale en fonction des performances de la technologie verte disponible. Nous calculons alors les équations  $\gamma_{max(m \setminus m+1)}(\beta) = 1 + \frac{m \cdot q \cdot e_1 \cdot D \cdot T}{k_1} \cdot (1 - \beta)$  pour tout  $m \in [1; 5]$  selon la proposition 4.1. La figure 4.1 illustre les différentes courbes d'investissement obtenues représentées dans le plan  $[\beta, \gamma]$ .

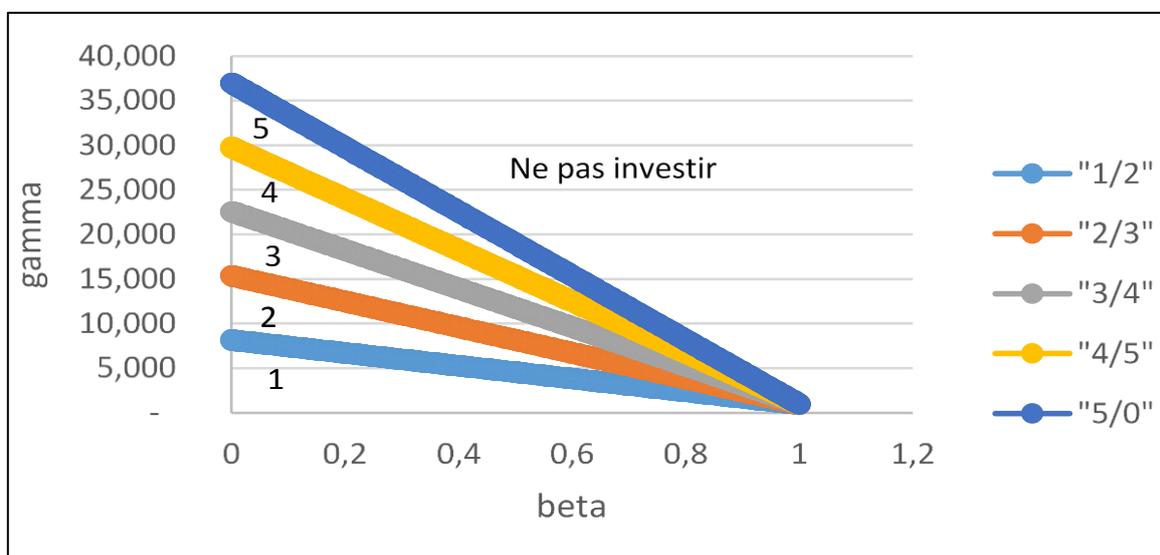


Figure 4.1 : Détermination des courbes d'investissement pour l'Exemple 1

Nous obtenons 6 ( $T + 1$ ) zones d'investissement possibles qui sont représentées comme suit :

- Pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  dans la zone 1, la décision optimale est d'installer la technologie verte l'année 1 ;
- Pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  dans la zone 2, la décision optimale est d'installer la technologie verte l'année 2 ;
- Pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  dans la zone 3, la décision optimale est d'installer la technologie verte l'année 3 ;
- Pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  dans la zone 4, la décision optimale est d'installer la technologie verte l'année 4 ;
- Pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  dans la zone 5, la décision optimale est d'installer la technologie verte l'année 5 ;

- Pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  dans la zone au-dessus de la courbe (5\0), la décision optimale est de ne pas investir en green.

Dans la section suivante, nous considérons le deuxième scénario, pour lequel la technologie ordinaire ne permet pas à l'entreprise de générer un profit positif sur tout l'horizon de planification. Quelles seraient alors dans ce cas les décisions d'investissement optimales pour l'entreprise en fonction des performances de la technologie verte sous la taxe carbone linéaire progressive à laquelle elle est soumise ?

### 4.3.2. Technologie ordinaire ne permet pas de générer du profit positif sur tout l'horizon

Dans cette partie, l'objectif est tout d'abord de présenter les stratégies d'investissement faisables, ensuite de les caractériser et finalement de les comparer afin de déduire la stratégie d'investissement optimale pour l'entreprise dans le cas où la technologie ordinaire ne permet pas de générer du profit positif sur tout l'horizon.

#### 4.3.2.1. Présentation des stratégies faisables

Une stratégie d'investissement est caractérisée par l'année d'investissement et le nombre d'années d'activité. Une stratégie d'investissement est dite faisable si elle permet à l'entreprise de générer un profit positif sur l'horizon de planification. Dans le but de maximiser son profit sur l'horizon de planification, l'entreprise peut décider d'arrêter de produire à partir de l'année pour laquelle l'augmentation de la taxe carbone génère des coûts plus élevés que ses revenus. Il est ainsi essentiel de déterminer l'année au plus tard à laquelle l'entreprise est capable de produire la demande de ses clients en générant un bénéfice pour pouvoir déterminer les stratégies d'investissement faisables.

Comme les technologies, verte et ordinaire, ont des taux d'émission de carbone et des coûts d'investissement différents, l'année au plus tard à laquelle l'entreprise peut générer un profit positif en utilisant chaque type de technologie peut être différente sous la même taxe carbone progressive considérée :

- On note  $n$  l'année maximale au plus tard à laquelle l'entreprise peut générer un profit positif en utilisant la technologie ordinaire disponible. Pour déterminer  $n$ , on résout l'inégalité *Profit avec technologie ordinaire en année  $n \geq 0$*  ;  $D(P - C) - \frac{1}{T} * K_1 - n * q * e_1 * D \geq 0$  et on déduit alors que  $n = \lfloor \frac{D(P-C) - \frac{1}{T} * K_1}{q * e_1 * D} \rfloor$  (4.15) ;
- On note par  $l(\beta, \gamma)$  l'année maximale au plus tard à laquelle l'entreprise peut générer un profit positif en utilisant la technologie verte caractérisée par  $\beta$  et  $\gamma$ . En résolvant l'inégalité *Profit avec technologie verte en année  $l(\beta, \gamma) \geq 0$*  ;  $D(P - C) - \frac{1}{T} * \gamma * K_1 - l(\beta, \gamma) * q * e_1 * \beta * D \geq 0$ , on obtient donc  $l(\beta, \gamma) = \lfloor \frac{D(P-C) - \frac{1}{T} * \gamma * K_1}{\beta * q * e_1 * D} \rfloor$  (4.16).

A partir des équations (4.15) et (4.16), par un simple calcul, on déduit que  $l(\beta, \gamma) \leq \frac{\gamma}{\beta} * n$ . On en déduit alors que  $l(\beta, \gamma) \geq n \forall (\beta, \gamma)$  étant donné que  $0 \leq \beta \leq 1$  et  $\gamma \geq 1$ .

Connaissant  $n$  et  $l(\beta, \gamma)$  pour chaque couple  $(\beta, \gamma)$ , l'objectif est de recenser toutes les stratégies faisables afin de les comparer par la suite pour déduire la stratégie optimale d'investissement et de production.

- Une première stratégie faisable serait de **ne pas investir en technologie verte**. Dans ce cas, l'entreprise installe la technologie ordinaire et **l'utilise  $n$  années** (tant qu'elle permet de générer du profit positif) puis la vend et quitte le business. **Cette stratégie est notée  $\{0-n\}$** , avec 0 désignant l'année d'investissement en technologie verte, qui est  $m = 0$  puisque l'entreprise n'investit pas en green ;
- D'autres stratégies faisables seraient **d'investir en technologie verte à l'année  $m$  avec  $m \geq 1$** . Pour un premier cas, lorsque  $m = 1$ , la stratégie correspondante est **d'installer la technologie verte dès la première année** et de **l'utiliser sur les  $l(\beta, \gamma)$  années** (tant qu'elle permet à l'entreprise de générer un bénéfice). Pour les cas où  $m > 1$ , l'entreprise envisage **de lancer son projet avec la technologie ordinaire puis la vend en année  $m$ , installe la technologie verte et continue à l'utiliser jusqu'à l'année  $l(\beta, \gamma)$**  (l'année au-delà de laquelle l'entreprise ne peut plus dégager du profit positif). Comme la technologie ordinaire permet à l'entreprise de dégager du bénéfice au plus tard l'année  $n$ , **l'entreprise ne peut pas envisager d'installer la technologie verte au-delà de l'année  $n+1$** . On note alors que  $m \leq n + 1$ . On désigne l'ensemble de ces stratégies faisables d'investissement en green par  $\{m- l(\beta, \gamma)\}$ , où  $m$  correspond à l'année d'investissement en technologie verte et  $l(\beta, \gamma)$  correspond au nombre d'années d'activité.

#### 4.3.2.2. Caractérisation des stratégies faisables

D'après les équations (4.15) et (4.16), nous avons pu conclure que la technologie verte permet à l'entreprise de générer du profit positif sur une période égale ou plus étendue que la technologie ordinaire ( $l(\beta, \gamma) \geq n \forall (\beta, \gamma)$ ). Par conséquent on peut écrire  $l(\beta, \gamma) = n + i$  avec  $i \in [0..T - n]$ . Cette écriture, nous permet de simplifier l'expression de  $l(\beta, \gamma)$ , et de l'exprimer en fonction de  $n$ , afin de faciliter la comparaison des stratégies d'investissement et de production faisables pour déduire la stratégie optimale pour l'entreprise.

Pour que l'entreprise dégage du profit positif avec la technologie verte l'année  $l(\beta, \gamma) = n + i$  avec  $i \in [0..T - n]$ , il faut que  $D(P - C) - \frac{1}{T} * \gamma * K_1 - (n + i) * q * e_1 * D * \beta \geq 0$ . Ceci implique que, pour tout  $i \in [0..T - n]$ , l'entreprise dégage du profit positif l'année  $(n+i)$  avec la technologie verte lorsque le paramètre qui caractérise son taux de réduction d'émission de carbone,  $\beta$ , vérifie la condition (4.17) suivante :  $\beta_i(\gamma) \leq \beta < \beta_{i-1}(\gamma)$ , où  $\beta_i(\gamma) = \frac{D(P-C) - \frac{1}{T} * \gamma * K_1}{(n+i) * q * e_1 * D}$  pour tout  $i \in [0..T - n - 1]$  et  $\beta_{-1}(\gamma) = 1$  et  $\beta_{T-n}(\gamma) = 0$  (4.17).

En analysant l'expression des  $\beta_i(\gamma)$ , on peut noter que pour un surcoût donné de la technologie verte ( $\gamma$  donné), le nombre d'années d'activité est d'autant plus grand ( $i$  augmente) lorsque le paramètre qui caractérise son taux de réduction d'émission de carbone  $\beta$  diminue.

En outre, en utilisant l'équation (4.16), on déduit que pour un taux de réduction des émissions de carbone donné, caractérisé par un  $\beta$  donné,  $l(\beta, \gamma) \leq l(\beta, 1)$ . Dans cette perspective, on détermine l'année au plus tard à laquelle l'entreprise dégage du bénéfice en utilisant la technologie verte en fonction de son taux de réduction des émissions de carbone (pour tout  $\beta \in [0 ; 1]$ ) pour le cas où  $\gamma = 1$ . On désigne désormais  $l(\beta, 1)$  par  $l(\beta)$ . Puis, nous en déduisons les stratégies d'investissement et de production faisables à comparer pour  $\gamma \geq 1$  afin de déduire la stratégie optimale pour chaque couple  $(\beta, \gamma)$ .

Le principe est alors de déterminer les  $\beta_i(1)$  pour tout  $i \in [0..T - n - 1]$  en utilisant l'équation (4.17). En calculant les valeurs de  $\beta_i(1)$ , on détermine les plages du paramètre

$\beta, \beta_i(1) \leq \beta < \beta_{i-1}(1)$ , pour tout  $\beta \in [0; 1]$ , pour lesquelles l'entreprise peut générer du profit positif avec la technologie verte, lorsque  $\gamma = 1$ , l'année  $n + i$  pour tout  $i \in [0..T - n]$ . On obtient alors :

- Pour  $i = 0$  ; pour  $\beta_0(1) \leq \beta \leq \beta_{-1}(1)$ ,  $l(\beta) = n$  et  $\beta_0(1) = \frac{D(P-C) - \frac{1}{T} * K_1}{n * q * e_1 * D}$  ;
- Pour  $i = 1$  ; pour  $\beta_1(1) \leq \beta < \beta_0(1)$ ,  $l(\beta) = n + 1$  et  $\beta_1(1) = \frac{D(P-C) - \frac{1}{T} * K_1}{(n+1) * q * e_1 * D}$  ;
- Ainsi de suite pour tout  $i \in [0..T - n]$ . Pour  $i = T - n$ , on obtient pour  $\beta_{T-n}(1) \leq \beta \leq \beta_{T-n-1}(1)$ ,  $l(\beta) = T$  et  $\beta_{T-n-1}(1) = \frac{D(P-C) - \frac{1}{T} * K_1}{(T-1) * q * e_1 * D}$ .

Ensuite, pour un taux de réduction des émissions de carbone donné (caractérisé par un  $\beta$  donné), comme  $l(\beta, \gamma) \leq l(\beta)$ , quand  $\gamma$  augmente, l'entreprise peut envisager de produire moins de  $l(\beta)$  années afin de maximiser son profit sous la taxe carbone progressive imposée. Une première comparaison entre deux types de stratégies faisables est de comparer pour un couple donné  $(\beta, \gamma)$  avec  $\beta_i(1) \leq \beta < \beta_{i-1}(1)$  et  $\gamma \geq 1$  :

- la stratégie d'investir en green à l'année  $m$  et de produire  $l$  années ;
- la stratégie d'investir en green à l'année  $m$  et de produire  $l-1$  années.

Puisque le nombre d'années d'activité est différent pour ces deux stratégies, pour les comparer on résout l'inégalité (*Profit de la stratégie  $\{m - l\} \geq$  Profit de la stratégie  $\{m - (l - 1)\}$ ), avec :*

- *profit de la stratégie  $\{m - l\}$*   $= l.D.(P - C) - \frac{m-1}{T}.k_1 + \frac{T-m+1}{T}.\gamma.k_1 + \sum_{t=1}^{m-1} q.t.e_1.D + \sum_{t=m}^l q.t.e_1.D.\beta$
- *profit de la stratégie  $\{m - (l - 1)\}$*   $= (l - 1).D.(P - C) - \frac{m-1}{T}.k_1 + \frac{T-m+1}{T}.\gamma.k_1 + \sum_{t=1}^{m-1} q.t.e_1.D + \sum_{t=m}^{l-1} q.t.e_1.D.\beta$

On obtient alors la condition (4.18) suivante :  $D(P - C - qle_1\beta) \geq 0$  (4.18). Néanmoins, par définition de  $l(\beta)$  l'équation (4.18) est toujours vraie pour  $\beta_i(1) \leq \beta < \beta_{i-1}(1)$ . On conclut alors que pour tout  $\beta_i(1) \leq \beta < \beta_{i-1}(1)$  et quel que soit  $\gamma \geq 1$ , la stratégie  $\{m-l\}$  est plus rentable que la stratégie  $\{m-(l-1)\}$ , qui est à son tour plus rentable que la stratégie  $\{m-(l-2)\}$  et ainsi de suite.

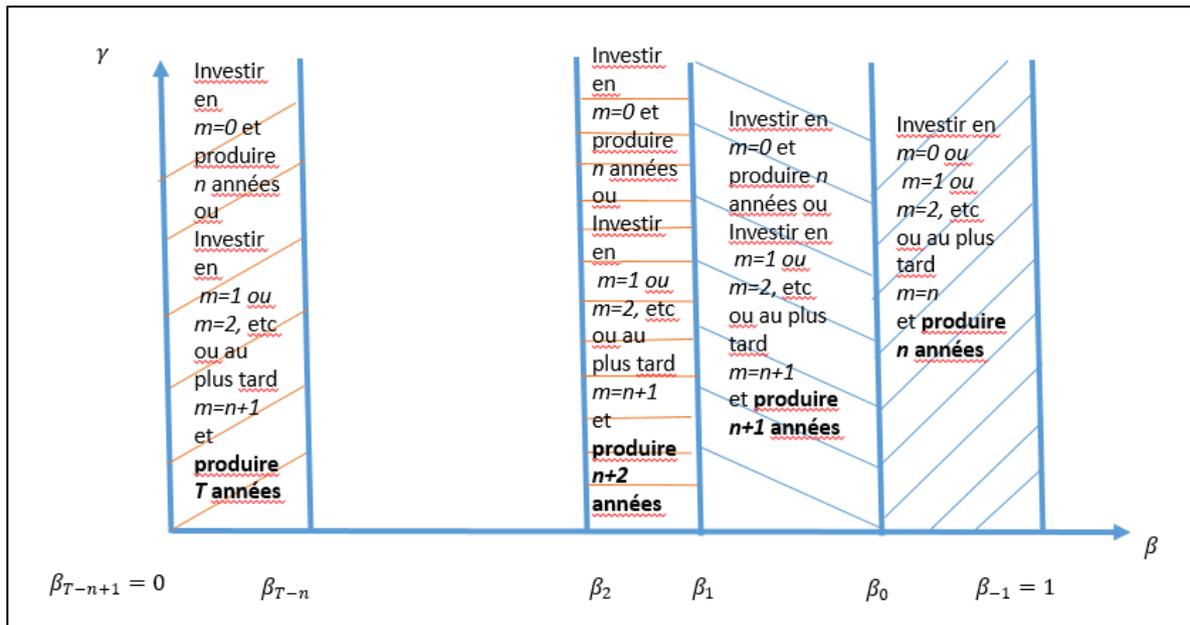
On déduit donc, que pour un taux de réduction des émissions de carbone donné (caractérisé par un  $\beta$  donné), **lorsque l'entreprise peut dégager un profit positif en produisant  $l(\beta)$  années, quel que soit le surcoût de la technologie verte ( $\gamma$ )**, si l'entreprise envisage d'investir en technologie verte, il serait préférable afin de maximiser le profit sous la taxe carbone progressive considérée, **de produire sur  $l(\beta)$  années**. On note désormais  $\beta_i(1) = \beta_i$ .

On retient alors que pour tout  $i \in [0..T - n]$ , et tout  $\beta_i \leq \beta < \beta_{i-1}$ ,  $l(\beta) = n + i$  avec  $\beta_i = \frac{D(P-C) - \frac{1}{T} * K_1}{(n+i) * q * e_1 * D}$  pour  $i \in [0..T - n - 1]$  et  $\beta_{-1} = 1$  et  $\beta_{T-n} = 0$ . **Les stratégies d'investissement et de production faisables à comparer** pour déduire la stratégie optimale sont :

- **toutes les stratégies d'investir en technologie verte à l'année  $m$  ( $m \leq n + 1$ ) et de produire sur  $l(\beta)$  années ;**
- **la stratégie de ne pas investir en technologie verte et de produire seulement  $n$  années.**

En effet avec le calcul décrit ci-dessus, on détermine pour tout  $i \in [0..T - n]$ , et tout  $l(\beta)$  avec  $l(\beta) = n + i$ , les différentes valeurs de  $\beta_i$  et ainsi les plages de  $\beta \in [\beta_i ; \beta_{i-1}[$  sur tout le domaine d'étude  $[0 ; 1]$  tel que  $l(\beta) = n + i$ . Ensuite, sur chaque plage de  $\beta \in [\beta_i ; \beta_{i-1}[$ , connaissant  $l(\beta)$  et  $n$ , **en fonction de la valeur du surcoût de la technologie verte  $\gamma$** , nous étudions les décisions stratégiques optimales en comparant les stratégies d'investissement et de production faisables sur cette plage de  $\beta \in [\beta_i ; \beta_{i-1}[$ . A titre d'exemple, pour  $i = 1$ , on considère la plage de  $\beta \in [\beta_1 ; \beta_0[$ . Nous savons que sur cette plage de  $\beta$ , quel que soit le surcoût de la technologie verte ( $\gamma$ ), si l'entreprise envisage d'investir en technologie verte, il serait préférable afin de maximiser le profit sous la taxe carbone progressive considérée, de produire sur  $n + 1$  années. **Les stratégies faisables à comparer sont donc les stratégies d'investir en technologie verte l'année  $m$  avec  $m \leq n + 1$  et la stratégie de ne pas investir en technologie verte et d'utiliser la technologie ordinaire sur seulement  $n$  années, et ceci en fonction de la variation de  $\beta$  et  $\gamma$ .** Nous allons ainsi déterminer en fonction des surcoûts de la technologie verte (pour tout  $\geq 1$ ), sur cette plage de  $\beta$  ( $\beta \in [\beta_1 ; \beta_0[$ ), les décisions d'investissement optimales en déterminant l'année d'investissement en technologie verte ( $m = 0$ , ou  $m = 1$ , ou  $m = 2$ , etc,  $m = n$  ou  $m = n + 1$  ?).

La figure 4.2 ci-dessous, illustre la segmentation des zones du plan  $(\beta, \gamma)$  avec  $\gamma \geq 1$  et  $\beta \in [0 ; 1]$  sur lesquelles nous comparons les décisions d'investissement et de production faisables afin de déterminer les décisions optimales en fonction de la variation des paramètres  $\beta$  et  $\gamma$ , dans le cas où la technologie ordinaire ne permet pas de générer du profit positif sur tout l'horizon.



Figures 4.2. Illustration des stratégies d'investissement faisables en fonction de la segmentation du plan  $(\beta, \gamma)$  en plages de  $[\beta_i ; \beta_{i-1}]$

**Remarque :**

Pour  $i = 0$ , lorsque  $\beta_0 \leq \beta \leq \beta_{-1}$  et  $l(\beta) = n$ , l'entreprise ne peut pas investir en technologie verte à l'année  $n + 1$ . Dans ce cas, l'entreprise peut envisager d'investir en green au plus tard l'année  $n$ . Alors que pour  $i \in [1..T - n]$ , lorsque  $\beta_i \leq \beta < \beta_{i-1}$ ,  $l(\beta) > n$ , l'entreprise peut investir dans la technologie verte au plus tard l'année  $n + 1$ .

Dans la suite de cette étude de détermination de stratégie d'investissement et de production optimale, on distingue entre les deux situations suivantes. Pour une première situation, on considère que la technologie verte a un taux de réduction d'émission de carbone faible :  $\beta$  proche de 1. Elle permet alors à l'entreprise de dégager du bénéfice au plus tard à l'année  $n$  tout comme la technologie ordinaire. Ensuite, dans une deuxième situation, on considère que la technologie verte, grâce à son taux de réduction d'émission de carbone élevé (faibles valeurs de  $\beta$ ), permet à l'entreprise de dégager du bénéfice au plus tard l'année  $l(\beta)$  avec  $l(\beta) > n$ .

**4.3.2.3. Technologie avec un taux de réduction d'émission de carbone faible,  $\beta$  proche de 1 ( $l(\beta) = n$ )**

Dans cette section, nous considérons le cas où les technologies, verte et ordinaire ont pratiquement le même niveau d'émissions de carbone et que les deux technologies ne permettent pas à l'entreprise de générer un profit positif sur tout l'horizon sous la taxe carbone progressive appliquée. Nous cherchons à déterminer en fonction des valeurs de  $\gamma$  et  $\beta$ , avec  $\beta \approx 1$ , la stratégie d'investissement optimale pour l'entreprise sous un tel système dynamique de législation de carbone. Comme nous l'avons déjà souligné, quand les deux technologies ont pratiquement le même taux d'émission de carbone, pour  $\beta_0 \leq \beta < \beta_{-1}$ , on obtient  $l(\beta) = n$ . Sous la taxe carbone progressive, l'entreprise peut décider d'investir l'année 1, 2, 3, ..., retarder l'investissement dans la technologie verte jusqu'à l'année  $n$ , ou de ne pas investir en technologie verte, ce qui signifie investir dans la technologie ordinaire l'année 1 et la vendre après l'avoir utilisée, à l'année  $n$ .

Nous développons alors un algorithme de résolution pour aider l'entreprise à décider de la stratégie optimale d'investissement et de production, en fonction des performances de la technologie verte disponible. L'objectif de cet algorithme est de déduire pour chaque couple  $(\beta, \gamma)$  avec pour  $\beta_0 \leq \beta < \beta_{-1}$  et  $\gamma \geq 1$  la stratégie d'investissement et de production optimale en tenant compte de la législation de taxe carbone progressive. Son principe de résolution consiste à comparer deux à deux les stratégies d'investissement et de production réalisables jusqu'à la déduction de la stratégie optimale. Afin de comparer les stratégies d'investissement faisables, nous cherchons à déterminer (comme dans la section 4.1) les équations  $\gamma_{\max(a \setminus b)} = f(\beta)$ . Ces équations permettent de déduire pour des taux de réduction d'émission de carbone donnés, caractérisés par le paramètre  $\beta$ , les valeurs des surcoûts des technologies vertes au-delà desquelles la stratégie {a} est meilleure que la stratégie d'investissement et de production {b} et au-dessous de laquelle la stratégie {b} s'avère plus rentable que {a}.

Dans la première partie (4.3.1), lorsque les deux technologies disponibles permettent à l'entreprise de dégager du bénéfice sur tout l'horizon, nous avons pu vérifier que pour un taux d'émission de carbone donné, lorsque le surcoût de la technologie verte augmente, la décision optimale est de retarder son installation, jusqu'à décider de ne pas investir en green. Pour cette partie de note étude, les technologies disponibles ne permettent pas à l'entreprise de générer du bénéfice sur tout l'horizon. De plus la technologie verte ne peut pas être vendue une fois installée alors que la technologie ordinaire peut être vendue une fois inutile. Dans ces conditions, contrairement à la première partie, pour un taux de réduction d'émission de carbone donné, il peut s'avérer plus rentable pour l'entreprise de ne pas investir en green que de retarder l'investissement vert, pour un plus faible surcoût de cette technologie verte. Dans ces conditions, si on détermine la valeur du surcoût  $\gamma_{\max}(\beta)$  au-delà de laquelle il est optimal de ne pas investir en green, il ne sera plus utile d'étudier les décisions d'investissement en technologie verte pour des valeurs plus importantes à ce surcoût de la technologie verte. Nous nous basons donc sur ce principe, pour étudier les décisions stratégiques optimales de l'entreprise. Dans cette optique nous aurons besoin de comparer les stratégies d'investissement en green deux à deux, tout en comparant également les stratégies d'investissement en technologie verte à la stratégie de ne pas investir en green. Pour comparer deux à deux ces stratégies d'investissement et de production, on établit la proposition 4.2 suivante :

***Proposition 4.2*** : Sous une taxe carbone progressive linéaire, pour un taux de réduction des émissions de carbone donné, proche de 1 de la technologie verte ( $\beta \in [\beta_0; 1]$ ),

- La stratégie  $\{m-n\}$  est plus rentable que la stratégie  $\{(m+1)-n\}$  lorsque le surcoût de la technologie verte est inférieur à  $\gamma_{\max(m-n \setminus (m+1)-n)}(\beta)$ , sinon la stratégie  $\{(m+1)-n\}$  s'avère plus rentable que  $\{m-n\}$  avec  $\gamma_{\max(m-n \setminus (m+1)-n)}(\beta) = 1 + \frac{m.q.e_1.D.T}{k_1} * (1 - \beta)$  (4.19);
- La stratégie  $\{m-n\}$  est plus rentable que la stratégie  $\{0-n\}$  lorsque le surcoût de la technologie verte est inférieure à  $\gamma_{\max(m-n \setminus 0-n)}(\beta)$ , sinon la stratégie  $\{0-n\}$  s'avère plus rentable que  $\{m-n\}$  avec  $\gamma_{\max(m-n \setminus 0-n)}(\beta) = \frac{n-m+1}{T-m+1} + \frac{q.e_1.D.T}{(T-m+1).k_1} * \frac{(n-m+1)*(n+m)}{2} * (1 - \beta)$  (4.20).

**Preuve :**

Les technologies ordinaire et verte permettent à l'entreprise de générer du profit positif au plus tard l'année  $n$ . Quelle que soit la technologie utilisée, l'entreprise produit toujours sur  $n$  années pour maximiser son profit. Par conséquent, le revenu de l'entreprise est le même quelle que soit sa stratégie d'investissement. La stratégie la plus rentable est alors la stratégie la moins coûteuse. Pour comparer la stratégie d'investir en green à l'année  $m$ , à la stratégie de retarder cet investissement à l'année  $m+1$ , on résout l'inégalité  $[\text{coût total}(\{m-n\}) \leq \text{coût total}(\{(m+1)-n\})]$  avec  $\text{coût total}(\{m-n\}) = \frac{m-1}{T} \cdot k_1 + \frac{T-m+1}{T} \cdot \gamma \cdot k_1 + \sum_{t=1}^{m-1} q \cdot t \cdot e_1 \cdot D + \sum_{t=m}^n q \cdot t \cdot e_1 \cdot D \cdot \beta$ . En résolvant cette inégalité, on obtient  $\gamma_{\max(m-n \setminus (m+1)-n)} \leq 1 + \frac{m \cdot q \cdot e_1 \cdot D \cdot T}{k_1} * (1 - \beta)$ , on en déduit alors l'équation (4.19).

Puis, pour comparer la stratégie d'investir en technologie verte à l'année  $m$  par rapport à la stratégie de ne pas investir en green, on résout l'inégalité  $[\text{coût total}(\{m-n\}) \leq \text{coût}(\{0-n\})]$ , on obtient donc  $\gamma_{\max(m-n \setminus 0-n)} \leq \frac{n-m+1}{T-m+1} + \frac{q \cdot e_1 \cdot D \cdot T}{(T-m+1) \cdot k_1} * \frac{(n-m+1) \cdot (n+m)}{2} * (1 - \beta)$ , d'où on déduit l'équation (4.20). ■

Ensuite, pour un taux de réduction des émissions de carbone donné, pour déterminer si pour des plus faibles valeurs du surcoût de la technologie verte, il est plus rentable de ne pas investir en green que de retarder cet investissement, on compare ces équations  $\gamma_{\max(m-n \setminus 0-n)}(\beta)$  et  $\gamma_{\max(m-n \setminus (m+1)-n)}(\beta)$ . Cette comparaison nous permet de déduire la décision optimale pour les valeurs de  $\beta$  considérées en fonction de  $\gamma$ .

Nous illustrons dans ce qui suit, ce principe de comparaison, que nous généralisons par la suite dans un algorithme de détermination de solution optimale.

On commence alors par considérer que l'entreprise peut envisager de ne pas investir en technologie verte, d'installer la technologie verte dès la première année ou de retarder l'investissement en technologie verte à la deuxième année ( $\{0-n\}$ ,  $\{1-n\}$ ,  $\{2-n\}$ ). On considère une plage donnée de  $\beta \in [\beta_0 ; 1]$ , puis on compare ces stratégies en utilisant les équations de la proposition 4.2 :

- D'une part, nous comparons la décision d'investir dans la technologie verte la première année à la décision d'investir dans la technologie verte la deuxième année. Nous déterminons  $\gamma_{\max(1-n \setminus 2-n)} = f(\beta)$  qui détermine pour chaque valeur de  $\beta$ , la valeur de  $\gamma_{\max}(\beta)$  en dessous de laquelle la politique  $\{1-n\}$  est meilleure et au-delà de laquelle la politique  $\{2-n\}$  s'avère plus rentable.
- D'autre part, nous comparons la décision d'investir dans la technologie verte la première année avec la décision de ne pas investir dans la technologie verte. Nous déterminons l'équation,  $\gamma_{\max(1-n \setminus 0-n)} = f(\beta)$  qui calcule pour chaque valeur de  $\beta$ , la valeur de  $\gamma_{\max}(\beta)$  en dessous de laquelle la politique  $\{1-n\}$  est meilleure, et au-dessus de laquelle la politique  $\{0-n\}$  est plus rentable.

Ayant déterminé ces deux expressions  $\gamma_{\max(1-n \setminus 2-n)} = f(\beta)$  et  $\gamma_{\max(1-n \setminus 0-n)} = f(\beta)$ , le principe est ensuite de les comparer afin de déduire la stratégie optimale. Nous traçons alors les courbes de ces deux équations dans le plan  $[\beta, \gamma]$ . L'objectif est d'étudier la position relative de ces deux courbes :

- L'une de ces deux courbes peut être au-dessus ou au-dessous de l'autre quel que soit  $\beta \in [\beta_0 ; 1]$ , dans ce cas ces courbes ne s'intersectent pas. Nous menons donc les comparaisons, qu'on décrit dans la suite, sur tout l'intervalle  $[\beta_0 ; 1]$ ;

- Il peut exister  $\beta' \in [\beta_0 ; 1]$  tel que sur  $[\beta' ; 1]$  l'une des courbes est supérieure à l'autre, alors que pour  $\beta \in [\beta_0 ; \beta' [$  cette courbe est au-dessous de l'autre, ces deux courbes s'intersectent alors en  $\beta'$ . Dans ce cas, nous regardons d'abord l'intervalle  $[\beta' ; 1]$ , puis l'intervalle  $[\beta_0 ; \beta' [$ , pour conduire les comparaisons décrites dans ce qui suit.

Par conséquent, sur l'intervalle de  $\beta$  considéré, nous pouvons donc avoir deux cas de figures possibles représentés dans les illustrations 4.3 et 4.4 suivantes :

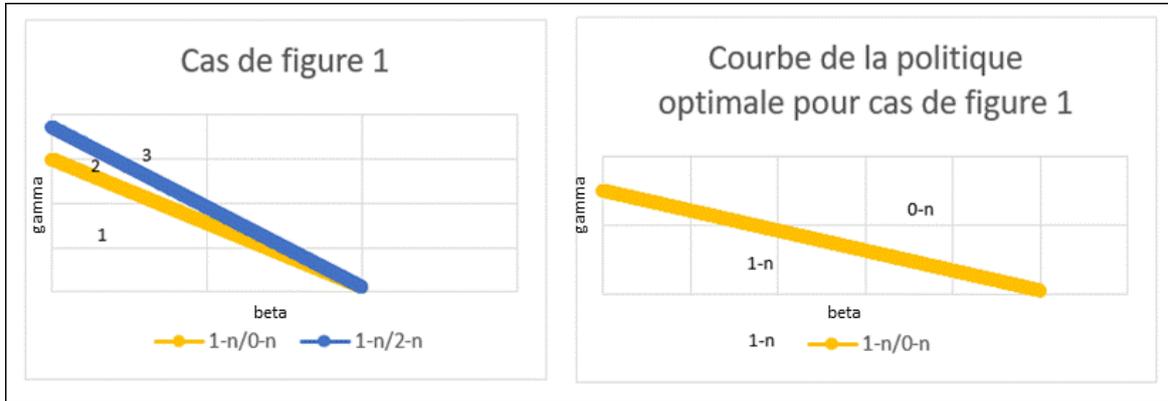


Figure 4.3 : Position relative des courbes d'investissement pour le premier cas

Pour le premier cas, où la courbe  $\gamma_{\max(1-n \setminus 0-n)}(\beta)$  est en-dessous de la courbe  $\gamma_{\max(1-n \setminus 2-n)}(\beta)$ , on distingue 3 zones du plan  $[\beta, \gamma]$  comme suit :

- Zone (1), l'aire du plan en dessous de la courbe  $\gamma_{\max(1-n \setminus 0-n)}$  ;
- Zone (2), l'aire du plan au-dessus de la courbe  $\gamma_{\max(1-n \setminus 0-n)}$ , et en dessous de la courbe  $\gamma_{\max(1-n \setminus 2-n)}$  ;
- Zone (3), l'aire du plan au-dessus de la courbe of  $\gamma_{\max(1-n \setminus 2-n)}$  .

Pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  de la zone (1), il est plus rentable pour l'entreprise d'investir en technologie verte la première année. Pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  de la zone (2), la décision est soit d'investir en technologie verte la 1<sup>ère</sup> année (puisque la position de cette zone se situe sous la courbe  $\gamma_{\max(1-n \setminus 2-n)}$ ) ou ne pas investir dans la technologie verte (puisque la position de cette zone est au-dessus de la courbe  $\gamma_{\max(1-n \setminus 0-n)}$ ). Cependant, la courbe  $\gamma_{\max(1-n \setminus 0-n)}$  qui compare les deux stratégies  $\{1-n\}$  et  $\{0-n\}$  implique que la stratégie d'investissement  $\{0-n\}$  est la meilleure pour les couples  $(\beta, \gamma)$  dans cette zone (2). Par conséquent, dans la zone (2), la décision optimale est de ne pas investir dans la technologie verte. Il est alors évident que, pour les mêmes valeurs de  $\beta$ , l'entreprise n'aurait pas intérêt à investir en technologie verte pour des valeurs plus élevées du surcoût de cette technologie ( $\gamma$  plus élevées). La zone (3) est ainsi, la zone du plan  $[\beta, \gamma]$  pour laquelle la politique optimale est de ne pas investir dans la technologie verte. Dans ce cas, pour les valeurs de  $\beta$ , pour lesquelles  $\gamma_{\max(1-n \setminus 0-n)}(\beta) \leq \gamma_{\max(1-n \setminus 2-n)}(\beta)$ , l'entreprise n'a plus besoin d'étudier davantage la décision d'investissement pour des valeurs plus importantes du surcoût de la technologie verte, étant donné que pour ces valeurs de  $\beta$ , l'entreprise a déjà déterminé les valeurs limites du surcoût de la technologie verte au-delà desquelles il n'est plus rentable d'investir en green.

On déduit alors que l'équation  $\gamma_{\max(1-n \setminus 0-n)} = f(\beta)$  est celle qui permet de déterminer les décisions optimales pour l'entreprise en fonction des valeurs des performances des technologies vertes disponibles. Pour cette partie du plan  $[\beta, \gamma]$ , pour un  $\beta$  donné, la décision

optimale s'avère alors d'investir en technologie verte la première année lorsque le surcoût de cette technologie ne dépasse pas la valeur de  $\gamma_{\max(1-n\setminus 0-n)}(\beta)$ , et ne pas investir en green lorsque le surcoût de la technologie verte est supérieure à cette valeur  $\gamma_{\max(1-n\setminus 0-n)}(\beta)$ .

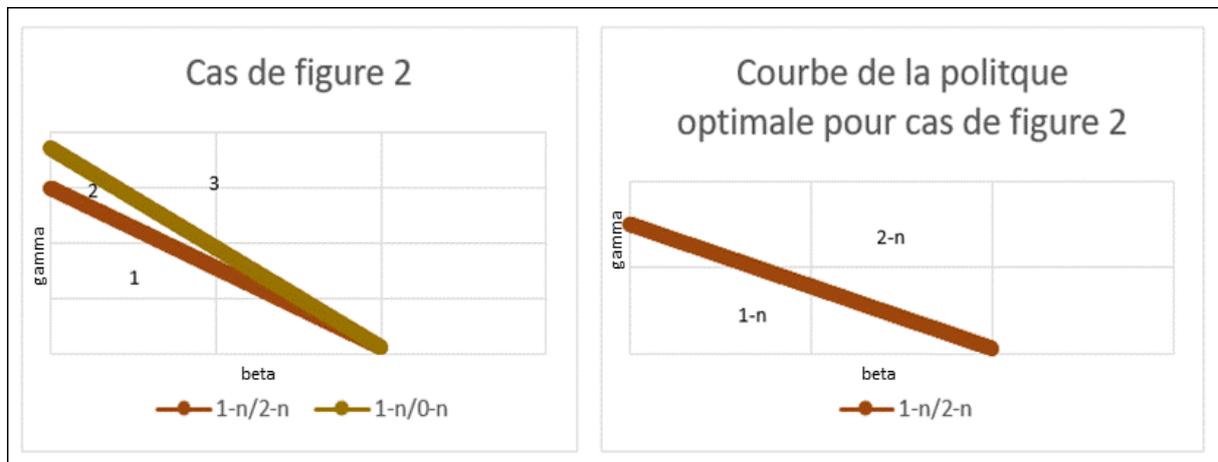


Figure 4.4 : Position relative des courbes d'investissement pour le deuxième cas

Pour le deuxième cas de figure, la courbe de l'équation  $\gamma_{\max(1-n\setminus 2-n)}(\beta)$  est en dessous de la courbe  $\gamma_{\max(1-n\setminus 0-n)}(\beta)$ . Nous obtenons toujours 3 zones distinctes du plan qu'on illustre dans la figure 4.3 comme suit :

- Zone (1), l'aire du plan en dessous de la courbe  $\gamma_{\max(1-n\setminus 2-n)}$  ;
- Zone (2), l'aire du plan au-dessus de la courbe  $\gamma_{\max(1-n\setminus 2-n)}$ , et en dessous de la courbe  $\gamma_{\max(1-n\setminus 0-n)}$  ;
- Zone (3), l'aire du plan au-dessus de la courbe  $\gamma_{\max(1-n\setminus 0-n)}$  .

Pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  de la zone (1), il est plus rentable pour l'entreprise d'investir en technologie verte la première année. Pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  de la zone (2), la meilleure stratégie peut être la décision d'investir en technologie verte l'année 2 (puisque cette zone si situe au-dessus de la courbe  $\gamma_{\max(1-n\setminus 2-n)}$ ) ou d'investir dans la technologie verte l'année 1 (puisque cette zone est sous la courbe  $\gamma_{\max(1-n\setminus 0-n)}$ ). Cependant, la courbe  $\gamma_{\max(1-n\setminus 2-n)}$  qui compare les deux politiques  $\{1-n\}$  et  $\{2-n\}$  implique que la politique d'investissement  $\{2-n\}$  est la meilleure pour les couples  $(\beta, \gamma)$  dans la zone (2). Par conséquent, nous en déduisons que pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  situé sous la courbe  $\gamma_{\max(1-n\setminus 2-n)}$ , la décision optimale est d'investir dans la technologie verte dès la première année et au-dessus de cette courbe, la décision optimale est d'investir en technologie verte la deuxième année. La fonction qui étudie les décisions optimales de l'entreprise pour cette plage de valeurs de  $\beta$  est alors  $\gamma_{\max(1-n\setminus 2-n)} = f(\beta)$ .

En outre, comme la décision optimale dans la zone (2) est d'investir dans la technologie verte à la deuxième année, on ne peut pas déduire à cette étape les valeurs de  $\gamma_{\max}(\beta)$  au-dessus desquelles la décision optimale pour l'entreprise est de ne pas investir en technologie verte. Pour arriver à cette conclusion, il faut étudier la fonction  $\gamma_{\max(2-n\setminus 0-n)}(\beta)$ , qui compare la politique  $\{2-n\}$  à la politique  $\{0-n\}$  et détermine les valeurs de  $\gamma_{\max}$ , pour les valeurs de  $\beta$  considérées, au-dessus desquelles il est plus rentable de ne pas investir en technologie verte

que d'y investir en année 2. Il faut également étudier la fonction  $\gamma_{max(2-n\setminus 3-n)}$  pour comparer la stratégie {2-n} à la stratégie {3-n} et déduire pour quelles valeurs  $\gamma_{max}(\beta)$ , il sera préférable de retarder la décision d'investissement en green à l'année 3. En utilisant le même raisonnement, nous étudions la position relative de ces deux nouvelles courbes de  $\gamma_{max(2-n\setminus 0-n)}$  et  $\gamma_{max(2-n\setminus 3-n)}$  dans le plan  $[\beta, \gamma]$  pour déterminer la décision optimale pour la zone (3) et s'il existe éventuellement d'autres zones pour représenter les politiques d'investissement optimales pour l'entreprise.

En se basant sur ce principe de résolution, nous développons un algorithme qui permet de déduire la solution d'investissement et de production optimale pour l'entreprise, lorsque les deux technologies verte et ordinaire permettent à l'entreprise de générer du bénéfice au plus tard à la même année qui reste inférieure à  $T$ .

**❖ Algorithme de détermination de solution optimale pour le cas où les deux technologies permettent à l'entreprise de générer du profit positif au plus tard la même année  $n$  ( $n < T$ )**

Sous la législation de taxe carbone progressive, lorsque les technologies verte et ordinaire ont pratiquement la même performance environnementale et permettent ainsi à l'entreprise de générer un profit positif au plus tard l'année  $n$  ( $n < T$ ) ( $\beta \in [\beta_0 ; 1]$ ), afin de déduire la décision optimale d'investissement en fonction des performances de la technologie verte disponible, nous exécutons l'algorithme 4.1, illustré dans la figure 4.5 suivante. Cet algorithme permet de déterminer et de tracer dans le plan  $[\beta ; \gamma]$  pour tout  $\beta \in [\beta_0 ; 1]$  et  $\forall \gamma \geq 1$ , les courbes  $\gamma_{max} = f(\beta)$  qui permettent de déterminer les décisions optimales d'investissement et de production pour l'entreprise:

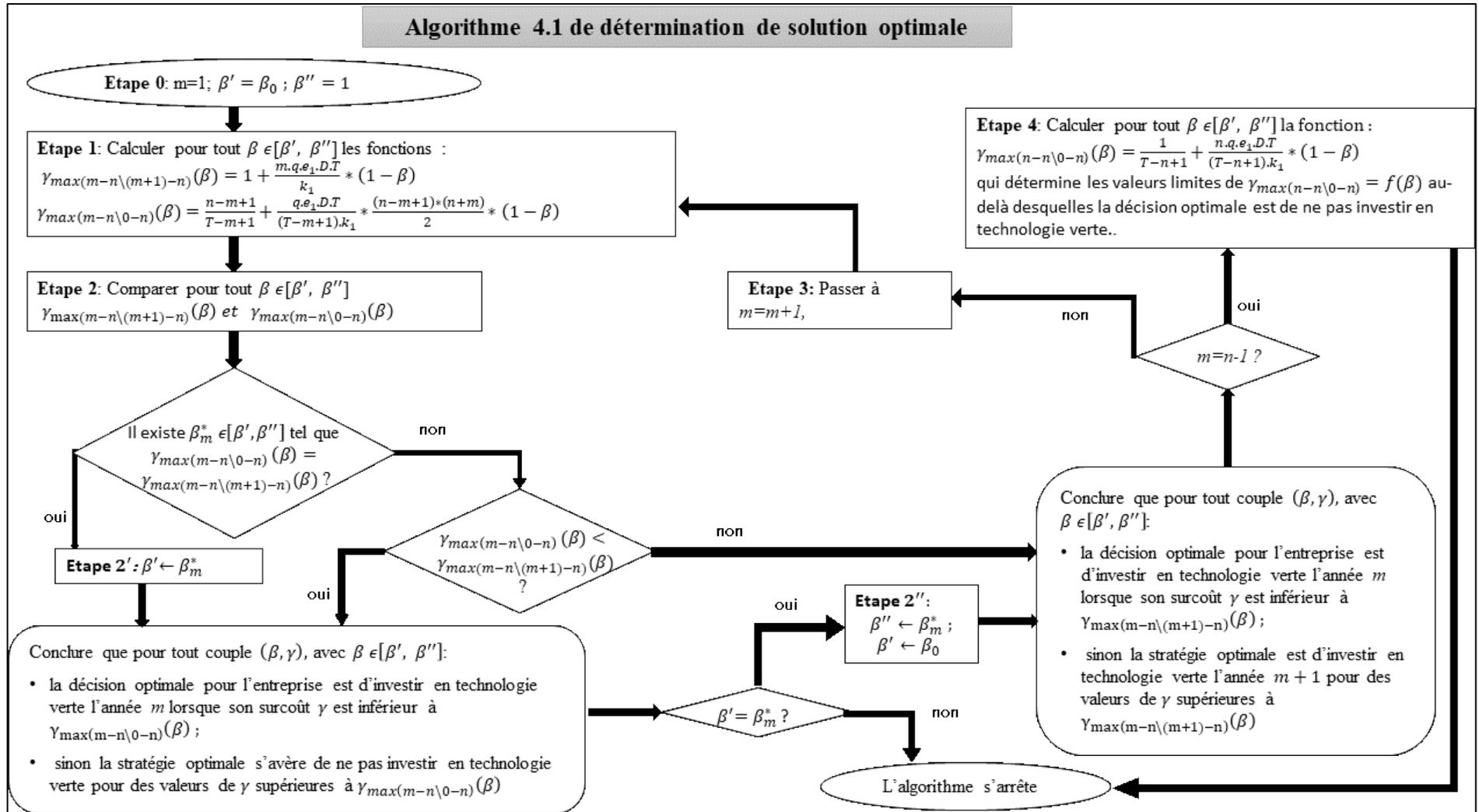


Figure 4.5: Algorithme 4.1 de détermination de solution optimale

Avant d'illustrer l'application de l'algorithme 4.1 sur un exemple concret, nous enchainons, dans la section suivante, avec une deuxième situation qui se traduit par un nouvel algorithme, qu'on note par Algorithme 4.2. Ce dernier permet de déduire la solution optimale dans le cas où la technologie verte permet à l'entreprise de générer un profit positif et de continuer à exercer ses activités pour un nombre maximal d'années plus important que celui qui est permis par la technologie ordinaire (cas  $l(\beta) > n$  avec  $\beta \in [\beta_i; \beta_{i-1}]$ ).

#### 4.3.2.4. Technologie verte permettant de générer du profit positif au-delà de l'année $n$ ( $l(\beta) \geq 1$ )

Pour des valeurs relativement faibles du paramètre  $\beta$ , caractérisant des taux de réduction des émissions de carbone importants, la technologie verte permet à l'entreprise de générer un profit positif au-delà de l'année  $n$  ( $l(\beta) > n$ ), l'année au plus tard à laquelle la technologie ordinaire permet de générer un profit positif. La valeur de  $l(\beta)$  augmente lorsque  $\beta$  diminue. Comme précédemment, nous vérifions toutes les politiques d'investissement et de production faisables pour l'entreprise :

- Investir en technologie verte la première année et produire sur  $l$  années ;
- Investir en technologie verte la deuxième année et produire sur  $l$  années ;
- Investir en technologie verte la  $i$ ème année et produire sur  $l$  années ;
- Investir en technologie verte l'année  $n+1$  et produire sur  $l$  années ;
- Finalement, ne pas investir en technologie verte, installer la technologie ordinaire la première année, produire  $n$  années, puis la vendre vers la fin de cette année. \*

Dans l'objectif de comparer deux à deux ces stratégies d'investissement et de production envisageables, on établit la proposition 4.3 ci-dessous :

**Proposition 4.3 :** Sous une taxe carbone progressive linéaire, pour un taux de réduction des émissions de carbone donné de la technologie verte (caractérisé par un  $\beta$  donné avec

$\beta \in [\beta_i; \beta_{i-1}]$ ), tel que  $l(\beta) = n + i$  pour  $i \in [1..T - n]$ , avec  $\beta_i = \frac{D(P-C) - \frac{1}{5} * K_1}{(n+i) * q * e_1 * D}$  pour  $i \in [0..T - n - 1]$  et  $\beta_{T-n} = 0$

- La stratégie  $\{m-l\}$  est plus rentable que la stratégie  $\{(m+1)-l\}$  lorsque le surcoût de la technologie verte est inférieur à  $\gamma_{\max(m-l \setminus (m+1)-l)}(\beta)$ , sinon la stratégie  $\{(m+1)-l\}$  s'avère plus rentable que  $\{m-l\}$  avec  $\gamma_{\max(m-l \setminus (m+1)-l)}(\beta) = 1 + \frac{m.q.e_1.D.T}{k_1} * (1 - \beta)$  (4.21);
- La stratégie  $\{m-l\}$  est plus rentable que la stratégie  $\{0-n\}$  lorsque le surcoût de la technologie verte est inférieure à  $\gamma_{\max(m-l \setminus 0-n)}(\beta)$ , sinon, sinon la stratégie  $\{0-n\}$  s'avère plus rentable que  $\{m-l\}$  avec  $\gamma_{\max(m-l \setminus 0-n)}(\beta) = \frac{n-m+1}{T-m+1} + \frac{(l-n).T.D.(P-C)}{(T-m+1).K_1} + \frac{q.e_1.D.T}{(T-m+1).k_1} * \sum_{t=m}^n t - \sum_{t=m}^l t. \beta$  (4.22).

**Preuve :**

La technologie ordinaire permet à l'entreprise de générer du profit positif au plus tard à l'année  $n$ . Alors que la technologie verte, caractérisée par son taux de réduction d'émission de carbone  $(1 - \beta)$ , permet à l'entreprise de générer du profit positif au plus tard à l'année  $l(\beta)$ . Par conséquent, si l'entreprise installe la technologie verte, quelle que soit l'année d'investissement en green, elle produit sur  $l(\beta)$  années. Pour comparer les stratégies

d'investissement en vert, il suffit donc de comparer les fonctions coûts de ces stratégies. Par contre, pour comparer les stratégies d'investissement en vert à la stratégie de ne pas investir en vert, on compare plutôt les profits de ces stratégies.

Pour comparer la stratégie d'investir en green à l'année  $m$ ,  $\{m-l\}$ , à la stratégie de retarder cet investissement à l'année  $m+1$ ,  $\{(m+1)-l\}$ , on résout l'inégalité [ $\text{coût total}(\{m-l\}) \leq \text{coût total}(\{(m+1)-l\})$ ] avec  $\text{Coût total}(\{m-l\}) = \frac{m-1}{T} \cdot k_1 + \frac{T-m+1}{T} \cdot \gamma \cdot k_1 + \sum_{t=1}^{m-1} q \cdot t \cdot e_1 \cdot D + \sum_{t=m}^l q \cdot t \cdot e_1 \cdot D \cdot \beta$ . En résolvant cette équation, on obtient  $\gamma_{\max(m-l \setminus (m+1)-l)} \leq 1 + \frac{m \cdot q \cdot e_1 \cdot D \cdot T}{k_1} * (1 - \beta)$ , on en déduit alors l'équation (4.21).

Ensuite, pour comparer la stratégie d'investir en technologie verte à l'année  $m$  et de produire  $l$  années,  $\{m-l\}$ , à la stratégie de ne pas investir en green et de produire sur  $n$  années avec la technologie ordinaire, on résout l'inégalité [ $\text{Profit}(\{m-l\}) \leq \text{Profit}(\{0-n\})$ ], sachant que  $\text{Profit}(\{m-l\}) = l \cdot D \cdot (P - C) - (\frac{m-1}{T} \cdot k_1 + \frac{T-m+1}{T} \cdot \gamma \cdot k_1 + \sum_{t=1}^{m-1} q \cdot t \cdot e_1 \cdot D + \sum_{t=m}^l q \cdot t \cdot e_1 \cdot D \cdot \beta)$  et  $\text{Profit}(\{0-n\}) = n \cdot D \cdot (P - C) - (\frac{n}{T} \cdot k_1 + \sum_{t=1}^n q \cdot t \cdot e_1 \cdot D)$ . On obtient alors  $\gamma_{\max(m-l \setminus 0-n)} \leq \frac{n-m+1}{T-m+1} + \frac{(l-n) \cdot T \cdot D \cdot (P-C)}{(T-m+1) \cdot K_1} + \frac{q \cdot e_1 \cdot D \cdot T}{(T-m+1) \cdot k_1} * \sum_{t=m}^n t - \sum_{t=m}^l t \cdot \beta$ , d'où on déduit l'équation (4.22) ■

En utilisant ces équations, nous développons l'algorithme 4.2. Cet algorithme permet de déterminer et de tracer dans le plan  $[\beta, \gamma]$  pour tout  $\beta \in [0; \beta_0]$  et  $\forall \gamma \geq 1$ , les courbes  $\gamma_{\max} = f(\beta)$  qui déterminent les décisions optimales d'investissement et de production pour l'entreprise.

❖ **Algorithme 4.2 de détermination de la solution optimale appliqué au cas où la technologie verte permet de générer un profit positif au-delà de l'année  $n$**

Sous la taxe carbone progressive linéaire, lorsque le taux de réduction des émissions de carbone de la technologie verte, permet à l'entreprise de générer un profit positif au plus tard à l'année  $l(\beta)$  tel que  $l(\beta) = n + i$  pour  $i \in [1..T - n]$ , et  $\beta \in [\beta_i; \beta_{i-1}[$ , sachant que  $\beta_i = \frac{D(P-C) - \frac{1}{5} \cdot K_1}{(n+i) \cdot q \cdot e_1 \cdot D}$  pour  $i \in [0..T - n_1]$  et  $\beta_{T-n} = 0$ , pour déduire la décision optimale d'investissement en fonction des performances de la technologie verte disponible, nous exécutons l'algorithme 4.2 illustré dans la figure (4.6) suivante :

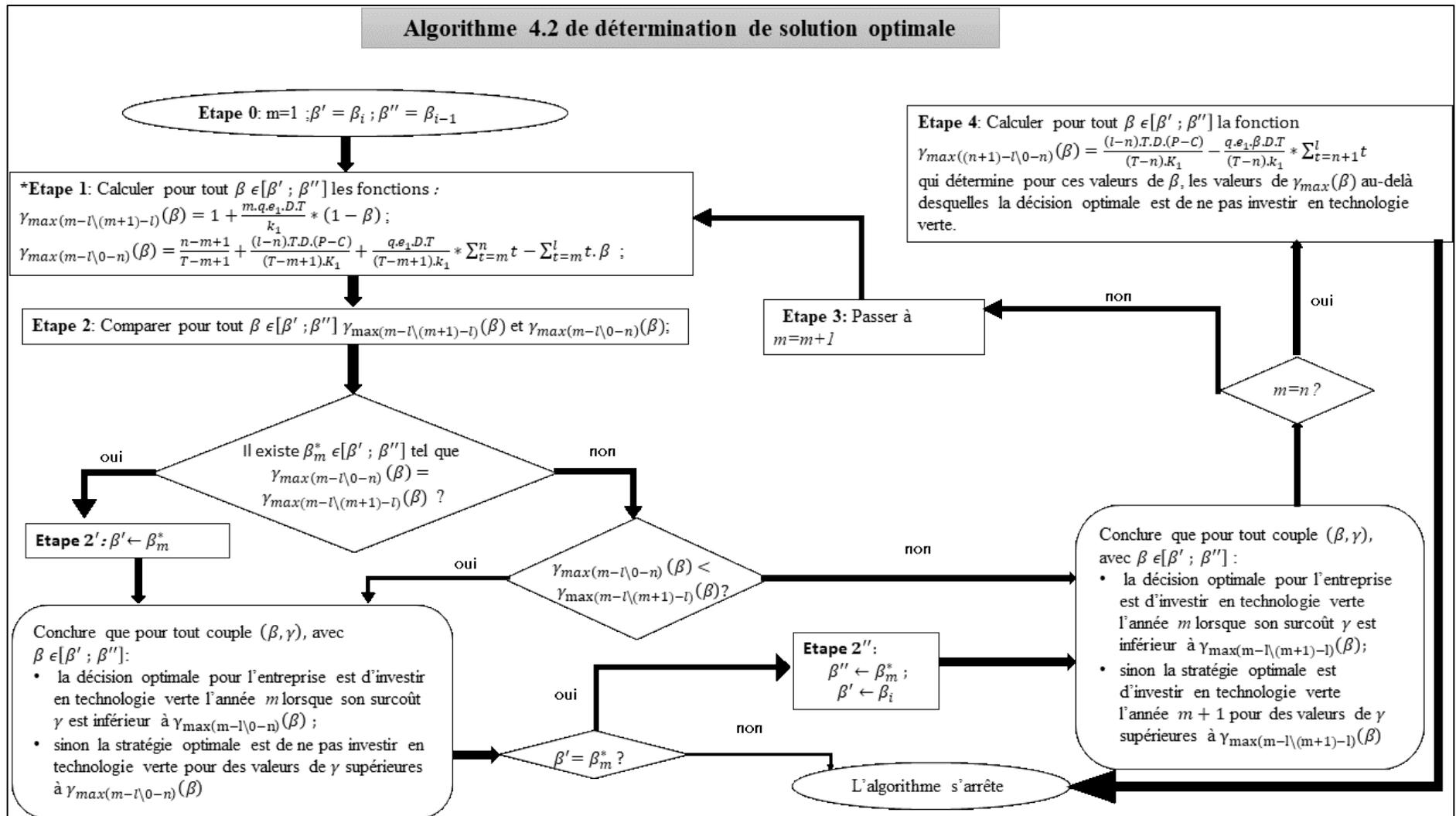


Figure 4.6 : Algorithme 4.2 de détermination de solution optimal

En utilisant cet algorithme, nous arrivons à déterminer analytiquement les décisions optimales d'investissement et de production pour l'entreprise, compte tenu des performances de la technologie verte disponible sous la législation de taxe carbone progressive considérée  $Q(t) = q \cdot t$ .

#### 4.3.2.5. Exemple illustratif appliquant les algorithmes 4.1 et 4.2

Nous proposons à ce niveau d'introduire un exemple d'application des algorithmes 4.1 et 4.2, qu'on note *Exemple 2*, pour illustrer ce cas où la technologie ordinaire disponible ne permet pas de dégager un profit positif sur tout l'horizon sous la taxe carbone progressive considérée. Nous reprenons alors le même exemple numérique, *Exemple 1*, en estimant cette fois que l'émission de carbone unitaire de la technologie ordinaire est de  $e_1 = 80Kg/unité$ . Nous considérons ensuite une taxe carbone linéaire progressive dont le taux d'augmentation est deux fois plus important que le modèle de la taxe carbone linéaire du gouvernement Canadien,  $Q(t) = 20 \cdot t$  avec  $t \in [1..5]$ . Nous déterminons ainsi que l'entreprise ne peut générer un profit positif en utilisant la technologie ordinaire qu'au plus tard l'année 2 ( $n = 2$ ). En fonction de la performance environnementale de la technologie verte disponible, nous déterminons le nombre maximal d'années pour lesquelles cette technologie verte permet à l'entreprise de générer un profit positif. Le tableau 4.1 ci-dessous résume nos résultats :

Tableau 4.1 : Détermination des nombres d'années de production en fonction de  $\beta$

Plages du paramètre $\beta$ , $[\beta_i; \beta_{i-1}[$	Le nombre maximal d'années de production $l(\beta)$
$[0,824 ; 1]$	2
$[0,618 ; 0,824[$	3
$[0,494 ; 0,618[$	4
$[0 ; 0,494[$	5

Pour  $\beta \in [0,824 ; 1]$ ,  $l(\beta) = 2 = n$  ; lorsque le taux de réduction des émissions de carbone de la technologie verte, ne dépasse pas les 17,6% par rapport à l'ordinaire, en utilisant cette technologie verte ou la technologie ordinaire, l'entreprise ne peut pas continuer son business en dégagant un profit positif sous la taxe carbone appliquée, au-delà de la deuxième année même avec la technologie verte. Selon l'algorithme 4.1 de détermination de solution optimale, on fixe  $m=1$ , et on calcule les deux équations  $\gamma_{max(1-2 \setminus 2-2)} = f(\beta)$  et  $\gamma_{max(1-2 \setminus 0-2)} = f(\beta)$  pour  $\beta \in [\beta_0 ; 1]$ . Le graphe à gauche de la figure 4.7 ci-dessous illustre les courbes de ces deux équations.

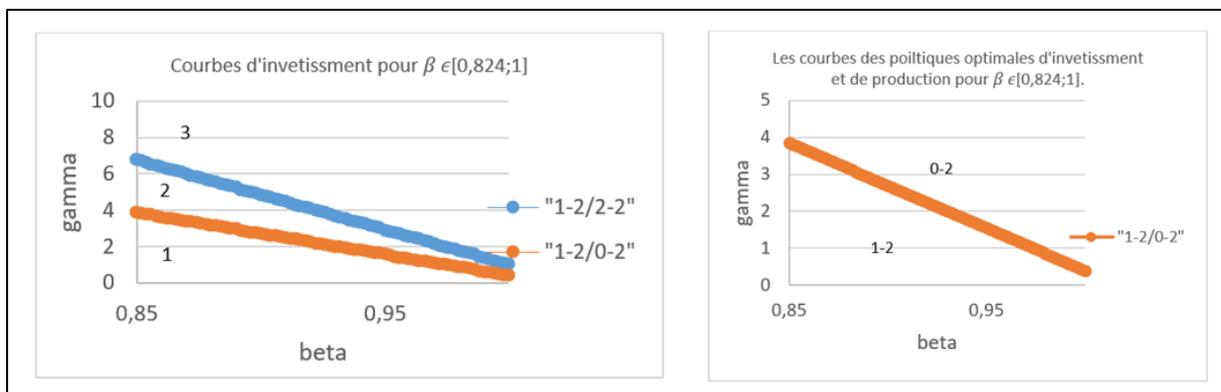


Figure 4.7 : Les courbes d'investissement faisables et optimales pour  $\beta \in [\beta_0 ; 1]$ .

Dans cet exemple, pour  $\beta \in [0,824 ; 1]$ , la courbe  $\gamma_{max(1-2 \setminus 0-2)} = f(\beta)$  est en dessous de la courbe  $\gamma_{max(1-2 \setminus 2-2)} = f(\beta)$ . On en déduit alors que cette courbe  $\gamma_{max(1-2 \setminus 0-2)} = f(\beta)$  détermine les stratégies optimales d'investissement en fonction des valeurs de  $\gamma$  et  $\beta$ . Par conséquent, nous aurons réellement que 2 zones d'investissement du plan  $[\beta, \gamma]$  ; pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  en dessous de la courbe  $\gamma_{max(1-2 \setminus 0-2)}$ , il est optimal d'investir dès l'année 1 en technologie verte, et pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  au-dessus de cette courbe il est optimal de ne pas investir en green. Le graphe à droite de la figure 4.5 illustre ces deux zones relatives aux politiques d'investissent optimales pour tout  $\beta \in [0,824 ; 1]$ .

Ensuite, considérons une technologie verte qui a une meilleure performance environnementale et qu'elle peut réduire les émissions de carbone d'au moins 17,6% à au plus 38,2% ( $\beta \in [0,618 ; 0,824[$ ). En utilisant cette technologie verte, l'entreprise réussit à dégager un profit positif sous la taxe carbone en vigueur au plus tard la troisième année, soit  $l(\beta) = 3$  pour  $\beta \in [0,618 ; 0,824[$ .

Selon l'algorithme de détermination de la solution optimale 4.2, nous déterminons, pour  $\beta \in [0,618 ; 0,824[$ , les équations pour  $m=1$  ;  $\gamma_{max(1-3 \setminus 2-3)} = f(\beta)$  et  $\gamma_{max(1-3 \setminus 0-2)} = f(\beta)$ . Nous obtenons la courbe  $\gamma_{max(1-3 \setminus 0-2)} = f(\beta)$  en dessous de la courbe  $\gamma_{max(1-3 \setminus 2-3)} = f(\beta)$  pour tous  $\beta \in [0,618 ; 0,824[$ . On déduit que pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  en dessous de la courbe  $\gamma_{max(1-3 \setminus 0-2)} = f(\beta)$ , la politique optimale est d'investir en technologie verte la première année ; et pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  au-dessus de cette courbe il s'avère optimal de ne pas investir en green. Il n'est plus utile alors de comparer les autres politiques d'investissent, puisque nous avons déjà obtenu les valeurs de  $\gamma_{max}(\beta)$  au-delà desquelles il est optimal de ne plus investir en technologie verte. La figure 4.8 illustre la courbe qui compare les décisions d'investissement optimales sur l'intervalle  $[0,618 ; 0,824[$ .

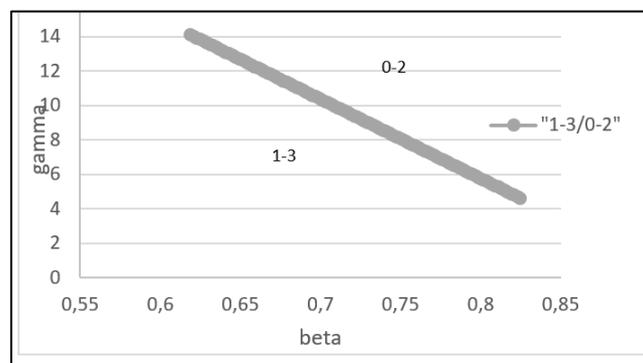


Figure 4.8. Les courbes de décisions d'investissement et de production optimale pour  $\beta \in [0,618 ; 0,824[$

Puis, on considère les valeurs du taux de réduction des émissions de carbone, tel que  $\beta \in [0,494 ; 0,618[$ , avec lesquelles la technologie verte permet à l'entreprise de générer un profit positif au plus tard la quatrième année. En suivant toujours l'algorithme 4.2, pour  $m = 1$ , pour tout  $\beta \in [0,494 ; 0,618[$ , nous déterminons les équations  $\gamma_{max(1-4 \setminus 2-4)} = f(\beta)$  et  $\gamma_{max(1-4 \setminus 0-2)} = f(\beta)$ . En étudiant la position relative de ces deux courbes, nous déterminons que pour  $\beta \in [0,582 ; 0,618[$  la courbe  $\gamma_{max(1-4 \setminus 0-2)} = f(\beta)$  est en dessous de la courbe  $\gamma_{max(1-4 \setminus 2-4)} = f(\beta)$ . On déduit que pour  $\beta \in [0,582 ; 0,618[$ , pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  en dessous de la courbe  $\gamma_{max(1-4 \setminus 0-2)}$  la politique optimale est d'investir en

technologie verte à l'année 1; et pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  au-dessus de cette courbe il s'avère optimal de ne pas investir en green. Il n'est plus utile de comparer les autres politiques d'investissent, sur cet intervalle de  $\beta \in [0,582 ; 0,618[$ , puisque nous avons déjà obtenu les valeurs de  $\gamma_{max}(\beta)$  au-delà desquelles il est optimal de ne plus investir en green.

Par contre, pour  $\beta \in [0,494 ; 0,618[$ , la courbe  $\gamma_{max(1-4 \setminus 0-2)} = f(\beta)$  est au-dessus de la courbe  $\gamma_{max(1-4 \setminus 2-4)} = f(\beta)$ . On en déduit que sur cet intervalle de  $\beta$ , pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  en dessous de la courbe  $\gamma_{max(1-4 \setminus 2-4)}$ , il est optimal d'investir en technologie verte dès l'année 1; et pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  au-dessus de cette courbe il s'avère intéressant d'investir en technologie verte à l'année 2. A ce stade, il faut déterminer jusqu'à quelles valeurs de  $\gamma_{max}(\beta)$ , pour tout  $\beta$  sur cet intervalle  $[0,494 ; 0,582[$ , la décision d'investir en technologie verte à l'année 2 reste optimale. Dans cet objectif, suivant l'algorithme 4.1, on passe à  $m=2$ , pour comparer les équations  $\gamma_{max(2-4 \setminus 3-4)} = f(\beta)$  et  $\gamma_{max(2-4 \setminus 0-2)} = f(\beta)$  sur l'intervalle  $[0,494 ; 0,582[$ . La courbe  $\gamma_{max(2-4 \setminus 0-2)}$  se trouve en dessous de la courbe  $\gamma_{max(2-4 \setminus 3-4)}$  pour tout  $\beta \in [0,494 ; 0,582[$ . On en déduit que pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  en dessous de la courbe  $\gamma_{max(2-4 \setminus 0-2)}$  la politique optimale est d'investir à l'année 2 en technologie verte; et pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  au-dessus de cette courbe il s'avère optimal de ne pas investir en green. Il n'est plus utile alors de comparer les autres politiques d'investissement, puisque nous avons déjà obtenu les valeurs de  $\gamma_{max}(\beta)$  à partir desquelles il est optimal de ne plus investir en green. La figure 4.9 ci-dessous illustre les courbes qui compare les décisions d'investissement optimales pour  $\beta \in [0,494 ; 0,618[$ .

