

Optimisation du transport et de l'allocation d'un co-produit de
la biométhanisation au sein d'une chaîne
d'approvisionnement collaboratif en boucle fermée

par

Mathieu FAURE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 17 NOVEMBRE 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Tassed Boukherroub, directrice de mémoire
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Jean-François Audy, codirecteur de mémoire
Département de management à l'Université du Québec à Trois-Rivières

M. Julien Trochu, président du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

Mme Rim Larbi, membre du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Pierre-Olivier Lemire, examinateur externe
Directeur R&D chez Tri-Énergie inc.

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 24 OCTOBRE 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier ma directrice de mémoire, Tassedha Boukherroub ainsi que mon codirecteur Jean-François Audy pour m'avoir accompagné tout au long de ce projet. Leur présence, leur suivi régulier et leurs conseils ont été d'une aide très précieuse.

Je tiens aussi à remercier Pierre-Olivier Lemire pour sa confiance et son implication sans qui ce projet n'aurait pas été possible.

Je remercie chaleureusement mes colocataires et mes amis pour leur présence au quotidien et leur enthousiasme qui ont fait de ces années à Montréal des moments inoubliables.

Enfin je remercie ma famille pour son amour et son soutien indéfectible même à grande distance et grâce à qui j'ai pu réaliser mon rêve d'étudier au Québec.

Optimisation du transport et de l'allocation d'un co-produit de la biométhanisation au sein d'une chaîne d'approvisionnement circulaire

Mathieu FAURE

RÉSUMÉ

Ce projet de recherche explore la logistique des opérations de production et de transport dans une chaîne d'approvisionnement (CA) de biométhanisation collaborative et en boucle fermée. Les fournisseurs de matières premières approvisionnent une usine de biométhanisation en résidus organiques, qui peuvent se présenter sous deux formes : liquide ou solide. Les résidus sont transportés à l'usine par deux types de camions (citernes et vrac solide) de capacités différentes, où ils sont transformés par biométhanisation. Au cours du processus de biométhanisation, ces résidus sont décomposés, en l'absence d'oxygène, en gaz naturel renouvelable et en digestat, qui est un engrais organique de grande valeur utilisé dans les exploitations agricoles. La plupart des fournisseurs sont également des clients qui ont besoin de récupérer le digestat pour leurs propres exploitations. De plus, ils ont besoin d'obtenir le digestat sous la même forme que les résidus organiques qu'ils ont fournis (liquide ou solide). Or, à la sortie de l'usine de biométhanisation, le digestat est sous forme liquide et nécessite donc de passer par un séparateur pour être déshydraté. Cette opération supplémentaire est coûteuse et demande un dimensionnement avisé pour éviter une sur ou sous capacité.

Le premier objectif de ce projet est de dimensionner une flotte de camions adaptée aux besoins et à la capacité de l'usine de biométhanisation et de minimiser les coûts de transport. Ensuite, le deuxième objectif est de déterminer la quantité de digestat à allouer aux fournisseurs-clients pour minimiser les coûts totaux de la CA, à savoir les coûts de transport et de séparation, afin de réaliser un maximum d'économies collectives. Enfin le troisième objectif consiste à déterminer des stratégies de compromis pour assurer l'équité des allocations de digestat pour l'ensemble des fournisseurs-clients. Deux ensembles de données ont été utilisés dans ce projet : le premier est issu d'un cas d'étude réel et le second est un cas d'étude fictif, mais représentatif, conçu à partir du cas réel.

Après avoir défini et modélisé le problème à l'aide de la programmation mathématique, quatre scénarios reflétant différentes mises en place de pratiques logistiques (retours en charge et configuration hétérogène de la flotte de camions) ont été testés. Cette étape a permis d'identifier un scénario comme étant plus performant que les autres sur différents points. Par comparaison avec le scénario de référence, dépourvu de ces pratiques logistiques, en appliquant simultanément les retours en charge et la flotte hétérogène à notre cas d'étude réel les économies potentielles sont de 17%, la réduction du nombre total de kilomètres parcourus est de 42% et la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) est de 34%. Pour le cas d'étude fictif, les économies potentielles sont de 29%, la réduction du nombre total de kilomètres parcourus est de 43% et la réduction des émissions de GES est de 35%.

Pour déterminer la quantité de digestat à allouer aux fournisseurs-clients, nous sommes repartis du scénario logistique le plus performant obtenu précédemment et nous avons établi huit

stratégies d’allocation différentes du digestat. Initialement, la répartition était obtenue à partir du prorata du tonnage humide de résidus organiques fournis par chaque fournisseur-client. Cette répartition a été jugée équitable par l’ensemble des acteurs de la CA. Nous avons ensuite voulu la confronter à d’autres répartitions. Les stratégies établies ont été déterminées et calculées soit manuellement soit via un algorithme ayant pour objectif d’obtenir le coût total minimum. Nous avons pu observer des résultats encourageants sur les économies potentielles, la réduction du nombre total de kilomètres parcourus et les émissions de GES mais aucune stratégie ne s’est imposée par rapport aux autres que ce soit pour notre cas d’étude réel ou notre cas d’étude fictif.

Nous avons alors exploré deux pistes permettant d’obtenir des stratégies de compromis afin d’assurer de bonnes performances sur les indicateurs tout en conservant l’équité entre tous les fournisseurs-clients. Dans un premier temps, nous avons mis en place un mécanisme de compensation financière qui a pour but d’utiliser les économies réalisées par l’ensemble de la CA grâce aux stratégies d’allocation pour dédommager les fournisseurs-clients qui recevraient moins de digestat que prévu avec la répartition initiale. L’application de ce système au cas d’étude réel a révélé que sur les 8 stratégies d’allocation testées, une seule permettait de conserver des économies sur les coûts totaux de la CA. Toutefois, en appliquant ce système au cas d’étude fictif, trois stratégies permettent de conserver des économies sur les coûts totaux de la CA. Dans un second temps, nous avons mis en place une stratégie multicritère qui détermine mathématiquement les allocations permettant un équilibre entre une répartition juste fondée sur la répartition initiale et une répartition visant à minimiser l’ensemble des coûts de la CA. Dans le cadre du cas réel, cette stratégie n’a pas mené à des résultats performants. En revanche, dans le cadre du cas fictif, cette stratégie nous a permis de déterminer des allocations alliant les deux objectifs de manière plus équilibrée.

Mots-clés : Économie circulaire, optimisation, chaîne d’approvisionnement en boucle fermée, transport, configuration de flotte de camions, retour en charge, allocation de ressources, biométhanisation, digestat, résidus organiques

Optimizing transportation and allocation of an anaerobic digestion co-product within a circular supply chain

Mathieu FAURE

ABSTRACT

This research explores the logistics anaerobic digestion production and transportation in the context of a collaborative and closed-loop supply chain (SC) in a region of Quebec (Canada). The raw materials suppliers provide an anaerobic digestion plant with organic residues, which can be in two forms: liquid or solid. The residues are transported to the plant by two types of truck (tanker and solid bulk) of different capacities, where they are transformed by anaerobic digestion. During the anaerobic digestion process, these residues are decomposed in the absence of oxygen into biogas and digestate, which is a high-value organic fertilizer used on farms. Most of the suppliers are also customers requiring to recover the digestate for their own farms. Moreover, they need to obtain the digestate in the same form as the organic residues they have provided (liquid or solid). However, when it exits the anaerobic digestion plant, the digestate is in liquid form and therefore requires passing through a separator to be dewatered. This additional operation is costly.

The first aim of this project is to size a fleet of trucks adapted to the needs and capacity of the plant under study and minimize transportation costs. The second objective is to determine the amount of digestate to be allocated to supplier-customers to minimize the total costs of SC, i.e., transportation and separation costs, in order to achieve maximum collective savings. Finally, the third objective is to determine compromise strategies to ensure fairness in digestate allocations for all supplier-customers. Two sets of data were used in this project: the first is from a real case study and the second is a fictitious case study based on the real case.

After defining and modeling the problem using mathematical programming, four scenarios reflecting different logistics practices (backhauling and heterogeneous truck fleet configuration) were tested. This step identified one scenario as being more efficient than the others in several respects. Compared to the baseline scenario, which did not include these logistics practices, applying both return loads and a heterogeneous fleet to our real-world case study resulted in potential savings of 17%, a 42% reduction in total kilometers traveled, and a 34% reduction in greenhouse gas (GHG) emissions. For the fictitious case study, the potential savings are 29%, the reduction in the total number of kilometers traveled is 43%, and the reduction in GHG emissions is 35%.

To determine the optimal amount of digestate to allocate to supplier-customers, we started with the most efficient logistics scenario obtained previously and established eight different digestate allocation strategies. The initial distribution is considered fair and is calculated based on the pro rata wet tonnage of organic residues supplied by each supplier-customer. We then wanted to compare it with other distributions. The strategies were determined and calculated either manually or using an algorithm designed to minimize total costs. We observed encouraging results in terms of potential savings, reduction in total kilometers traveled, and

GHG emissions, but no single strategy stood out above the others, either for our real-world case study or our fictional case study.

We then explored two avenues for developing compromise strategies that would ensure good performance on the indicators while maintaining fairness between all suppliers and customers. First, we implemented a financial compensation system designed to use the savings achieved by the entire SC through allocation strategies to compensate supplier-customers who would receive less digestate than expected under the initial distribution. Applying this system to the real-world case study revealed that of the nine allocation strategies tested, only one allowed for savings on total SC costs. However, when applying this system to the fictitious case study, three strategies allowed for savings on total SC costs. In a second step, we implemented a dual-objective strategy that mathematically determines the allocations that strike a balance between a fair distribution based on the initial distribution and a distribution aimed at minimizing total SC costs. In the real-world case, this strategy did not produce effective results. However, in the fictitious case, this strategy enabled us to determine allocations that combined the two objectives in a more balanced way.