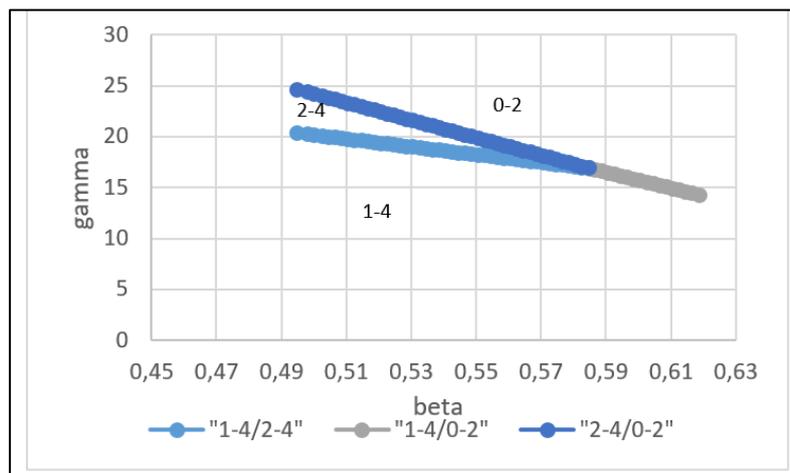


Figure 4.9. Les courbes de décisions d'investissement et de production optimale pour  $\beta \in [0,494 ; 0,618[$

Finalement avec une technologie verte ayant une performance environnementale qui permet de réduire les émissions de carbone de plus de 50,6% (pour  $\beta \in [0; 0,494[$ ), l'entreprise peut générer du profit positif sur tout l'horizon sous la taxe carbone progressive considérée. En adoptant les étapes de l'algorithme 4.2, nous déterminons pour  $m=1$ , pour  $\beta \in [0; 0,494[$ , les équations  $\gamma_{max(1-5 \setminus 2-5)} = f(\beta)$  et  $\gamma_{max(1-5 \setminus 0-2)} = f(\beta)$ .

Nous étudions alors la position relative des courbes  $\gamma_{max(1-5 \setminus 2-5)} = f(\beta)$  et  $\gamma_{max(1-5 \setminus 0-2)} = f(\beta)$ . Nous notons que pour tout  $\beta \in [0; 0,494[$  la courbe  $\gamma_{max(1-5 \setminus 2-5)}$  est en dessous de la courbe  $\gamma_{max(1-5 \setminus 0-2)}$ . On en déduit que pour  $\beta \in [0; 0,494[$ , pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  en dessous de la courbe  $\gamma_{max(1-5 \setminus 2-5)}$  il est optimal d'investir en technologie verte dès l'année 1 et au-dessus de cette courbe il s'avère plus intéressant d'investir en

technologie verte à l'année 2. A ce stade, il faut déterminer jusqu'à quelles valeurs de  $\gamma_{max}(\beta)$ , pour  $\beta \in [0; 0,494[$ , la décision d'investir en technologie verte à l'année 2 reste la stratégie optimale. Nous comparons alors pour  $m=2$ , l'équation  $\gamma_{max(2-5\setminus 0-2)} = f(\beta)$  et  $\gamma_{max(2-5\setminus 3-5)} = f(\beta)$ . Nous trouvons que pour tout  $\beta \in [0,236; 0,494[$ , la courbe  $\gamma_{max(2-5\setminus 0-2)}$  est en dessous de la courbe  $\gamma_{max(2-5\setminus 3-5)}$ . On déduit que pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  en dessous de la courbe  $\gamma_{max(2-5\setminus 0-2)}$ , la politique optimale est d'investir à l'année 2 en technologie verte ; et au-dessus de cette courbe il s'avère optimal de ne pas investir en green. Il n'est plus utile alors de comparer les autres politiques d'investissement pour  $\beta \in [0,236; 0,494[$ , puisque nous avons déjà obtenu les valeurs de  $\gamma_{max}(\beta)$  à partir desquelles il est optimal de ne plus investir en green. Toutefois, pour  $\beta \in [0; 0,236[$ , la courbe  $\gamma_{max(2-5\setminus 3-5)}$  est en dessous de la courbe  $\gamma_{max(2-5\setminus 0-5)}$ . On en déduit que pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  en dessous de la courbe  $\gamma_{max(2-5\setminus 3-5)}$ , il est optimal d'investir en technologie verte à l'année 2 et pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  au-dessus de cette courbe il s'avère intéressant d'investir en technologie verte à l'année 3. A cette étape, il faut déterminer jusqu'à quelles valeurs de  $\gamma_{max}(\beta)$  sur l'intervalle  $[0; 0,236[$  la décision d'investir en green à l'année 3 reste la politique optimale. Dans cet objectif, on passe à  $m=3$ , et suivant l'algorithme de détermination de solution optimale 4.2, on compare les équations  $\gamma_{max(3-5\setminus 4-5)} = f(\beta)$  et  $\gamma_{max(3-5\setminus 0-2)} = f(\beta)$  pour tout  $\beta \in [0; 0,236[$ . La courbe  $\gamma_{max(3-5\setminus 0-2)}$  s'avère en dessous de la courbe  $\gamma_{max(3-5\setminus 4-5)}$  pour tout  $\beta \in [0; 0,236[$ . On en déduit alors que pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  en dessous de la courbe  $\gamma_{max(3-5\setminus 0-2)}$  la politique optimale est d'investir à l'année 3 en technologie verte ; et pour tout couple  $(\beta, \gamma)$  au-dessus de cette courbe il s'avère optimal de ne pas investir en green. Il n'est plus utile alors de comparer les autres politiques d'investissement, puisque nous avons déjà obtenu les valeurs de  $\gamma_{max}(\beta)$  au-delà desquelles il est optimal de ne plus investir en green. La figure 4.10 ci-dessous illustre les courbes qui comparent les décisions d'investissement optimales pour  $\beta \in [0; 0,494[$ .

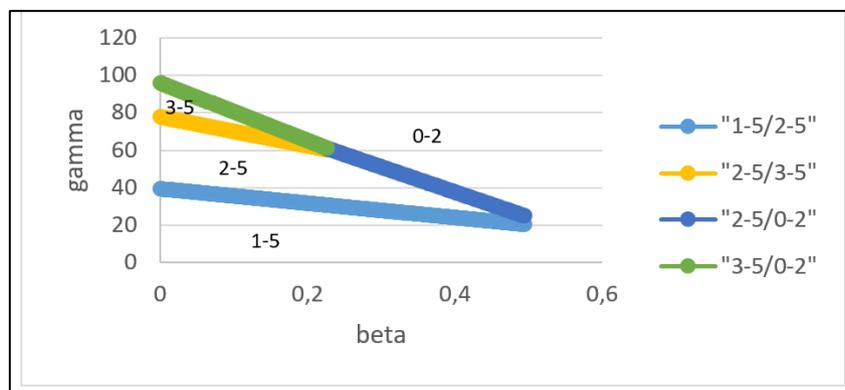


Figure 4.10. Les courbes de décisions d'investissement et de production optimale pour  $\beta \in [0; 0,494[$

Finalement en concaténant toutes les courbes obtenues ci-dessus, pour tous  $\beta \in [0; 1]$  les courbes des stratégies optimales d'investissement et de production sont illustrées dans la figure 4.11 ci-dessus.

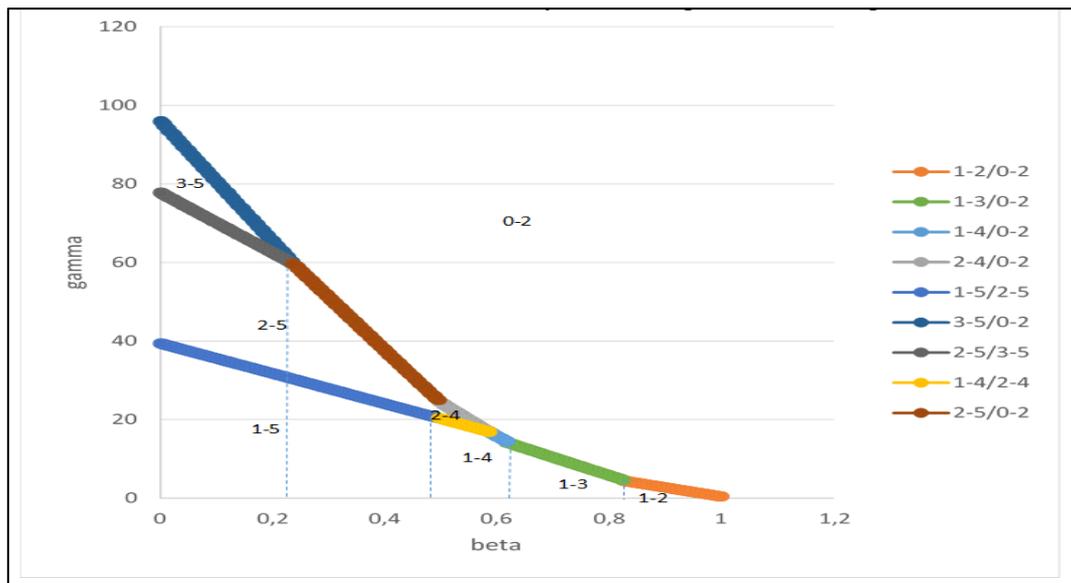


Figure 4.11. Les courbes de décisions d'investissement et de production optimale pour  $\beta \in [0 ; 1]$

Dans la section suivante, à travers un ensemble d'expérimentations numériques et en utilisant les propositions de ce chapitre ainsi que les algorithmes de détermination des solutions optimales 4.1 et 4.2, nous visons à étudier l'impact de la taxe carbone dynamique sur les décisions stratégiques de la CL et ses performances.

### 4.3.3. Expérimentations numériques

Nous développons un algorithme général de détermination des solutions optimales qui inclut l'algorithme 4.1, 4.2, et qui exécute la proposition 4.1 en utilisant le logiciel *Matlab R2017a*. Cet algorithme général permet de déterminer et de tracer dans le plan  $[\beta ; \gamma]$ , pour tout  $\beta \in [0 ; 1]$  et  $\forall \gamma \geq 1$ , les courbes  $\gamma_{max} = f(\beta)$  qui définissent les décisions optimales d'investissement et de production pour l'entreprise sous la taxe carbone progressive considérée. En utilisant un exemple numérique dérivé de l'industrie du textile, nous menons une analyse de sensibilité sur le surcoût de la technologie verte ( $\gamma$ ) dans le but d'illustrer son impact sur les décisions stratégiques d'investissement. Ensuite, nous analysons l'impact de la taxe carbone linéaire progressive sur les décisions stratégiques de l'entreprise en faisant varier le taux d'augmentation de cette taxe carbone ( $q$ ). Finalement, nous étudions cet impact de la taxe carbone sur deux types d'industries, une industrie propre et une autre plus polluante, en fonction de leurs niveaux de pollution (déterminé par le taux d'émission de carbone unitaire de la technologie ordinaire,  $e_1$ ). Pour mener ces analyses numériques, nous nous basons sur l'exemple numérique utilisé auparavant. Nous rappelons ainsi que  $D = 12000$  unités ;  $P = 10\$$  ;  $C = 6\$$  ;  $K_1 = 2500\$$  et  $e_1 = 40kg/unité$ .

#### 4.3.3.1. Impact du surcoût et du taux de réduction des émissions de carbone de la technologie verte sur les décisions d'investissement

Dans une première expérimentation, nous considérons que le taux unitaire d'émission de carbone en utilisant la technologie ordinaire est  $e_1 = 40kg/tCO_2$  (Ball, 2008). On suppose que  $q = 10$ , ce qui signifie que  $Q(t) = 10 \cdot t$  avec  $T=5$ . Dans la *figure 4.12*, nous illustrons les zones du plan  $[\beta, \gamma]$  qui définissent les décisions optimales d'investissement en fonction de la variation du surcoût de la technologie verte en fonction de son taux de réduction des

émissions de carbone. Ces zones du plan  $[\beta, \gamma]$  sont alors représentées comme suit : Investir dans la technologie verte en année 1 (zone 1), en année 2 (zone 2), en année 3 (zone 3), en année 4 (zone 4), en année 5 (zone 5) et ne pas investir dans la technologie verte (zone 0).

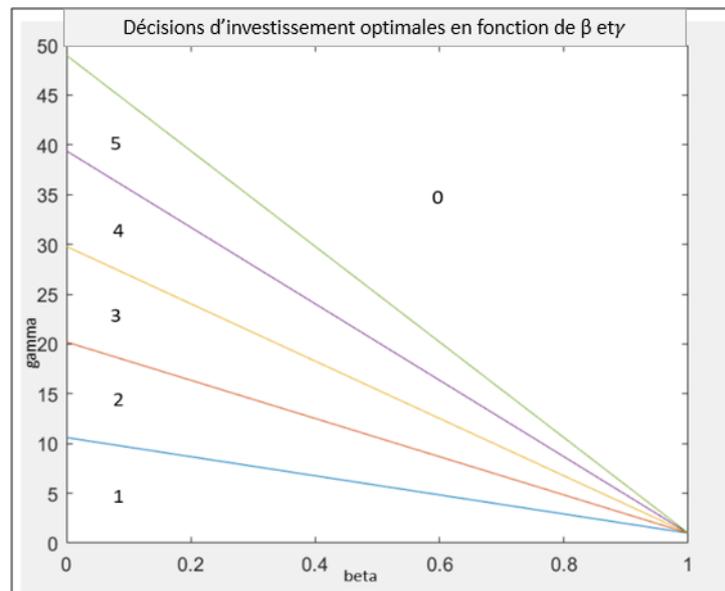


Figure 4.12: Les décisions optimales d'investissement sous une taxe carbone progressive linéaire  $Q(t)=10.t$

**Observation 1:**

Pour un taux d'émission de carbone donné de la technologie verte ( $\beta$ ), lorsque le surcoût de l'investissement vert augmente ( $\gamma$  augmente), il est préférable de reporter l'investissement dans la technologie verte. En outre, pour chaque taux d'émission de carbone ( $\beta$ ), il existe une valeur limite du surcoût,  $\gamma_{max}(\beta)$ , pour laquelle il est plus rentable de ne pas investir dans la technologie verte en dépit de la législation de taxe carbone progressive. Lorsque la performance environnementale de la technologie verte disponible s'améliore ( $\beta$  diminue), la valeur limite de  $\gamma_{max}(\beta)$  augmente.

Nous considérons d'abord le cas où la technologie verte a une faible performance environnementale  $\beta = 0,8$ . Lorsque le surcoût de cette technologie verte disponible ( $\gamma$ ) est inférieur à  $\gamma_{max(1\setminus 2)}(0,8) = 2,91$ , la solution optimale est d'investir dans la technologie verte dès la première année. Lorsque  $\gamma$  se situe dans l'intervalle  $[2,91 ; 4,8]$ , la décision optimale est de retarder l'investissement vert à la deuxième année. Cependant, lorsque le surcoût de cette technologie verte ( $\gamma$ ) est supérieur à  $\gamma_{max(5\setminus 0)}(0,8) = 10,5$ , la décision optimale est de ne pas investir dans la technologie verte.

Nous considérons ensuite le cas où la performance environnementale de la technologie verte disponible s'améliore, en considérant ainsi un faible taux d'émission donné par  $\beta = 0,2$ . Dans ce cas, l'entreprise choisit d'investir dans cette technologie verte dès la première année tant que le surcoût de la technologie verte disponible ne dépasse pas  $\gamma_{max(1\setminus 2)}(0,2) = 8,6$ . Puis la décision optimale pour l'entreprise est d'investir dans cette technologie verte à la deuxième année, lorsque son surcoût est dans l'intervalle  $[8,6 ; 16,4]$ . Enfin, l'entreprise décide de ne pas investir dans une telle technologie verte lorsque son surcoût est supérieur à  $\gamma_{max(5\setminus 0)}(0,2) = 39,3$ . Il est évident que les taxes carbone sont plus efficaces pour inciter les entreprises à

investir dans les technologies vertes en dépit de leurs surcoûts élevés, uniquement si leur taux de réduction des émissions de carbone est suffisamment bon (faible valeur de  $\beta$ ).

Nous soulignons que les fonctions  $\gamma_{\max(m \setminus m+1)} = f(\beta)$ , sont linéaires décroissantes en fonction de  $\beta$ . Les pentes de ces droites augmentent quand l'année d'investissement dans la technologie verte augmente ( $m$  augmente). En effet, sous une taxe carbone progressive linéaire donnée, afin d'avancer l'investissement dans la technologie verte de l'année 2 à l'année 1, il faut une diminution plus importante de son surcoût que celle qui pousse à avancer l'investissement en green de l'année 3 à 2 et ainsi de suite. A titre d'exemple, pour  $\beta = 0,9$ , avec seulement 12% de diminution de la valeur de  $\gamma$  l'entreprise est incitée à avancer sa décision d'investissement en technologie verte de l'année 5 à l'année 4. Toutefois, une diminution d'au moins 42% du surcoût de la technologie verte est nécessaire pour pousser l'entreprise à avancer sa décision d'investissement en technologie verte de l'année 2 à l'année 1. En fait, sous des valeurs élevées de taxe carbone atteintes vers la fin de l'horizon, la décision d'investissement en technologie verte est plus sensible à la variation de son surcoût par rapport à la technologie ordinaire. Sous de telles valeurs de taxes carbone élevées, les entreprises sont incitées à faire avancer la décision d'investissement vert même pour une légère baisse de son surcoût  $\gamma$ . Cependant, au cours des premières années, étant donné que la législation de taxe carbone linéaire progressive est lancée avec des valeurs de taxes relativement basses, la décision d'avancer l'investissement en technologie verte ne peut être la décision optimale que pour une réduction significative de son surcoût ( $\gamma$ ). Au cours de ces années, les taxes carbone ne sont pas suffisamment élevées pour inciter les entreprises à investir en technologie verte. Dans ces conditions, une réduction significative du surcoût des technologies vertes est essentielle pour rentabiliser la décision d'investissement vert pour qu'elle soit la décision optimale pour les entreprises. Par conséquent, nous recommandons au gouvernement d'envisager un système de subventions dynamique afin de contrebalancer l'effet de l'augmentation progressive de la taxe carbone et d'encourager les entreprises à investir en technologies vertes au plus tôt. Dans cette perspective, des subventions plus importantes sont à accorder aux entreprises qui investissent en technologie verte au plus tôt.

#### ***4.3.3.2. Impact de la taxe carbone progressive linéaire sur les décisions d'investissement***

Pour cette deuxième expérimentation, dans un premier lieu, nous considérons toujours que l'émission unitaire de carbone de la technologie ordinaire est  $e_1 = 40 \text{ KgCO}_2$ . Pour souligner l'impact de la taxe carbone linéaire progressive, nous envisageons trois législations de taxe carbone linéaire  $Q(t) = 10.t$ ;  $Q(t) = 15.t$  and  $Q(t) = 30.t$  et nous fixons toujours  $T=5$ . Sous chaque taxe carbone linéaire considérée, nous étudions les décisions d'investissement en fonction des performances des technologies vertes disponibles ( $\beta$  and  $\gamma$ ).

#### **Observation 2:**

*Il est recommandé aux gouvernements d'imposer des taxes carbone élevées pour garantir la décision d'investissement en technologie verte au plus tôt lorsque son surcoût est élevé. Dans la même perspective, nous en déduisons que si les technologies vertes disponibles ne coûtent pas chères par rapport aux technologies ordinaires, le gouvernement peut appliquer des taxes carbone pas trop élevées capables d'encourager l'investissement vert au plus tôt tout en minimisant l'impact négatif de cette législation sur la rentabilité des entreprises.*

Sous les législations progressives de taxe carbone  $Q(t) = 10.t$  and  $Q(t) = 15.t$ , l'entreprise génère des profits positifs sur tout l'horizon de planification. Les zones du plan  $[\beta, \gamma]$  qui définissent les décisions d'investissement optimales pour chaque couple  $(\beta, \gamma)$  sont

désignées par un numéro qui présente l'année d'investissement dans la technologie verte et la zone (0) définit la zone du plan  $[\beta, \gamma]$  pour laquelle il est optimal de ne pas investir en technologie verte. Lorsque la pente de la taxe carbone linéaire augmente à 15 (deuxième graphique de la figure 4.11), les zones du plan  $[\beta, \gamma]$  définissant les décisions d'investissement optimales pour l'entreprise sont les mêmes que pour le premier graphique lorsque  $Q(t) = 10.t$ , mais les courbes  $\gamma_{\max(m \setminus m+1)} = f(\beta)$  sont translatées vers le haut. Cette augmentation de la pente de la taxe carbone progressive incite l'entreprise à investir dans la technologie verte à l'année  $m$ , pour un surcoût maximal de la technologie verte plus élevé que ce surcoût maximal pour la taxe carbone linéaire  $Q(t) = 10.t$ . A titre d'exemple, pour le couple  $(0,2 ; 12)$ , la décision optimale, quand  $q=10$ , est d'investir dans la technologie verte à la deuxième année, alors que si  $q=15$ , la décision optimale pour ce couple  $(0,2 ; 12)$  consiste à faire avancer l'investissement dans la technologie verte à la première année.

Nous représentons dans la figure 4.13, ci-dessous, les courbes d'investissement qui déterminent les stratégies d'investissement optimales pour chaque couple  $(\beta, \gamma)$  sous ces deux législations de taxe carbone progressive linéaire.

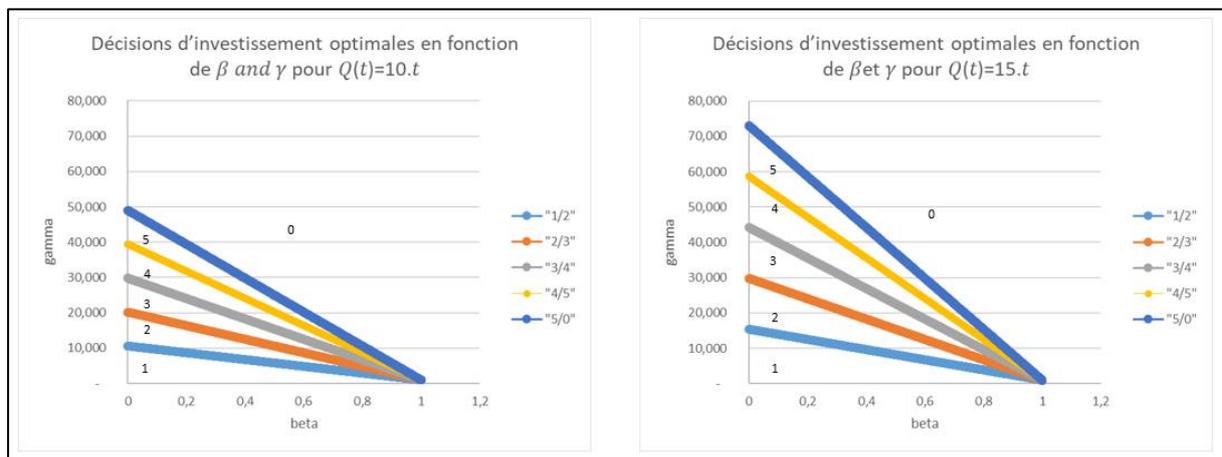


Figure 4.13 : Les décisions d'investissement optimales sous différentes législations de taxe carbone progressive  $Q(t) = 10.t$  et  $Q(t) = 15.t$

Dans une troisième expérimentation numérique, on estime qu'une taxe carbone progressive plus stricte est imposée avec  $Q(t) = 30.t$ . Dans ce cas, l'entreprise n'arrive pas à générer un profit positif sur tout l'horizon avec la technologie ordinaire. Sous cette taxe carbone, l'entreprise réussit à générer un profit positif en utilisant la technologie ordinaire au plus tard l'année 3. La technologie verte, en fonction de ses performances environnementales, peut permettre à l'entreprise de générer un profit positif sous les mêmes valeurs de taxe carbone appliquées au plus tard l'année 3, 4 ou encore l'année 5 selon les valeurs  $\beta$ . La figure 4.14 ci-dessous illustre les décisions optimales d'investissement et de production pour l'entreprise pour chaque couple  $(\beta, \gamma)$ .

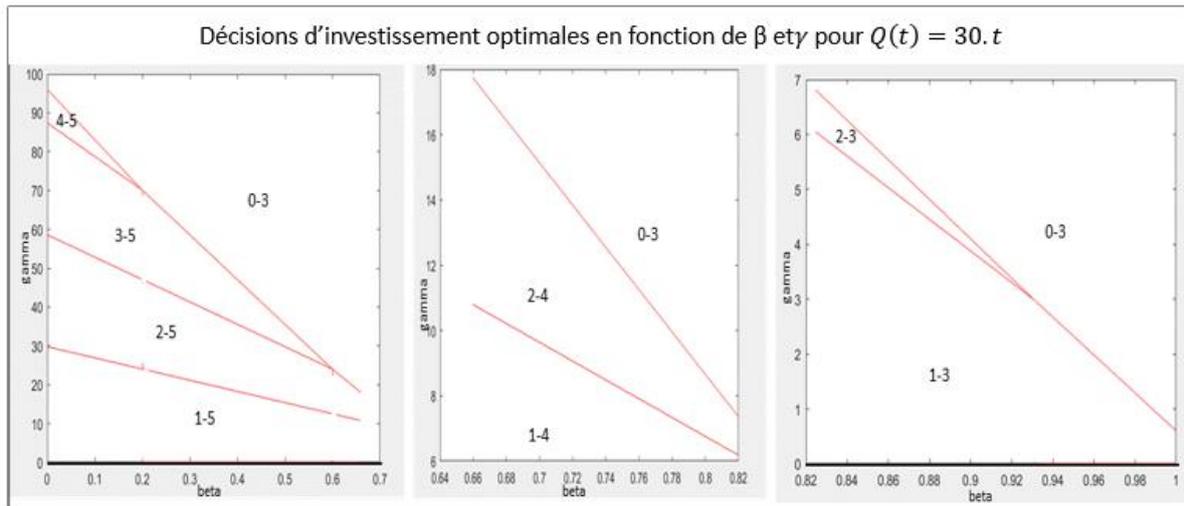


Figure 4.14 Les décisions d'investissement optimales sous la législation de taxe carbone progressive  $Q(t) = 30.t$

**Observation 3:**

Lorsque les technologies vertes disponibles ont de bonnes performances environnementales, l'augmentation de la taxe carbone incite les entreprises à investir plus tôt dans la technologie verte, même pour des surcoûts élevés de cette technologie. Cependant, si les technologies vertes disponibles ne peuvent pas réduire de manière significative les émissions de carbone par rapport aux technologies ordinaires, l'augmentation de la taxe carbone peut avoir un impact négatif sur la décision d'investissement vert et donc la décourager.

En fait, pour le premier graphe de cette figure 4.14, le taux de réduction des émissions de carbone de la technologie verte est tel que  $\beta \in [0,82 ; 1]$ . Avec cette performance environnementale limitée, les deux technologies, ordinaire et verte, permettent à l'entreprise de générer un profit positif au plus tard la même année, à savoir l'année 3. Dans ce cas, les zones d'investissement du plan  $[\beta, \gamma]$  sont comme suit : (zone 1-3) investir en technologie verte l'année 1 et produire au cours de 3 années, (zone 2-3) investir en technologie verte l'année 2 et produire au cours de 3 années, et (zone 0-3) ne pas investir en technologie verte et produire pendant 3 années avec la technologie ordinaire. Avec une telle performance de la technologie verte disponible, il s'avère inutile d'investir à l'année 3 ou 4 ou 5 dans la technologie verte étant donné que sous la taxe carbone progressive considérée, les performances de la technologie verte disponible ne permettent pas à l'entreprise de générer un profit positif au-delà de l'année 3.

Pour le couple (0,94, 4), la décision d'investissement optimale sous une taxe carbone linéaire avec une pente  $q=10$ , est de ne pas investir en technologie verte, alors que pour une pente de taxe carbone linéaire  $q=15$ , la solution optimale est d'investir en technologie verte à l'année 4. Finalement, pour une pente de taxe carbone linéaire  $q=30$ , la décision d'investissement optimale est de ne pas investir en technologie verte. Si nous prenons un autre exemple, pour lequel  $\beta = 0,8$  et  $\gamma = 10$ , sous une taxe carbone  $Q(t) = 10.t$ , la décision optimale est d'investir en technologie verte à l'année 5, puis avec l'imposition d'une taxe carbone plus importante  $Q(t) = 15.t$ , la décision optimale est d'avancer l'investissement en technologie verte à l'année 4, cependant quand la taxe carbone passe à  $Q(t) = 30.t$ , la décision optimale

s'avère donc de ne pas investir en technologie verte. Nous soulignons ainsi que lorsque les technologies vertes disponibles n'ont pas un taux de réduction des émissions de carbone significatif par rapport à la technologie ordinaire, la taxe carbone ne doit être ni trop basse ni trop élevée pour encourager l'investissement vert.

Pour le second graphe de la figure 4.14, quand  $\beta \in [0,64 ; 0,82]$ , la technologie verte permet à l'entreprise de générer un profit positif au plus tard l'année 4, ce qui implique que ( $l=4$  et  $n=3$ ). Les zones d'investissement du plan  $[\beta ; \gamma]$  sont alors illustrées comme suit: (zone 1-4) investir en technologie verte l'année 1 et produire 4 années, (zone 2-4) investir en technologie verte l'année 2 et produire 4 années, (zone 0-3) ne pas investir en technologie verte et produire 3 années.

Finalement, pour le troisième et dernier graphe de la figure 4.14, pour  $\beta \in [0 ; 0,64]$ , la technologie verte permet à l'entreprise de générer un profit positif durant tout l'horizon ce qui signifie que ( $l=5$  et  $n=3$ ). Par conséquent, il peut s'avérer plus rentable pour certaines performances des technologies vertes disponibles caractérisées par un couple de valeurs  $(\beta, \gamma)$ , de retarder la décision d'investissement en technologie verte à l'année 3 ou même 4. En effet, les zones d'investissement du plan  $[\beta, \gamma]$  sont représentées comme suit dans ce graphe: (zone 1-5) investir en technologie verte l'année 1 et produire 5 années ; (zone 2-5) investir en technologie verte l'année 2 et produire 5 années ; (zone 3-5) investir en technologie verte l'année 3 et produire 5 années ; (zone 4-5) investir en technologie verte l'année 4 et produire 5 années ; et finalement (zone 0-3) ne pas investir en technologie verte et produire 3 années avec la technologie ordinaire. Pour illustrer ces conditions, nous considérons une technologie verte disponible avec une performance caractérisée par le couple  $(0,2, 12)$ . Sous une taxe carbone linéaire de pente  $q=30$ , en dépit du surcoût élevé de cette technologie et grâce à sa performance environnementale l'entreprise décide d'investir en technologie verte dès la première année. En outre pour une même performance environnementale de cette technologie verte (pour un taux de réduction fixe des émissions de carbone, caractérisé par un  $\beta$  donné) l'entreprise continue à investir dans cette technologie verte dès l'année 1 jusqu'à un surcoût maximum de 20 ( $\gamma_{\max(1-5 \setminus 2-5)}(0,2)=20$ ). Toutefois, on note que lorsque la taxe carbone linéaire est lancée avec une pente  $q=15$ , pour ce couple  $(0,2, 20)$  la décision optimale est de retarder l'investissement vert à l'année 2, alors que sous une taxe carbone  $Q(t) = 10.t$ , il s'avère plus rentable à l'entreprise de retarder l'investissement vert à l'année 3.

Nous illustrons alors que l'augmentation de la taxe carbone peut inciter les entreprises à investir plus tôt en technologie verte, en dépit de surcoûts importants de ces technologies, pourvu que la performance environnementale de cette technologie soit significativement meilleure que celle de la technologie ordinaire. En effet, dans certains cas, l'augmentation de la taxe carbone peut limiter la capacité de l'entreprise à générer un profit positif sur tout l'horizon, lorsque les technologies vertes disponibles ne réduisent pas de manière significative le taux d'émission de carbone unitaire (par rapport à la technologie ordinaire). Par conséquent, dans de telles conditions, l'augmentation de la taxe carbone décourage l'investissement vert.

#### ***4.3.3.3. Impact de la taxe carbone progressive linéaire sur les décisions d'investissement pour deux secteurs différents (propre vs polluant)***

Dans le cadre de cette expérience, nous cherchons à mettre en évidence l'impact de la taxe carbone progressive sur une industrie relativement moins propre et une autre plus polluante en termes d'émission de carbone. Dans cet objectif, nous considérons une industrie polluante caractérisée par un taux unitaire d'émission de carbone  $e_1 = 40Kg/CO_2$  et une deuxième industrie plus propre avec un taux unitaire d'émission de carbone  $e_1 = 20Kg/CO_2$ . Nous

étudions les décisions d'investissement de ces deux industries étant soumises aux mêmes fonctions de taxes carbone linéaires progressives,  $Q(t) = 15.t$  et  $Q(t) = 30.t$ . Les résultats obtenus sont représentés dans les figures 4.15 et 4.16.