Keywords: Circular economy, optimization, closed-loop supply chain, transportation, truck fleet configuration, backhauling, resource allocation, anaerobic digestion, digestate, organic residues.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	7
1.1 Économie circulaire	7
1.2 La biométhanisation.....	8
1.3 Les pratiques logistiques.....	10
1.4 Le problème d'allocation	12
CHAPITRE 2 CAS D'ÉTUDE ET PROBLÈME	17
2.1 Description du cas d'étude.....	17
2.2 Description du problème.....	20
CHAPITRE 3 MODÈLE MATHÉMATIQUE	21
3.1 Hypothèses génériques.....	21
3.2 Formulation du modèle mathématique	22
CHAPITRE 4 ANALYSES DE PRATIQUES LOGISTIQUES POUR RÉDUIRE LE COÛT TOTAL DE TRANSPORT	29
4.1 Présentation des différents scénarios logistiques étudiés.....	29
4.2 Application au cas d'étude réel.....	30
4.3 Résultats.....	31
4.3.1 Les économies potentielles	31
4.3.2 Distances parcourues	32
4.3.3 Réduction des émissions de GES.....	33
4.3.4 Nombre et taux d'utilisation des camions.....	35
4.4 Conclusion	37
CHAPITRE 5 PROPOSITION ET ANALYSE DE STRATÉGIES D'ALLOCATION ..	39
5.1 Présentation des stratégies d'allocation	39
5.2 Résultats (cas d'étude réel)	43
5.2.1 Les économies potentielles	43
5.2.2 Distances parcourues	46
5.2.3 Réduction des émissions de GES.....	47
5.2.4 Nombre et taux d'utilisation des camions.....	48

5.3	Conclusion	49	
CHAPITRE 6 RECHERCHE DE L'ÉQUILIBRE.....51			
6.1	Création d'un mécanisme de compensation financière	51	
6.1.1	Mise en place du mécanisme de compensation financière	52	
6.1.2	Résultats pour le cas d'étude réel.....55	55	
6.2	Création d'une stratégie multicritère équilibrant économie et équité.....56	56	
6.2.1	Mise en place d'une stratégie multicritère équilibrant économie et équité	56	
6.2.2	Recherche des optimums de Pareto (cas d'étude réel).....58	58	
6.3	Discussion	61	
CHAPITRE 7 APPLICATION À UN CAS FICTIF GÉNÉRALISABLE.....65			
7.1	Méthodologie de création du cas d'étude	65	
7.2	Application des pratiques logistiques au cas fictif.....66	66	
7.2.1	Les économies potentielles	66	
7.2.2	Distances parcourues	67	
7.2.3	Réduction des émissions de GES.....68	68	
7.2.4	Nombre et taux d'utilisation des camions.....69	69	
7.3	Application des stratégies d'allocation au cas fictif	70	
7.3.1	Les économies potentielles	70	
7.3.2	Distances parcourues	72	
7.3.3	Réduction des émissions de GES.....73	73	
7.3.4	Nombre et taux d'utilisation des camions.....73	73	
7.4	Application et résultats des stratégies de recherche de l'équilibres au cas fictif	75	
7.5	Conclusion	79	
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS			81
ANNEXE I SIMULATION DE ST05 DANS IBM ILOG CPLEX OPTIMIZATION STUDIO.....87			
ANNEXE II CAS FICTIF GÉNÉRALISABLE (TEL QU'UTILISÉ DANS LE CHAPITRE 7)			89
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES			91

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1. Ensembles et indices	23
Tableau 3.2. Variables de décision	24
Tableau 3.3. Paramètres	24
Tableau 4.1. Scénarios	30
Tableau 4.2. Économies réalisées par chaque scénario par rapport au cas de référence (S01) pour le cas réel	31
Tableau 4.3. Consommation de carburant de chaque camion selon sa taille en fonction du chargement.....	34
Tableau 4.4. Flotte sélectionnée pour chaque scénario pour le cas réel	35
Tableau 4.5. Taux d'utilisation moyen des camions par scénario pour le cas réel	36
Tableau 5.1. Stratégies d'allocation étudiées	40
Tableau 5.2. Économies réalisées par chaque stratégie en comparaison à la stratégie de référence (ST01) pour le cas réel	44
Tableau 5.3. Comparaison des émissions de GES par rapport à la stratégie de référence (ST01) pour le cas réel.....	47
Tableau 5.4. Flotte de camion retenue pour chaque stratégie pour le cas réel	48

Tableau 5.5. Taux d'utilisation des camions pour chaque stratégie pour le cas réel	49
Tableau 6.1. Paramètres liés au mécanisme de compensation financière.....	52
Tableau 6.2. Exemple de calcul à effectuer pour appliquer le mécanisme de compensation financière à une stratégie d'allocation quelconque nommée ST0X.....	53
Tableau 6.3. Paramètres supplémentaires pour la mise en place d'un mécanisme de compensation financière	54
Tableau 6.4. Variable de décision supplémentaire pour la mise en place d'un mécanisme de compensation financière	54
Tableau 6.5. Économies réalisées par chaque stratégie en comparaison à la stratégie de référence (ST01) sans et avec mécanisme de compensation financière pour le cas réel.....	55
Tableau 6.6. Variable de décision supplémentaire pour la mise en place d'une stratégie équilibrant économie et équité	56
Tableau 6.7. Poids utilisés dans la fonction multicritère	58
Tableau 6.8. Couple de poids liés aux optimums de Pareto obtenus pour le cas réel.....	60
Tableau 7.1. Caractéristiques et différences entre le cas réel et le cas fictif.....	65
Tableau 7.2. Économies réalisées par chaque scénario par rapport au scénario de référence (S01) pour le cas fictif.....	67
Tableau 7.3. Flotte sélectionnée pour chaque scénario pour le cas fictif	69
Tableau 7.4. Taux d'utilisation moyen des camions par scénario pour le cas fictif.....	70

Tableau 7.5. Économies réalisées par chaque stratégie en comparaison à la stratégie de référence (ST01) pour le cas fictif	71
Tableau 7.6. Émissions de gaz à effet de serre par rapport à la stratégie de référence (ST01) pour le cas fictif	73
Tableau 7.7. Flotte de camion retenue pour chaque stratégie pour le cas fictif.....	74
Tableau 7.8. Taux d'utilisation des camions pour chaque stratégie pour le cas fictif.....	74
Tableau 7.9. Économies réalisées par chaque stratégie par comparaison avec la stratégie de référence (ST01) sans et avec système de compensation financière pour le cas fictif.....	75
Tableau 7.10. Couple de poids liés aux optimums de Pareto obtenus pour le cas fictif.....	77

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1.1. Schéma explicatif de l'ÉC, tiré de RECYC-QUÉBEC (2018).....	2
Figure 0.1.2. Évolution du coût moyen de l'essence au Canada entre janvier 2015 et janvier 2025 (Statistiques Canada, 2025)	3
Figure 1.1. Schéma explicatif d'une symbiose industrielle entre deux usines	8
Figure 1.2. Schéma explicatif du processus de biométhanisation	9
Figure 2.1. Schéma détaillé du processus de biométhanisation.....	17
Figure 2.2. Schéma détaillé du processus de séparation.....	19
Figure 2.3. Schéma des flux de matière de la CA (Faure, Boukherroub, Audy, & Lemire, 2025)	19
Figure 3.1. Schéma explicatif du calcul des temps de trajet.....	22
Figure 3.2. Explication détaillée de plusieurs paramètres	26
Figure 4.1. Distances totales parcourues en charge et à vide pour chaque scénario pour le cas réel.....	32
Figure 4.2. Émissions totales de GES par les camions pour chaque scénario pour le cas réel	34
Figure 5.1. Répartition des coûts totaux de la CA par stratégie pour le cas réel	45

Figure 5.2. Distances totales parcourues par les camions en charge et à vide pour chaque stratégie pour le cas réel.....	46
Figure 6.1. Représentation graphique du front de Pareto et des solutions dominées pour le cas réel.....	59
Figure 6.2. Visualisation des valeurs de F1 et de F2 pour les optimums de Pareto	61
Figure 7.1. Distances totales parcourues en charge et à vide pour chaque scénario pour le cas fictif.....	67
Figure 7.2. Estimations des émissions totales de GES par les camions en tonnes pour chaque scénario pour le cas fictif	68
Figure 7.3. Répartition des coûts totaux de la CA par stratégie d'allocation pour le cas fictif	71
Figure 7.4. Distances totales parcourues par les camions en charge et à vide pour chaque stratégie pour le cas fictif.....	72
Figure 7.5. Front et optimums de Pareto pour le cas fictif	76
Figure 7.6. F1 et de F2 pour les optimums de Pareto obtenus pour le cas fictif.....	78

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CA	Chaîne d'approvisionnement
ÉC	Économie circulaire
ÉP	Émetteur-preneur
ÉNP	Émetteur non-preneur
G	Camion d'une capacité de 46.5 tonnes
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat
GNR	Gaz naturel renouvelable
M	Camion d'une capacité de 40.5 tonnes
MO	Matière organique
MILP	Programmation linéaire en nombre entier mixte
NU	Nations Unies
P	Camion d'une capacité de 35.5 tonnes
TPS	Temps

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Tmh Tonne métrique humide

t Tonne métrique

min Minute

\$ Dollar canadien de 2025

km Kilomètre

L Litre

INTRODUCTION

Depuis août 2021, les différents groupes de travail du groupe d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat (GIEC) ont publié trois rapports faisant le point sur l'état des connaissances sur le réchauffement climatique. Le premier groupe s'est intéressé aux bases physiques du climat (Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC), 2023a), le second à la vulnérabilité des sociétés humaines, aux conséquences du changement climatique et aux scénarios d'adaptation (IPCC, 2023b), enfin le dernier à l'atténuation du changement climatique (Shukla et al., 2022). Ces trois rapports ont mis en évidence le lien entre les activités humaines et le réchauffement climatique. Ils soulignent l'urgence de prendre des actions concrètes pour ralentir le réchauffement climatique car le monde se dirige vers un réchauffement de 3,2°C d'ici 2100 avec des conséquences graves et irréversibles. Le GIEC propose des solutions concrètes pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) et insiste sur la nécessité de limiter le réchauffement à 1,5°C. Il est notamment indiqué que des transformations rapides et profondes sont nécessaires dans tous les secteurs de la société et notamment dans les secteurs de l'énergie, de l'industrie, le transport, l'agriculture et les bâtiments (IPCC, 2023a, 2023b ; Shukla et al., 2022).