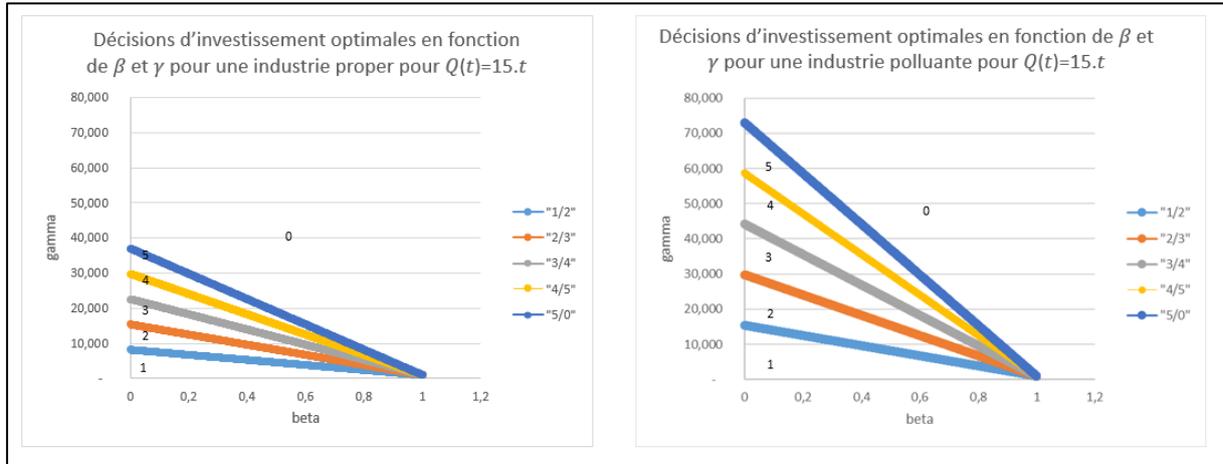


Figure 4.15: Les décisions d'investissement optimales pour une industrie polluante et une industrie plus propre sous la taxe carbone progressive  $Q(t) = 15.t$

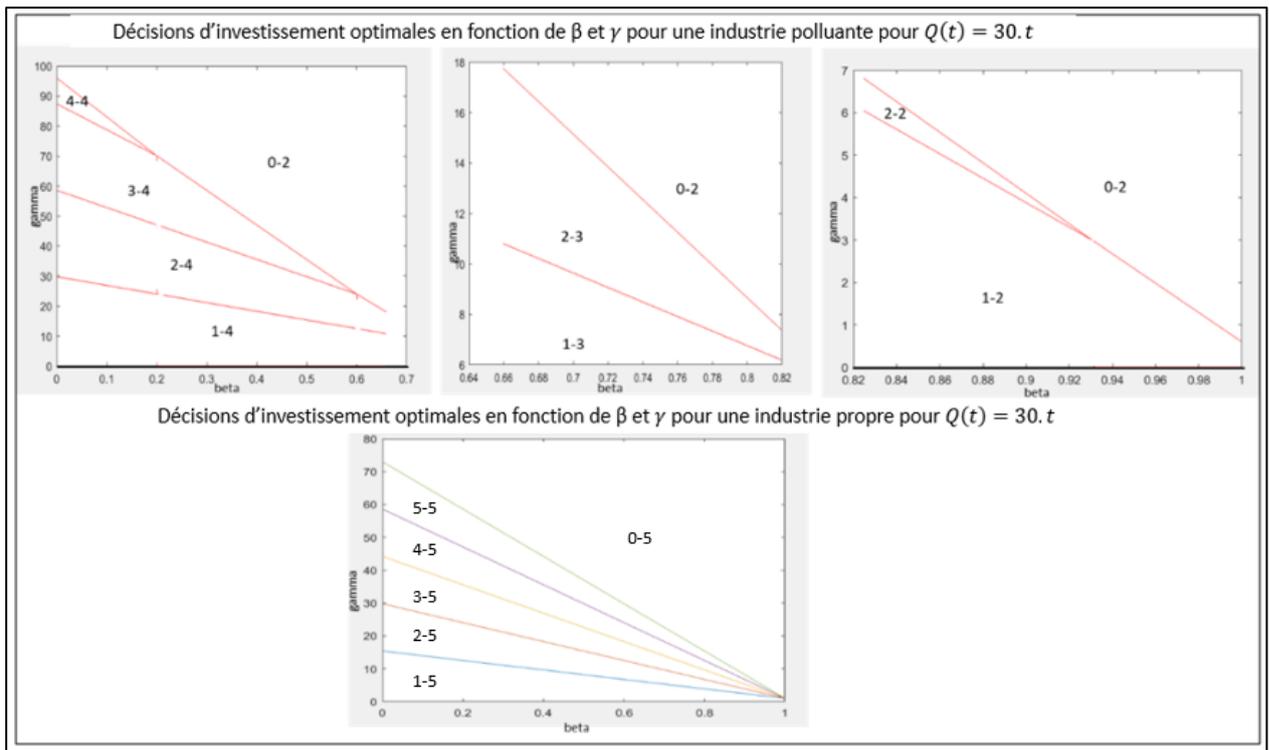


Figure 4.16: Les décisions d'investissement optimales pour une industrie polluante et une industrie plus propre sous la taxe carbone progressive  $Q(t) = 30.t$

**Observation 4:**

Pour garantir l'investissement vert au plus tôt, le gouvernement doit appliquer des taxes carbone progressives élevées aux industries propres. Cependant, pour les secteurs plus polluants, les taxes peu élevées sont plus efficaces pour encourager les investissements au plus tôt en technologies vertes.

Sous la taxe carbone progressive  $Q(t) = 15 \cdot t$  (figure 4.15), pour l'industrie polluante, quand la technologie verte disponible a une faible performance environnementale et un surcoût élevé, par exemple pour le couple (0,8 ; 10), la décision optimale est d'investir dans la technologie verte la quatrième année. Cependant, pour l'industrie propre, lorsque les technologies vertes disponibles offrent de telles performances (0,8 ; 10), la décision optimale est de ne pas investir en green. Si on considère que la technologie verte peut avoir une meilleure performance environnementale telle que  $\beta = 0,2$  pour le même surcoût ( $\gamma = 10$ ), pour l'industrie polluante, la décision optimale s'avère alors d'investir en technologie verte dès la première année et pour l'industrie propre, il est préférable d'investir en technologie verte à la deuxième année. En effet, en augmentant du double la taxe carbone progressive appliquée,  $Q(t) = 30 \cdot t$  (figure 4.16), pour l'industrie polluante lorsque la technologie verte disponible a un taux d'émission de carbone élevé ( $\beta = 0,8$ ) et un surcoût également élevé ( $\gamma = 10$ ), la décision optimale est de ne pas investir en technologie verte en raison des performances de cette technologie qui permet à l'entreprise de générer un profit positif sous la taxe carbone appliquée sur seulement trois ans exactement comme la technologie ordinaire. Pour l'industrie propre, lorsque la taxe carbone appliquée augmente à  $Q(t) = 30 \cdot t$ , l'entreprise est incitée à investir dans la technologie verte à la quatrième année, malgré les performances de cette technologie verte disponible ( $\beta = 0,8$  et  $\gamma = 10$ ). Nous en déduisons que pour encourager les industries propres à améliorer davantage leurs performances et à passer aux technologies vertes, les gouvernements doivent leur imposer des taxes carbone élevées. Cependant, l'augmentation de la taxe carbone pour les industries polluantes a un impact sur leur capacité de production et décourage donc l'investissement vert lorsque les technologies vertes disponibles ont un surcoût élevé et à peu près le même taux d'émission de carbone que la technologie ordinaire. Toutefois, en augmentant la taxe carbone progressive à  $Q(t) = 30 \cdot t$ , quand les technologies vertes disponibles ont de bonnes performances environnementales, malgré leur surcoût élevé (0,2 ; 10), la décision optimale est d'installer la technologie verte dès la première année pour les industries polluantes et propres.

Nous pensons que ce résultat est intéressant car contre intuitif. En effet, on pourrait s'attendre à ce que les gouvernements, contrairement à ce qui a été montré dans ce chapitre, appliquent des taxes strictes et élevées aux industries polluantes et des taxes moins élevées aux industries propres, en proportionnalité à leurs impacts différés sur l'environnement. En fait, pour les industries propres, le gouvernement doit mettre en place des taxes carbone élevées pour les encourager à investir au plus tôt dans les technologies vertes, même lorsque celles-ci sont coûteuses. La bonne performance environnementale des industries propres leur permet de supporter les taxes carbone élevées. Toutefois, pour les secteurs polluants, l'augmentation des taxes carbone peut décourager l'investissement vert et les inciter à quitter le secteur lorsque les technologies vertes disponibles présentent de mauvaises performances (coût élevé et réduction du taux d'émission de carbone unitaire réduite). Enfin, augmenter les taxes carbone pour les industries polluantes peut être efficace pour encourager l'investissement vert seulement si les technologies disponibles peuvent entraîner une réduction significative des émissions de carbone des industries.

## 4.4. Etude de l'impact de différentes stratégies de taxation progressive de carbone sur les décisions d'investissement et les performances de la CL

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons opté pour une stratégie linéaire progressive de taxe carbone, récemment adoptée par le gouvernement canadien pour étudier et souligner l'impact de la taxe carbone dynamique sur les décisions stratégiques de la CL. Dans cette deuxième partie, nous explorons d'autres formes de stratégies de taxe carbone progressives qui peuvent aussi être appliquées.

Dans cette perspective, nous considérons dans le modèle *MDLA*, d'autres formes de taxe carbone, à savoir des taxes carbone constante, convexe et concave. L'objectif est de déterminer quelle stratégie de taxation du carbone est la plus efficace pour réduire les émissions de carbone de la CL sans compromettre son profit et peut ainsi être considérée comme plus appropriée pour garantir l'acceptation de cette législation par les entreprises.

### 4.4.1. Présentation de différentes formes de taxation progressive de carbone considérées

De nombreux gouvernements ont adopté la stratégie progressive de taxation du carbone pour garantir une meilleure mise en œuvre de cette législation. Nous illustrons à travers cette partie quatre formes différentes de taxes carbone dynamiques. Dans cet objectif, nous remplaçons la *contrainte* (4.9) du modèle *MDLA* par les contraintes (4.19), (4.20) et (4.21) suivantes :

- Taxe carbone progressive linéaire,  $Q(t) = q \cdot t \quad \forall t \in [1; T] \quad (4.9)$  ;
- Taxe carbone progressive convexe,  $Q(t) = q \cdot b^{t-1} \quad \forall t \in [1; T] \quad (4.23)$  ;
- Taxe carbone progressive concave,  $Q(1) = q$  ;  $Q(t) = c * \sqrt{t-1} \quad \forall t \in [2; T] \quad (4.24)$  ;
- Taxe carbone constante,  $Q(t) = Q(T) \quad \forall t \in [1; T] \quad (4.25)$ .

Les paramètres  $q$ ,  $b$  et  $c$  sont des constantes qu'on détermine ultérieurement. Pour comparer l'efficacité de ces différentes formes de stratégies de taxation, nous supposons qu'elles sont mises en œuvre pour atteindre le même objectif par rapport à la valeur finale de taxe carbone, c.-à-d., la valeur cible à atteindre au bout de l'horizon  $T$ . Pour la taxe carbone constante, la valeur de lancement de la législation de taxe carbone est égale à la valeur finale visée, et donc  $Q(1) = Q(T)$ . Pour les autres stratégies de taxation progressive du carbone, nous supposons qu'elles sont toutes lancées avec la même valeur pour atteindre la valeur finale cible selon différentes formes d'incrémentation. Nous déterminons alors cette valeur de la taxe carbone initiale ainsi que les paramètres  $q$ ,  $b$  et  $c$  des expressions des taxes carbone progressives comme suit:

- $q = \frac{Q(T)}{T}$ , la valeur commune de lancement de la taxe carbone; (4.26)

- $b = \frac{T-1}{\sqrt[T]{\frac{q \cdot T}{q}}} = T^{-1} \sqrt[T]{T}$ , paramètre de la taxe carbone convexe ; (4.27)

- $c = \frac{q \cdot T}{\sqrt[T]{(T-1)}}$ , paramètre de la taxe carbone concave. (4.28)

Nous obtenons finalement quatre modèles multi-périodes, qui ont en commun la fonction objectif (4.1) et les 13 contraintes (contraintes (4.2) à (4.13) sauf contrainte (4.10)). Ils

diffèrent par l'expression de *la contrainte* (4.10), (4.23), (4.24), (4.25) pour les 4 formes qui modélisent la législation de la taxe carbone considérée pour chaque modèle.

Pour cette partie, nous supposons que sous les valeurs de taxes carbone imposées, l'entreprise arrive toujours à dégager un profit positif tout au long de l'horizon quelle que soit la technologie utilisée ordinaire ou verte. Nous définissons alors les variables  $Q_{stop-1}$  et  $Q_{stop-2}$ ; qui représentent la valeur de la taxe carbone maximale sous laquelle l'entreprise génère un profit positif l'année  $T$  avec la technologie ordinaire et verte respectivement

$$\bullet \quad Q(T) \leq Q_{stop-1} = \frac{TD(P-C)-K_1}{TDe_1} \quad (4.29)$$

$$\bullet \quad Q(T) \leq Q_{stop-2} = \frac{TD(P-C)-\gamma K_1}{TDe_1\beta} \quad (4.30)$$

#### 4.4.2. Impact des stratégies dynamiques de taxation de carbone sur les décisions d'investissement : résolution analytique

Dans cette section, nous résolvons analytiquement les quatre modèles. Nous caractérisons pour chaque modèle les conditions sur la taxe carbone progressive, menant aux décisions optimales d'investissement. En d'autres termes, pour chaque forme de taxation de carbone (constante, convexe, concave, linéaire), nous déterminons les plages cibles de  $Q(T)$ , qu'il faut viser pour inciter les entreprises à investir dans la technologie verte à l'année  $m$ , avec  $m \in [1..T]$ .

##### 4.4.2.1. Stratégie de taxe carbone constante

Si la taxe carbone adoptée par le gouvernement est une taxe constante sur tout l'horizon, l'entreprise n'a pas la possibilité de retarder l'investissement pour minimiser le coût d'acquisition de la technologie verte. Si elle trouve rentable l'installation de la technologie verte, elle l'installe dès la première année étant donné que les coûts de production, la demande, le prix de vente et la valeur de taxe carbone sont constants sur tout l'horizon de planification. Sous une telle taxe, les entreprises n'ont que deux choix : investir en green ou non. La proposition 4.4 définit la décision optimale d'investissement sous une taxe carbone constante.

**Proposition 4.4 : Sous la stratégie de taxe carbone constante, la décision optimale pour l'entreprise est d'investir en technologie verte, si la valeur de la taxe carbone cible  $Q(T)$  vérifie la condition suivante :**

$$Q_{const-inf} < Q(T) < Q_{stop-2}, \text{ avec } Q_{const-inf} = \frac{K_1(\gamma-1)}{Te_1D(1-\beta)} \quad (4.31),$$

$$\text{avec } \frac{\gamma-\beta}{1-\beta} \leq \frac{T.D.(P-C)}{K_1} \text{ pour vérifier que } Q_{const-inf} \leq Q_{stop-2}.$$

Le profit optimal de l'entreprise et ses émissions globales sous cette plage de taxe carbone s'avère :

Profit optimal ( $\pi$ )	$TD(P - C) - \gamma K_1 - T. (T. q. \beta. e_1. D)$
Emissions (E)	$T. (\beta. e_1. D)$

**Preuve :**

En effet pour arriver à cette conclusion, on compare simplement le coût total si l'entreprise investit la première année en technologie verte sous la taxe carbone constante par rapport à la décision de ne pas investir en green. Ainsi on déduit la condition sur la valeur de taxe carbone, qui reste constante sur tout l'horizon, qui est nécessaire pour inciter à l'investissement vert.

Nous déduisons de l'expression de  $Q_{const-inf}$ , que quand  $\gamma$  augmente,  $Q_{const-inf}$  augmente ; plus le surcoût de la technologie verte est grand plus il faut imposer des taxes carbone importantes pour pousser les entreprises à investir dans le green. Toutefois, quand  $\gamma$  augmente,  $Q_{stop-2}$  diminue ; plus le surcoût de la technologie verte est important, plus les coûts de l'entreprise augmentent et ainsi son profit diminue jusqu'à ce qu'elle ne peut plus dégager un profit positif l'année  $T$  quand  $\gamma$  est assez grand. Nous devons alors déterminer la condition sur  $\gamma$  et  $\beta$  qui permet la faisabilité du problème en garantissant que  $Q_{const-inf} \leq Q_{stop-2}$  et ainsi on obtient :  $\frac{\gamma-\beta}{1-\beta} \leq \frac{T.D.(P-C)}{K_1}$ . ■

**4.4.2.2. Stratégie de taxe carbone progressive linéaire**

Dans la partie 4.3, nous avons étudié pour une taxe carbone progressive linéaire donnée, les décisions stratégiques optimales en fonction des performances de la technologie verte disponible ( $\beta$  et  $\gamma$ ). Dans cette partie, pour une technologie verte donnée ( $\beta$  et  $\gamma$  donnés), on étudie les décisions stratégiques en fonction de la valeur cible de taxe carbone.

Sous une taxe carbone progressive linéaire, le gouvernement donne plus de flexibilité aux entreprises pour s'adapter à la taxe carbone. En effet, selon la valeur de la taxe carbone finale, il peut être optimal pour l'entreprise d'investir dès l'année 1 ou de retarder l'investissement à l'année 2 ou 3, ..., ou de retarder l'investissement green jusqu'à l'année  $T$ . La proposition 4.5 détermine la décision optimale d'investissement sous une taxe carbone progressive linéaire.

**Proposition 4.5 :** La décision optimale pour l'entreprise, est d'investir dans la technologie verte l'année  $m$  avec  $m \in [1..T]$ , lorsque la valeur cible de la taxe carbone  $Q(T)$  satisfait la condition suivante :

$$Q_{lin-inf}(m) \leq Q_m(T) \leq Q_{stop-2}, \text{ avec } Q_{lin-inf}(m) = \frac{K_1(\gamma-1)}{m e_1 D(1-\beta)} \quad (4.32),$$

$$\text{avec } \gamma \cdot m \cdot (1 - \beta) - \beta \cdot T(\gamma - 1) \leq \frac{m \cdot T \cdot D \cdot (P - C) \cdot (1 - \beta)}{K_1} \text{ pour vérifier que } Q_{lin-inf} \leq Q_{stop-2}.$$

**Le profit optimal de l'entreprise et ses émissions globales, sous ces plages de taxe carbone selon la valeur de  $m$  s'avère :**

<b>Profit optimal (<math>\pi</math>)</b>	$TD(P - C) - \frac{m-1}{T} \cdot k_1 - \frac{T-m+1}{T} \cdot \gamma \cdot k_1 - \sum_{t=1}^{m-1} q \cdot t \cdot e_1 \cdot D + \sum_{t=m}^T q \cdot t \cdot e_1 \cdot D \cdot \beta$
<b>Emissions (<math>E</math>)</b>	$(m - 1) \cdot e_1 \cdot D + (T - m + 1) \cdot e_1 \cdot D \cdot \beta$

**Preuve :**

En effet pour déterminer cette plage de taxe carbone qui incite l'investissement vert l'année  $m$ , on compare le coût total si l'entreprise investit à l'année  $m$  en technologie verte par rapport au coût total si l'investissement vert est retardé à l'année  $m+1$ . On en déduit la condition sur la valeur de taxe carbone cible minimale, sous la taxe carbone progressive linéaire, qu'il faut

viser pour que la décision d'investir à l'année  $m$  en technologie verte soit la décision optimale et on détermine alors  $Q_{lin-inf}(m)$ . De même, quand  $\gamma$  augmente,  $Q_{const-inf}$  augmente et  $Q_{stope-2}$  diminue. Nous devons alors déterminer la condition sur  $\gamma$  et  $\beta$  qui permet la faisabilité du problème en garantissant que  $Q_{lin-inf} \leq Q_{stope-2}$  et ainsi on obtient :  $\gamma \cdot m \cdot (1 - \beta) - \beta \cdot T(\gamma - 1) \leq \frac{m \cdot T \cdot D \cdot (P - C) \cdot (1 - \beta)}{K_1}$  ■

Pour  $m=T$  on retrouve  $Q_{const-inf} = Q_{lin-inf}(T)$ , c'est-à-dire pour une même valeur de taxe carbone finale, sous une taxe carbone constante l'entreprise installe la technologie verte dès l'année 1, alors que l'entreprise retarde l'investissement green à l'année  $T$  sous une stratégie linéaire de taxation de carbone.

#### 4.4.2.3. Stratégie de taxe carbone convexe

La taxe carbone convexe s'avère une autre forme de taxe progressive que les gouvernements peuvent adopter pour donner plus de flexibilité aux entreprises pour s'y adapter. Sous de telles formes de taxe carbone, retarder l'investissement en green, peut être le choix optimal pour maximiser son profit selon la valeur de taxe finale visée. La proposition 4.6 détermine la décision optimale d'investissement sous une taxe carbone progressive convexe.

**Proposition 4.6 :** Sous une taxe carbone progressive convexe, l'entreprise investit dans la technologie verte l'année  $m$  avec  $\epsilon \in [1..T]$ , lorsque la valeur finale de taxe carbone  $Q(T)$  satisfait la condition suivante :

$$Q_{convexe-inf}(m) < Q_m(T) < Q_{stope-2}, \text{ avec } Q_{convexe-inf}(m) = \frac{b^{T-m} K_1 (\gamma - 1)}{T \cdot e_1 D (1 - \beta)} \quad (4.33),$$

avec et  $\beta \cdot b^{T-m} K_1 (\gamma - 1) \leq (1 - \beta) \cdot [T \cdot D \cdot (P - C) - \gamma \cdot K_1]$  pour vérifier que  $Q_{convexe-inf} \leq Q_{stope-2}$ .

Le profit optimal de l'entreprise et ses émissions globales, sous ces plages de taxe carbone selon la valeur de  $m$  s'avère :

Profit optimal ( $\pi$ )	$TD(P - C) - \frac{m-1}{T} \cdot k_1 - \frac{T-m+1}{T} \cdot \gamma \cdot k_1 - \sum_{t=1}^{m-1} q \cdot b^{t-1} \cdot e_1 \cdot D - \sum_{t=m}^T q \cdot b^{t-1} \cdot e_1 \cdot D \cdot \beta$
Emissions ( $E$ )	$(m - 1) \cdot e_1 \cdot D + (T - m + 1) \cdot e_1 \cdot D \cdot \beta$

*Preuve :*

En effet pour déduire l'équation (4.29), nous comparons le coût total si l'entreprise investit l'année  $m$  en technologie verte par rapport au coût total si l'investissement vert est retardé à l'année  $m+1$ . On en déduit alors la valeur de taxe carbone cible minimale, sous la taxe carbone progressive convexe, qu'il faut viser pour que la décision d'investir à l'année  $m$  en technologie verte soit la décision optimale et on détermine alors  $Q_{convexe-inf}(m)$ . De même que dans les autres formes de taxes carbone, nous déduisons une condition de faisabilité qui garantit que  $Q_{convexe-inf} \leq Q_{stope-2}$  et nous obtenons alors,  $\beta \cdot b^{T-m} K_1 (\gamma - 1) \leq (1 - \beta) \cdot [T \cdot D \cdot (P - C) - \gamma \cdot K_1]$  ■

Nous soulignons que  $Q_{convexe-inf} = Q_{const-inf} \cdot b^{T-m}$  avec  $m \in [1..T]$  et  $b = \sqrt[T]{T}$ . Pour  $m = T$  on retrouve  $Q_{convexe-inf}(T) = Q_{const-inf}$ .

#### 4.4.2.4. Stratégie de taxe carbone concave

Sous cette forme de taxe carbone progressive, l'entreprise peut également retarder son investissement dans la technologie verte afin de maximiser son profit sur tout l'horizon. La proposition 4.7 détermine la décision optimale d'investissement sous une taxe carbone progressive concave.

**Proposition 4.7 : Pour une stratégie de taxe carbone concave, la décision optimale pour l'entreprise est d'investir dans la technologie verte la première année, si la valeur de la taxe carbone finale  $Q(T)$  vérifie la condition suivante:**

$$Q_{concave-inf}(1) < Q_1(T) < Q_{stop-2}, \text{ avec } Q_{concave-inf}(1) = \frac{K_1(\gamma-1)}{D.e_1.(1-\beta)} \quad (4.34),$$

avec  $\beta.K_1(\gamma-1) \leq (1-\beta).[T.D.(P-C) - \gamma.K_1]$  pour vérifier que  $Q_{concave-inf}(1) \leq Q_{stop-2}$ .

Sinon la décision optimale pour l'entreprise s'avère d'investir en technologie verte à l'année  $m \in [2; T]$ , si la valeur de la taxe carbone finale  $Q(T)$  vérifie la condition suivante:

$$Q_{concave-inf}(m) < Q_m(T) < Q_{stop-2}, \text{ avec } Q_{concave-inf}(m) = \frac{\sqrt{T-1}.K_1(\gamma-1)}{T.\sqrt{m-1}.D.e_1.(1-\beta)} \quad (4.35),$$

avec  $\sqrt{T-1}.\beta.K_1(\gamma-1) \leq \sqrt{m-1}.(1-\beta).[T.D.(P-C) - \gamma.K_1]$  pour vérifier que  $Q_{concave-inf}(m) \leq Q_{stop-2}$ .

Sous ces plages de taxe carbone, le profit optimal de l'entreprise et ses émissions globales s'écrit comme suit, selon la valeur de  $m$  :

Profit optimal ( $\pi$ )	$m = 1$	$TD(P-C) - \frac{m-1}{T}.k_1 - \frac{T-m+1}{T}.\gamma.k_1 - q.\beta.e_1.D - \sum_{t=2}^T \sqrt{t}.e_1.D.\beta$
	$m \in [2..T]$	$TD(P-C) - \frac{m-1}{T}.k_1 - \frac{T-m+1}{T}.\gamma.k_1 - q.e_1.D - \sum_{t=2}^{m-1} \sqrt{t}.e_1.D + \sum_{t=m}^T \sqrt{t}.e_1.D.\beta$
Emissions ( $E$ )		$(m-1).e_1.D + (T-m+1).e_1.D.\beta$

*Preuve :*

En effet, de la même façon, on compare les coûts des décisions d'investir en technologie verte à l'année  $m$  et de retarder l'investissement vert à l'année  $m+1$ . Avec ces comparaisons on déduit les équations (4.30) et (4.31) qui définissent les valeurs de taxe carbone cibles minimales, sous la taxe carbone progressive concave, qu'il faut viser pour que la décision d'investir à l'année  $m$  en technologie verte soit la stratégie optimale. De même nous établissons les conditions de faisabilité telles que d'une part  $Q_{concave-inf}(1) \leq Q_{stop-2}$  ; ce qui implique que  $\beta.K_1(\gamma-1) \leq (1-\beta).[T.D.(P-C) - \gamma.K_1]$  et d'autre part  $Q_{concave-inf}(m) \leq Q_{stop-2}$  ; ce qui implique que  $\sqrt{T-1}.\beta.K_1(\gamma-1) \leq \sqrt{m-1}.(1-\beta).[T.D.(P-C) - \gamma.K_1]$ . ■

### 4.4.3. Impact des stratégies dynamiques de taxation du carbone sur les décisions d'investissement et les performances de la CL: analyse multicritères

La mise en œuvre de la législation de taxe carbone demeure un dilemme pour les gouvernements. En effet, une stratégie efficace de taxation du carbone doit inciter les entreprises à l'investissement vert et garantir ainsi la réduction des émissions de carbone tout en leur garantissant des profits intéressants. Dans cette section, nous étudions l'impact des différentes formes de taxation de carbone (linéaire, constante, convexe et concave) sur la décision d'investissement, les profits et les émissions de carbone de la CL. Dans l'objectif de mener des analyses numériques robustes et fiables, nous nous basons pour l'estimation des valeurs de taxes carbone sur l'exemple Canadien déjà décrit et adopté dans la première partie de ce chapitre. De cette stratégie de taxation progressive linéaire des émissions de carbone, nous déduisons les paramètres des autres formes de taxes carbone en nous basant sur les valeurs de lancement, valeurs finales et horizon de cette taxe carbone canadienne. Rappelons que le gouvernement canadien a lancé la taxe carbone avec une valeur de  $10\$/tCO_2$  la première année qui est prévue d'augmenter linéairement au cours des années selon l'équation  $(t) = 10 \cdot t$ , sur un horizon de 5 années, notamment  $t \in [1..5]$ . En se référant aux contraintes (4.19), (4.20) et (4.21), on en déduit les fonctions de taxes carbone : constante, convexe et concave qu'on illustre dans la figure 4.17 suivante.

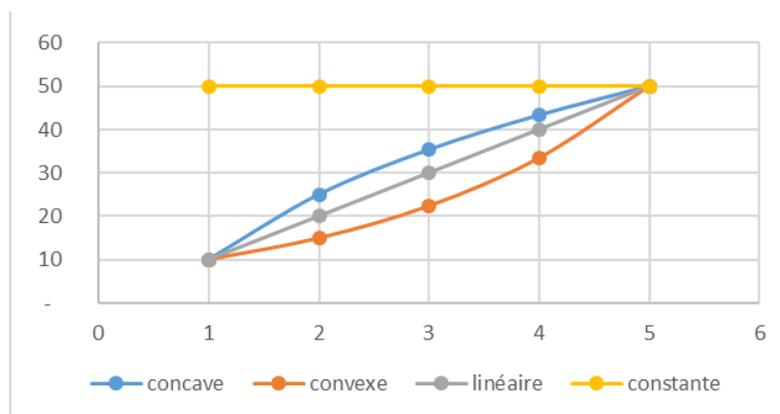


Figure 4.17. Les quatre formes de taxe carbone dynamiques considérées

L'objectif est de comparer l'efficacité de ces différentes stratégies de taxation de carbone. Dans cette optique, nous utilisons une approche d'analyse multicritère, en prenant en compte comme critères d'évaluation le profit et les émissions de la CL, et en développant une fonction utilité qui permet d'appréhender ces deux critères d'évaluation pour chaque stratégie de taxation de carbone considérée.

#### 4.4.3.1. Définition de la fonction utilité

Dans cette partie, pour des raisons de simplicité et d'efficacité, nous utilisons une des méthodes d'analyse multicritères les plus répandues, à savoir la somme pondérée pour comparer l'efficacité des différentes formes de taxes carbone dynamiques. En fait, l'objectif est d'évaluer les stratégies de taxation progressive du carbone sur la base de deux critères quantitatifs : le profit et la réduction d'émission de carbone par rapport aux émissions maximales engendrées sous l'une des stratégies, qui peuvent facilement être regroupés en un seul critère que nous visons à maximiser. En effet, nous utilisons la notion de « fonction utilité », qui permet l'agrégation de ces deux critères en un critère unique, en adoptant la

méthode de somme pondérée. Les coefficients de pondération pour chaque critère se définissent par l'importance donnée par le gouvernement à chacun. Pour déterminer cette fonction utilité pour chaque stratégie de taxation de carbone, on procède comme suit. On note par  $j$  la stratégie de taxation de carbone, ainsi  $j = 1, 2, 3, 4$  pour la stratégie de taxation de carbone constante, linéaire, convexe et concave respectivement. On définit, les deux critères d'évaluation des stratégies de taxation de carbone ( $j$ ) par le profit de l'entreprise (critère 1) et ses émissions de carbone (critère 2). Notons ainsi  $\pi_j$  le profit global généré par l'entreprise étant soumise à la législation de taxe carbone  $j$ , et  $E_j$  les émissions globales de l'entreprise sous tout l'horizon sous cette législation  $j$ . Alors que le premier critère est à maximiser, le deuxième est à minimiser. Par conséquent, on modifie ce deuxième critère dans le but d'obtenir deux critères homogènes, les deux à maximiser. On choisit alors de déterminer pour chaque stratégie de taxation de carbone  $j$ , le niveau de réduction d'émission de carbone par rapport au niveau le plus élevé d'émission généré sous l'une de ces quatre formes de taxation de carbone. Ce nouveau critère est noté  $RE_j$  qu'on détermine comme suit pour chaque forme de taxation de carbone considérée,  $\forall j RE_j = \max_k (E_k) - E_j$ . A ce niveau, on procède à la normalisation de ces deux critères en calculant  $C_{1j}$  and  $C_{2j}$  pour les critères 1 et 2 respectivement tel que  $C_{1j} = \frac{\pi_j}{\sum_j \pi_j}$ ;  $C_{2j} = \frac{RE_j}{\sum_j RE_j}$ . On déduit ainsi la fonction utilité pour chaque forme de taxe carbone  $j$  qui regroupe ces deux critères normalisés à un seul indicateur en incorporant pour chaque critère son coefficient de pondération  $u$  et  $v$  pour les critères 1 and 2, respectivement. On déduit alors l'équation de la fonction utilité notée  $W_j$  pour chaque stratégie de taxe carbone  $j$  comme suit

$$W_j = u \cdot C_{1j} + v \cdot C_{2j}, \text{ avec } u + v = 1. \quad (4.36)$$

Nous proposons dans ce qui suit, d'utiliser cette fonction utilité développée afin de comparer l'efficacité des différentes formes de taxation de carbone considérée, à savoir les taxes progressives linéaire, convexe, concave et la taxe carbone constante. La décision d'investissement dépend de la forme de taxe carbone imposée mais aussi des performances de la technologie verte disponible caractérisée par les deux paramètres  $\gamma$  (le surcoût de la technologie verte) et  $\beta$  (tel que  $(1 - \beta)$  est le taux de réduction des émissions de carbone). Par conséquent, nous proposons d'étudier alors la sensibilité de la fonction utilité à chacun des paramètres cruciaux du problème et notamment aux coefficients de pondération  $u$  et  $v$  attribués à chaque critère d'évaluation.

#### 4.4.4. Analyse de sensibilité

Dans ce qui suit nous menons des analyses de sensibilité sur les performances de la technologie verte caractérisées par les paramètres  $\beta$  et  $\gamma$  ainsi que le poids du bénéfice.

##### 4.4.4.1. Analyse de sensibilité sur la performance environnementale ( $\beta$ ) et le poids du bénéfice ( $u$ )

On fixe le surcoût de la technologie verte à  $\gamma = 3$ . Pour différentes valeurs du coefficient de pondération du profit ( $u = 0,2 ; 0,5$  et  $0,8$ ), on fait varier le taux de réduction des émissions de carbone de la technologie verte disponible en faisant varier le paramètre  $\beta$  et on résume nos résultats dans la figure 4.18 ci-dessous.

Pour  $\beta \leq 0,7$  et quelle que soit la valeur  $u$ , la stratégie de taxation de carbone convexe s'avère la meilleure, d'après les valeurs des fonctions utilité obtenues. En effet, lorsque les technologies vertes disponibles ont une telle performance environnementale, sous toutes les stratégies de taxation du carbone étudiées, les entreprises investissent dans les technologies

vertes au cours de la première année. Par conséquent, le deuxième critère, qui compare le niveau d'émission de carbone sous une stratégie de taxation de carbone  $j$  par rapport au niveau maximum d'émission sous l'une de ces quatre stratégies n'a plus d'influence significative, étant donné que sous les quatre stratégies, l'entreprise émet le même niveau d'émission de carbone en prenant la même décision stratégique d'investissement. Néanmoins, la progression convexe de la taxe carbone garantit aux entreprises une meilleure réduction des coûts d'émission de carbone comparée aux autres stratégies et ainsi un meilleur profit.

Cependant, pour  $0,7 < \beta < 1$ , la stratégie de taxation de carbone constante s'avère la meilleure même pour des valeurs élevée de  $u$  ( $u=0,8$ ) le poids accordé au profit. Lorsque la technologie verte disponible ne peut pas réduire de manière significative le niveau d'émission de carbone par rapport à la technologie ordinaire, c'est seulement sous une taxe carbone constante que les entreprises investissent dès la première année dans la technologie verte et réduisent donc leur niveau d'émission de carbone. Malgré un coût d'émission plus élevé et donc un profit dégradé dans le cadre de cette stratégie de taxation de carbone par rapport aux profits générés sous les autres stratégies de taxation, grâce au niveau de réduction d'émission qu'elle induit, la stratégie de taxation du carbone constante reste la meilleure malgré la grande importance accordée au critère de profit ( $u$  proche de 1).

Finalement, pour  $\beta$  proche de 1, même sous une législation de taxe carbone constante, l'entreprise n'investit pas dans la technologie verte qui s'avère peu performante. Par conséquent, en décidant d'installer la technologie ordinaire, sous toutes les stratégies de taxe carbone considérées, lorsque la technologie verte disponible s'avère aussi polluante que l'ordinaire, les entreprises auront le même niveau d'émission de carbone. Par conséquent, la stratégie convexe sera la meilleure générant le meilleur profit pour l'entreprise.