L'économie circulaire (ÉC) se présente comme un exemple de changement profond de la manière de fonctionner dans divers secteurs notamment l'agriculture, l'énergie et l'industrie. Il s'agit d'un changement de paradigme dans la manière de produire et de consommer. Là où l'économie linéaire, utilisée principalement jusqu'à maintenant, peut-être résumée simplement par les actions EXTRAIRE – TRANSFORMER – UTILISER – JETER, l'ÉC propose à chacune des étapes, des améliorations et des boucles de flux de matière/énergie ayant pour but de réduire la consommation de matière première et d'énergie. Cela se traduit par des processus de production plus efficaces, de l'éco-conception, du reconditionnement de produits, de la revalorisation de déchets, de la symbiose industrielle, etc.

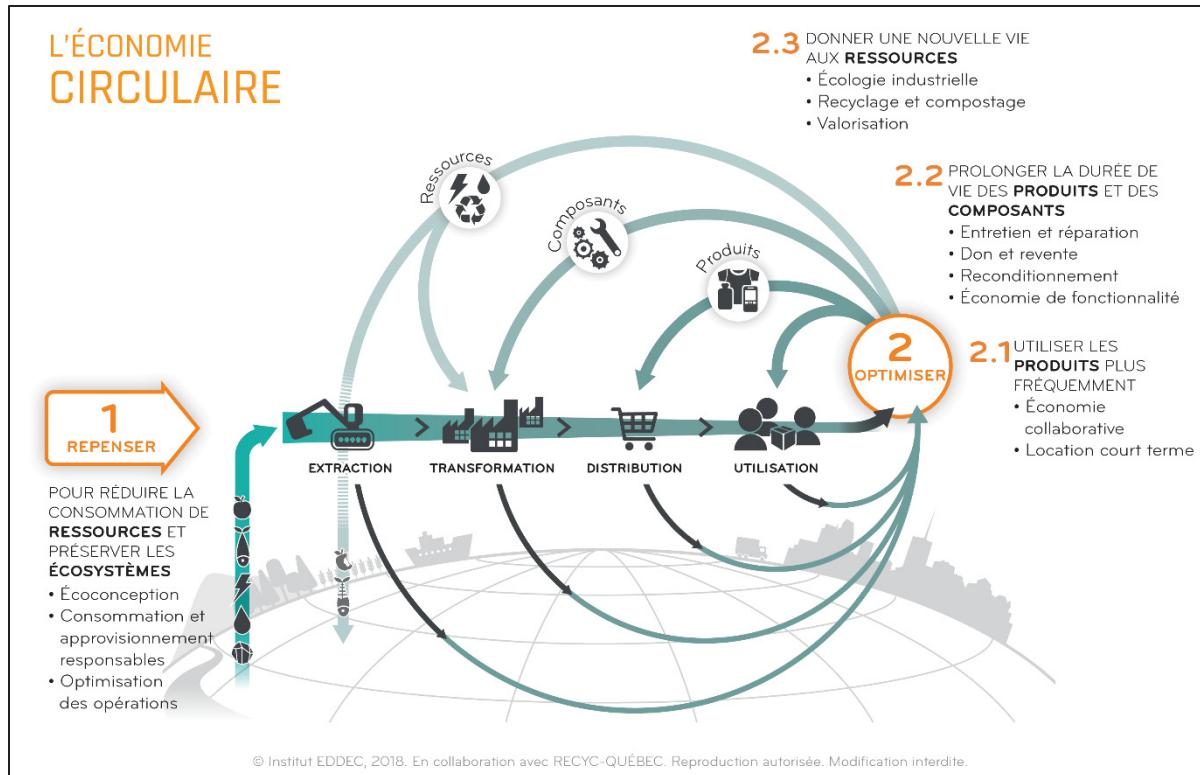


Figure 0.1.1. Schéma explicatif de l'ÉC, tiré de RECYC-QUÉBEC (2018)

Mettre en place l'ÉC dans un domaine industriel permet donc de produire de manière plus respectueuse de l'environnement, des biens qui auront un impact moins élevé et une durée de vie plus longue dans leur forme initiale ou à travers différentes formes de valorisation.

Toutefois la production n'est pas le seul domaine qui produit des GES. D'après le gouvernement du Québec, 43% des GES du Québec proviennent des transports. À cette problématique environnementale vient se rajouter une problématique économique : les coûts de transport ont beaucoup augmenté ces dernières années à cause notamment de la hausse du prix du carburant comme nous pouvons le voir sur la Figure 0.1.2.

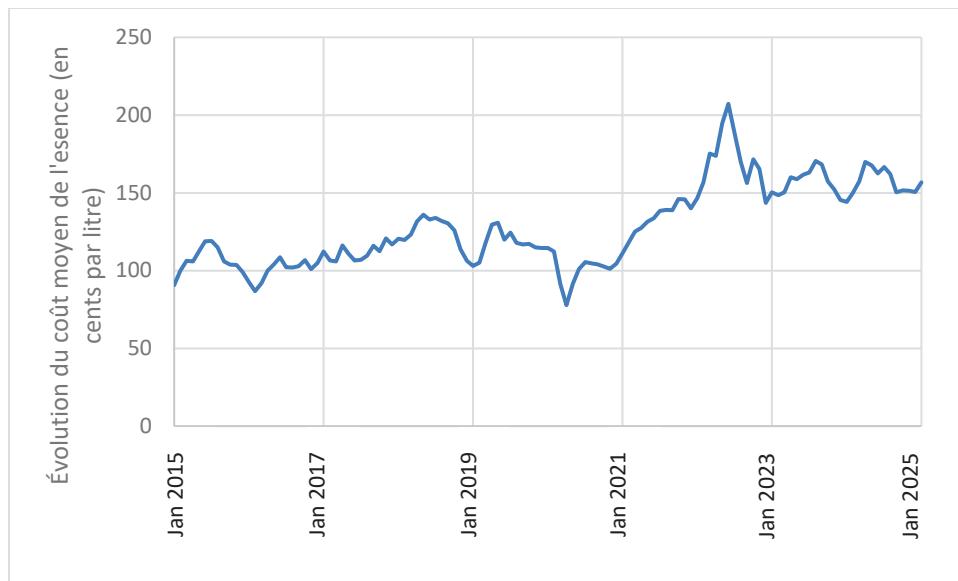


Figure 0.1.2. Évolution du coût moyen de l'essence au Canada entre janvier 2015 et janvier 2025 (Statistiques Canada, 2025)

Par exemple, au Canada et en Suède, les coûts de transport pèsent jusqu'à un tiers du coût total des matières premières dans le secteur forestier (Audy et al., 2023). À cela s'ajoutent deux défis majeurs : d'une part, les émissions de GES liées à la consommation de carburant, et d'autre part, la pénurie de chauffeurs routiers dans certains secteurs. Pour y remédier, des solutions existent, comme l'utilisation de pratiques logistiques avec la mise en place de flotte de camions hétérogène (une flotte de camions composée de camions de tailles différentes qui permet d'utiliser des camions de taille adaptée à différentes situations) et la mise en place de retours en charge (qui permet de minimiser les trajets effectués sans chargement) mais aussi le développement de modèles d'optimisation ou l'adoption de technologies innovantes, à l'image du peloton de camions (Gazran, 2024). Ces approches permettent de réduire à la fois les coûts de transport, la consommation de carburant et les besoins en main-d'œuvre mais aussi de réduire les émissions de GES.

Selon les Nations Unies (NU), le secteur d'activité qui émet le plus de GES est avant tout celui de la production d'énergie avec environ 35% des émissions totales mondiales. Dans ce contexte, il est pertinent et nécessaire de se pencher sur les différentes alternatives de production d'énergie, de gestion de matières résiduelles, de réduction des coûts et des

émissions de GES. Pour la production d'énergie et de réduction des matières résiduelles organiques, un processus se révèle être une solution prometteuse : la biométhanisation. À travers la décomposition des résidus organiques issus en majorité de l'industrie agro-alimentaire, ce processus permet à la fois de valoriser cette matière résiduelle, de produire du gaz naturel renouvelable (GNR) ainsi qu'un fertilisant naturel organique, appelé digestat, très convoité par les exploitations agricoles pour remplacer en partie le recours aux fertilisants chimiques.

Cette méthode moins carbonée de production de l'énergie est en plein essor et intéresse de plus en plus les territoires et les gouvernements. En effet, depuis 2020 et dans une dynamique de décarbonation de l'énergie, la législation québécoise impose une quantité minimale de gaz naturel de source renouvelable à livrer de 1% en 2020 et de 10% en 2030. Ceci imposera des changements significatifs considérant que, en 2022, d'après Pineau (2024) et Whitmore & Pineau (2025), le gaz naturel utilisé au Québec est quasiment entièrement issu d'importations. Les pôles qui utilisent le plus de GNR sont l'industrie, à hauteur de 57%, les commerces et autres institutions, à hauteur de 26% ainsi que le résidentiel à 11%. Donc, pour répondre à cette exigence de décarbonation de cette filière énergétique, 13 projets liés au GNR étaient en cours de réalisation en mai 2024. Onze d'entre eux sont des usines de biométhanisation avec diverses sources de résidus : agricoles, municipaux ou autres. Les deux autres sont des usines d'épuration de biogaz. En effet, le biogaz obtenu par biométhanisation doit être séparé pour obtenir du biométhane propre à la consommation (Brosseau, 2024).

Dans ce mémoire nous allons justement nous intéresser à un projet d'usine de biométhanisation mettant en jeu une chaîne d'approvisionnement (CA) collaborative en boucle fermée et qui nous sert d'étude de cas. Ce projet considère une usine de biométhanisation alimentée en résidus organiques par différents fournisseurs qui sont aussi pour la plupart des clients souhaitant recevoir le digestat produit.

Ce projet a alors soulevé plusieurs questionnements. Comment améliorer la rentabilité économique de la future usine de biométhanisation à l'aide de bonnes pratiques logistiques ?

Comment aborder la question de l'équité au niveau de l'allocation du digestat aux fournisseurs-clients ? Est-il possible de garantir une répartition juste du digestat afin d'atteindre une acceptabilité de l'ensemble des fournisseurs-clients tout en minimisant le coût total de la CA ?

Ce projet poursuit trois objectifs principaux. Le premier consiste à dimensionner une flotte de camions adaptée aux besoins et à la capacité de l'usine de biométhanisation, tout en minimisant les coûts de transport. Le deuxième objectif vise à déterminer la quantité optimale de digestat à allouer aux fournisseurs-clients permettant de réduire les coûts totaux de la CA, incluant les coûts de transport et de séparation, et ainsi maximiser les économies collectives réalisées. Enfin, le troisième objectif cherche à établir des stratégies de compromis permettant d'assurer une répartition équitable du digestat entre tous les fournisseurs-clients et de minimiser le coût total de la CA

Pour mener à bien cette étude, deux jeux de données ont été mobilisés : l'un issu d'un cas réel (dont certaines données confidentielles ne sont pas divulguées), l'autre correspondant à un cas fictif inspiré du premier, avec des données détaillées en ANNEXE II. Le problème a été modélisé à l'aide de la Programmation Linéaire en Nombres Entiers Mixtes (MILP). Quatre scénarios logistiques, intégrant des pratiques logistiques variées comme les retours en charge ou une configuration hétérogène de la flotte de camions, ont été testés pour identifier la solution la plus performante. À partir du scénario logistique optimal, huit stratégies d'allocation du digestat ont été élaborées afin d'explorer différentes approches. Initialement, la répartition était obtenue à partir du prorata du tonnage humide de résidus organiques fournis par chaque fournisseur-client. Cette répartition a été jugée équitable par l'ensemble des acteurs de la CA et nous avons voulu la confronter à d'autres stratégies d'allocation du digestat. Selon les stratégies, les allocations ont été calculées soit au préalable, soit déterminées par le modèle (variables de décision). Enfin, pour concilier performance économique et équité, deux pistes ont été explorées. D'une part, un mécanisme de compensation financière a été mis en place : les économies réalisées grâce aux stratégies d'allocation sont redistribuées aux fournisseurs-clients recevant moins de digestat que prévu initialement. D'autre part, une stratégie multicritère a été développée pour déterminer mathématiquement les allocations qui

équilibrer une répartition équitable (basée sur la répartition initiale) et une répartition optimisant les coûts globaux de la CA.

Ce mémoire est organisé en sept chapitres distincts. Le CHAPITRE 1 est une revue de la littérature. Son but est de mieux comprendre le contexte entourant la biométhanisation ainsi que d'identifier dans la littérature scientifique les différentes pratiques logistiques (flotte hétérogène et retours en charge) et les différentes stratégies d'allocation possibles nous permettant de constituer les voies d'amélioration de la CA à l'étude. Le CHAPITRE 2 présente le cas d'étude réel. Ce chapitre a pour objectif de détailler la CA étudiée et le problème de manière la plus complète possible pour ainsi comprendre l'ensemble de leurs particularités et d'identifier les points pouvant être améliorés. Le CHAPITRE 3 présente le modèle mathématique utilisé pour résoudre les différents problèmes décisionnels et scénarios étudiés dans sa forme la plus générale. Ce modèle étant voué à subir diverses modifications en fonction des décisions, scénarios et stratégies testés, il est primordial de présenter une version permettant une compréhension complète de la logique utilisée. Le CHAPITRE 4 traite de deux pratiques logistiques (flotte hétérogène et retours en charge). Son objectif est de quantifier les bénéfices liés à l'implémentation de ces pratiques logistiques séparément et conjointement. Le CHAPITRE 5 aborde les stratégies d'allocations et comment le modèle mathématique a été adapté au problème pour en tenir compte. Son objectif est de présenter les stratégies testées, leur conceptualisation ainsi que les résultats obtenus. Le CHAPITRE 6 explore différentes pistes et stratégies envisagées pour garantir le plus possible l'équité entre les différents acteurs de la CA tout en minimisant les coûts de la CA. Enfin, le CHAPITRE 7 présente un cas fictif et, dans un objectif de reproductibilité, va démontrer et parcourir à nouveau toutes les voies d'amélioration développées dans les chapitres précédents afin de vérifier les résultats et les conclusions tirées du cas réel. Pour finir, la conclusion revient sur les résultats les plus importants avant de présenter des recommandations et un ensemble de perspectives de recherche.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre propose une revue de la littérature autour de quatre thématiques principales : l'ÉC, la biométhanisation, les pratiques logistique mises en place dans les problèmes de transport de marchandises avec des camions et d'allocation de ressources naturelles. À travers cette revue, nous présentons donc les concepts clés sur lesquels repose notre recherche mais aussi positionner notre contribution scientifique à la littérature.

1.1 Économie circulaire

Prieto-Sandoval et al. (2018) ont réuni dans une seule définition l'ensemble des points constitutifs de l'ÉC : « Le modèle circulaire est un système économique qui représente un changement de paradigme dans la manière dont la société humaine est liée à la nature et qui vise à prévenir l'épuisement des ressources, à fermer les boucles énergétiques et matérielles et à faciliter le développement durable grâce à sa mise en œuvre aux niveaux micro (entreprises et consommateurs), méso (agents économiques intégrés en symbiose) et macro (villes, régions et gouvernements). La réalisation de ce modèle circulaire nécessite des innovations environnementales cycliques et régénératives dans la manière dont la société légifère, produit et consomme. » (Prieto-Sandoval, Jaca, & Ormazabal, 2018)

C'est avec cette définition à l'esprit que nous avons considéré le domaine de l'énergie comme étant lié à l'ÉC. De nombreux liens peuvent être établis entre ces deux domaines. Certains matériaux critiques stratégiques et énergétiques comme les métaux utilisés dans les batteries de voitures électriques (lithium, cobalt et nickel) peuvent être recyclées afin d'être réutilisés dans d'autres batteries (Wan & Wang, 2022) . D'autre part, la mise en place de symbioses industrielles permet de revaloriser des co-produits délaissés d'une CA comme matière première pour une autre industrie et permet à la fois de réduire la production de matières résiduelles et d'économiser de l'énergie en faisant collaborer deux industries ou plus (Dong, Taka, Lee, Park, & Park, 2022).

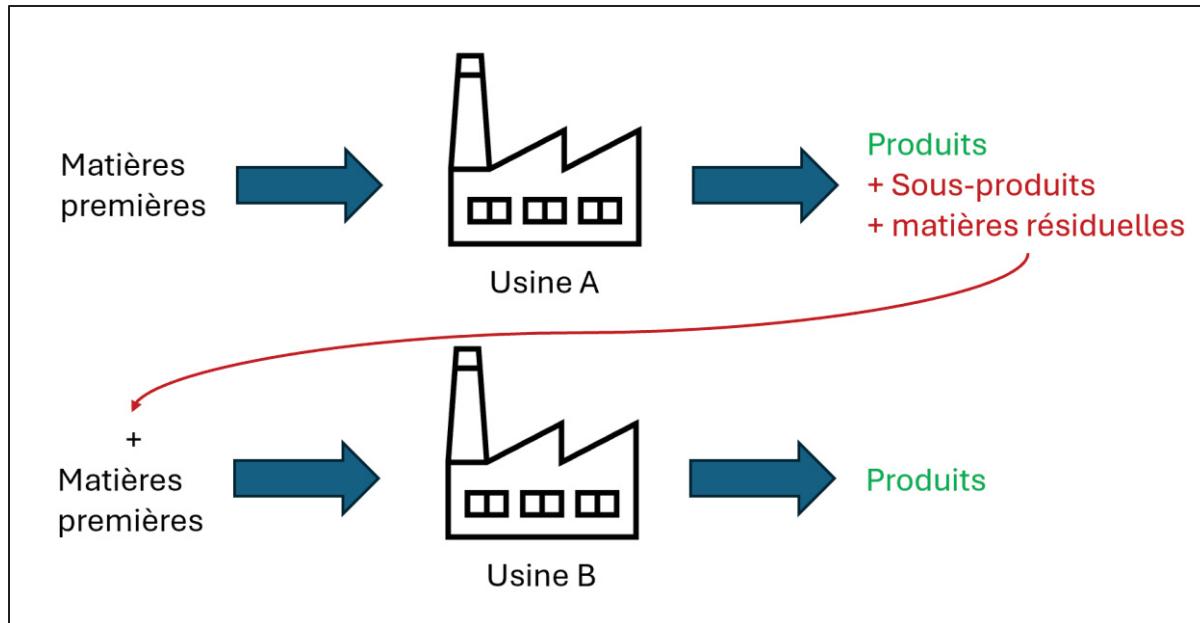


Figure 1.1. Schéma explicatif d'une symbiose industrielle entre deux usines

Une autre piste pour allier économie circulaire et énergie serait la production d'énergie via des matières résiduelles telle que la biométhanisation.