**Observation 5:**

*Nous soulignons que si les entreprises disposent de technologies vertes efficaces capables de réduire de manière significative le niveau d'émission de carbone, il est recommandé d'adopter la stratégie de taxation du carbone convexe. En effet, cette dernière garantit une réduction maximale des émissions de carbone tout comme les autres stratégies mais en engendrant un meilleur profit. Toutefois, si les entreprises ne disposent pas de technologies vertes aussi efficaces, il est recommandé aux gouvernements d'adopter une stratégie d'imposition constante de taxe carbone pour les inciter à investir dans les technologies vertes, même lorsque le critère du profit revêt une grande importance.*

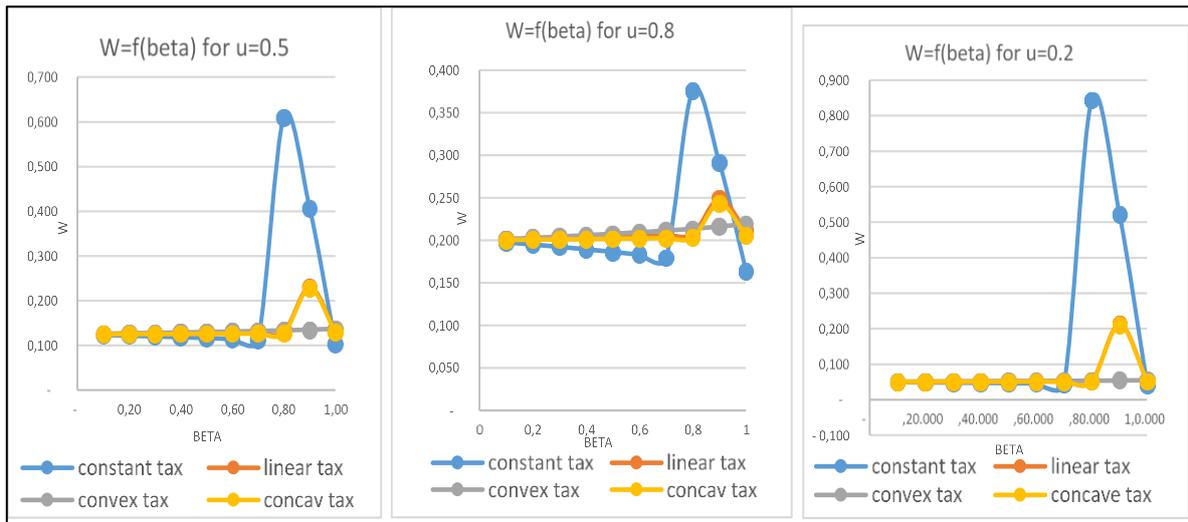


Figure 4.18: Impact de la performance environnementale et de la pondération du critère profit sur les performances de l'entreprise sous les différentes formes de taxation du carbone

#### 4.4.4.2. Analyse de sensibilité sur le surcoût de la technologie verte ( $\gamma$ ) et le poids du profit ( $u$ )

On fixe le taux de réduction des émissions de carbone, tel que  $\beta = 0,5$ . Pour différentes valeurs du poids du critère profit ( $u = 0,2 ; 0,5$  et  $0,8$ ), on fait varier les valeurs du surcoût de la technologie verte par rapport à l'ordinaire ( $\gamma$ ) en illustrant les résultats obtenus dans la figure 4.19 ci-dessous.

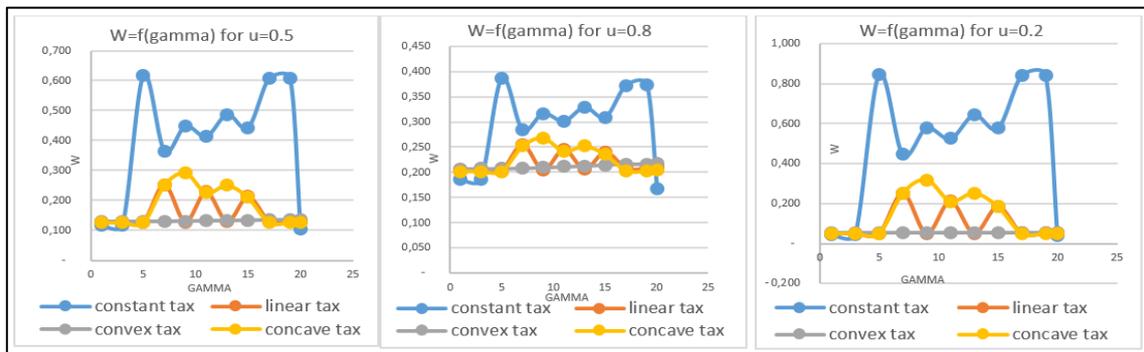


Figure 4.19: Impact du surcoût des technologies vertes et du poids du profit sur la fonction utilité pour les différentes stratégies de taxation du carbone

Pour  $\gamma = 1$  et  $\gamma = 3$ , quelle que soit la stratégie de taxation envisagée, l'entreprise investit dans la technologie green dès l'année 1. Par conséquent, sous les différentes formes de taxation de carbone, l'entreprise émet le même niveau d'émission de carbone et ainsi le profit demeure le seul critère de sélection entre ces stratégies de taxation. Dans de telles conditions, la stratégie de taxe carbone convexe s'avère la meilleure qui permet à l'entreprise de maximiser son profit par rapport aux autres stratégies de taxes carbone. Cette conclusion est bien alignée avec celle qu'on a tirée quand la valeur de  $\beta$  était moins de 0,7 quand on a fixé  $\gamma = 3$ , la valeur de  $\beta$  à partir de laquelle l'entreprise investit dans le green quelle que soit la stratégie de taxe carbone adoptée.

Cependant, pour  $\gamma = 5$ , sous les stratégies progressives de taxes carbone, l'entreprise retarde l'investissement dans le green. Seule la stratégie de taxation constante incite l'entreprise à investir dans le green dès l'année 1. Cette décision permet à cette stratégie de taxation de

carbone d'avoir la meilleure fonction utilité en dépit d'un poids important accordé au critère profit allant jusqu'à 0,9. Seulement pour un poids  $u \cong 1$ , la stratégie convexe de taxe carbone redevient la meilleure. Nous notons que l'écart important entre les courbes dans ce cas, est dû au fait que nous considérons comme critère de comparaison, le taux réduction d'émission de carbone par rapport au niveau d'émission maximum sous l'une des stratégies. Or pour cet exemple, sous la taxe carbone constante, l'entreprise investit dès l'année 1 en technologie verte, alors que sous les autres stratégies elle retarde cet investissement. Elle réussit ainsi à réduire considérablement ses émissions de carbone ce qui résulte en une valeur de fonction utilité considérablement importante par rapport aux autres stratégies.

Finalement, on note bien qu'il existe une certaine valeur de  $\gamma$  pour laquelle, l'investissement dans le green ne pourra pas être optimal sous aucune forme des taxes carbone. Dans ces conditions, l'entreprise investit dans la technologie ordinaire sous toutes les stratégies de taxe carbone appliquées. Encore une fois, dans de telles conditions, le profit étant le seul critère de sélection, la taxation convexe devient la meilleure. Toutefois, aucune taxe n'est efficace pour inciter à l'investissement dans le green, lorsque les coûts de celles-ci sont excessivement chers par rapport aux technologies ordinaires. Le cas  $\gamma = 20$  illustre bien cette constatation.

Nous soulignons à travers ces illustrations, que lorsque le coût de la technologie green par rapport à celui de l'ordinaire n'est pas très élevé, une stratégie de taxation de carbone convexe est recommandée ; en effet, elle incite à l'investissement green en garantissant le maximum de profit à l'entreprise. Toutefois, lorsque le surcoût des technologies green disponibles est assez important, le gouvernement doit plutôt mettre en place une stratégie de taxation de carbone constante pour garantir l'implication des entreprises dans le développement durable.

A travers cette analyse, nous soulignons que pour assurer l'efficacité d'une stratégie de taxe carbone progressive, il est recommandé aux gouvernements de veiller à ce que la technologie verte disponible ne soit pas trop chère par rapport à la technologie ordinaire. Une des façons de le faire est d'octroyer des subventions aux entreprises afin de réduire les coûts d'investissement vert ou de mettre en place des projets de soutien aux concepteurs et producteurs de technologies vertes pour les aider à proposer des technologies vertes abordables. En outre, il est recommandé aux gouvernements de mettre en œuvre une législation de taxe carbone convexe s'ils optent pour une stratégie progressive, dont les performances ont été illustrées par l'analyse numérique par rapport aux autres stratégies progressives, notamment les stratégies de taxation du carbone linéaire et concave, étant donné qu'elle garantit le plus de fluidité dans l'incrémentation de la taxe carbone.

## Conclusion

La plupart des gouvernements qui ont mis en place des législations de taxe carbone, ont opté pour des stratégies de taxation progressives. Cette taxe est lancée avec un prix de carbone relativement bas et ils prévoient de l'augmenter progressivement au fil des années afin d'atteindre une valeur de taxe carbone cible qui leur permet d'atteindre leur objectif de réduction des émissions sur un horizon bien défini.

A travers ce chapitre, nous contribuons à la littérature en développant des modèles multi-périodes de choix de technologie sous une taxe carbone progressive sur un horizon fini de  $T$  années. Nous développons un algorithme (que nous implémentons sur le logiciel Matlab) pour la détermination des solutions optimales d'investissement qui s'avère un outil d'aide à la décision pour les entreprises afin de les assister dans la prise de décision stratégique à long terme sous un système réglementaire évolutif de la taxe carbone.

En outre, en s'inspirant de l'exemple concret de la stratégie canadienne de taxation linéaire progressive de carbone, nous avons élaboré d'autres formes de stratégie de taxation progressive du carbone qui ont des valeurs de taxes carbone initiale et finale communes. En utilisant une approche d'analyse multicritère, nous développons une méthode d'évaluation des stratégies de taxation de carbone en intégrant comme critère le profit et la réduction des émissions. A travers des analyses de sensibilité sur certains paramètres de cette fonction utilité et des paramètres de la technologie verte, nous montrons que les gouvernements doivent prendre en compte les performances des technologies vertes disponibles pour promulguer une réglementation efficace de taxe carbone.

Nous concluons, qu'à travers les chapitres 3 et 4, nous avons mis l'accent sur deux critères cruciaux de la législation de la taxe carbone qui ont été ignorés dans les études de problème de CCL, à savoir :

- La non-homogénéité de la taxe carbone entre les pays et son impact sur les décisions stratégiques et performances de la CL.
- La progressivité de la taxe carbone et son impact sur les décisions d'investissement en green.

A ce niveau, il est à mentionner que tous nos modèles de CCL sous la législation de la taxe carbone développés, sont des modèles déterministes, qui n'intègrent pas les sources d'incertitude de l'environnement. Il reste alors intéressant de développer ces modèles en prenant en compte l'incertitude de la demande client, ou de la législation environnementale afin d'appréhender leurs impacts sur les décisions des entreprises et leurs performances. Dans le chapitre suivant, nous proposons d'initier l'étude et l'analyse de tels problèmes dans un environnement incertain, qui constitue une perspective intéressante pour les travaux futurs.

**Chapitre V : Sur la prise en  
considération de l'incertitude dans la  
conception des chaînes logistiques à  
faibles teneurs en carbone**

## Introduction

Avec la mondialisation et l'intégration des chaînes logistiques, le contexte décisionnel de l'entreprise s'avère de plus en plus complexe et plein d'incertitude. Les entreprises ont besoin de prendre des décisions stratégiques à long terme, en s'appuyant sur des prévisions des différents paramètres de leurs problèmes et éventuellement leurs évolutions. L'incertitude de ces prévisions demeure un enjeu majeur qu'il faut impérativement prendre en considération lors de la conception des chaînes logistiques afin de prendre des décisions robustes. Dans ce contexte, l'optimisation mathématique sous incertitude, connue par l'optimisation stochastique, depuis son apparition dans les années 50 n'a cessé de se développer pour mettre en place des approches diverses et adaptables aux différents problèmes de gestion de l'entreprise et de sa CL.

A travers l'étude de la littérature, nous avons souligné que la modélisation stochastique dans le contexte de la gestion de chaîne logistique à faible teneur en carbone (GCLFTC) n'a pas reçu autant d'importance que la modélisation déterministe. Dans ce chapitre, nous proposons de contribuer à la littérature, en développant des modèles stochastiques de CCLFTC, en considérant tout particulièrement les sources d'incertitudes liées aux pressions externes exercées par le gouvernement et les clients verts sur l'entreprise pour l'inciter à réduire les émissions de carbone de sa CL.

Dans un premier modèle (*MDL5*), nous étudions le problème de choix de technologie sous la législation de taxe carbone (statique et déterministe) tout en intégrant l'incertitude de la demande client. Ensuite, nous développons un deuxième modèle stochastique (*MDL6*), de choix de technologie, en considérant une demande déterministe, mais sous une taxe carbone progressive et incertaine. En exploitant ces modèles sur des exemples numériques, nous illustrons et soulignons l'impact de ces sources d'incertitude sur les décisions stratégiques des entreprises et leurs performances. Nous proposons également d'évaluer les performances des décisions des modèles stochastiques par rapport à celles obtenues par des modèles déterministes dans la résolution des problèmes stratégiques de CCL avec considération des émissions de carbone.

## 5.1. Principales sources d'incertitude à considérer

Les pressions externes législatives et des clients conscients de l'environnement présentent deux sources d'incertitude externe pour l'entreprise. D'une part, bien qu'il soit convenu que les clients peuvent inciter les entreprises à réduire leurs émissions de carbone, en adoptant un comportement d'achat responsable, l'estimation de cette demande sensible aux émissions de carbone reste critique. D'autre part, dans le contexte de la non-homogénéité des taxes carbone entre les pays et de leur progressivité et leur sensibilité aux circonstances politiques, économiques et sociales, les prévisions de l'évolution de la taxe carbone présentent un enjeu pour les managers.

Comment peut-on alors intégrer l'incertitude de ces paramètres cruciaux dans les modèles mathématiques de CCLFTC ?

### 5.1.1. Incertitude de la demande client

La demande client reste toujours un paramètre incertain, dont la modélisation stochastique s'avère plus appropriée (Baghaliana et al., 2013). De plus le comportement des clients verts favorise davantage cette incertitude de la demande.

En effet, en améliorant les performances environnementales des produits fabriqués, l'entreprise peut orienter le choix des clients vers ces produits. Dans ces conditions, la demande client peut augmenter en fonction du niveau d'amélioration de la performance environnementale de l'entreprise et de la réduction de l'empreinte carbone de ces produits par rapport aux autres produits ordinaires proposés sur le marché. Cependant, cette corrélation entre la demande et la performance environnementale des produits reste encore très incertaine. À notre connaissance, les chercheurs n'ont pas encore établi clairement comment la sensibilité des clients à l'environnement, en particulier en ce qui concerne les émissions de carbone, peut avoir une incidence sur la demande. Il s'agit clairement d'un sujet de recherche novateur et critique, car cette sensibilité dépend du type du produit, du secteur, du niveau de conscience des clients, de leur sexe ou âge, etc. L'incorporation du comportement environnemental des clients dans les modèles mathématiques présente alors un défi majeur.

En attente de recherche plus approfondies sur ce comportement de client vert, il s'avère alors judicieux de modéliser la demande client par une variable aléatoire continue.

La modélisation de la demande client par une variable aléatoire uniforme ou normale sont les approches les plus utilisées et défendues dans la littérature (Baghaliana et al., 2013). Nous considérerons dans ce chapitre que la demande client dans ce contexte environnemental, peut être approximée par une variable aléatoire uniformément distribuée sur un intervalle  $[a ; b]$  (Chelly et al., 2017).

Dans cette optique, nous développons un modèle de choix de technologie de production sous une demande uniforme dans le cadre de la législation de la taxe carbone. Nous résolvons ensuite le modèle *MDL5* afin d'illustrer l'impact de l'incertitude de la demande sur les décisions stratégiques de l'entreprise dans un cadre environnemental exigeant.

### **5.1.2. Incertitude de la législation de la taxe carbone**

La législation environnementale de la taxe carbone est considérée comme un système de tarification de carbone plus sûr et fiable, en terme de certitude du prix de carbone, par rapport au système de marché de carbone qui obéit aux fluctuations de la loi de l'offre et de la demande. Néanmoins, nous avons bien souligné dans le chapitre 2 à travers les exemples de certaines taxes carbone appliquées dans le monde, que cet outil législatif demeure également incertain sur le long terme vu sa sensibilité aux évolutions des circonstances politiques, sociales et économiques.

Rappelons le cas de l'Australie, qui a réussi à mettre en place son système de taxe carbone en 2012, qu'elle a aboli en 2014 sous les pressions des entreprises, abandonnant ainsi sa stratégie prévue d'augmentation progressive de taxe carbone d'un taux de 2,5% annuellement. Citons encore le cas des USA qui ont signé en 2014, un accord bilatéral avec la Chine sur la réduction des émissions de carbone et l'application des taxes, et qui n'a pas été respecté. Finalement, on peut signaler les manifestations des gilets jaunes conduites récemment en France, qui ont pu modifier la trajectoire d'évolution de la taxe carbone prévue depuis son adoption en 2014.

Dans ce contexte, la modélisation sous incertitude peut s'avérer intéressante sous cette réglementation environnementale évolutive. Il est à noter que l'aspect incertain de la taxe carbone a été ignoré dans la littérature de GCLFTC. Intégrer une telle composante peut induire le développement de modèles dynamiques et stochastiques, qui peuvent s'avérer complexes et difficiles à résoudre, nécessitant ainsi de développer des outils de résolution spécifiques. La modélisation stochastique des législations environnementales évolutives présente donc une piste prometteuse pour les travaux futurs.

Dans ce chapitre, nous proposons d'initier la modélisation d'un problème de choix de technologie sous une législation de taxe carbone linéaire progressive et incertaine (Chelly et al., 2018a). Dans cette perspective, nous adoptons l'approche de modélisation par scénario pour optimiser la décision d'investissement de l'entreprise en tenant compte de différentes réalisations possibles de la taxe carbone. Nous soulignons que la prédictibilité de ces scénarios de la taxe carbone sur un horizon de  $T$  périodes et le choix de scénarios potentiels à envisager, pour garantir des décisions stratégiques optimales et robustes face à l'incertitude, nécessitent beaucoup d'effort et de précision de la part des décideurs. Une alternative, que nous proposons dans l'approche de modélisation pour faciliter cette tâche, est de considérer en plus de la législation progressive prévue et communiquée par le gouvernement, les scénarios extrêmes (dits « Worst cases »). Avec une telle approche, qu'on peut décrire de prudente, peut-on espérer que les décisions du modèle stochastique seront bonnes quelle que soit la réalisation de la taxe carbone ? Ou au contraire, ces décisions peuvent-elles dégrader le profit de l'entreprise si ces cas extrêmes s'avèrent peu probables ?

Finalement, nous proposons une approche d'évaluation des performances du modèle stochastique, en l'exploitant sur des exemples numériques, et en comparant les décisions obtenues aux décisions de modèles déterministes développés pour la résolution du même problème.

Dans les sections suivantes, nous présentons et résolvons les modèles *MDL5* et *MDL6* respectivement.

## **5.2. Problème de choix de technologie de production sous une demande client incertaine dans le cadre de la législation de taxe carbone**

Dans cette partie, nous commençons par définir le problème. Ensuite, nous présentons le modèle *MDL5*. Puis, nous le résolvons numériquement. Enfin, nous illustrons l'impact de l'incertitude de la demande sur la décision stratégique d'investissement et les performances de l'entreprise. Dans cette perspective, nous comparons les performances des décisions du modèle d'optimisation stochastique aux décisions du modèle d'optimisation déterministe pour l'étude du même problème de choix de technologie sous la législation de taxe carbone.

### **5.2.1. Définition du problème**

Afin d'aborder cette problématique, nous reprenons le cas de l'entreprise qui veut se lancer dans la production d'un nouveau produit et qui cherche à déterminer quelles technologies installer parmi deux technologies de production disponibles, notée  $f$ , telle que  $f=1$  désigne la technologie ordinaire et  $f=2$  désigne la technologie verte. Dans ce contexte, la capacité initiale de production sera toujours considérée nulle. Rappelons que nous admettons que la technologie ordinaire est moins coûteuse, en termes de coût d'installation ( $K_2 = \gamma * K_1$  avec  $\gamma \geq 1$ ), mais plus polluante, en matière d'émission de carbone que la technologie verte ( $e_2 = \beta * e_1$  avec  $\beta \leq 1$ ). Nous adoptons toujours l'hypothèse d'égalité du coût unitaire de production sur ces deux technologies ( $C_2 = C_1 = C$ ). Cette entreprise est soumise à la législation de la taxe carbone. Pour des raisons de simplicité, nous modélisons la taxe carbone par une variable statique et déterministe. Nous considérons alors pour ce problème, qu'une taxe unitaire de  $Q\$/tCO_2$  est appliquée à chaque tonne de carbone générée par l'entreprise. Nous admettons que la concurrence dans ce secteur est parfaite. Par conséquent, nous considérons que le prix de vente est déterministe et fixe, imposé par le marché, quelle que soit la technologie utilisée. Cependant, contrairement aux problèmes précédents, nous considérons

dans cette partie, que la demande client est incertaine. Nous la modélisons alors par une variable aléatoire,  $\tilde{D}$ , avec une moyenne  $E(\tilde{D})$  et une fonction de répartition ( $F_{\tilde{D}}$ ). Cette incertitude affecte les performances de l'entreprise et peut induire des coûts supplémentaires. D'une part, nous estimons que la non-satisfaction de la demande est pénalisée par un coût de rupture. En fait, si l'entreprise ne satisfait pas la demande de ses clients, l'entreprise peut avoir recours à la sous-traitance pour s'approvisionner de la quantité manquante, néanmoins à un coût de rupture  $CR$  qui est supérieur au coût de production. Nous supposons que même si l'entreprise ne dispose pas d'une telle option, la pénurie affecte son image de marque et induit une perte de marché qui peut être quantifiée par cette pénalité de pénurie. D'autre part, si l'entreprise produit plus que la demande de ses clients, elle supportera un coût de stockage si le produit peut être stocké sans perdre sa valeur. Sinon, si le produit risque de perdre sa valeur au-delà d'une certaine période, comme dans le cas des produits de mode, d'agroalimentaire, et de cosmétiques, l'entreprise sera obligée de vendre le surplus de sa demande à des prix réduits inférieurs aux prix de vente, appelés prix de récupération  $CS$ , dans le cadre d'actions de liquidation de stocks.

Ce problème est connu sous le nom de problème de vendeur de journaux, qui décrit la situation d'un fournisseur ou d'un fabricant qui doit décider combien acheter ou produire avant de savoir exactement combien vendre.

L'entreprise cherche à prendre la décision stratégique d'investissement sous cette incertitude de la demande. Nous faisons abstraction de la capacité des technologies de production, et nous admettons qu'elles ont toutes les deux des capacités infinies. Le choix des technologies reposera sur l'optimisation des coûts d'investissement, d'émission et d'incertitude. Le problème de l'entreprise, dans ce cas, est de décider des technologies à installer et de la quantité à produire sur la technologie installée afin de maximiser son profit sous la législation de taxe carbone et sa demande client aléatoire.

### **5.2.2. Modèle de choix de technologie sous une demande incertaine et la législation de taxe carbone (MDL5)**

Pour modéliser ce problème, nous avons choisi de maximiser l'espérance du profit. Avec cette approche, nous obtenons un modèle qui peut être résolu en utilisant des techniques de modélisation déterministes. Il convient toutefois de noter que le modèle résultant est différent du modèle déterministe, modélisant la demande par sa valeur moyenne.

Nous formulons alors le problème comme un modèle stochastique en deux étapes. Dans un premier temps, l'entreprise prend ses décisions d'investissement en choisissant les technologies à installer. Cette décision est modélisée par une variable de décision binaire  $y_f$  telle que  $y_f = 1$  si la technologie  $f$  est installée et 0 sinon. Le choix de la technologie de production affecte le coût d'acquisition, le taux d'émission et par conséquent le coût d'émission engendré. La décision de l'étape 2 inclut les quantités à produire sur la technologie  $f$  installée qu'on modélise par la variable de décision  $x_f$ . Les décisions de la deuxième étape sont optimisées par l'approche du vendeur des journaux.

Nous désignons par  $X$ , la quantité totale fabriquée sur les différentes technologies installées, et par  $E_m$  la quantité totale de carbone émise par la production.

Notons par  $\Pi$  la fonction objectif du modèle *MDL5*, dont nous cherchons à maximiser l'espérance. Ainsi le problème s'écrit comme suit :

$\Pi = \text{Max} \{ \text{Espérance} [\text{revenus des ventes} - \text{coûts de production} - \text{coûts d'installation} - \text{coûts des émissions} - \text{coûts de rupture} + \text{revenus de récupération}] \}$

$$\Pi = \text{Max} \{ E[\min(X, \tilde{D})] \cdot P - [\sum_{f=1}^2 x_f \cdot C - \sum_{f=1}^2 K_f \cdot y_f] - Em \cdot Q - [CR \cdot E[\max(0, \tilde{D} - X)]] + CS \cdot E[\max(0; X - \tilde{D})] \} \quad (5.1)$$

**Sous les contraintes**

$$X = \sum_{f=1}^2 x_f \quad (5.2)$$

$$Em = (\sum_{f=1}^2 e_f \cdot x_f) \quad (5.3)$$

$$x_f \leq B \cdot z_f \quad \forall f = 1, 2 \quad (5.4)$$

$$x_f \geq 0 \quad \forall f = 1, 2 \quad (5.5)$$

$$z_f \in \{0; 1\} \quad \forall f = 1, 2 \quad (5.6)$$

La *contrainte* (5.2) calcule la quantité totale fabriquée sur les différentes technologies installées, définie par  $X$ . La *contrainte* (5.3) calcule la quantité totale de carbone,  $Em$ , émise par la production. La *contrainte* (5.4) assure que la technologie  $f$  ne peut être utilisée que si elle est installée. Les *contraintes* (5.5) et (5.6) représentent les contraintes de non négativité et d'intégrité.

Notons bien que ce modèle comporte une fonction objectif stochastique dont on cherche à maximiser l'espérance avec 5 contraintes déterministes. Aucune contrainte n'est imposée sur la demande puisque nous avons choisi de modéliser le problème comme un problème de vendeur de journaux et d'introduire les coûts de l'incertitude (coût de rupture et revenu de récupération) dans les coûts à optimiser de la fonction objectif.

Afin de résoudre ce modèle, il est essentiel de le simplifier. Dans cet objectif, nous nous référons aux équations (5.7) et (5.8) et (5.9), utilisées dans les travaux de Baghaliana et al. (2013) :

$$E[\min(X, \tilde{D})] = X - E[\max(0, X - \tilde{D})] \quad (5.7)$$

$$E[\max(0, X - \tilde{D})] - E[\max(0, \tilde{D} - X)] = X - E(\tilde{D}) \quad (5.8)$$

$$E[\max(0, X - \tilde{D})] = \int_0^X F_{\tilde{D}}(t) dt \quad (5.9)$$

En incorporant ces équations dans la fonction objectif (5.1), on écrit la nouvelle fonction objectif simplifiée (5.10) :

$$\Pi = \text{Max} \{ [(P + CR) \cdot X - (CR + P - CS) \cdot \int_0^X F(t) dt - CR \cdot E(\tilde{D})] - [\sum_{f=1}^2 x_f \cdot C - \sum_{f=1}^2 K_f \cdot z_f] - [\sum_{m=1}^M e \cdot Q] \} \quad (5.10)$$

Finalement on obtient un modèle déterministe équivalent au modèle stochastique. L'espérance de la fonction objectif que nous cherchons à optimiser est désormais exprimée par l'intégrale de la fonction cumulative de la variable aléatoire  $\tilde{D}$ . Le résultat de cette transformation est un modèle non linéaire à variables mixtes, qui présente une fonction objectif non linéaire et 5 contraintes linéaires.

Dans ce problème, nous considérons que la demande est une variable aléatoire qui suit une loi uniforme sur  $[a; b]$ , alors sa fonction de répartition s'écrit comme le montre le tableau 5.1:

Tableau 5.1 : Fonction de répartition de la loi uniforme sur l'intervalle [a ; b]

Fonction de répartition	Valeur	Intervalle
$F_{\tilde{D}}(t) = P(0 \leq \tilde{D} \leq t) =$	0	si $t < a$
	$\frac{t-a}{b-a}$	si $a \leq t < b$
	1	si $t \geq b$

En considérant une demande aléatoire uniforme, le modèle MDL5 devient alors un modèle Quadratique à Variables Mixtes (QVM) dont la fonction objectif s'écrit selon l'équation (5.11) comme suit :

$$\begin{aligned} \Pi = & \text{Max} \left\{ [(P + CR) \cdot X - (CR + P - CS) \cdot \left( \frac{1}{b-a} \cdot \left( \frac{X^2}{2} - a \cdot X + \frac{a^2}{2} \right) \right) - CR \cdot \left( \frac{b+a}{2} \right)] - \right. \\ & \left. \sum_{f=1}^2 x_f \cdot C - e_0 \cdot Q_0 - \sum_{f=1}^2 K_f \cdot z_f \right\} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Ce problème QVM, qui présente une fonction objectif quadratique non linéaire ainsi que 5 contraintes linéaires, peut être résolu avec le solveur CPLEX 12.6 qui utilise l'algorithme de *barrier*, une technique à base de points intérieurs pour la résolution de tels problèmes QVM.

Nous continuons dans la partie qui suit avec la résolution numérique de ce modèle afin d'illustrer l'impact combiné de de la taxe carbone et de l'incertitude de la demande sur les décisions stratégiques des entreprises et leurs performances.

### 5.2.3. Résolution numérique de MDL5

La demande client est considérée exogène et stochastique. Elle est représentée par une variable aléatoire  $\tilde{D}$  qui suit une loi uniforme sur [10000 ; 14000]. Ainsi, l'espérance de  $E[\max(0, X - \tilde{D})]$  s'évalue comme illustré dans le tableau 5.2 suivant.

Tableau 5.2 : Fonction de répartition de la demande uniforme sur [10000 ; 14000].

Fonction	Valeur	Intervalle
$E[\max(0, X - \tilde{D})] = \int_0^X F_{\tilde{D}}(t) dt = \int_{10000}^X F_{\tilde{D}}(t) dt$	0	si $X < 10000$
	$\frac{X^2}{8000} - (5/2)X + 12500$	si $10000 \leq X < 14000$
	$X - 14000$	si $X \geq 14000$

Afin de mettre en évidence l'intérêt de considérer une demande incertaine dans un problème de choix de technologies dans un contexte environnemental, nous comparons les résultats du modèle stochastique MDL5 aux résultats d'un modèle d'optimisation déterministe pour résoudre ce même problème. Dans ce modèle déterministe, nous supposons que la demande est approximée par sa valeur moyenne. On la modélise alors par la variable  $D$ , telle que  $D = E(\tilde{D})$ . La fonction objectif de ce modèle déterministe est présentée par l'équation (5.12).

Ce modèle adopte les mêmes contraintes que *MDL5*, en ajoutant la contrainte (5.13) ci-dessous :

$$\pi = \text{Max} \{ D \cdot P - \sum_{f=1}^2 x_f \cdot C - E \cdot Q + - \sum_{f=1}^2 K_f \cdot z_f \} \quad (5.12)$$

Sous les contraintes de (5.2) à (5.6) du modèle *MDL5* et la contrainte (5.13).

$$\sum_{f=1}^2 x_f \leq D \quad (5.13)$$

Cette *contrainte (5.13)* garantit que la quantité produite ne dépasse pas la demande dans ce contexte de maximisation du profit.

Comme on l'a déjà mentionné, nous cherchons à comparer les performances des modèles d'optimisation déterministe et stochastique dans la résolution de ce problème d'investissement sous la législation de taxe carbone. Ainsi nous introduisons les mêmes données pour les deux modèles, notamment, les coûts d'installation et de production des différentes technologies disponibles, ainsi que leurs émissions, le prix de vente que nous avons supposé fixe et déterminé au préalable et les données relatives à la législation environnementale. Rappelons que pour modéliser la demande stochastique, nous avons supposé qu'elle suit une loi uniforme sur l'intervalle  $[10000 ; 14000]$ . Ainsi, la demande est supposée égale à  $D=12000$  unités dans le modèle déterministe.

Le tableau 5.3 résume l'exemple numérique que nous adoptons pour résoudre nos modèles.

Tableau 5.3 : Données numériques : paramètres et coûts du modèle

Paramètres	Notations	Valeurs
Demande	D	12000
Prix de vente	P	10\$
Emission unitaire de carbone de la technologie ordinaire	$e_1$	0,03t
Coût unitaire de production avec technologie ordinaire ou green en domestique	C	6\$
Coût d'installation de la technologie ordinaire	$K_1$	2500\$
Paramètre caractérisant le taux de réduction de l'émission unitaire de la technologie verte par rapport à l'ordinaire	$\beta$	0,33
Surcoût de la technologie verte	$\gamma$	2,5

Le tableau 5.4, présente les décisions optimales et les performances de l'entreprise avec chaque modèle d'optimisation.

Tableau 5.4 : Résultats des modèles stochastique et déterministe

Décisions	Modèle stochastique	Modèle Déterministe
Technologie installée	2	1
Quantité à produire	12 967	12 000
Profit (\$)	37 215	41 900
Chiffre d'affaire (\$)	129 670	120 000
Emission totale de carbone (t)	128	360
Coûts de pollution (\$)	1 284	3 600

Il est clair à partir de ces résultats que la considération de l'incertitude de la demande a un grand impact sur les décisions stratégiques de l'entreprise. Le premier constat souligne que le profit a diminué de 13% entre le modèle déterministe et le modèle stochastique. Tandis que le modèle déterministe qui s'avère plus optimiste a prévu un gain de 41900\$, le modèle stochastique n'a prévu que 37215\$. En effet, le modèle déterministe opte pour le choix de la technologie ordinaire dont le coût d'installation ne représente que la moitié du coût d'installation de la technologie green choisie dans le modèle stochastique. Le choix de cette technologie pour ce modèle déterministe s'explique par le fait qu'en ne produisant que 12000 unités, l'entreprise n'a pas besoin d'investir en technologie verte, plus coûteuse et moins émettrice de carbone, pour minimiser ses coûts d'investissement et d'émission. Les performances de la technologie ordinaire permettent à l'entreprise d'optimiser ses coûts en produisant sa demande client tout en minimisant les coûts des émissions, de production et d'installation. Cependant, en considérant que la demande est aléatoire uniformément sur [10000 ; 14000], la variabilité de la demande, peut emmener l'entreprise à produire plus que 12000 unités pour optimiser les coûts supplémentaires de rupture et les revenus de récupérations. L'augmentation de la production engendre alors l'augmentation des coûts d'émission de carbone. En décidant de produire plus, le modèle stochastique a opté pour le choix de la technologie verte qui permet de minimiser les coûts d'émission sous la même valeur de taxe carbone. On illustre à travers cet exemple que l'incertitude de la demande pousse l'entreprise vers le choix de la technologie verte en dépit de ses coûts d'exploitation plus élevés pour permettre à l'entreprise de se doter de la flexibilité requise pour répondre aux besoins de ses clients et maximiser son profit tout en minimisant ses émissions de carbone. Ce choix de technologie propre permet ainsi d'améliorer les performances environnementales de l'entreprise en faisant passer ses émissions de carbone de 360t à 128t de carbone soit 64% de moins.