1.2 La biométhanisation

La biométhanisation est une méthode de production d'énergie qui répond à deux grandes problématiques : améliorer la gestion des résidus organiques et décarboner l'industrie et les transports. En effet, l'utilisation de résidus organiques dans le cadre de la biométhanisation est un moyen prometteur de produire de l'énergie ainsi qu'un moyen efficace de gestion des déchets (Gautam, Neha, Upadhyay, & Dubey, 2020 ; Taveira De Souza, Obal, X. Valenzuela, & De Oliveira Florentino, 2024). La biométhanisation permet la valorisation des résidus agricoles, ménagers ou industriels ce qui contribue à l'ÉC et réduit la dépendance à l'enfouissement ou à l'incinération qui sont sources de pollution atmosphérique et des sols.

La biométhanisation est un procédé industriel qui fonctionne à l'équivalent d'un bac de compostage (voir Figure 1.2. Schéma explicatif du processus de biométhanisation). Les résidus

organiques de toutes sortes sont placés dans une cuve fermée hermétiquement. En l'absence d'oxygène, la décomposition des matières organiques va alors créer deux éléments : du GNR et un co-produit qu'on appelle digestat (Taveira De Souza et al., 2024).

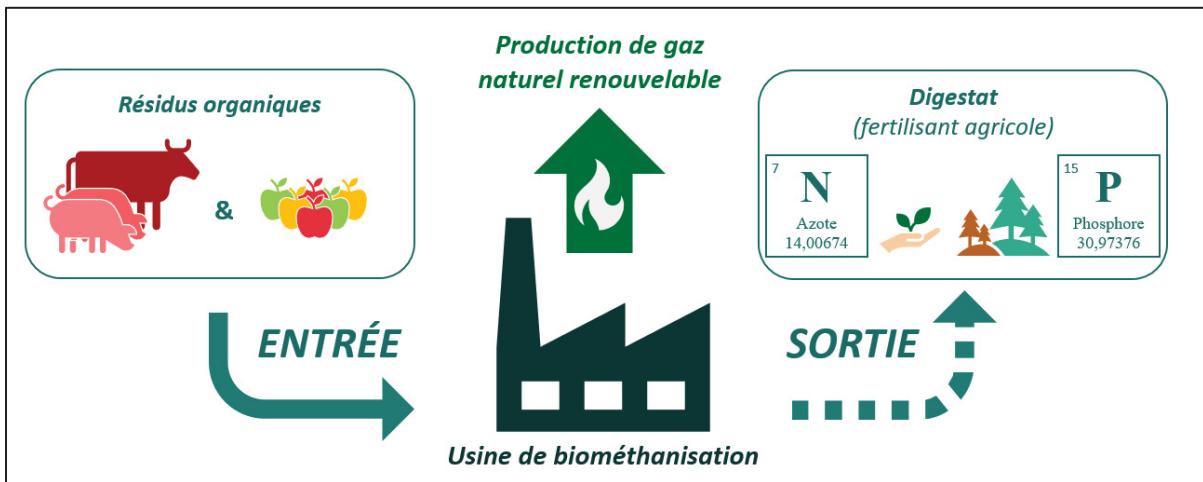


Figure 1.2. Schéma explicatif du processus de biométhanisation

Le GNR (majoritairement du méthane) a plusieurs utilisations possibles. Il trouve une utilisation chez les particuliers pour produire de la chaleur par exemple, mais peut servir aussi à produire de l'électricité ou même décarboner certains secteurs difficiles à électrifier. Enfin, il peut aussi servir de carburant pour certains véhicules notamment des camions ou des autobus et ainsi réduire de près de 30% les émissions des GES par rapport à leur équivalent fonctionnant à l'essence ou au diesel (Milojević et al., 2025).

D'un autre côté, le digestat est majoritairement utilisé en tant que fertilisant grâce à sa haute teneur en azote. Szwed et al. (2024) relèvent de nombreux bénéfices quant à l'utilisation du digestat : la structure des sols et leur fertilité sont améliorées grâce aux nutriments et aux composés organiques apportés et le digestat ne nuit pas au développement des micro-organismes souterrains comme le ferait un engrais chimique. Le digestat apparaît être un choix de qualité pour une agriculture durable et la protection des sols ; de plus, son utilisation permet de réduire les coûts d'achat de fertilisants chimiques. Le digestat peut être utilisé sous forme liquide et sous forme solide. Toutefois, le digestat peut présenter des risques (Derehajlo et al.,

2023). En effet, la qualité du digestat dépend entièrement du type de résidus organiques utilisés pour sa fabrication. Comme les composés organiques utilisés pour la biométhanisation sont issus de sources variées, certains peuvent être plus ou moins chargés en métaux lourds (p. ex. plomb, cadmium, mercure, nickel). La présence de métaux lourds dans les sols peut nuire à la fertilité de celui-ci mais aussi avoir des impacts néfastes sur les animaux ou les personnes qui consomment les produits issus de la croissance du même sol. D'autres risques liés à la santé peuvent également survenir notamment à cause de la contamination microbienne.

Enfin, pour que la biométhanisation soit une solution viable de production d'énergie locale et de gestion des matières résiduelles il est nécessaire que les usines de biométhanisation soient placées stratégiquement (Obal et al., 2024). Pour cela il est recommandé de mettre en place des partenariats entre les lieux de génération de résidus organiques et les usines de biométhanisation.

1.3 Les pratiques logistiques

Dans le but d'optimiser le transport des flux dans les chaînes d'approvisionnement de la biométhanisation, nous nous sommes intéressés aux pratiques logistiques communément utilisées en transport.

Une pratique pertinente à intégrer est la mise en place d'une flotte hétérogène. L'utilisation d'une flotte hétérogène de véhicules présente de multiples avantages (Repoussis & Tarantilis, 2010). Le planificateur peut ajuster la composition de la flotte pour mieux répondre aux besoins spécifiques des clients, notamment lorsqu'ils exigent des véhicules équipés de fonctionnalités coûteuses ou spécialisées (Bräsysy et al., 2008). Certains clients tirent également profit de cette diversité, par exemple lorsqu'ils nécessitent des véhicules de petite taille en raison de contraintes d'accessibilité en milieu urbain, de préoccupations environnementales ou de limitations physiques liées au gabarit et au poids des véhicules (Semet, 1995).

Enfin, les véhicules de différentes capacités de transport permettent d'optimiser l'allocation des ressources en fonction de la demande variable des clients. En déployant des types de

véhicules adaptés aux caractéristiques des zones desservies — comme des camions de grande capacité pour les zones industrielles ou rurales où les volumes à transporter sont élevés, et des véhicules plus légers pour les zones urbaines densément peuplées — il est possible de réduire les coûts logistiques tout en améliorant l'efficacité opérationnelle (Tarantilis, Kiranoudis, & Vassiliadis, 2003, 2004). Cette flexibilité permet non seulement de minimiser les trajets à vide et de maximiser le taux de remplissage des véhicules, mais aussi d'adapter dynamiquement la flotte aux fluctuations saisonnières ou ponctuelles de la demande, renforçant ainsi la résilience et la compétitivité de la chaîne logistique.

Une autre pratique logistique pertinente est la mise en place de retours en charge. Les retours en charge consistent à éviter que les camions ne reviennent à vide après une livraison, en les chargeant avec des marchandises, des résidus ou des co-produits pour la suite du trajet vers un autre client. En évitant les trajets à vide, les coûts de transport (p. ex. carburant, maintenance, main-d'œuvre) sont significativement diminués et moins de trajets à vide signifient moins d'émissions de GES. De plus, les véhicules sont utilisés plus efficacement, ce qui augmente leur taux d'utilisation et réduit le besoin en nouveaux camions. De nombreux travaux traitent de cette pratique logistique (Desrosiers et al., 1995 ; Fleischmann et al., 1997) mais aussi de son application notamment dans le domaine forestier (Gazran, 2024) . Dans un contexte de logistique sortante et entrante à une usine portugaise, Marques *et al.* (2020) comparant trois stratégies de planification : planification opportuniste avec retours en charge, planification intégrée des flux entrants et sortants et planification découpée. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec la planification opportuniste avec retours en charge ainsi qu'avec la planification découpée. Les différences observées dépendent des contextes géographiques étudiés. Les retours en charge ont été particulièrement performants dans les contextes où les distances entre les nœuds du réseau sont inférieures à 200 km (Marques et al., 2020).

Dans ce travail, l'un de nos objectifs est d'optimiser le transport à l'aide de pratiques logistiques. Cela rapproche donc notre étude des travaux sur l'optimisation de la logistique et des problèmes de routage de véhicule dans le domaine forestier et notamment des travaux de Audy *et al.* (2023) qui abordent les retours en charge comme une stratégie clé pour améliorer

l'efficacité du transport du bois et réduire les coûts logistiques. Le système ASICAM, développé au Chili (Audy et al., 2023) et utilisé dans plusieurs pays, inclut des règles heuristiques pour générer des trajets avec des opportunités de retours en charge. Ce système a permis des économies de coûts allant jusqu'à 30 % en optimisant les trajets et en réduisant les kilomètres à vide. De même, FlowOpt, un système d'aide à la décision suédois (Audy et al., 2023), évalue les économies potentielles liées au retour en charge en facilitant les échanges de volumes de bois entre différentes entreprises forestières, ce qui permet de créer des trajets communs et de réduire les coûts de transport de 5 % à 12,8 %. Les retours en charge sont particulièrement pertinents dans les contextes de collaboration interentreprises, où plusieurs acteurs partagent leurs ressources logistiques pour optimiser les trajets (Gazran, 2024). Par exemple, le système Åkarweb en Suède permet d'identifier les meilleures opportunités de retours en charge parmi les trajets gérés par différents décideurs, en utilisant des modèles d'optimisation basés sur la programmation linéaire (Audy et al., 2023). Enfin, l'intégration des retours en charge dans les modèles de planification nécessite de prendre en compte des contraintes supplémentaires, comme les fenêtres de temps pour les livraisons et les collectes, la compatibilité des types de bois avec les sites de demande, et les capacités des véhicules. Les méthodes hybrides, combinant optimisation et heuristiques, sont souvent utilisées pour résoudre ces problèmes complexes et générer des solutions réalistes et efficaces (Audy et al., 2023).

1.4 Le problème d'allocation

Notre étude s'intéresse à l'allocation du digestat dans une CA en boucle fermée. La particularité de notre étude portant sur la biométhanisation repose sur le fait que les fournisseurs de résidus organiques sont aussi des clients du digestat. Il faut donc allouer le digestat en fonction des besoins des fournisseurs-clients tout en tenant compte de ce qu'ils ont fourni à la CA c'est-à-dire de leur contribution à la production du GNR par biométhanisation.

Cela rend notre étude très proche d'études concernant l'allocation de ressources dans une CA en boucle fermée comme l'allocation de l'eau potable tout en prenant en compte les coûts liés

au traitement des eaux usées (Vázquez-Serrano et al., 2025). Dans cet article, les allocations doivent gérer des sources d'eau variées (eaux de surface, souterraines, recyclées, dessalées) et des demandes hétérogènes (zones résidentielles, industrielles, agricoles), chacune avec des contraintes spécifiques (capacités de traitement, réseaux de distribution, etc.) tout en cherchant à minimiser les coûts de la CA, en maintenant un accès équitable à l'eau dans toutes les zones.

Dans le même esprit, nous nous sommes ensuite intéressés aux recherches sur les allocations de l'eau qui est la ressource naturelle la plus sujette aux études sur les problèmes d'allocation. De nombreux travaux s'y intéressent chacun de manière différente. Par exemple, Letcher et al. (2007) propose une modélisation de l'allocation des ressources en eau à travers un réseau de nœuds interconnectés, représentant les points clés d'extraction ou d'utilisation (agriculture, environnement, etc.). Son approche intègre deux types de décisions : celles basées sur une connaissance parfaite des ressources, et celles fondées sur des attentes incertaines, reflétant les choix réels des acteurs face à des conditions imprévisibles. Les résultats mettent en avant la nécessité pour les modèles d'être sensibles aux politiques de gestion et aux changements d'utilisation des terres, comme la reforestation ou la construction de barrages, qui influencent significativement les flux d'eau. Cette méthode offre un cadre robuste et adaptable pour relever les défis de l'allocation de l'eau, alliant rigueur scientifique et flexibilité. Enfin, l'auteur souligne l'importance d'une collaboration avec les parties prenantes pour ancrer les modèles dans les réalités locales (Letcher et al., 2007). Messner et al. (2006), quant à eux, combinent participation des acteurs, analyse multicritère et coûts-bénéfices pour résoudre un conflit d'allocation en eau en Allemagne, lié à la réduction des activités minières. Leur méthode, structurée autour de scénarios intégrant les incertitudes climatiques et les priorités locales, permet d'évaluer des stratégies alternatives comme le transfert d'eau ou le remplissage des mines. Bien que certaines solutions semblent avantageuses économiquement, leurs impacts sur les utilisateurs en aval restent à clarifier. Cette approche améliore la prise de décision en renforçant la gestion de l'information et l'équité entre les parties (Messner et al., 2006).

L'étude de Rahmoune et al. (2024) présente une approche novatrice pour allouer équitablement les ressources forestières publiques entre les scieries du Québec, où plus de 90 % des forêts

sont gérées par l'État. Cette méthode combine la théorie des jeux coopératifs et un modèle d'optimisation multi-objectif, visant à concilier équité, durabilité et collaboration. Les scieries, souvent organisées en coalitions chevauchantes (situation dans laquelle un même acteur, une même entité ou une même ressource peut appartenir simultanément à plusieurs coalitions ou groupes distincts), collaborent dans trois domaines clés — récolte, entretien des routes forestières et transport — ce qui génère des économies de coûts substantielles. Cependant, les méthodes traditionnelles d'allocation sont jugées injustes par certaines scieries, car elles ne tiennent pas suffisamment compte des efforts individuels et collectifs.

L'approche proposée évalue d'abord les économies réalisées grâce à la collaboration, puis utilise un algorithme pour attribuer un score de contribution à chaque scierie. Un modèle d'optimisation détermine ensuite les volumes de bois alloués, en équilibrant deux critères : la contribution aux économies de coûts et la performance individuelle en matière de durabilité. Enfin, une analyse vérifie la stabilité des coalitions, en s'assurant qu'aucune scierie n'a intérêt à quitter sa coalition ou à en rejoindre une autre au détriment des membres existants.

Les résultats montrent que cette méthode récompense équitablement les scieries selon leur niveau de collaboration et leur performance durable. Les scieries les plus actives dans les coalitions ou celles participant à des groupes restreints obtiennent des allocations plus importantes, tandis que les non-collaboratives reçoivent des volumes minimaux. L'analyse de sensibilité confirme la robustesse du modèle, même si certains ajustements sont nécessaires en fonction des performances individuelles ou collectives. La stabilité des coalitions est particulièrement assurée ce qui maintient les incitations à collaborer sans déséquilibrer les dynamiques existantes.

Cette approche offre une solution transparente et durable pour l'allocation des ressources forestières, tout en ouvrant des perspectives pour intégrer d'autres acteurs, comme les communautés autochtones ou les propriétaires privés (Rahmoune et al., 2024).

Ce problème est aussi traité dans Boukherroub et al. (2017) qui propose un cadre intégré pour résoudre le problème d'allocation des ressources forestières publiques au Canada, en prenant

compte explicitement les dimensions économique, environnementale et sociale de la durabilité. L'approche se structure autour de trois phases principales : évaluation de la performance des usines de transformation du bois, évaluation multicritère, basée sur la méthode Group-AHP, pour agréger les jugements d'experts pour attribuer des poids aux critères et calculer un score de performance globale pour chaque usine. Enfin, deux modèles d'optimisation linéaire sont formulés pour allouer les volumes de bois : le premier maximise la valeur totale créée par l'ensemble des usines, tandis que le second vise à garantir une répartition proportionnelle aux performances de chaque usine, assurant ainsi une forme d'équité inter-entreprises.

L'étude de cas, montre que l'intégration des critères de durabilité influence significativement les décisions d'allocation. Les résultats révèlent que la stratégie cherchant à garantir l'équité entre les entreprises est également efficace pour maximiser la valeur créée, avec un écart minimal par rapport à la solution optimale. Cette approche permet ainsi de concilier performance globale et équité, tout en s'éloignant des pratiques traditionnelles basées uniquement sur des critères économiques ou historiques. L'article souligne aussi l'importance de définir des lignes directrices claires pour les experts et de collecter des données continues sur la performance des usines, afin d'améliorer la robustesse et la transparence du processus d'allocation (Boukherroub et al., 2017).

À ce jour, allier optimisation du transport et détermination des allocations dans le domaine de la biométhanisation n'a pas été traité dans la littérature. Cette recherche a donc pour but de combler une lacune dans la littérature scientifique en étudiant de façon intégrée des pratiques logistiques et des stratégies d'allocation appliquées à une CA de biométhanisation en boucle fermée.

CHAPITRE 2

CAS D'ÉTUDE ET PROBLÈME

Ce chapitre a pour but de présenter la CA en boucle fermée d'une usine de biométhanisation au Québec (Canada) qui constitue le cas d'étude réel pour notre projet de recherche.

2.1 Description du cas d'étude

Notre cas d'étude concerne une usine de biométhanisation devant être mise en place dans la région de la Mauricie, dans la province de Québec (Canada). Dans cette étude de cas, 13 émetteurs de résidus organiques se sont associés pour approvisionner la future usine de biométhanisation en résidus organiques. Le processus de biométhanisation transforme ces résidus en GNR et génère un co-produit, le digestat brut, une boue très riche en nutriments notamment en azote et en phosphore, qui peut être utilisé comme engrais organique pour les sols agricoles (voir Figure 2.1).