Toutefois, rappelons que le profit de l'entreprise avec les décisions du modèle déterministe semble être meilleur que son profit avec les décisions du modèle stochastique. Ainsi, il s'avère intéressant, de réévaluer les profits de l'entreprise avec les décisions de chaque modèle d'optimisation en considérant différents scénarios possible de la réalisation de la demande. En effet l'adoption des décisions du modèle stochastique aussi bien que du modèle déterministe, en fonction des réalisations de l'incertitude, peut engendrer des regrets. Nous procédons, alors, à l'évaluation de cet éventuel regret dans chacun des deux cas pour différents scénarios possibles de la réalisation de la demande.

Dans cet objectif, nous supposons que l'entreprise peut décider de ses choix stratégiques et tactiques, une fois que la demande est dévoilée et connue. Ainsi on résout 4 modèles déterministes basés sur 5 réalisations différentes de la demande, qu'on note ( $WS_i$ ), tel que  $WS_1 = 10000$ ,  $WS_2 = 11000$ ,  $WS_3 = 12000$ ,  $WS_4 = 13000$  et  $WS_5 = 14000$  unités. On désigne ces décisions, que l'entreprise pourrait mener si elle possède l'information exacte sur la demande, par les décisions « Wait and See ».

Ensuite on estime que l'entreprise opte pour les décisions optimales du modèle déterministe, et installe ainsi la technologie ordinaire en produisant 12000 unités. On considère chacun des scénarios envisagés de la réalisation de la demande,  $WS_i$ , et on réévalue le profit de l'entreprise pour chacun de ces cas. Dans chaque cas, le coût d'investissement, de production et d'émission étant fixe vu qu'on produit toujours la même quantité suggérée par le modèle déterministe, on recalcule les coûts de rupture et les revenus de récupération en fonction de la réalisation de la demande considérée. On conclut alors le regret déterministe ( $R_{det}(WS_i)$ ), qui pour chaque réalisation de la demande  $WS_i$  avec  $i \in [1..5]$ , détermine la différence entre les deux profits.

$$R_{det}(WS_i) = \frac{\text{Profit}(WS_i) - \text{Profit déterministe réévalué pour}(WS_i)}{\text{Profit}(WS_i)} \text{ pour tout } i \in [1..5] \quad (5.14)$$

Ensuite, pour évaluer la solution du modèle stochastique, on estime que l'entreprise décide de produire 12967 sur la technologie verte. On réévalue de la même façon le profit de l'entreprise sous chaque réalisation de la demande  $WS_i$  avec  $i \in [1..5]$ . En comparant ce profit réévalué par rapport au Profit  $(WS_i)$  qui considère ce scénario  $(WS_i)$  de la demande, on déduit de même le regret stochastique  $(R_{stoc}(WS_i))$ .

$$R_{stoc}(WS_i) = \frac{\text{Profit}(WS_i) - \text{Profit stochastique réévalué pour}(WS_i)}{\text{Profit}(WS_i)} \text{ pour tout } i \in [1..5] \quad (5.15)$$

On calcule à l'aide de l'équation (5.16) ci-dessous, un indicateur qui permet d'évaluer la différence relative entre les résultats du modèle déterministe et stochastique, qu'on note RD

$$RD = \frac{(\text{résultat stochastique} - \text{résultat déterministe}) * 100}{\text{résultat stochastique}} \quad (5.16)$$

Tableau 5.5 : Calcul des regrets déterministe et stochastique

$WS_i$	Scénario de la demande	Profit $WS_i$	Technologie à installer	Profit stochastique (réévalué) pour $WS_i$	$R_{stoc}(WS_i)$	Profit déterministe réévalué pour $WS_i$	$R_{det}(WS_i)$
$WS_1$	10 000	34 500	1	24 815	9 685	27 900	6 600
$WS_2$	11 000	38 200	1	31 815	6 385	34 900	3 300
$WS_3$	12 000	41 900	1	38 815	3 085	41 900	-
$WS_4$	13 000	45 713	2	45 419	294	36 900	8 813
$WS_5$	14 000	49 614	2	40 419	9 195	31 900	17714
Moyenne		41 985		36 257	5 729	34 700	7 285

Dans le tableau 5.6 ci-dessous, on présente la comparaison entre les deux modèles, qui incluent les profits estimés par les modèles d'optimisation, les profits réévalués ainsi que les regrets moyen et maximum de chaque modèle

Tableau 5.6 : Comparaison entre les modèles stochastique et déterministe

Indicateur de performance	Modèle déterministe	Modèle stochastique	Différence relative (RD)
Profit du modèle d'optimisation avant réévaluation	41 900	37 215	-13%
Profit réévalué en fonction des scénarios de la demande	34 700	36 257	+4%
Regret moyen	7 285	5 729	-21,3%
Regret maximal	17 714	9 685	-82,9%

Le regret moyen pour les décisions du modèle déterministe est de 7 285\$, alors que le regret stochastique moyen est de 5 729\$ soit 21% de moins. Il est ainsi clair que, bien que le modèle déterministe ait estimé un gain supérieur au gain stochastique, le regret qu'il présente est plus

important. En effet, on note que le profit stochastique réévalué s'avère plus important que le profit déterministe réévalué (de 4%). Il est à souligner également que le regret stochastique maximum peut atteindre 13% du profit stochastique estimé, si le scénario 1 se réalise et ainsi la demande ne s'avère que de 10000 unités. Quant au regret déterministe maximum, il est de l'ordre de 17714\$ soit 42% du profit déterministe estimé. Par conséquent, l'adoption de la solution déterministe s'avère plus regrettable si l'un des scénarios extrêmes se produit. Ces analyses et ces calculs illustrent que les décisions du modèle stochastique sont plus robustes face à l'incertitude. Par conséquent, la modélisation stochastique s'avère plus appropriée pour étudier les problèmes stratégiques de conception de CL sous des pressions législatives sur les émissions de carbone, étant donné que ses décisions optimales engendrent moins de regret, permettent de maximiser le profit et réduire les émissions de l'entreprise quelle que soit la réalisation de la demande.

Soulignons que dans notre exemple numérique, les décisions stratégiques du modèle stochastique et du modèle déterministe sont différentes. Alors que le modèle stochastique suggère d'installer la technologie verte, le modèle déterministe opte pour le choix de la technologie ordinaire. Pour analyser davantage les performances des modélisations stochastique et déterministe dans la résolution de ce problème, nous reprenons nos analyses d'évaluation et de comparaison des regrets des décisions des deux modèles, sur deux autres exemples numériques, pour lesquels, les décisions stratégiques d'investissement des deux modèles s'avèrent les mêmes. Dans un premier cas, on considère que les deux modèles suggèrent d'installer la technologie verte. Dans un deuxième cas, on considère que les deux modèles choisissent d'installer la technologie ordinaire. Afin d'illustrer ces deux cas, nous choisissons de faire varier le surcoût de la technologie verte, que nous admettons un paramètre crucial et déterminant pour ce problème de choix de technologie sous la taxe carbone et une demande incertaine.

Pour un surcoût de la technologie verte  $\gamma = 2,5$ , les deux modèles choisissent d'installer la technologie ordinaire à cause de l'augmentation du coût d'installation qui ne favorise plus la technologie verte sous la taxe carbone considérée en dépit de ses performances environnementales. Toutefois, bien que le modèle déterministe suggère de produire la moyenne de la demande à savoir 12000 unités, le modèle stochastique suggère de produire 12900 unités. Serait-il alors plus judicieux à l'entreprise de ne produire que 12000, ou bien est-il plus rentable et avantageux de produire 12900 unités. Pour répondre à cette interrogation, on réévalue, pour chacune des réalisations de la demande considérée, le profit et ainsi le regret de l'entreprise si elle produit 12900 ou 12000 unités.

Les tableaux 5.7 et 5.8 résument nos résultats pour ce cas où  $\gamma = 2,5$ .

Tableau 5.7. Calcul du regret déterministe et stochastique pour  $\gamma = 2,5$

$\gamma = 2,5$							
$WS_i$	Scénario de la demande	Profit $WS_i$	Technologie à installer	Profit stochastique (réévalué) pour $WS_i$	$R_{stoc}(WS_i)$	Profit déterministe réévalué pour $WS_i$	$R_{det}(WS_i)$
WS1	10 000	34 500	1	23 773	10 727	26 562	7 938
WS2	11 000	38 200	1	30 773	7 427	33 562	4 638
WS3	12 000	41 900	1	37 773	4 127	40 562	1 338
WS4	13 000	45 600	1	43 573	2 027	35 562	10 038
WS5	14 000	49 300	1	38 573	10 727	30 562	18 738
Moyenne		41 900		34 893	7 007	33 362	8 538

Tableau 5.8 : Comparaison des deux modèles déterministe et stochastique pour  $\gamma = 2,5$

Indicateur de performance	Modèle déterministe	Modèle stochastique	Différence relative (RD)
Profit du modèle d'optimisation avant réévaluation	41 900	37 115	-13%
Profit réévalué en fonction des scénarios de la demande	33 362	34 893	+4%
Regret moyen	8 538	7 007	-21,8%
Regret maximal	18 738	10 727	-74,6%

Bien que les deux modèles ont opté pour la même décision stratégique d'investissement, à savoir l'investissent en technologie ordinaire, les décisions du modèle stochastique conduisent à un profit estimé inférieur au profit du modèle déterministe de 13%. L'entreprise peut alors décider de ne produire que 12000 unités pour maximiser son profit, tel que suggéré par ce modèle. Toutefois, en considérant les scénarios de la réalisation de la demande, les décisions du modèle déterministe engendrent un regret moyen de 8538\$ soit 20% du profit estimé. De plus, si le pire scénario d'une demande de 14000 unités se réalise, le regret de l'entreprise avec les décisions déterministes peut atteindre 45% du profit estimé. Cependant, après réévaluation des profits stochastique et déterministe selon les scénarios considérés de la demande, le profit stochastique réévalué moyen s'avère 4% meilleur que le profit déterministe réévalué moyen. En outre, dans le cas du pire scénario, le regret maximum sous les décisions de ce modèle stochastique est de seulement 29% du profit estimé, soit un regret maximal de 74,6% inférieur au regret maximal déterministe.

Finalement, on illustre que même si les deux modèles, stochastique et déterministe, optent pour le même choix de technologies, à savoir la technologie ordinaire, les décisions du modèle stochastique, restent toujours plus robustes face à l'incertitude, plus rentables et plus performantes que les décisions du modèle déterministe.

Par la suite, on considère, une réduction du surcoût de la technologie verte qui passe à  $\gamma = 1,5$ , pour que les deux modèles suggèrent de prendre la même décision stratégique sous la taxe carbone en vigueur, à savoir l'installation de la technologie verte. On reprend les mêmes analyses, sur cet exemple numérique et on obtient les résultats détaillés dans les tableaux 5.9 et 5.10, qui restent en conformité avec nos résultats précédents.

Tableau 5.9. Calcul du regret déterministe et stochastique pour  $\gamma = 1,5$

$\gamma = 1,5$							
$WS_i$	Scénario de la demande	Profit $WS_i$	Technologie à installer	Profit stochastique (réévalué) pour $WS_i$	$R_{stoc}(WS_i)$	Profit déterministe réévalué pour $WS_i$	$R_{det}(WS_i)$
WS1	10 000	35 260	2	26 065	9 195	29 062	6 198
WS2	11 000	39 161	2	33 065	6 096	36 062	3 099
WS3	12 000	43 062	2	40 065	2 997	43 062	0
WS4	13 000	46 963	2	46 669	294	38 062	8 901
WS5	14 000	50 864	2	41 669	9 195	33 062	17 802
Moyenne		41 900		37 507	5 555	35 862	7 200

Tableau 5.10 : Comparaison des deux modèles déterministe et stochastique pour  $\gamma = 1,5$

Indicateur de performance	Modèle déterministe	Modèle stochastique	Différence relative
Profit du modèle d'optimisation avant réévaluation	43 062	38 465	-12%
Profit réévalué en fonction des scénarios de la demande	35 862	37 507	+4%
Regret moyen	7 200	5 555	-22,8%
Regret maximal	17 802	9 195	-93,6%

Nous illustrons, à travers nos expérimentations numériques, qui présentent trois cas pour lesquelles les décisions stratégiques des modèles déterministe et stochastique sont différentes ou pas, que quelles que soient les performances des technologies vertes disponibles, la modélisation stochastique est plus adaptée à la résolution de problème de CCLFTC sous la taxe carbone, étant donné que ses décisions sont plus robustes face à l'incertitude de son environnement et plus rentables.

A travers cet exemple, nous avons souligné l'importance de considérer l'incertitude de la demande lors de la résolution d'un problème stratégique dans un cadre environnemental exigeant. Par conséquent, nous considérons la modélisation stochastique plus appropriée pour résoudre ce problème et trouver les décisions optimales sous des contraintes de la taxe carbone.

Nous proposons dans la suite, d'étudier l'impact d'une autre source d'incertitude externe, à savoir l'incertitude de la pression législative sur les décisions et performances des entreprises. Dans le modèle de choix de technologie de production sous une taxe carbone déterministe et une demande incertaine, nous avons développé un modèle statique. Mais, afin de mieux illustrer l'effet de l'incertitude de la taxe carbone sur les décisions des CL et leurs

performances, nous considérons le problème de progressivité de la taxe carbone qui accentue davantage cette incertitude. Dans la partie suivante, nous traitons donc le problème de choix de technologie de production sous une taxe carbone dynamique et incertaine. Nous proposons en particulier d'étudier l'impact combiné de la progressivité et l'incertitude de la législation de taxe carbone sur les décisions stratégiques d'investissement de l'entreprise.

### **5.3. Modèle multi-périodes stochastique de choix de technologie sous une taxe carbone progressive et incertaine (MDL6)**

Dans cette partie, nous considérons toujours le problème d'une l'entreprise qui cherche à installer des nouvelles technologies de production pour se lancer dans la fabrication d'un nouveau produit. Cette entreprise est installée dans un pays qui annonce sa stratégie de mise en place d'une législation de taxe carbone progressive sur un horizon de  $T$  périodes. Telle que communiquée par le gouvernement, cette taxe carbone augmenterait progressivement au cours des  $T$  années en suivant une progression linéaire au cours du temps tel que  $Q(t) = q \cdot t$  avec  $t \in [1..T]$ . Cette entreprise dispose de deux choix de technologies différentes sur le marché notées  $f$ : une technologie ordinaire ( $f = 1$ ) et une technologie verte ( $f = 2$ ). On reprend les hypothèses des sections précédentes (section 5.1) sur ces technologies disponibles.

Le coût de production unitaire ainsi que le coût d'installation sont supposés constants sur tout l'horizon. On admet également que la capacité de production de chaque technologie, ordinaire ou verte, est infinie. L'entreprise a recours à un amortissement linéaire de son matériel sur les  $T$  périodes à partir de la date d'achat. En outre, la technologie ordinaire peut être vendue dans le cas où l'entreprise ne s'en sert plus. Par contre nous supposons que la technologie verte ne peut pas être vendue.

Nous considérons également que le prix de vente est un paramètre connu et fixe sur tout l'horizon, déterminé par le marché  $P(t) = P$ . Pour des raisons de simplicité, dans une perspective de mettre l'accent sur l'impact de l'incertitude de la législation de carbone, nous supposons dans cette partie, que la demande est connue et fixe sur toute la période, désignée par  $D(t) = D$ .

L'entreprise cherche alors à déterminer quelles technologies installer et en quelles années pour maximiser son profit sous la taxe carbone progressive en vigueur.

Pour la prise de décision stratégique d'investissement, il s'avère judicieux pour l'entreprise de prendre en considération l'horizon de  $T$  périodes pour intégrer le caractère dynamique de cette taxe carbone progressive. Toutefois nous supposons que cette taxe carbone progressive annoncée sur un horizon de  $T$  périodes peut changer au cours du temps suite à différentes circonstances politiques, économiques ou sociales. En effet, les législations en général, et les taxes carbone en particulier sont approuvées par des gouvernements qui sont élus périodiquement. Un changement de gouvernement au cours de l'horizon considéré peut entraîner des changements de stratégies environnementales, et induire ainsi la modification de la réglementation de taxe carbone. En outre, sous les pressions des industriels, de la société civile ou d'autres parties prenantes, la législation de taxe carbone peut être sujette à changement et ne pas suivre la trajectoire progressive annoncée. Finalement, dans le contexte mondial d'objectif global de réduction des émissions de carbone, la taxe carbone progressive adoptée par ce gouvernement peut aussi changer pour s'aligner aux valeurs moyennes des taxes carbone adoptées par les autres gouvernements. Les entreprises doivent alors prendre en considération ce caractère incertain de cette taxe carbone dynamique lors de la prise de décisions stratégiques d'investissement. La modélisation de cette contrainte d'incertitude du

pouvoir législatif s'avère donc critique en raison de la difficulté de prévoir le scénario le plus probable de la stratégie de taxation de carbone sur un horizon étendu de  $T$  périodes surtout dans de telles conditions où de nombreux acteurs aussi bien en local qu'à l'échelle mondiale peuvent intervenir.

Dans le modèle *MDL6*, dans le cadre d'initier la modélisation de cette contrainte, nous optons vers l'optimisation stochastique, en déployant l'approche par scénario. En effet, afin de faire face à ce dilemme de prédictibilité des scénarios à considérer, nous proposons d'intégrer dans le modèle *MDL6* les scénarios extrêmes, pour déterminer une solution qui reste "bonne" quelle que soit le scénario considéré. Dans cette optique, nous intégrons trois scénarios notés par  $s$ , avec  $s = \{1, 2, 3\}$ , équiprobables (probabilité de chaque scénario  $s$  est alors  $Pr_s = 1/3$ ). Ces trois scénarios envisagés correspondent à la politique de taxe carbone communiquée, ainsi qu'aux deux cas extrêmes. Ils sont décrits dans le tableau 5.11 suivant :

Tableau 5.11 : Scénarios considérés de la taxe carbone du modèle stochastique

Scénario	Taxe carbone considérée
Dans un premier scénario, $s = 1$ , la taxe carbone reste constante sur l'horizon. Ainsi, au bout de $T$ périodes, elle sera la même que la taxe carbone de lancement	$Q_s(t) = Q(1) \quad \forall t \in [1..T] \quad \text{pour } s = 1$ (5.17)
Dans un deuxième scénario, $s = 2$ , on suppose que la taxe carbone sera telle qu'annoncée, progressive linéaire sur les $[1..T]$ périodes	$Q_s(t) = q.t \quad \forall t \in [1..T] \quad \text{pour } s = 2$ (5.18)
Dans un troisième scénario on suppose que la taxe carbone sera lancée avec la valeur finale à atteindre au bout de l'horizon de planification	$Q_s(t) = Q(T) = T.q$ $\forall t \in [1..T] \quad \text{pour } s = 3$ (5.19)

La fonction objectif du modèle multi-périodes stochastique *MDL6* est de maximiser l'espérance du profit de l'entreprise en intégrant ces trois scénarios avec des probabilités d'occurrence égales. Dans ce qui suit nous détaillons les paramètres, variables de décisions, fonction objectif et contraintes de ce modèle.

### Paramètres du modèle

$t$  : période dans  $[1.. T]$  ;

$s$  : scénarios de la taxe carbone dans  $[1..S]$  ;

$f$  : technologies de production dans  $[1..F]$  ;

$K_1$ : coût d'investissement en technologie ordinaire ;

$\beta$  : paramètre caractérisant le taux de réduction des émissions de carbone de la technologie verte par rapport à l'ordinaire,  $e_2 = \beta * e_1$  avec  $\beta \in [0; 1]$ ;

$\gamma$  : facteur reflétant le surcoût de la technologie verte par rapport à l'ordinaire,  $K_2 = \gamma * K_1$  avec  $\gamma \geq 1$

$B$ : une constante très grande ;

$E_{ts}$ : émissions totales de carbone générées en période  $t$  sous le scénario  $s$  ;

$Q_s(t)$ : la taxe carbone unitaire en période  $t$  (\$/tonne  $CO_2$ ) pour le scénario  $s$  ;

$Pr_s$ : probabilité du scénario  $s$  de la taxe carbone ;

$\pi_t$ : profit de l'entreprise en période  $t$  ;

**Variables de décision**

$x_{fts}$ : quantité à produire sur la technologie  $f$  en période  $t$  pour le scénario  $s$ ;

$y_{ft}$ : variable binaire égale à 1 si on installe la technologie  $f$  en période  $t$  et 0 sinon ;

$z_t$ : variable binaire égale à 1 si la technologie ordinaire est vendue en période  $t$  et 0 sinon

**Fonction Objectif**

$$Max[\sum_{t=1}^T (E(\pi_t) - \sum_{f=1}^2 y_{ft} * (T - t + 1) * \frac{1}{T} * K_f + (T - t + 1) * K_1 * \frac{1}{T} * z_t)] \quad (5.20)$$

Pour chaque période  $t$ , l'espérance du profit est :

$$E(\pi_t) = \sum_{s=1}^S Pr_s * (\sum_{f=1}^2 x_{fts} * (P_t - C) - Q_s(t) * E_{ts}) \quad (5.21)$$

**Sous les contraintes**

$$\sum_{f=1}^2 x_{fts} \leq D_t \quad \forall t \in [1..T] \quad \forall s \in [1..S] \quad (5.22)$$

$$E_{ts} = \sum_{f=1}^2 e_f * x_{fts} \quad \forall t \in [1..T] \quad \forall s \in [1..S] \quad (5.23)$$

$$\sum_{t=1}^T y_{ft} \leq 1 \quad \forall f = 1, 2 \quad (5.24)$$

$$\sum_{t=1}^{t-1} y_{1t} \geq z[t] \quad \forall t \in [1..T] \quad (5.25)$$

$$\sum_{t=1}^T z_t \leq 1 \quad (5.26)$$

$$x_{fts} \leq B * y_{ft} \quad \forall f = 1, 2 ; \forall t \in [.. T] ; \forall s \in [1..S] \quad (5.27)$$

$$x_{fts} \geq 0 \quad \forall f = 1, 2 ; \forall t \in [.. T] ; \forall s \in [1..S] \quad (5.28)$$

$$y_f \in \{0 ; 1\} \quad \forall f = 1, 2 \quad (5.29)$$

$$z_t \in \{0 ; 1\} \quad (5.30)$$

Dans un contexte de maximisation de profit, ou la surproduction n'est pas pénalisée, la *contrainte* (5.22) garantit que la quantité totale fabriquée du produit fini sur toutes les technologies installées ne dépasse pas la demande annuelle pour chaque année  $t$  pour chaque scénario  $s$ . La *contrainte* (5.23) calcule la quantité totale d'émission de carbone générée chaque année  $t$ , pour chaque scénario  $s$ , par la quantité produite sur les technologies installées. La *contrainte* (5.24) garantit que chaque technologie ne peut être installée qu'une seule fois sur tout l'horizon de planification. La *contrainte* (5.25), permet de vérifier que la technologie ordinaire ne peut être vendue que si elle a déjà été installée auparavant. La *contrainte* (5.26), impose que la technologie ordinaire ne peut être vendue qu'une seule fois sur l'horizon de planification. La *contrainte* (5.27) vérifie que chaque technologie ne peut être utilisée que si elle est installée. Finalement les *contraintes* (5.28), (5.29) et (5.30), sont des contraintes de non-négativité et de restrictions binaires, respectivement.

**5.3.1. Résolution numérique du modèle MDL6 et analyses**

A travers des expérimentations numériques nous cherchons à étudier l'impact de la taxe carbone dynamique et incertaine sur les décisions stratégiques des chaînes logistiques et leurs performances. Pour cela on résout à travers un exemple numérique dérivé de l'industrie du textile, déjà utilisé pour nos modèles précédents, le modèle stochastique MDL6 ainsi qu'un modèle déterministe qui ne prend en considération, pour la décision de choix de technologies

de production, que la stratégie de taxe carbone progressive annoncée par le gouvernement. Ce modèle déterministe a pour fonction objectif (5.31), les contraintes (5.32), (5.33), (5.34) et (5.35) détaillées ci-dessous ainsi que les mêmes contraintes (5.24), (5.25), (5.26), (5.29) et (5.30) du modèle stochastique *MDL6* en remplaçant  $x_{fts}$  par  $x_{ft}$  la quantité à fabriquer sur chaque technologie  $f$  en période  $t$ .

$$\text{Max}(\sum_{t=1}^T [\sum_{f=1}^2 x_{ft} * (P_t - C)] - [Q(t) * E_t] - [\sum_{f=1}^2 y_{ft} * (T - t + 1) * \frac{1}{T} * K_f] + [(T - t + 1) * K_1 * \frac{1}{T} * z_t]) \quad (5.31)$$

$$\sum_{f=1}^2 x_{ft} \leq D_t \quad \forall t \in [1..T] \quad (5.32)$$

$$E_t = \sum_{f=1}^F e_f * x_{ft} \quad \forall t \in [1..T] \quad (5.33)$$

$$x_{ft} \leq B * y_{ft} \quad \forall f = 1, 2; \forall t \in [..T] \quad (5.34)$$

$$x_{ft} \geq 0 \quad \forall f = 1, 2; \forall t \in [..T] \quad (5.35)$$

Pour les valeurs de la taxe carbone, nous adoptons la taxe carbone progressive linéaire appliquée par le Gouvernement Canadien en 2018. Cette taxe carbone est lancée avec une valeur de taxe de 10\$ \ t CO<sub>2</sub> la première année, et elle est supposée augmenter de 10€ chaque année pour atteindre 50€ \ t CO<sub>2</sub> dans un horizon de 5 années. Nous admettons alors que  $Q_2(t) = 10.t$  avec  $t \in [1..5]$ . Pour le modèle d'optimisation stochastique *MDL6*, nous considérons un autre scénario pour lequel  $Q_1(t) = 10€ \ t CO_2 \ \forall t \in [1..5]$ , et un troisième scénario pour lequel  $Q_3(t) = 50€ \ t CO_2 \ \forall t \in [1..5]$ . La probabilité d'occurrence de chaque scénario est alors de 1/3. Nous considérons  $D = 12000$ ;  $P = 10\$/\text{unité}$ ;  $C = 6\$/\text{unité}$ ;  $K_1 = 2500\ \$$  et  $e_1 = 0,03t/\text{unité}$ . Nous varions les valeurs des paramètres caractérisant le taux de réduction des émissions de carbone et le surcoût de la technologie verte disponible par rapport à la technologie ordinaire ( $\beta$  et  $\gamma$ ). Nous analysons ensuite les résultats obtenus qui sont illustrés dans le tableau 5.12.

Tableau 5.12: Décisions optimales d'investissement et profit des entreprises pour le modèle déterministe et stochastique

$\beta$	$\gamma$	Décisions (DET)	Profit (DET)	Emissions de carbone (DET)	Décision (STOC)	Profit (STOC)	Emissions de carbone (STOC)
0,8	1,5	1	193 050	1440	1	192 853	1440
	4	3	187 640	1584	1	186 603	1440
0,7	1,5	1	198 450	12600	1	198 248	1260
	4	2	192 620	1368	1	191 998	1260
0,6	1,5	1	203 850	1080	1	203 642	1080
	4	2	197 660	1224	1	197 392	1080
0,5	1,5	1	209 250	900	1	209 229	900
	4	1	203 000	900	1	202 979	900

Pour chaque couple  $(\beta, \gamma)$  qui caractérise la technologie verte disponible, nous résolvons tout d'abord le modèle multi-périodes stochastique *MDL6*, et nous déterminons ainsi la décision d'investissement optimale pour l'entreprise. Nous précisons alors l'année

d'investissement en technologie verte dans la colonne (Décisions STOC), le profit engendré par cette décision ainsi que les émissions de carbone générées dans les colonnes respectives (Profit STOC et Emissions de carbone STOC). Puis, on résout de même le modèle déterministe. On précise la décision d'investissement en technologie verte, le profit du modèle déterministe ainsi que les émissions de carbone engendrées par la décision de ce modèle dans les colonnes respectives (Décisions DET, Profit DET et Emissions de carbone DET).

A partir de ce tableau, on remarque que les décisions stratégiques optimales du modèle déterministe et du modèle stochastique sont les mêmes quand les technologies vertes ont un coût d'investissement relativement proche de celui de l'ordinaire (quand  $\gamma = 1,5$ ) quelle que soit la performance environnementale de la technologie verte ( $\beta$ ).

Quand le surcoût de la technologie verte devient assez élevé par rapport à l'ordinaire ( $\gamma = 4$ ), les décisions optimales des deux modèles stochastique et déterministe changent. En effet, le modèle stochastique encourage l'investissement en technologie verte au plus tôt par rapport au modèle déterministe. Par exemple, lorsque le niveau de réduction des émissions de carbone de la technologie verte est 20% de moins ( $\beta = 0,8$ ), le modèle déterministe suggère d'investir en technologie verte l'année 3 alors que le modèle stochastique, choisit d'investir en green dès l'année 1. Plus la performance environnementale de la technologie verte s'améliore ( $\beta$  diminue), plus le modèle déterministe suggère d'avancer l'investissement en technologie verte également jusqu'à avoir la même décision stratégique d'investissement que le modèle stochastique, à savoir investir en technologie verte dès la première année.

On conclut que lorsque le surcoût de la technologie verte est assez faible, et/ou que son niveau de réduction d'émission de carbone par rapport à la technologie ordinaire est important, les décisions du modèle déterministe et stochastique sont les mêmes à savoir investir en technologie verte dès l'année 1. Dans ce contexte, la modélisation déterministe, qui est plus simple, et qui intègre bien le caractère progressif de la législation de carbone peut être adéquate à la résolution du problème d'investissement de l'entreprise. Les décideurs n'ont pas ainsi besoin de faire recours à la modélisation stochastique plus sophistiquée et complexe, pour aboutir à des décisions plus robustes sous l'incertitude de la taxe carbone.

Toutefois, quand l'un de ces deux indicateurs de performance de la technologie verte la désavantage par rapport à la technologie ordinaire, les décisions du modèle stochastique encouragent l'investissement au plus tôt par rapport aux décisions du modèle déterministe.

Par conséquent, le modèle stochastique conduit l'entreprise à prendre des décisions donnant une meilleure performance environnementale en lui permettant de mieux réduire ses émissions globales de carbone sur tout l'horizon. A titre d'exemple, lorsque l'entreprise avance l'investissement en green de l'année 3 (selon la décision optimale du modèle déterministe pour le couple  $\beta = 0,8$  et  $\gamma = 4$ ) à l'année 1 (selon la décision optimale du modèle stochastique), ses émissions globales de carbone sur l'horizon diminuent de 21%. Toutefois, en retardant l'investissement en green, en adoptant la décision stratégique du modèle déterministe, le profit estimé pour l'entreprise semble être meilleur. Pour le même exemple, le modèle déterministe prévoit que l'entreprise dégage un profit de 187 640\$ en installant la technologie verte la troisième année sous la taxe carbone progressive. Par contre, le modèle stochastique, qui prend en considération en plus du scénario annoncé, les deux scénarios extrêmes, prévoit en effet que le profit de l'entreprise n'atteigne que 186 603\$ en investissant dans le green dès l'année 1, soit 1% de moins. Nous nous demandons alors si les résultats de ce modèle restent bons quelle que soit la réalisation de la taxe carbone, ou donne-t-il dans certains cas des décisions pénalisantes.

Afin d'évaluer la robustesse des solutions stochastique et déterministe et de comparer leurs performances, nous proposons de réévaluer les profits que l'entreprise peut dégager avec chacune des décisions stratégiques des deux modèles en fonction de différentes réalisations possibles de cette taxe carbone. Pour ce faire, on reprend l'exemple de  $\beta = 0,8$  et  $\gamma = 4$ . Rappelons que dans ce cas le modèle stochastique décide que la stratégie optimale pour l'entreprise est d'investir en technologie verte à l'année 1 en estimant un profit  $\pi_s$  de 186 603\$, et une émission globale de 1438,6t. Quant au modèle déterministe, il suggère d'installer la technologie verte à l'année 3 en estimant atteindre un profit plus important  $\pi_d$  de 187 640\$ tout en dégageant plus de 10% de carbone sur tout l'horizon. Pour être plus exhaustif dans cette analyse, nous allons constituer un ensemble de 15 scénarios possibles pour la taxe carbone, qu'on désigne par  $sr_i$  avec  $i \in [1..15]$ . Nous mettons l'accent à travers ces scénarios recensés sur deux possibilités. D'une part, nous considérons des scénarios qui présentent la possibilité que la taxe carbone n'augmente pas telle que prévue à cause des oppositions à cette législation environnementale. D'autre part, nous incluons certains scénarios tels que l'augmentation de la taxe carbone sera plus importante que prévue suite aux pressions mondiales exercées sur le gouvernement pour qu'il aligne ses valeurs de taxes carbone aux valeurs mondiales de ces taxes dans une perspective d'unifier ces valeurs et d'instaurer une taxe carbone internationale unique. Le tableau 5.13 résume les scénarios de taxe carbone considérés pour cette étude.