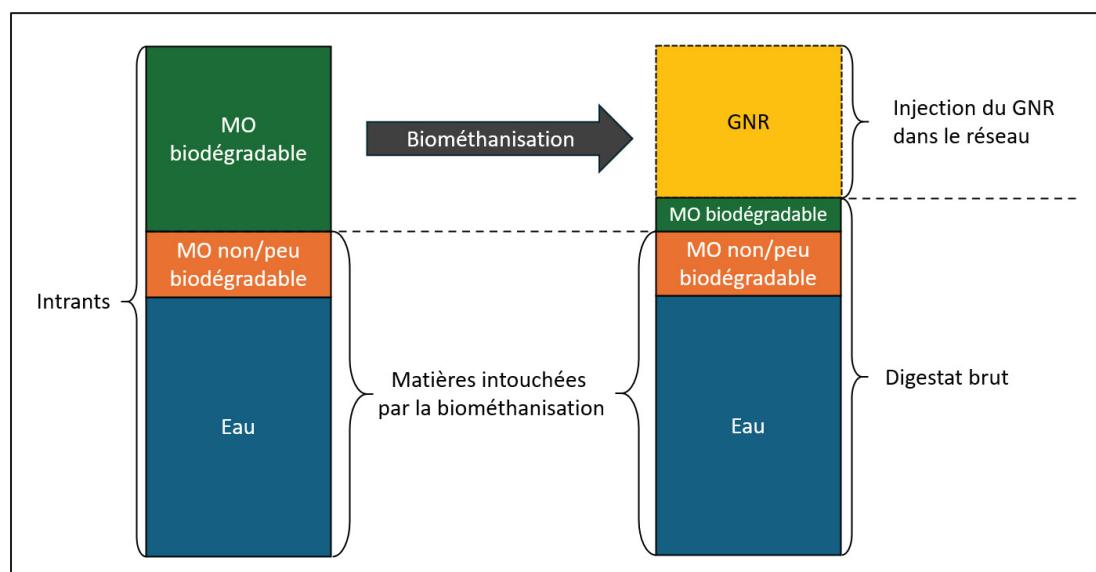


Figure 2.1. Schéma détaillé du processus de biométhanisation

Les émetteurs se divisent en deux catégories : les émetteurs-preneurs (EP), qui fournissent des résidus organiques à l'usine de biométhanisation et s'attendent à recevoir du digestat en retour, et les émetteurs non-preneurs (ENP), qui fournissent des résidus organiques mais ne demandent pas de recevoir du digestat en retour. Les EP sont donc à la fois fournisseurs de résidus organiques et clients pour le digestat. D'un autre côté, les ENP bénéficient de cette CA parce qu'elle leur permet de revaloriser leurs résidus organiques qui auraient dû être acheminés à l'enfouissement, à leur frais. Cette CA en boucle fermée permet l'implémentation d'une approche d'EC. Deux types différents de camions sont nécessaires car les émetteurs fournissent des résidus organiques qui peuvent être soit liquides, soit solides. De même, le digestat peut être distribué sous forme brute (liquide) ou solide. En raison du type d'équipement de stockage des résidus déjà en place, un émetteur de résidus organiques liquides n'acceptera que du digestat liquide, tandis qu'un émetteur de résidus organiques solides n'acceptera que du digestat solide. De plus, après avoir visité un fournisseur, chaque camion doit retourner à l'usine pour être nettoyé avant de se rendre chez le suivant en raison de préoccupations de biosécurité, notamment des problèmes de contamination croisée.

À la suite du processus de biométhanisation, le digestat généré est uniquement sous sa forme brute qui est liquide. Il est donc nécessaire d'équiper l'usine d'un séparateur industriel permettant une ségrégation du digestat brut en digestat solide (et en eaux usées). Comme seule la matière organique présente dans le digestat intéresse les EP, le processus de séparation permet de transporter un produit contenant la quantité de matière organique en intrant mais avec moins d'eau (voir Figure 2.2). Ce séparateur est un équipement coûteux et doit donc être dimensionné de manière adéquate pour garantir la production de quantités suffisantes de digestat solide afin de répondre à la demande. Pour fonctionner, ce séparateur a besoin essentiellement d'électricité et de polymères. Ces polymères ont pour but d'aider à agglomérer la matière organique et sont nécessaires pour séparer l'eau de la matière organique. La quantité de polymères à ajouter dépend de la qualité du digestat, un digestat pauvre en fibres nécessitera l'utilisation de plus de polymères qu'un digestat riche en fibres. Par chance, l'un des émetteurs du cas d'étude fournit à la CA des boues papetières riches en fibre, ce qui permet de limiter la quantité de polymères à utiliser.

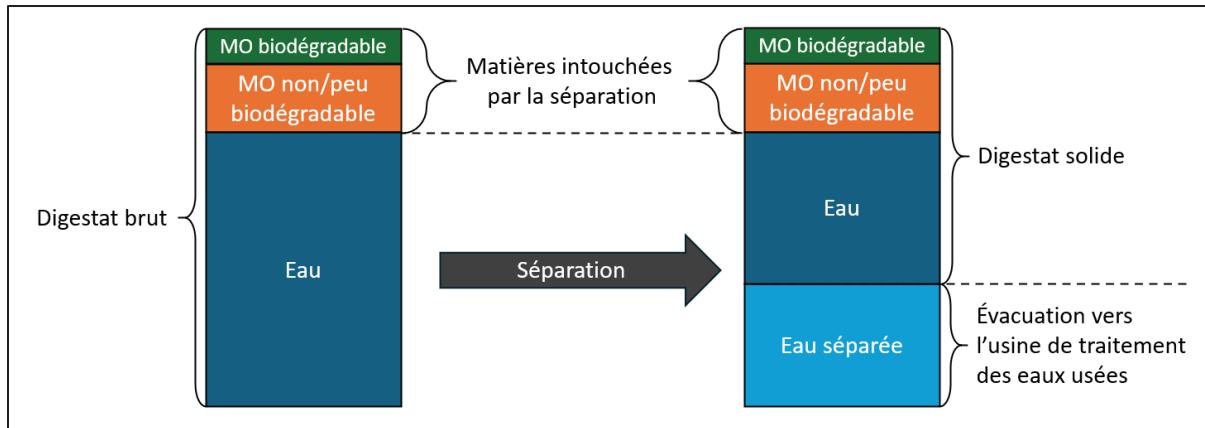


Figure 2.2. Schéma détaillé du processus de séparation

La Figure 2.3 montre les flux de matières au sein de la CA en boucle fermée de l'étude de cas réel lors du fonctionnement régulier. Lors de la rotation initiale de la CA les camions partent à vide vers les émetteurs (EP et ÉNP).

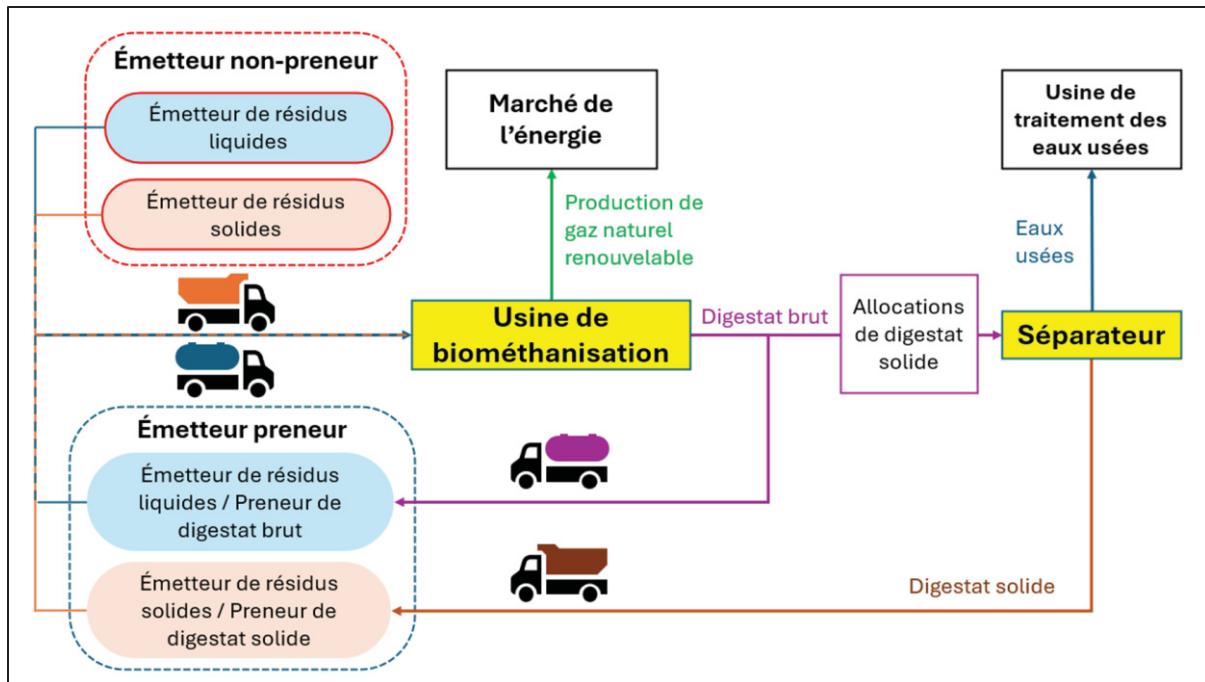


Figure 2.3. Schéma des flux de matière de la CA (Faure, Boukherroub, Audy, & Lemire, 2025)

2.2 Description du problème

Les gestionnaires de l'usine souhaitent minimiser les coûts de l'ensemble de la CA tout en assurant des allocations justes de digestat. Cependant ces deux objectifs sont intrinsèquement liées : modifier les allocations de digestat a une conséquence directe sur les coûts de la CA (nombre et types de camion à acquérir, dimensionnement du séparateur, quelles pratiques logistiques adopter ou non, etc.) et sur la satisfaction de chaque ÉP.

Il faut alors trouver un moyen d'aider à la prise de décision pour déterminer comment répondre au mieux aux attentes des gestionnaires de l'usine. À l'heure actuelle, la stratégie d'allocation envisagée est un prorata du tonnage de matière humide où chaque ÉP reçoit une quantité de digestat proportionnelle au tonnage humide de résidus organiques qu'il a fourni à l'usine de biométhanisation. Cette règle empirique est commune en pratique (p. ex. Frisk, et al. (2010)) mais, même si elle peut être perçue comme juste par les ÉP, il ne s'agit pas nécessairement de la stratégie la plus avantageuse économiquement ou la plus appropriée quand nous regardons d'autres critères comme le besoin en fertilisation des sols de chaque ÉP ou la contribution en matière organique.

La création d'un modèle mathématique d'aide à la décision permet d'explorer de nombreux scénarios logistiques et des stratégies d'allocation variées afin de fournir des recommandations aux gestionnaires de l'usine.