Tableau 5.13 : Ensemble des scénarios considérés de la réalisation de la taxe carbone

$sr_i$	Notation du Scénario	Présentation du scénario
$sr_1$	[10, 10, 10, 10, 10]	La taxe carbone reste à sa valeur de lancement soit 10\$/t $CO_2$ ,
$sr_2$	[50, 50, 50, 50, 50]	La taxe carbone est lancée avec sa valeur finale de 50\$/t $CO_2$ ,
$sr_3$	[10, 20, 20, 20, 20]	La taxe carbone se réalise comme prévu puis reste stable à sa valeur de la deuxième période soit, 20\$/t $CO_2$ ,
$sr_4$	[10, 20, 30, 30, 30]	La taxe carbone se lance progressivement comme prévu puis reste stable à sa valeur de la troisième période soit, 30\$/t $CO_2$ ,
$sr_5$	[10, 20, 30, 40, 40]	La taxe carbone se lance progressivement comme prévu puis reste stable à sa valeur de la quatrième période soit, 40\$/t $CO_2$ ,
$sr_6$	[10, 20, 30, 40, 50]	La taxe carbone est appliquée comme prévu
$sr_7$	[10, 0, 0, 0, 0]	La taxe carbone se lance comme prévu avec 10\$/t $CO_2$ la première année puis elle est annulée
$sr_8$	[10, 20, 0, 0, 0]	La taxe carbone se lance comme prévu jusqu'à la deuxième année où elle atteint 20\$/t $CO_2$ puis elle est annulée
$sr_9$	[10, 20, 30, 0, 0]	La taxe carbone se lance comme prévu jusqu'à la troisième année où elle atteint 30\$/t $CO_2$ puis elle est annulée
$sr_{10}$	[10, 20, 30, 40, 0]	La taxe carbone se lance comme prévu jusqu'à la quatrième année où elle atteint 40\$/t $CO_2$ puis elle est annulée
$sr_{11}$	[0, 0, 0, 0, 0]	La taxe carbone ne se lance pas, elle est annulée dès la première année

$sr_i$	Notation du Scénario	Présentation du scénario
$sr_{12}$	[10, 40, 80, 120, 160]	La taxe carbone double la valeur prévue la deuxième année, puis continue à augmenter progressivement linéairement au cours des années suivantes à partir de la deuxième année
$sr_{13}$	[10, 20, 60, 120, 180]	La taxe carbone augmente selon les prévisions au cours des deux premières années, puis double la valeur prévue pour la troisième année, et enfin continue à augmenter progressivement linéairement au cours des années suivantes à partir de la troisième année
$sr_{14}$	[10, 20, 30, 80, 160]	La taxe carbone augmente selon les prévisions au cours des trois premières années, puis double la valeur de la taxe prévue pour la quatrième année, et enfin double de valeur pour la cinquième année.
$sr_{15}$	[10, 20, 30, 40, 100]	La taxe carbone augmente selon les prévisions au cours des quatre premières années, puis double la valeur de la taxe prévue pour la cinquième année

Pour chaque scénario considéré ( $sr_i$ ), on résout un modèle déterministe en injectant comme données d'entrée les valeurs de taxes carbone de ce scénario. On détermine donc la décision optimale que l'entreprise devrait prendre en cas de réalisation de ce scénario ainsi que le profit optimal qu'aurait généré cette décision qu'on note  $\pi_{sr_i}$ . On suppose ensuite que l'entreprise choisit d'adopter les décisions stratégiques d'investissement du modèle déterministe. Elle décide ainsi d'investir en technologie verte à l'année 3 et on réévalue le profit de l'entreprise, avec cette décision sous cette réalisation de taxe carbone considérée ( $\pi_{det}(sr_i)$ ). Puis, on suppose que l'entreprise adopte plutôt les décisions stratégiques du modèle stochastique. Elle décide alors d'investir en technologie verte la première année et on réévalue le profit de l'entreprise avec cette décision sous la réalisation considérée de la taxe carbone ( $\pi_{stoc}(sr_i)$ ). Pour évaluer ces décisions dans la résolution du problème d'investissement de l'entreprise, nous calculons tout d'abord le regret que génèrent respectivement les décisions du modèle déterministe et stochastique pour chaque scénario prévu  $sr_i$ , qu'on note  $R_{det}(sr_i)$  et  $R_{stoc}(sr_i)$ . Ces deux indicateurs sont déterminés selon les équations 5.36 et 5.37 suivantes :

$$R_{det}(sr_i) = \frac{(\pi_{sr_i} - \pi_{det}(sr_i))}{\pi_{sr_i}} \quad (5.36)$$

$$R_{stoc}(sr_i) = \frac{(\pi_{sr_i} - \pi_{det}(sr_i))}{\pi_{sr_i}} \quad (5.37)$$

Nous ajoutons ensuite deux nouveaux indicateurs de performance que nous désignons par le degré de robustesse de chaque décision ( $DR(sr_i)$ ) ainsi qu'un indicateur qui permet de comparer la qualité relative des décisions stochastique et déterministe qu'on note ( $QR(sr_i)$ ).

L'indicateur du degré de robustesse, compare le profit réévalué sous chaque scénario considéré avec les décisions de chaque modèle ( $\pi_{det}(sr_i)$ ,  $\pi_{stoc}(sr_i)$ ), au profit estimé par le modèle d'optimisation même ( $\pi_d$ ,  $\pi_s$ ). On note  $DR_{stoc}(sr_i)$  le degré de robustesse du modèle stochastique et  $DR_{det}(sr_i)$  le degré de robustesse du modèle déterministe.

$$DR_{stoc}(sr_i) = \frac{(\pi_{stoc}(sr_i) - \pi_s)}{\pi_s} \quad (5.38)$$

$$DR_{det}(sr_i) = \frac{(\pi_{det}(sr_i) - \pi_d)}{\pi_d} \quad (5.39)$$

Cet indicateur permet d'appréhender la robustesse, des décisions de chaque modèle. Une décision est d'autant plus robuste que son degré de robustesse est plus important. Autrement dit, plus le degré de robustesse de la décision d'un modèle donné est important, plus le profit que l'entreprise peut générer, sous ce scénario de taxe carbone, avec les décisions optimales de ce modèle est supérieur au profit estimé par le modèle d'optimisation. Pour un degré de robustesse négatif, on conclut que l'entreprise, dégage sous ce scénario, un profit inférieur au profit estimé par le modèle d'optimisation. En prenant en considération les moyennes des valeurs absolues des  $DR$  pour l'ensemble des 15 scénarios, on déduit le degré de robustesse moyen ( $DRm$ ) des décisions des modèles déterministe ( $DRm_{det}$ ) et stochastique ( $DRm_{stoc}$ ).

On calcule également un indicateur qui permet de comparer les profits réévalués, sous chaque scénario envisageable de la taxe carbone, en adoptant les décisions d'investissement du modèle stochastique et du modèle déterministe. Cet indicateur évalue la qualité relative des décisions et permet ainsi de comparer les profits réévalués des deux décisions stochastique et déterministe sous chaque scénario.

$$QR(sr_i) = \frac{(\pi_{stoc}(sr_i) - \pi_{det}(sr_i))}{\pi_{stoc}(sr_i)} \quad (5.40)$$

En effet, sous un scénario considéré, plus la valeur de cet indicateur est importante, plus les décisions du modèle stochastique permettent de dégager un meilleur profit que les décisions du modèle déterministe. Pour une valeur négative de cet indicateur, la décision stratégique du modèle déterministe s'avère meilleure sous ce scénario, permettant à l'entreprise de dégager un meilleur profit. En considérant la moyenne des valeurs absolues de  $QR$  pour l'ensemble des 15 scénarios, on détermine la valeur de  $QRm$ . Cet indicateur peut donner une idée de plus sur la comparaison de la rentabilité des décisions des deux modèles en prenant en considération l'ensemble des différents scénarios envisagés.

A travers le tableau 5.14, on illustre les résultats de nos comparaisons entre les performances du modèle stochastique et déterministe, en incluant les indicateurs des regrets et des degrés de robustesse des décisions des deux modèles pour chaque scénario de taxe carbone considéré ainsi que l'indicateur de qualité des deux décisions.

Tableau 5.14 : Comparaison des performances des modèles stochastique et déterministe pour différents scénarios de la taxe carbone ( $\beta = 0,8$  et  $\gamma = 4$ )

Scénario de la taxe carbone ( $sr_i$ ).	Décisions optimales	$\pi_{sr_i}$	$\pi_{stoc}(sr_i)$	$R_{stoc}(sr_i)$	$DR_{stoc}(sr_i)$	$\pi_{det}(sr_i)$	$R_{det}(sr_i)$	$DR_{det}(sr_i)$	$QR(sr_i)$
[10, 10, 10, 10, 10]	0	219 500	215 600	2%	15,5%	217 160	1%	15,7%	-0,7%
[10, 20, 20, 20, 20]	0	205 100	204 080	0,5%	9,4%	204 920	0,1%	9,2%	-0,4%
[10, 20, 30, 30, 30]	3	196 280	195 440	0,4%	4,7%	196 280	0%	4,6%	-0,4%
[10, 20, 30, 40, 40]	3	190 520	189 680	0,4%	1,6%	190 520	0%	1,5%	-0,4%
[10, 20, 30, 40, 50]	3	187 640	186 800	0,4%	0,1%	187 640	0%	0,0%	-0,4%
[10, 0, 0, 0, 0]	0	233 900	227 120	3%	21,7%	229 400	2%	22,3%	-1,0%
[10, 20, 0, 0, 0]	0	226 700	221 360	2%	18,6%	222 200	2%	18,4%	-0,4%
[10, 20, 30, 0, 0]	0	215 900	212 720	1%	14,0%	213 560	1%	13,8%	-0,4%
[10, 20, 30, 40, 0]	3	202 040	201 200	0%	7,8%	202 040	0%	7,7%	-0,4%
[0, 0, 0, 0, 0]	0	237 500	230 000	3%	23,3%	233 000	2%	24,2%	-1,3%
[50, 50, 50, 50, 50]	1	158 000	158 000	0%	-15,3%	153 800	3%	-18,0%	2,7%
[10, 40, 80, 120, 160]	2	112 700	111 920	1%	-40,0%	111 320	1%	-40,7%	0,5%
[10, 20, 60, 120, 180]	3	122 360	117 680	4%	-36,9%	122 360	0%	-34,8%	-4,0%
[10, 20, 30, 80, 160]	3	144 440	143 600	1%	-23,0%	144 440	0%	-23,0%	-0,6%
[10, 20, 30, 40, 100]	3	173 240	172 400	0%	-7,6%	173 240	0%	-7,7%	-0,5%
Moyenne		206 644	185 840	1,3%	16%	186 792	0,8%	16,1%	0,9%

A partir de ce tableau, on remarque que le regret moyen déterministe est moins important que le regret moyen stochastique. Ce qui veut dire, qu'en se référant aux 15 scénarios envisagés, les décisions du modèle déterministe permettent à l'entreprise de générer moins de regret que les décisions du modèle stochastique. Il est à noter que pour seulement deux scénarios ( $sr_{11}$  et  $sr_{12}$  dont les réalisations sont respectivement [50, 50, 50, 50, 50] et [10, 40, 80, 120, 160]) que le regret déterministe s'avère plus important que le regret stochastique. Pour le scénario 11, la décision optimale en cas de réalisation de ce scénario est d'investir en technologie verte dès la première année exactement comme suggéré par le modèle stochastique ce qui induit un regret stochastique nulle ( $R_{stoc}(sr_{11}) = 0$ ). Toutefois le regret déterministe en cas de réalisation de ce scénario s'avère de 3%. Pareil pour le scénario 12, pour lequel la décision optimale est d'investir en technologie verte la deuxième année, le regret stochastique n'est que de 0,7%, alors que le regret déterministe pour ce scénario est de 1,2%. Il est à mentionner que dans 11 sur 15 des scénarios recensés, les valeurs de la taxe carbone à la première et la deuxième année sont telles qu'annoncées par le gouvernement. Pour ces scénarios la décision optimale d'investissement s'avère alors de ne pas investir en technologie verte ou de retarder son installation à la troisième année selon les valeurs de la taxe carbone à atteindre sur les trois dernières années de l'horizon de planification pour chaque scénario. Pour 7 de ces 11 scénarios considérés, la décision d'investissement optimale est d'installer la technologie verte la troisième année, exactement comme suggéré par le modèle déterministe. Par conséquent, pour ces 7 scénarios, le regret déterministe est nul alors que le regret stochastique varie entre 0,4% et 3% selon le scénario.

Dans la plupart de ces scénarios de la taxe carbone, l'incertitude des valeurs de la taxe touche plutôt les valeurs finales de la taxe carbone à atteindre vers la fin de l'horizon, ce qui favorise le retard de l'investissement en technologie verte puisque les valeurs de lancement de la taxe carbone sont relativement faibles. La modélisation stochastique qui prend en considération que la taxe carbone peut être lancée avec sa valeur finale, suggère d'investir en green dès la première année et engendre ainsi plus de regret en cas où la taxe carbone se réalise comme prévu au moins sur les deux premières années.

Pour consolider ces analyses, nous adoptons ensuite l'indicateur de la qualité relative qui permet de comparer les décisions de ces deux modèles stochastique et déterministe pour chacun des scénarios de la taxe carbone considérée. Etant donné que l'entreprise n'a pas l'option d'attendre la réalisation de la taxe carbone pour prendre la décision optimale en fonction de la réalisation du scénario, l'entreprise peut soit prendre la décision du modèle déterministe soit choisir la décision du modèle stochastique. En réévaluant le profit de chacune de ces deux décisions en fonction des scénarios  $sr_i$ , nous comparons la rentabilité des deux décisions en fonction des scénarios ce qui nous permet d'appréhender la qualité relative des décisions de ces deux modèles.

D'après le tableau 5.14, on note que dans la plupart des scénarios envisagés, la  $QR$  est négative, ce qui permet de conclure que les décisions stratégiques du modèle déterministe permettent à l'entreprise d'atteindre un meilleur profit que les décisions du modèle stochastique. Néanmoins, il faut signaler que les valeurs de  $QR(sr_i)$  sont faibles et très proches de 0. La valeur de la  $QR(sr_i)$  négative la plus importante est obtenue lorsque la taxe carbone n'est pas du tout appliquée, pour  $sr_{10}$ . Dans ce cas, le fait d'installer la technologie verte à l'année 3 permet à l'entreprise de générer un meilleur profit de 1,3% que lorsqu'elle installe cette technologie dès la première année. Les seuls scénarios ( $sr_i$ ), pour lesquels la  $QR(sr_i)$  s'avère positive, traduisant ainsi que le modèle stochastique permet de dégager un profit meilleur que le modèle déterministe, sont les scénarios où la taxe carbone est lancée directement avec la valeur finale ou que la progression de la taxe carbone est doublée dès la

deuxième année ( $sr_{11}$  et  $sr_{12}$ ). La  $QR$  positive la plus importante est atteinte lorsque la taxe carbone ne sera pas progressive telle qu'annoncée et sera directement mis en œuvre par sa valeur finale ( $sr_{11}$ ). Cette valeur s'avère de l'ordre de 3%. Il est à noter que cette valeur peut être considérée comme faible pour les cas où les profits sont réduits. Néanmoins, 3% d'un profit important peut être considéré comme un gain significatif. Seulement dans ce cas, où ce scénario peut s'avérer fort probable et lorsque les profits de l'entreprise s'avèrent d'un ordre important, que la modélisation stochastique permet à l'entreprise d'améliorer son profit par rapport aux décisions du modèle déterministe. Finalement, il est à noter que la  $QRm$  n'est que de l'ordre de 0,9%, ce qui souligne que les profits engendrés par les décisions des deux modèles stochastique et déterministe restent relativement proches.

On souligne que l'une des principales raisons qui peut expliquer ces résultats inattendus, peut être le choix des scénarios, qui demeure toujours critique pour la modélisation stochastique avec cette approche. Si dans certains contextes, les valeurs de la taxe carbone peuvent augmenter dès les premières années contrairement à ce qui est prévu, la modélisation stochastique peut s'avérer meilleure en suggérant d'investir en green dès l'année 1.

Finalement, nous proposons d'inclure un dernier indicateur de performance qui est le degré de robustesse. Cet indicateur analyse la robustesse des décisions de la modélisation stochastique et déterministe à part (séparément), en fonction des réalisations des scénarios de la taxe carbone.

D'après nos résultats illustrés dans le tableau 5.14, on remarque que les  $DR$  des décisions du modèle stochastique ( $DR_{stoc}(sr_i)$ ) et déterministe ( $DR_{det}(sr_i)$ ) sont positifs pour les scénarios qui prétendent une stabilité ou annulation des valeurs de taxe carbone. On conclut alors que si l'un de ces scénarios se réalise, les décisions du modèle déterministe aussi bien que les décisions du modèle stochastique permettent à l'entreprise de dégager un meilleur profit que celui estimé par les modèles d'optimisation même ( $\pi_{det}(sr_i)$  meilleur que  $\pi_d$  et  $\pi_{stoc}(sr_i)$  meilleur que  $\pi_s$  pour ces scénarios  $sr_i$ ). Toutefois, les  $DR$  des décisions du modèle stochastique et déterministe sont négatifs lorsque le scénario de la taxe carbone prétend une augmentation plus importante que prévue des valeurs de la taxe. Les décisions optimales stochastique et déterministe permettront toutes les deux de générer des profits inférieurs aux profits estimés par les modèles d'optimisation. Finalement, en considérant les moyennes des valeurs absolues des  $DR$  pour l'ensemble des 15 scénarios, on aboutit à des  $DR$  de l'ordre de 16% pour les deux modèles. Le  $DRm_{stoc} = 16\%$  et le  $DRm_{det} = 16,1\%$ . Ces valeurs nous donnent une idée générale sur la déviation entre les profits réévalués ( $\pi_{stoc}(sr_i), \pi_{det}(sr_i)$ ) et les profits estimés par les modèles d'optimisation ( $\pi_s$  et  $\pi_d$ ). On voit bien que les deux approches de modélisation **multi-périodes stochastique** et **multi-périodes déterministe ont des performances très proches en moyenne. Toutefois, la valeur même des  $DRm$**  souligne bien l'impact que peut engendrer l'incertitude de la taxe carbone sur les performances économiques des entreprises.

Bien que cette approche de modélisation stochastique s'avère un outil adapté à la prise de décision optimale dans un tel contexte d'incertitude, le modèle déterministe peut aussi être recommandé pour ce problème vu qu'il est simple à utiliser et plus facile à résoudre

Pour récapituler, à travers cet exemple, nous avons souligné que le modèle stochastique encourage l'investissement vert au plutôt garantissant ainsi à l'entreprise une meilleure performance environnementale que le modèle déterministe de 21%. Toutefois avec les décisions du modèle stochastique, le profit de l'entreprise peut s'avérer légèrement inférieur au profit généré par les décisions optimales du modèle déterministe de -0,5%. Reste à savoir

lequel des critères de maximisation du profit ou de réduction des émissions de carbone est plus important pour l'entreprise, afin de déduire laquelle des deux approches de modélisation est plus appropriée. Il est important de mentionner que les deux approches de modélisation stochastique multi-périodes avec approche par scénarios et la modélisation déterministe multi-période sont appropriées pour la résolution de problème de CCLFTC sous la législation de taxe carbone.

Finalement, dans notre choix des scénarios, dans ce contexte de taxation progressive de carbone, nous avons plutôt conçu des scénarios qui induisent l'incertitude des valeurs sur le long terme. En effet, ayant annoncé la stratégie progressive de taxation de carbone, on admet que le gouvernement ne peut pas basculer brusquement les valeurs prévues de ces taxes. Même s'ils sont nécessaires, les changements sont généralement appliqués de façon progressive. Toutefois, une meilleure prédictibilité et recensement des scénarios de taxe carbone en fonction des circonstances économique, politique et sociale réelles peuvent améliorer la qualité de nos résultats de comparaison entre la modélisation stochastique et déterministe.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons initié la modélisation de problèmes stochastiques de CCLFTC, en intégrant tout particulièrement les sources d'incertitude liées aux pressions externes exercées sur l'entreprise afin de l'inciter à réduire ses émissions de carbone. Dans cette perspective, nous avons étudié le problème d'investissement stratégique, en considérant dans un premier modèle l'incertitude de la demande client qui a été modélisée par une variable aléatoire. Puis dans un deuxième modèle qui traite également ce problème d'investissement, nous avons considéré l'incertitude de la législation de taxe carbone, en adoptant l'approche de modélisation stochastique par scénarios.

En exploitant nos modèles sur des exemples numériques, nous avons illustré que la modélisation stochastique est plus appropriée pour étudier de tels problèmes stratégiques dans le contexte environnemental de la taxe carbone, où la demande s'avère incertaine. Les décisions de ce modèle stochastique sont plus robustes face à l'incertitude, permettent de générer un meilleur profit et d'atteindre une meilleure performance environnementale.

Toutefois, en adoptant l'approche par scénario pour la modélisation d'incertitude de la taxe carbone progressive, nous avons souligné que les deux approches de modélisation stochastique multi-périodes et la modélisation déterministe multi-périodes sont intéressantes pour la résolution de problème de CCLFTC sous la législation de taxe carbone.

Nous concluons, que dans les futurs modèles, une approche de résolution analytique du problème de CCLFTC sous incertitude s'avère intéressante afin de comprendre, analyser et déduire l'impact de l'incertitude dans ce contexte environnemental de réduction des émissions de carbone des CL sous les pressions externes des gouvernements et des clients verts.

En outre, pour des raisons de simplicité, nous avons considéré chaque source d'incertitude à part. Il serait judicieux dans les travaux futurs de modéliser des problèmes de CCLFTC sous une taxe carbone progressive incertaine et une demande aléatoire. De tels modèles nécessiteront un effort de résolution supplémentaire, et seront utiles afin d'étudier l'impact combiné des incertitudes des pressions externes exercées sur l'entreprise dans ce contexte de réduction des émissions de carbone de la CL.

Finalement, d'autres approches de modélisation de ces incertitudes peuvent être exploitées dans les travaux futurs. Si dans le modèle *MDL5*, en considérant une demande aléatoire

uniforme, nous avons pu illustrer que les performances de la modélisation stochastique sont meilleures, il serait intéressant de regarder si les mêmes conclusions restent valables si on considère d'autres formes de demande aléatoire, à savoir une demande normale. En outre, nous avons initié la modélisation stochastique de la taxe carbone en adoptant l'approche par scénario. Nous avons mis en évidence la complexité de la prédictibilité et le choix des scénarios à considérer dans le problème d'optimisation stratégique. Il demeure intéressant de tester d'autres approches de modélisation dans les travaux futurs afin d'échapper à ce dilemme.

Il reste alors intéressant de continuer de creuser dans cette direction de modélisation du problème de GCLFTC, qui s'avère novatrice et prometteuse pour développer les recherches dans cette filière de GCLV.

# **Conclusion Générale**

Dans la perspective de s'intégrer dans une stratégie de développement durable, la réduction des émissions de carbone de la chaîne logistique a été priorisée par de nombreuses multinationales comme une action cruciale afin d'améliorer leurs performances environnementales. Dans cette optique, la gestion de la chaîne logistique verte en général, et la gestion de chaîne logistique à faible teneur en carbone en particulier, ont réussi à attirer l'attention de plusieurs chercheurs en Recherche Opérationnelle et Management Opérationnel ces dernières années. Ces domaines de recherche continueront à attirer plus d'attention en dépit de leur maturité, vu la criticité des menaces toujours présentes des activités de la CL sur l'environnement. Les recherches dans ces domaines ont amplement contribué à aider les entreprises à prendre des décisions stratégiques, tactiques ou opérationnelles qui leur permettent de réussir l'intégration de la conscience environnementale dans la gestion de leurs CL tout en améliorant leurs performances économiques. De nombreux modèles mathématiques d'optimisation de CL avec la considération des émissions de carbone et leurs contraintes relatives ont été développés. Avec l'avancée de la recherche dans ce domaine, il s'avère judicieux d'analyser la littérature existante afin de souligner ses limites et les besoins pour les travaux futurs. Afin de cibler les problématiques prioritaires, il est primordial de mener des analyses approfondies étudiant les contenus des modèles développés, en termes de la modélisation des facteurs clés des problèmes traités.

Notre thèse s'intègre dans ce domaine et nous avons cherché ainsi à contribuer au progrès des recherches en génie industriel dans la gestion des chaînes logistiques à faible teneur en carbone (GCLFTC).

**Notre travail de recherche s'articule principalement autour de quatre contributions :**

- L'identification des caractéristiques et des facteurs pertinents du problème GCLFTC.
- La modélisation de nouveaux problèmes de GCLFTC, en abordant des aspects et les problématiques qui avaient été ignorés (principalement l'aspect progressif et non homogène des taxes carbone ainsi que l'incertitude du contexte environnemental).
- La résolution analytique des modèles développés afin de comprendre, étudier et analyser le comportement décisionnel des entreprises dans ce cadre environnemental en fonction des contraintes considérées et des paramètres du problème.
- L'exploitation de ces modèles sur des exemples numériques pour illustrer le type de recommandations managériales qui peuvent être obtenues grâce à ces modèles et ceci aussi bien pour les entreprises que pour les gouvernements.

**Apport sur l'identification des caractéristiques du problème de gestion de chaîne logistique à faible teneur en carbone**

Pour modéliser un problème de GCLFTC, il est primordial de comprendre les différentes caractéristiques de ce problème. Dans cette optique, nous avons proposé dans le premier chapitre de notre thèse un modèle conceptuel qui permet de préciser les éléments pertinents de ce problème. A travers ce modèle, nous avons identifié les pressions externes exercées par les clients et les gouvernements comme les facteurs clés qui incitent les entreprises à réduire les émissions de carbone de leurs CL. Nous avons ensuite classé ces émissions générées par les différentes activités de la CL en trois sources d'émissions, émissions de production, transport et stockage. Finalement nous avons représenté dans ce framework, une classification des décisions logistiques des entreprises qui impactent les émissions de carbone différemment, entre une catégorie de décisions de gestion opérationnelle (GO), une catégorie de décision d'investissement technologique (IT) et une catégorie qui regroupe les autres décisions

stratégiques de conception de chaîne logistique avec coordination entre les partenaires de ce système (CCL-C).

A la lumière de ces résultats, nous pensons avoir facilité la compréhension de ce problème, mais aussi identifié les facteurs pertinents dont il faut tenir compte et intégrer afin de développer des modèles mathématiques appropriés à la gestion de chaînes logistiques dans le contexte environnemental de réduction des émissions de carbone.

Pour mener l'étude de la littérature, nous nous sommes référés à ce framework, en classifiant les travaux existants selon les trois catégories mentionnées ci-dessus (MO, IT et CCL-C), suivant les décisions étudiées et les problématiques abordées dans ces travaux.

Cette étude nous a permis de mettre l'accent sur les limites des travaux existants en terme de :

- **Modélisation des législations environnementales de carbone** : Pour aboutir à ces conclusions nous avons conduit une revue des différentes législations déployées dans le monde et nous avons analysé leurs présentations et intégrations dans les modèles mathématiques.
- **L'intégration et la modélisation du comportement des clients conscients de l'environnement** : Pour déduire les limites de la modélisation de ce paramètre, nous avons discuté l'impact que peut avoir ce comportement sur les profits et les décisions des entreprises. Nous avons aussi mis en relief la diversité des techniques utilisées et par conséquent la difficulté d'intégrer un tel paramètre pour lequel les chercheurs ne savent pas clairement exprimer les relations entre coût de produits verts, prix, demande et qualité environnementale.
- **L'approximation des paramètres des émissions de carbone de la CL** : nous avons ainsi fourni une liste exhaustive des différents techniques de modélisation des émissions de carbone de transport, de production et de stockage développées et utilisées dans la littérature.

A l'issue de cette analyse, nous avons réussi à faire un bilan sur la recherche dans cette filière et ainsi à identifier les besoins pour les recherches futures. Parmi les limites décelées dans les travaux existants, nous avons noté que plusieurs simplifications ont été faites lors de la modélisation des législations environnementales et notamment la taxe carbone. Nous proposons alors de contribuer à la littérature en développant de nouveaux modèles de CCLFTC avec une meilleure modélisation de cette législation de taxe carbone, en étudiant en particulier ses différentes caractéristiques et leurs impacts sur les décisions des entreprises et leurs performances.

#### **Apport en modélisation de nouveaux problèmes de GCLFTC :**

Dans le chapitre 3, nous avons abordé un problème crucial qui n'a pas reçu beaucoup d'importance dans la littérature existante, à savoir le problème de fuite de carbone engendré par la non homogénéité des taxes carbone entre les pays. Dans cet objectif, nous avons modélisé un problème de localisation et de choix de technologie en mettant en relief la non-homogénéité des taxes carbone entre les localisations potentielles considérées.

De plus, aucun des travaux existants n'a considéré le caractère progressif des taxes carbone. Une originalité des travaux menés dans le cadre de cette thèse est de développer des modèles multi-périodes de choix de technologie sous différentes formes de taxes carbone progressives, à savoir les progressions linéaire, convexe et concave. Dans le chapitre 4, nous nous sommes

intéressés à étudier l'impact de cette progressivité sur les décisions d'investissement et les performances des CL.

Nous notons que les modèles développés dans les chapitres 3 et 4 ont été résolus analytiquement, ce qui nous a permis d'avoir l'expression des solutions optimales en fonction des paramètres du problème. En se référant aux résultats du chapitre 3, une entreprise peut déduire la stratégie de localisation et de choix de technologie optimale en fonction des taxes carbone et/ou des subventions appliquées. En se basant sur les résultats du chapitre 4, ainsi qu'à l'algorithme de détermination de la solution optimale développé, une entreprise dispose d'un outil d'aide à la décision permettant de déduire la solution optimale d'investissement en technologie verte en fonction de la taxe carbone progressive appliquée et en tenant compte des performances de la technologie verte disponible.

La dernière contribution en termes de modélisation consiste à adopter les outils de la modélisation stochastique et de les adapter aux problèmes de CCLFTC. Dans ce contexte, nous avons proposé en premier lieu un modèle stochastique à deux étapes, de choix de technologie sous la taxe carbone avec prise en considération de l'incertitude de la demande. Ensuite, nous avons initié la prise en considération de l'incertitude de la législation de taxe carbone qui a été ignorée par tous les modèles existants, développés pour la CCLFTC. Nous avons alors proposé un modèle multi-périodes stochastique en adoptant l'approche par scénario pour étudier le problème de choix de technologie de production sous une taxe carbone progressive et incertaine.

### **Apport en recommandations managériales**

Afin de contribuer à l'étude et la résolution du problème de gestion de chaîne logistique à faible teneur en carbone (GCLFTC), en adoptant les outils de l'optimisation et de la modélisation mathématique, nous avons opté pour des modèles plus au moins simples dont la résolution permet de comprendre le problème et d'analyser ses facteurs. Les modèles proposés ont été exploités pour fournir des recommandations managériales aux entreprises et aux gouvernements. Ces recommandations se résument comme suit :

En exploitant les modèles du chapitre 3, qui étudient la non homogénéité des taxes carbone entre les localisations, nous avons pu identifier les principales conditions, en terme de taxe carbone imposée, qui poussent les entreprises à se délocaliser. Nous avons ainsi mis l'accent sur le problème de fuite de carbone et ses circonstances. A travers nos résultats analytiques et numériques, nous avons pu souligner que les secteurs très polluants sont les plus concernés par le problème de fuite de carbone car ils font recours à la délocalisation même pour des faibles valeurs de taxe carbone. Il n'est pas donc utile de taxer plus les entreprises polluantes pour qu'elles passent aux technologies vertes, car elles risquent ainsi de se délocaliser.

Ensuite, pour faire face au problème de délocalisation, nous avons montré que les subventions aussi bien que les taxes carbone de frontières, peuvent être des outils efficaces dans certains cas et pas dans d'autres.

Tout d'abord, nous avons souligné qu'il est recommandé aux gouvernements d'accorder des subventions locales vertes différenciées, telle qu'elles soient plus importantes pour les secteurs disposants de technologies vertes relativement coûteuses par rapport aux ordinaires. De plus, cette subvention locale verte donne au gouvernement plus de flexibilité en termes de valeurs de taxe carbone à imposer. En effet, plus la subvention accordée est importante, plus le gouvernement peut diminuer la valeur de la taxe carbone imposée et garantir ainsi l'acceptation d'un tel outil et son efficacité à réduire les émissions de carbone des CL. Dans une première réflexion, on peut penser que lorsque le gouvernement impose des taxes carbone

réduites, il n'a pas besoin de les coupler avec la subvention pour garantir leur acceptation, et encore qu'il faut augmenter les subventions lorsqu'on augmente les taxes carbone imposées. Néanmoins, nous avons montré à travers notre analyse, que lorsque la taxe carbone diminue il est recommandé d'augmenter la subvention locale verte pour favoriser la stratégie d'investissement local vert.

Ensuite, quant à la taxe carbone de frontière, nous avons étudié les apports et les limites de cet outil législatif à réduire le risque de fuite de carbone. Dans certains cas, le gouvernement peut réussir à favoriser l'investissement local vert pour des valeurs de taxes carbone de frontières moins élevées que les taxes carbone domestiques. Dans d'autres cas, pour garantir l'efficacité de cet outil législatif, nous avons illustré l'intérêt de coupler ce système hybride de taxe carbone domestique et de frontière avec une subvention pour l'investissement local afin de réduire les coûts fixes en domestique et favoriser l'investissement local vert même pour des faibles valeurs de taxe carbone domestique et de frontière. A l'issue de ce chapitre, nous avons pu vérifier que pour garantir l'efficacité de la taxe carbone, comme un outil incitant à l'investissement vert, sans être obligé d'imposer des taxes carbone élevées, il faut garantir l'accessibilité des entreprises aux technologies vertes performantes. Dans ce contexte, taxer les entreprises disposant de technologies vertes performantes est plus simple pour les gouvernements (plages de taxes plus étendues pour favoriser l'investissement local vert).

Les études analytiques et les expérimentations numériques menées sur les modèles du chapitre 4, qui se focalisent sur le caractère progressif de la taxe carbone, nous ont permis d'analyser l'intérêt de retarder ou d'avancer l'investissement en technologie verte sous un tel système législatif en fonction des autres données du problème, notamment les performances de la technologie verte disponible. Nous avons ainsi vérifié que plus la taxe carbone progressive augmente, plus l'entreprise aura intérêt à investir en green au plus tôt, à condition que la technologie verte disponible soit performante en terme de réduction d'émission de carbone. En effet, nous avons pu identifier certains cas pour lesquels l'augmentation de la taxe carbone peut limiter la capacité de l'entreprise à générer du profit positif sur tout l'horizon, lorsque les technologies vertes disponibles ne réduisent pas de manière significative le taux d'émission de carbone unitaire (par rapport à la technologie ordinaire). Par conséquent, dans de telles conditions, l'augmentation de la taxe carbone décourage l'investissement vert. Ensuite, nous avons illustré à travers ce chapitre, que pour garantir l'investissement vert au plus tôt, le gouvernement doit appliquer des taxes carbone progressives élevées aux industries propres. Cependant, pour des secteurs plus polluants, les taxes peu élevées sont plus efficaces pour encourager les investissements au plus tôt en technologies vertes. Enfin, à l'issue de nos résultats, nous recommandons aux gouvernements d'adapter un système de subvention dynamique avec la taxe progressive afin de booster la performance de cette législation environnementale. Dans ce contexte, il est recommandé d'accorder des subventions plus importantes aux entreprises qui investissent en technologie verte au plus tôt.

Dans le cinquième chapitre, nous avons initié la prise en considération de l'incertitude des pressions externes exercées, notamment par les clients d'une part et le gouvernement d'autre part dans la modélisation des problèmes de CCLFTC. En se basant sur des études comparatives entre les modèles stochastiques développés et les modèles déterministes amplement utilisés dans la littérature, nous avons pu illustrer les performances de la modélisation stochastique dans la résolution de tels problèmes stratégiques dans un contexte environnemental exigeant. En incorporant, d'une part, une demande uniforme dans un problème de choix de technologie, nous avons réussi à illustrer l'importance de considérer l'incertitude de la demande lors de la résolution d'un problème stratégique sous la taxe

carbone. En adoptant l'approche par scénario, pour incorporer l'incertitude de la législation environnementale progressive, nous avons vérifié que les deux approches de modélisation : stochastique multi-périodes avec approche par scénarios et déterministe multi-périodes sont intéressantes pour la résolution du problème de CCLFTC sous la législation de taxe carbone. Nous avons mis l'accent sur la difficulté de prévoir les scénarios de taxe carbone potentiels à considérer pour la modélisation stochastique avec cette approche, ce qui rend la modélisation déterministe plus simple et facile à utiliser pour résoudre ce genre de problème.

Nous pensons que les types de résultats obtenus peuvent servir bien évidemment aux entreprises pour les aider à comprendre les enjeux de leurs décisions stratégiques dans le cadre d'une législation de taxe carbone caractérisée par sa non homogénéité entre les pays, par sa progressivité et par son incertitude. De plus, nos analyses peuvent de même servir aux gouvernements. Dans ce contexte, nos résultats montrent l'intérêt des outils d'aide à la conception de réglementation environnementale plus performante, en soulignant d'une part les limites du système législatif existant et en suggérant d'autre part les pistes d'amélioration afin de mettre en place des législations capables d'inciter les entreprises à la réduction des émissions de carbone des CL.

### **Limites et perspectives du travail réalisé**

Plusieurs améliorations peuvent être proposées afin de booster l'apport de nos travaux de recherches et faire progresser l'apport de la modélisation mathématique et l'optimisation des CL dans la résolution des problèmes environnementaux, notamment la réduction des émissions de carbone des CL :

- Pour des raisons de simplicité et afin de pouvoir résoudre analytiquement nos modèles, nous avons opté pour le développement de modèles simples qui n'intègrent qu'au plus deux décisions stratégiques ; le choix de technologie et la localisation des sites de production. Nous avons visé en étudiant principalement la décision d'investissement d'illustrer l'impact de la taxe carbone et de l'incertitude sur les décisions stratégiques des CL. Néanmoins, la modélisation de CL intégrée et l'étude de plusieurs décisions stratégiques (e.g. choix de moyens de transport, de fournisseurs, etc.) à la fois peut être une direction intéressante afin d'aborder des problèmes plus complexes dans ce contexte de GCLFTC sous les pressions législatives de la taxe carbone ;
- Dans tous les modèles de CCLFTC développés dans notre thèse, nous avons admis que le prix de vente est fixe et imposé par le marché. Dans une autre alternative, le prix de vente peut constituer une variable de décision, qui dans certains cas peut permettre à l'entreprise de réduire l'impact de la législation de taxe carbone sur son profit. Etudier les décisions de prix en considérant différentes structures de marché et en intégrant la pression de la concurrence peut alors constituer une autre perspective.
- Nous nous sommes focalisés sur la législation de taxe carbone en proposant une meilleure modélisation et intégration de cette réglementation. Cependant, tel qu'on l'a souligné dans la section 2.4, d'autres législations, à savoir le marché de carbone, nécessitent d'être mieux modélisées dans les travaux futurs afin de mettre l'accent sur les aspects de ces législations qui ont été de même simplifiés et ignorés dans la littérature existante ;
- Encore une fois, nous nous sommes concentrés dans nos travaux de recherche à analyser et étudier l'impact de la législation de taxe carbone sur les décisions stratégiques des entreprises et leurs performances. Toutefois, nous admettons qu'une

piste intéressante pour développer nos modèles est d'incorporer le comportement environnemental des clients dans nos modèles mathématiques de CCLFTC. Dans cette optique, l'analyse de l'impact combiné des pressions externes exercées sur l'entreprise pour l'inciter à la réduction des émissions de carbone de sa CL s'avère intéressante et peut conduire à des recommandations plus élaborées pour les entreprises et les gouvernements.

- La considération de l'incertitude des pressions externes dans le cadre de GCLFTC, demeure un domaine de recherche novateur et peu exploité qui présente une piste prometteuse dans le futur. Il est recommandé dans ce sens, de développer plus de modèles stochastiques de GCLFTC et leurs approches et outils de résolution. De tels efforts permettent de fournir aux décideurs des outils d'aide à la décisions plus robustes et fiables.
- Nous suggérons finalement, d'étudier le problème de recyclage avec considération de la réduction des émissions de carbone, et le problème du management du risque dans les modèles de GCLFTC.

## Références bibliographiques

Australie: des géants énergétiques réclament une taxe carbone, *Le monde de l'énergie*, disponible sur <https://www.lemondedelenergie.com/australie-taxe-carbone/2018/11/14/>

Absi, N., Dazère-Pérès, S., Kedad-Sidhoum, S., Penz, B., Rapine, C. 2013. Lot sizing with carbon emission constraints, *European Journal of Operational Research*, 227(1), 55-61. Doi : 10.1016/j.ejor.2012.11.044

Ahi, P., Searcy, C. 2013. A comparative literature analysis of definitions of green and sustainable supply chain management, *Journal of Cleaner Production*, 52, 329-341. Doi: 10.1016/j.jclepro.2013.02.018

Andic, E., Yurt, O., Baltacıoğlu, T., 2012. Green supply chains: efforts and potential applications for the Turkish market. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 50-68. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.10.008>

Ansari, Z.A., Kant, R. 2016. A state-of-art literature review reflecting 15 years of focus on sustainable supply chain management, *Journal of Cleaner Production*, 142(4), 2524-2543. Doi: 10.1016/j.jclepro.2016.11.023.

Baghaliana, A., Rezapour, S., Farahani, Z, R. 2013. Robust supply chain network design with service level against disruptions and demand uncertainties: A real-life case. *European Journal of Operational Research*, 227(1), 199–215.

Bain, M. 2018. Fashion's ambitious new project to reduce its climate impact is getting help from the UN, *Quartz*, disponible sur <https://qz.com/1491309/adidas-zara-hm-and-more-commit-to-reducing-fashion-climate-impact-at-cop24/>

Ball, J. 2008. Six Products, Six Carbon Footprints, *The Wall Street Journal*, disponible sur <https://www.wsj.com/articles/SB122304950601802565>

Bauer, J., Bektas, T., Crainic, T, G. 2010. Minimizing greenhouse gas emissions in intermodal freight transport: an application to rail service design, *Journal of the Operational Research Society*, 61 (3), 530–542. Doi : 10.1057/jors.2009.102

Bazan, E., Jaber, M.Y., El Saadany, A.M.A. 2015. Carbon Emissions and Energy Effects on Manufacturing-Remanufacturing Inventory Models. *Computers & Industrial Engineering*, 88, 307-316. Doi: 10.1016/j.cie.2015.07.002

Bazan, E., Jaber, M.Y., Zanoni, S. 2015. Supply chain models with greenhouse gases emissions, energy usage and different coordination decisions. *Applied Mathematical Modelling*, 29 (17), 5131-5151. Doi: 10.1016/j.apm.2015.03.044

Bemporad, R., Baranowski, M. 2007. Conscious Consumers Are Changing the Rules of Marketing. Are You Ready?, *BBMG Conscious Consumer Report- White paper*.

Benjaafar, S., Li, Y., Daskin, M. 2013. Carbon footprint and the management of SCs: Insights from simple models. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 10 (1), 99–116. Doi: 10.1109/TASE.2012.2203304

Bouchery, Y., Ghaffari, A., Jemai, Z. and Dallery, Y. 2011. Adjust or invest: what is the best option to green a SC? *Laboratoire Genie Industriel, Ecole Centrale Paris*.

Bouchery, Y., Ghaffari, A., Jemai, Z., Dallery, Y. 2012. Including sustainability criteria into inventory models. *European Journal of Operational Research*, 222 (2), 229-240. doi : 10.1016/j.ejor.2012.05.004

- Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J., Seuring, S. 2014. Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions, *European Journal of Operational Research*, 233(2), 299-312 ; Doi : 10.1016/j.ejor.2013.09.032
- Brécard, D., Hlaimi, B., Lucas, Perraudeau, Y. 2009. Determinants of demand for green products: An application to eco-label demand for fish in Europe, *Ecological Economics*, 69(1), 115-125. Doi: 10.1016/j.ecolecon.2009.07.017.
- Carlson, D.K. 2005. Public Priorities : Environment vs. Economic Growth. Gallup, Inc, disponible sur <https://news.gallup.com/poll/15820/public-priorities-environment-vs-economic-growth.aspx>
- Chaabane, A., Ramudhin, A., Paquet, M. 2012. Design of sustainable scs under the emission-trading scheme. *International Journal of Production Economics*, 135 (1), 37-49. Doi : 10.1016/j.ijpe.2010.10.025
- Chelly, A., Noura, I., Hadj-Alouane, A., Frein, Y. 2017. A stochastic model for analyzing the combined effect of demand uncertainty and carbon tax within the context of green supply chain design. *The 7th International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM) Conference*, Saarbrücken, Germany, 598-603.
- Chelly, A., Noura, I., Hadj-Alouane, A., Frein, Y. 2018. A dynamic stochastic model for technology investment decision under a progressive uncertain carbon tax legislation, *International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain (ILS)*, Lyon.
- Chelly, A., Noura, I., Hadj-Alouane, A., Frein, Y. 2018. The impact of dynamic carbon tax legislation on strategic supply chain decisions, *the 16th International Conference on Manufacturing Research ICMR*, Skövde-Sweden, 473-478. DOI: 10.3233/978-1-61499-902-7-473.
- Chelly, A., Noura, I., Frein, Y., B. Hadj-Alouane, A. 2019. On The consideration of carbon emissions in modelling-based supply chain literature: the state of the art, relevant features and research gaps, *International Journal of Production Research*, 57(15-16), 4977-5004. Doi: 10.1080/00207543.2018.1497310
- Chen, W.T., Li, Y.P., Huang, G.H., Chen, X., Li, Y.F. 2010. A two-stage inexact stochastic programming model for planning carbon dioxide emission trading under uncertainty. *Applied Energy*, 87(3), 1033-1047.
- Chen, X., Benjaafara, S., Elomria, A. 2013. The carbon-constrained EOQ. *Operations Research Letters*, 41 (2), 172–179.
- Chen, X., Hao, G. 2014. Sustainable pricing and production policies for two competing firms with carbon emissions tax. *International Journal of Production Research*, 53(21), 6408-6420. doi : 10.1080/00207543.2014.932928
- Chen, X., Chan, C.K., Lee, Y. 2015. Responsible production policies with substitution and carbone missions trading. *Journal of Cleaner Production*, 134, 642-651. Doi : 10.1016/j.jclepro.2015.10.083
- Choi, T.M. 2013. Local sourcing and fashion quick response system : the impacts of carbon footprint tax. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 55, 43-54. Doi : 10.1016/j.tre.2013.03.006
- Chrita, K. 2007. In search of the green consumers : A perceptual study, *Journal of Service Research*, 7(1), 173-191

Creyts, J., Derkach, A., Nyquist, S., Ostrowski, K., Stephenson, J. 2007. Reducing U.S. greenhouse gas emissions: How much at what cost? Washington, DC: McKinsey & Company.

Conrad, K. 2005. Price competition and product differentiation when consumers care for the environment, *Environment and Resource Economics*, 31, 1-19

Cossardeaux, J. 2017. La Chine lance son projet de marché du carbone, *Les Echos*, disponible sur <https://www.lesechos.fr/2017/12/la-chine-lance-son-projet-de-marche-du-carbone-190141>

Dekker, R., Bloemhof, J., Mallidis, I. 2012. Operations Research for green logistics – An overview of aspects, issues, contributions and challenges, *European Journal of Operational Research*, 219 (3), 671-679. Doi : 10.1016/j.ejor.2011.11.010

Diabat, A., Simchi-Levi, D. 2010. A carbon-capped supply chain network problem. Institute of Electrical and Electronics Engineers : *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Piscataway, N.J, 2009, 523-527. doi : 10.1109/IEEM.2009.5373289.

Dong, C., Shen, B., Chow, P,Z., Yang, L., Ng, C,T.2016. Sustainability investment under cap-and-trade regulation. *Annals of Operations Research*, 240(2), 509–531. doi:10.1007/s10479-013-1514-1

Drake, D., Kleindorfer, P.R. and Van Wassenhove, L.N. 2010. Technology choice and capacity investment under emissions regulation, *INSEAD, Fontainebleau, France, Working Paper*

Drake, D, F. 2012. Carbon Tariffs: Effects in Settings with Technology Choice and Foreign Comparative Advantage. *Harvard Business School Working Paper*, 13-021

Drake, D,F., Kleindorfer, P, R., Van Wassenhove, L,N.2015. Technology Choice and Capacity Portfolios under Emissions Regulation. *Production and Operations Management*, 25(6), 969–1146. DOI 10.1111/poms.12523

Du, S., Ma, F., Fu, Z., Zhu, L., Zhang, J. 2015. Game-theoretic analysis for an emission-dependent supply chain in a ‘cap-and-trade’ system. *Annals of Operations Research*, 228 (1), 135–149. DOI 10.1007/s10479-011-0964-6

Du, S., Zhu, L., Liang, L., Ma, F. 2013. Emission-dependent supply chain and environment-policy-making in the ‘cap-and-trade’ system. *Energie Policy*, 57, 61-67. Doi : 10.1016/j.enpol.2012.09.042

Du, S., Tang, W., Song, M. 2016. Low-carbon production with low-carbon premium in cap-and-trade regulation. *Journal of Cleaner Production*, 134, 652-662. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.01.012.

Dussud, F.X., Wong, F., Duvernoy, J. 2015. Chiffres clés du climat France et Monde Édition 2015, *Service de l’observation et des statistiques*, disponible sur <https://www.i4ce.org/wp-content/uploads/2015/10/REPERES-2015-FR-BD.pdf>

EPA. U.S. Environmental Protection Agency, Greenhouse Gas Equivalencies Calculator, Accessed April 2013, <Http://Www.Epa.Gov/Cleanenergy/Energy-Resources/Calculator.Html>.

EPA. U.S. Environmental Protection Agency, National Waste Report for 2012, Accessed Mars

- 2012, [http://www.epa.ie/pubs/reports/waste/stats/EPA\\_NWR12\\_Complete\\_to\\_web\\_5Aug14.pdf](http://www.epa.ie/pubs/reports/waste/stats/EPA_NWR12_Complete_to_web_5Aug14.pdf)
- Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., Péton, O. 2015. Sustainable supply chain network design: an optimization-oriented review, *Omega*, 54, 11-32. Doi : 10.1016/j.omega.2015.01.006
- European Commission., 2009. Europeans' Attitudes Towards the Issue of Sustainable Consumption and Production. *Flash Eurobarometer* 256, disponible sur [http://www.ec.europa.eu/public\\_opinion/flash/fl\\_256\\_en.pdf](http://www.ec.europa.eu/public_opinion/flash/fl_256_en.pdf)
- European commission. 2009. Sustainability Report, ISBN: 978-92-79-11370-3. Doi : 10.2765/87726
- European comission. 2011. Energy roadmap 2050, Publications Office of the European Union, ISBN : 978-92-79-21798-2. Doi:10.2833/10759
- European comission. 2013. Green paper : A 2030 framework for climate and energy policies, Brussels, [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/publication/GP\\_EN\\_web.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/publication/GP_EN_web.pdf)
- Fahimnia, B., Sarkis, J., Boland, J., Reisi, M., Goh, M. 2014. Policy insights from a green supply chain optimisation model, *International Journal of Production Research*, 53(21), 6522-6533. doi: 10.1080/00207543.2014.958592
- Fahimnia, B., Sarkis, J., Choudhary, A., Eshragh, A. 2014. Tactical supply chain planning under a carbon tax policy scheme: A case study, *International Journal of Production Economics*, 164, 206-215. Doi : 10.1016/j.ijpe.2014.12.015
- Fahimnia, B., Jabbarzadeh, A., Sarkis, J. 2015. A Tradeoff Model for Green Supply Chain Planning: A Leanness-versus Greenness Analysis, *Omega*, 54, 173-190. Doi : 10.1016/j.omega.2015.01.014
- Garcia-Alvarado, M., Paquet, M., Chaabane, A. 2016. Joint strategic and tactical planning under the dynamics of a cap-and-trade scheme, *IFAC-Papers Online*, 49(12), 622–627.
- Garcia-Alvarado, M., Paquet, M., Chaabane, A. 2014. An Inventory Model with Recovery and Environment Considerations, *CIRRELT, Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport*.
- García-Alvarado, M., Paquet, M., Chaabane, A. 2015. On inventory control of product recovery systems subject to environmental mechanisms, *International Journal of Production Economics*, 165, 132-144. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.01.009>
- Gemechu, E.D., Butnar, I., Llop, M., Castells, F. 2014. Economic and environmental effects of CO2 taxation: an input-output analysis for Spain, *Journal of Environmental Planning and Management*, 57(5), 751-768. Doi : <https://doi.org/10.1080/09640568.2013.767782>
- Ghosh, A., Jha, J. K., Sarmah, S. P. 2016. Optimizing a two-echelon serial supply chain with different carbon policies, *International Journal of Sustainable Engineering*, 9(6), 363-377. doi: 10.1080/19397038.2016.1195457
- Glock, C.H., Jaber, M. Y., Searcy, C. 2012. Sustainability strategies in an EPQ model with price- and quality-sensitive demand, *The International Journal of Logistics Management*, 23 (3). 340 – 359. doi : 10.1108/09574091211289219
- Gong, X., Zhou, S.X. 2013. Optimal Production Planning with Emissions Trading. *Operations Research*, 61(4), 908-924. doi : <http://dx.doi.org/10.1287/opre.2013.1189>

- Gurtu, A., Jaber, M. Y., Searcy, C. 2014. Impact of fuel price and emissions on inventory policies, *Applied Mathematical Modelling*, 39(3-4), 1202-1216 (2014). doi: 10.1016/j.apm.2014.08.001
- Hammami, R., Noura, I., Frein, Y. 2015. Carbon emissions in a multi-echelon production-inventory model with lead time constraints, *International Journal of Production Economics*, 164, 292–307. doi : 10.1016/j.ijpe.2014.12.017
- Harris, I., Naim, M., Palmer, A., Potter, A., Mumford, C. 2011. Assessing the impact of cost optimization based on infrastructure modelling on CO2 emissions, *International Journal of Production Economics*, 131 (1), 313-321. doi : 10.1016/j.ijpe.2010.03.005
- He, Y., Wang, L., Wang, J. 2012. Cap-and-trade vs. carbon taxes: A quantitative comparison from a generation expansion planning perspective, *Computers & Industrial Engineering*, 63(3), 708-716. doi : 10.1016/j.cie.2011.10.005
- He, P., Zhang, W., Xu, X., Bian, Y. 2015. Production lot-sizing and carbon emissions under cap-and-trade and carbon tax regulations, *Journal of Cleaner Production*, 103, 241-248. doi : 10.1016/j.jclepro.2014.08.102
- H&M. 2013. Sustainability Report, disponible sur [http://about.hm.com/content/dam/hm/about/documents/en/Annual%20Report/Annual-Report2013\\_en.pdf](http://about.hm.com/content/dam/hm/about/documents/en/Annual%20Report/Annual-Report2013_en.pdf). [Consulté en Avril 2019].
- H&M. 2010. Sustainability Report H&M, disponible sur <http://sustainability.hm.com/content/sustainability/en/sustainability/commitments/choose-andreward-responsible-partners/code-of-conduct.html#> La durabilité dans la chaîne de valeur d'H&M 23. [Consulté en Avril 2019].
- Hoehn, K.M.R., Tan, T., Fransoo, J.C., Van Houtum, G.J. 2014. Effect of carbon emission regulations on transport mode selection under stochastic demand, *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 26, 170–195. doi : 10.1007/s10696-012-9151-6
- Hong, Z., Chu, C., Yu, Y. 2016. Dual-mode production planning for manufacturing with emission constraints, *European Journal of Operational Research*, 251 (1), 96-106. Doi : 10.1016/j.ejor.2015.11.015
- Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Lim, B., Treanton, K., Mamaty, I., Bonduki, Y., Griggs, D;J., and Callender, B.A. 1996. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) guidelines (1996), *Greenhouse Gas Inventory Reporting Instructions*. 1, disponible sur <https://www.ipcc.ch/report/revised-1996-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- HP. 2011. Annual report, <http://h30261.www3.hp.com/~media/Files/H/HP-IR/documents/reports/2012/2011-annual-report.pdf>
- Hua, G., Cheng, T.C.E., Wang, S. 2011. Managing carbon footprints in inventory management, *International Journal of Production Economics*, 132(2), 178-185. Doi : 10.1016/j.ijpe.2011.03.024
- Huang, Y., Wang, K., Zhang, T., Pang, C. 2016. Green supply chain coordination with greenhouse gases emissions management: A game-theoretic approach, *Journal of Cleaner Production*, 112(3), 2004-2014. Doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.137.

- Jaber, M.Y., Glock, C.H., El Saadany, A.M.A. 2013. Supply chain coordination with emissions reduction incentives, *International Journal of Production Research*, 51(1), 69-82, Doi : 10.1080/00207543.2011.651656
- Jawad, H., Jaber, M.Y., Bonney, M., Rosen, M.A. 2016. An Exergetic Economic Production Quantity Model for a Sustainable System, *Applied Mathematical Modelling*, 40 (11–12), 6026-6039. doi: 10.1016/j.apm.2016.01.042
- Jiang, Y., and Klabjan, D. 2012. Optimal emissions reduction investment under green house gas emissions regulations. *Northwestern university*, Working Paper, Northwestern University.
- Jiang, W., Chen, X. 2016. Optimal strategies for manufacturer with strategic customer behavior under carbon emissions-sensitive random demand, *Industrial Management & Data Systems*, 116(4), 759 – 776. Doi : 10.1108/IMDS-08-2015-0321
- Jin, M., Granda-Marulanda, N.A., Down, I. 2013. The Impact of Carbon Policies on Supply Chain Design and Logistics of a Major Retailer, *Journal of Cleaner Production*, 85, 453-461. Doi : 10.1016/j.jclepro.2013.08.042.
- Jotzo, F., Jordan, T., Fabian, N. 2012. Policy Uncertainty about Australia's Carbon Price: Expert Survey Results and Implications for Investment, *Australian Economic Review*, 45(4), 395-409. Doi : <https://doi.org/10.1111/j.1467-8462.2012.00709.x>
- Kerbrat, J.Y. 2015. Coca Cola Entreprise Le transport représente seulement 6% des émissions de CO2, *Transportissimo*, disponible sur <https://www.transportissimo.com/coca-cola-entreprise-le-transport-represente-seulement-6-des-emissions-de-co2/>
- Kleindorfer, P.A., Singhal, A, et al., Van Wassenhove, L.N. 2005. Sustainable Operations Management, *Production and Operation Management*, 14 (4), 482-492. Doi : <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2005.tb00235.x>
- Kim, N., Janic, M., Wee, B.V. 2009. Trade-Off Between Carbon Dioxide Emissions and Logistics Costs Based on Multiobjective Optimization, *Journal of the Transportation Research Board*, 2139, DOI: 10.3141/2139-13
- Komanoff, C., Gordon, M. 2015. British Columbia's Carbon Tax: By The Numbers, A Carbon Tax Center Report. [https://www.carbontax.org/wp-content/uploads/CTC\\_British\\_Columbia%27s\\_Carbon\\_Tax\\_By\\_The\\_Numbers.pdf](https://www.carbontax.org/wp-content/uploads/CTC_British_Columbia%27s_Carbon_Tax_By_The_Numbers.pdf)
- Konur, D., Schaefer, B. 2014. Integrated inventory control and transportation decisions under carbon emissions regulations: LTL vs. TL carriers, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 68, 14-38. Doi : 10.1016/j.tre.2014.04.012
- Kossoy, A., Peszko, G., Oppermann, K., Prytz, N., Klein, N., Blok, K., Lam, L., Wong, L., Borkent, B. 2015. State and Trends of Carbon Pricing 2015, by World Bank and Ecofys, Washington, DC. Doi: 10.1596/978-1-4648-0725-1
- Kouvelis, B., Chambers, C.G., Wang, H. 2006. Supply Chain Management research and Production and Operations Management: Review, trends, and opportunities, *Production and Operation Management*, 15(3), 449-469. Doi : <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2006.tb00257.x>
- Krass, D., T. Nedorezov, A. Ovchinnikov. 2013. Environmental taxes and the choice of green technology, *Production and Operations Management*, 22(5), 2013, 1035–1055. Doi : 10.1111/poms.12023

- Laoche, M., Bergeron, J., Barbaro-Forleo, G. 2001. Targeting consumers who are willing to pay more environmentally-friendly products, *Journal of Consumer Marketing*, 18(6), 503-520.
- Larsen, H.N., Hertwich, E.G. 2012. Analyzing the carbon footprint from public services provided by counties. *Journal of Cleaner Production*, 19( 17-18), 1975-1981. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.06.014>
- Lerhlaly, S., Lebbar, M., Allaoui, H., Ouazar, D., Afif, S. 2016. An Integrated Inventory Location Routing Problem Considering CO2 Emissions, *Contemporary Engineering Sciences*, 9(7), 303-314. Doi : <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2016.512326>
- Les changements climatiques, disponible sur <https://www.un.org/fr/sections/issues-depth/climate-change/index.html>. [consulté le 15/03/2019].
- Li, J., Su, Q., Ma, L. 2016 Production and transportation outsourcing decisions in the supply chain under single and multiple carbon policies, *Journal of Cleaner Production*, 141(10), 1109-1122. Doi: 10.1016/j.jclepro.2016.09.157.
- Liu, Z.L., Anderson, T.D., Cruz, J.M. 2012. Consumer environmental awareness and competition in two-stage supply chains, *European Journal of Operational Research*, 218(3), 602-613. Doi : 10.1016/j.ejor.2011.11.027
- Liu, B., Espinola Arredondo, A. 2013. The Impact of Environmental Taxes on Firms' Technology and Entry Decisions, *School of Economic Sciences, Working Paper Series WP 2013-2*.
- Liu, B., Holmbom, M., Segerstedt, A., Chen, W. 2015. Effects of carbon emission regulations on remanufacturing decisions with limited information of demand distribution, *International Journal of Production Research*, 53 (2), 532-548. Doi : 10.1080/00207543.2014.957875
- Luchs, M.G., Naylor, R;W., Irwin, J.R., Raghunathan, R. 2010. The Sustainability Liability: Potential Negative Effects of Ethicality on Product Preference, *Journal of Marketing*, 74, 18–31
- Manikas, A., Godfrey, M. 2010. Inducing green behavior in a manufacturer, *Global journal of business research*, 4 (2), 27-38
- Memari, A., Rahim, A.R.A., Absi, N., Ahmad, R., Hassan, A. 2016. A bi-objective carbon capped distribution planning of a three-echelon supply chain, *Computers & Industrial Engineering*, 97, 111-127. doi: 10.1016/j.cie.2016.04.015
- Miao, Z., Mao, H., Fu, K, Wang, Y. 2016. Remanufacturing with Trade-ins under Carbon Regulations, *Computers and Operation Research*, 89, Pages 253-268. Doi : 10.1016/j.cor.2016.03.014
- Moon, W., Florkowski, W.J., Bruckner, B., Schonhof, I. 2002. Willingness to pay for environmental practices: Implications for eco-labeling, *Land Economics*, 78(1), 88-102
- Nachmany, M., Samuel, F., Terry, T., Murray, C., Tucker, L., Adam, M., Carolina, P., et al. 2014. The Globe climate legislation study: a review of climate change legislation in 66 countries: fourth edition, *GLOBE International and Grantham Research Institute : LSE*, London, UK

- Nagurney, A., Nagurney, L.S. 2010. Sustainable Supply Chain Network Design: A Multicriteria Perspective, *International Journal of Sustainable Engineering*, 3,(3), 189-197. Doi : 10.1080/19397038.2010.491562
- Nouira, I., Hammami, R., Frein, Y., Temponi, C. 2016. Design of forward supply chains: impact of a carbon emissions-sensitive demand, *International Journal of Production Economics*, 173, 80–98. Doi : 10.1016/j.ijpe.2015.11.002
- Nouira, I., Frein, Y., Hadj-Alouane, A. 2014. Optimization of manufacturing systems under environmental considerations for a greenness-dependent demand, *International Journal of Production Economics*, 150, 188-198. Doi: 10.1016/j.ijpe.2013.12.024
- Park, S.J., Cachon, G.P., Lai, G., Seshadri, S. 2015. Supply Chain Design and Carbon Penalty: Monopoly vs. Monopolistic Competition. *Production and Operations Management*, 24(9), 1494–1508, DOI 10.1111/poms.12373
- Purohit, A.K., Shankar, R., Dey, P.K., Choudhary, A. 2016. Non-stationary stochastic inventory lot-sizing with emission and service level constraints in a carbon cap-and-trade system, *Journal of Cleaner Production*, 113, 654-661. Doi : 10.1016/j.jclepro.2015.11.004
- Rezaee, A., Dehghanian, F., Fahimnia, B., Beamon, B. 2015. Green supply chain network design with stochastic demand and carbon price, *Annals of Operations Research*, 250(2), 463–485. Doi : 10.1007/s10479-015-1936-z
- Rosič, H., Jammernegg, W. 2013. The economic and environmental performance of dual sourcing: A newsvendor approach, *International Journal of Production Economics*, 143(1), 109-119.
- Sarkis, J., Zhu, Q., Lai, K.H. 2011. An organizational theoretic review of green supply chain management literature, *International Journal of Production Economics*, 130, 1-15.
- Seuring, S., Müller, M. 2008. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management, *Journal of Cleaner Production*, 16 (15), 1699–1710.
- Seuring, S. 2013. A review of modeling approaches for sustainable supply chain management, *Decision Support Systems*, 54(4), 1513-1520. Doi : 10.1016/j.dss.2012.05.053
- Shaw, K., Irfan, M., Shankar, R., Yadav, S.S. 2016. Low carbon chance constrained supply chain network design problem: A benders decomposition based approach, *Computers & Industrial Engineering*, 98, 483-497. Doi: 10.1016/j.cie.2016.06.011
- Song, S., Govindan, K., Xu, L., Du, P., Qiao, X. 2016. Capacity and production planning with carbon emission constraints, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 97, 132-150. Doi : 10.1016/j.tre.2016.10.007.
- Song, J., Leng, M. 2012. Analysis of the Single-Period Problem under Carbon Emissions Policies, *International Series in Operations Research & Management Science*, 176, 297-313.
- Srivastava, S.K., 2007. Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews*, 9(1), 3–80.
- Subramanian, R., Gupta, S., Talbot, B. 2007. Compliance Strategies under Permits for Emissions, *Production and operations management*, 16(6), 763–779. Doi : 10.3401/poms.
- Tang, S., Wang, W., Cho, S. 2014. Reduction carbon emissions in supply chain through logistics outsourcing, *Journal of System and Management Sciences*, 4(1), 14-22.

- Tang, C.S., Zhou, S. 2012. Research advances in environmentally and socially sustainable operations, *European Journal of Operational Research*, 223(3), 585-594. Doi : 10.1016/j.ejor.2012.07.030
- Tarek, A., Diabat, A., and Simchi-Levi, D. 2011. A carbon sensitive supply chain network problem with green procurement. *Institute of Electrical and Electronics Engineers : IEEE, 40th International Conference on Computers & Industrial Engineering*, Awaji, Japan 1-6. Doi : 10.1109/ICCIE.2010.5668278.
- Tao, F., Fana, T, Laib, K.K. 2016. Optimal inventory control policy and supply chain coordination problem with carbon footprint constraints, *International transactions in operational research*, 0, 1-21. Doi : 10.1111/itor.12271.
- Thøgersen J., Barcellos, M.D., Perin, M.G., Zhou, Y. 2012.. Consumer buying motives and attitudes towards organic food in two emerging markets: China and Brazil, *International Marketing Review*, 32(3/4), 389-413
- Toptal, A., Özlü, H., Konur, D. 2014. Joint decisions on inventory replenishment and emission reduction investment under different emission regulations, *International Journal of Production Research*, 52(1), 243-269. Doi : 10.1080/00207543.2013.836615.
- Validi, S., Bhattacharya, A., Byrne, P.J. 2013. Integrated low-carbon distribution system for the demand side of a product distribution supply chain: a DoE-guided MOPSO optimiser-based solution approach, *International Journal of Production Research*, 52(10), 3074-3096. Doi: 10.1080/00207543.2013.864054
- Validi, S., Bhattachary, A., Byrne, P.J. 2014. A case analysis of a sustainable food supply chain distribution system—A multi-objective approach, *International Journal of Production Economics*, 152, 71-87
- Walmart Canada. 2019. Walmart Canada lance une initiative majeure de réduction des émissions, disponible sur [www.newswire.ca](http://www.newswire.ca). [Consulté en Mai 2019].
- Wang, X, J., Choi, S.H. 2015. Impacts of carbon emission reduction mechanisms on uncertain make-to-order manufacturing, *International Journal of Production Research*, 54, 3311-3328. Doi: 10.1080/00207543.2015.1106606
- Wang, W., Ferguson, M.E., Hu, S., Souza, G.C. 2013. Dynamic Capacity Investment with Two Competing Technologies, *Manufacturing & Service Operations Management*, 15(4), 616-629. Doi : 10.1287/msom.2013.0438
- Wang, Z., Sarkis, J. 2013. Investigating the relationship of sustainable supply chain management with corporate financial performance, *International Journal of Productivity and Performance Management*, 62 (8), 871-888. Doi : 10.1108/IJPPM-03-2013-0033
- Xin, M., Ping, J., Ho, W., YANG, C.H. 2016. Optimal Procurement Decision with a Carbon Tax for the Manufacturing industry, *Computers and Operation Research*, 89, 360-368. doi : 10.1016/j.cor.2016.02.017
- Xiong, Y., Yang, J., Li, Y. 2016. Price and carbon emission decisions under pressures of consumer, regulator and competition, *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 30 (1/2), 87-115.
- Xu, X., He, P., Xu, H., Zhang, Q. 2016. Supply chain coordination with green technology under cap-and-trade regulation, *International Journal of Production Economics*, 183 (B), 433-442. Doi : 10.1016/j.ijpe.2016.08.029

- Yalabik, B. and Fairchild, R.J. 2011. Customer, regulatory, and competitive pressure as drivers of environmental innovation, *International Journal of Production Economics*, 131(2), 519–527. Doi : 10.1016/j.ijpe.2011.01.020
- Yakita, A. 2009. Technology choice and environmental awerness in a trade and environment context. *Australian Economic Papers*, 48(3), 270-279
- Yenipazarli, A. 2015. Managing new and remanufactured products to mitigate environmental damage under emissions regulation, *European Journal of Operational Research*, 249(1), 117-130. Doi : 10.1016/j.ejor.2015.08.020
- Zakeri, A., Dehghanian, F., Fahimnia, B., Sarkis, J. 2014. Carbon pricing versus emissions trading: A supply chain planning perspective, *International Journal of Production Economics*, 164, 197-205. Doi : 10.1016/j.ijpe.2014.11.012
- Zanoni, S., Mazzoldi, L., Jaber, M.Y. 2014. Vendor-managed inventory with consignment stock agreement for single vendor–single buyer under the emission-trading scheme, *International Journal of Production Research*, 52(1), 20-31. Doi : 10.1080/00207543.2013.812812
- Zanoni, S., Mazzoldi, L., Zavanella, L.E., Jaber, M. Y. 2014. A joint economic lot size model with price and environmentally sensitive demand, *Production & Manufacturing Research*, 2(1), 341-354. Doi : 10.1080/21693277.2014.913125
- Zhang, B., Xu, L. 2013. Multi-item production planning with carbon cap and trade mechanism, *International Journal of Production Economics*, 144 (1), 118-127
- Zheng, Y., Liao, H. Yang, X. 2015. Stochastic Pricing and Order Model with Transportation Mode Selection for Low-Carbon Retailers, *Sustainability*, 8(1), 48-67. Doi:10.3390/su8010048
- Zhou, M., Pan, Y., Chen, Z., Chen, X. 2015. Environmental resource planning under cap-and-trade: models for optimization, *Journal of Cleaner Production*, 112 (2),1582-1590. Doi : 10.1016/j.jclepro.2015.04.085
- Zhuo, H., Wei, S. 2016. Gaming of Green Supply Chain Members Under Government Subsidies—Based on the Perspective of Demand Uncertainty. *Proceedings of the Tenth International Conference on Management Science and Engineering Management*, Singapore, Advances in Intelligent Systems and Computing, 502. Doi : 10.1007/978-981-10-1837-4\_91837-4\_91