CHAPITRE 3

MODÈLE MATHÉMATIQUE

Ce chapitre a pour but de présenter le modèle mathématique qui nous a permis de répondre au problème de transport et d'allocation pour une CA en boucle fermée d'une usine de biométhanisation. Dans un premier temps nous avons détaillé les hypothèses génériques sur lesquelles repose notre modèle, puis, dans un second temps, nous avons explicité la formulation mathématique de notre problème basé sur la programmation linéaire en nombre entier mixte (MILP) afin de pouvoir le résoudre.

3.1 Hypothèses génériques

Nos hypothèses concernent l'usine de biométhanisation, le transport et les stratégies d'allocation. Elles sont les suivantes :

- Le réseau logistique ne comprend qu'une seule usine de biométhanisation reliée au réseau de traitement des eaux usées afin que celles-ci (sortant du séparateur) puissent y être déversées.
- L'usine de biométhanisation fonctionne 24 heures sur 24, 7 jours sur 7.
- La période d'amortissement d'un camion (tracteur et remorque) est de 7 ans.
- Les camions ne peuvent être que dans deux états : soit vides, soit chargés à pleine capacité (aucune charge partielle), la limite de poids étant atteinte avant la limite de volume.
- La flotte de camions peut être homogène ou hétérogène en termes de taille.
- Les camions-citernes et les camions de vrac solide de même taille ont des coûts d'exploitation identiques mais des coûts d'acquisition différents.
- Les camions-citernes ne peuvent transporter que des matières liquides (résidus organiques liquides et digestat brut), les camions de vrac solide ne peuvent transporter que des matières solides (résidus organiques solides et digestat solide).

- Tous les conducteurs ont le même temps de disponibilité ; il n'y a pas de transport pendant les fins de semaine et nous supposons que les conducteurs ont une pause d'une heure par jour, ce qui donne une journée de travail de sept heures.
- Les émetteurs ont une capacité maximale de stockage du digestat qui ne peut être dépassée. Les émetteurs liquides ne peuvent stocker que 120 % de la quantité totale de résidus organiques fournie, tandis que les émetteurs solides ne peuvent stocker plus de 150 % de la quantité totale de résidus organiques fournie.
- L'épandage du digestat n'est pas fait en continu dans l'année. Toutefois, l'infrastructure de stockage présente chez chaque EP assure le découplage production-épandage permet l'opérationnalisation des trajets aller-retours en charge.
- La durée des trajets comprend des temps (tps) de diverses natures : temps de transport et les temps de chargement et de déchargement (comprenant aussi le nettoyage du camion). (Voir Figure 3.1.)

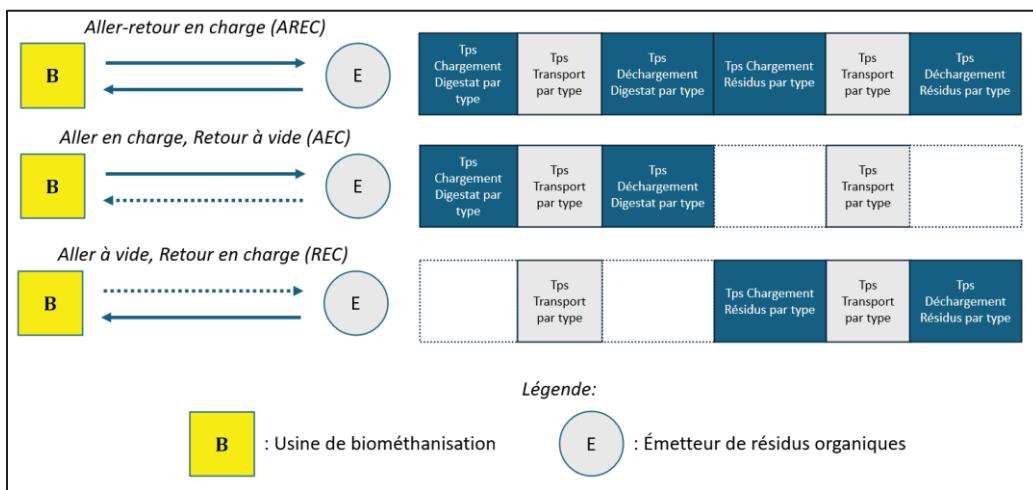


Figure 3.1. Schéma explicatif du calcul des temps de trajet

3.2 Formulation du modèle mathématique

Ce modèle mathématique est un MILP dont l'objectif est de minimiser le coût total de la CA en boucle fermée (c'est-à-dire le coût total des activités de transport et de séparation) en fonction de la stratégie d'allocation choisie. Pour certaines stratégies (ST01, ST02, ST07a, ST07b, ST08a, ST08b, ST09, voir la section 5.1.), les allocations sont effectuées à l'avance et

donc prises en compte par le modèle par des paramètres fixés au préalable, tandis que pour les autres (ST05 et ST06, voir la section 5.1.), elles sont prises en compte à l'aide de variables de décision dans le modèle. Les ensembles et les indices, les variables de décision, la fonction objectif et les contraintes sont présentés dans les paragraphes suivants.

- **Ensembles et indices** : les ensembles utilisés dans le modèle sont définis dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1. Ensembles et indices

Notation	Définition
E	Ensemble de tous les émetteurs de résidus.
E_p	Ensemble de tous les ÉP.
$e \in E$ $e \in E_p$	Indice qui spécifie l'émetteur (ou l'EP) vers lequel le camion se dirige (c'est-à-dire la destination de la livraison).
M	Ensemble de tous les types de camions (camion-citerne ou camion de vrac solide).
$m \in M$	Indice qui spécifie le type de camion utilisé. $m \in M = \{citerne, vrac solide\}$ Par abus de langage, m peut aussi directement désigner le type du digestat puisque chaque type de digestat ne peut-être transporté que par un seul type de camion.
S	Ensemble de toutes les tailles de camion
$s \in S$	Indice qui spécifie la taille du camion effectuant le trajet. $s \in S = \{Petit, Moyen, Grand\}$

- **Variables de décision**

Les variables de décision sont soit des nombres réels positifs soit des entiers positifs ; elles peuvent dépendre des trois indices définis dans le Tableau 3.1. Les variables de décision utilisées dans le modèle sont définies dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2. Variables de décision

Notation	Définition
$AREC_{e,m,s}$	Nombre de trajets de type « en charge complète (aller en charge et retour en charge) » de l'usine vers l'émetteur e avec un camion de type m et de taille s .
$AEC_{e,m,s}$	Nombre de trajets de type « aller en charge et retour à vide » de l'usine vers l'émetteur e avec un camion de type m et de taille s .
$REC_{e,m,s}$	Nombre de trajets de type « aller à vide et retour en charge » de l'usine vers l'émetteur e avec un camion de type m et de taille s .
$N_{m,s}$	Nombre (entier) de camions de type m et de taille s .
$D_{e,m}$	Quantité de digestat allouée à l'émetteur e transporté par un camion de type m . Valable seulement pour les stratégies ST05 et ST06.

- **Paramètres** : les paramètres utilisés dans le modèle sont définis dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3. Paramètres

Notation	Unité	Définition
T	Année(s)	Horizon de planification.
$C_{m,s}$	Tmh/camion	Charge maximale pour un camion de type m et de taille s .
$D_{e,m}$	Tmh/T	Quantité de digestat allouée à l'émetteur e transporté par un camion de type m . Valable seulement pour les stratégies ST01, ST02, ST07a, ST07b, ST08a, ST08b, ST09.
$L_{e,m}$	Tmh/T	Capacité de stockage maximale de l'émetteur e pour le digestat de type m .
$R_{e,m}$	Tmh/T	Quantité de résidus organiques fournie par l'émetteur e de type m .
$T_{AREC_{e,m,s}}$	Minutes (min) par trajet	Durée d'un trajet de type « AREC » vers l'émetteur e d'un camion de type m et de taille s .

Notation	Unité	Définition
$T_{AEC_{e,m,s}}$	min par trajet	Durée d'un trajet de type « AEC » vers l'émetteur e d'un camion de type m et de taille s .
$T_{REC_{e,m,s}}$	min par trajet	Durée d'un trajet de type « REC » vers l'émetteur e d'un camion de type m et de taille s .
TC	min par année	Disponibilité du temps de travail du conducteur pendant un an.
$CAC_{m,s}$	\$/camion	Coût d'acquisition amorti d'un camion de type m et de taille s .
COC_{AREC_s}	\$/min	Coût d'opération d'un camion de taille s pour un trajet de type « AREC ».
COC_{AEC_s}	\$/min	Coût d'opération d'un camion de taille s pour un trajet de type « AEC ».
COC_{REC_s}	\$/min	Coût d'opération d'un camion de taille s pour un trajet de type « REC ».
$\alpha_{r\acute{e}s\acute{u}dus \rightarrow brut}$		Coefficient qui convertit la quantité totale de résidus entrant dans l'usine de biométhanisation en la quantité totale de digestat brut distribuée. Il reflète le processus de transformation des résidus en du digestat brut (l'opération de séparation n'est pas utilisée ici)
$\alpha_{r\acute{e}s\acute{u}dus \rightarrow solide}$		Coefficient qui convertit la quantité totale de résidus entrant dans l'usine de biométhanisation en la quantité totale de digestat solide distribuée. Il reflète le processus de transformation des résidus en du digestat brut et l'opération de séparation.
β_1		Pente de la droite de régression caractérisant les coûts variables du séparateur.
β_2		Ordonnée à l'origine de la droite de régression caractérisant les coûts fixes du séparateur.
δ		Coefficient utilisé pour convertir une quantité de digestat solide en une quantité de digestat brut.

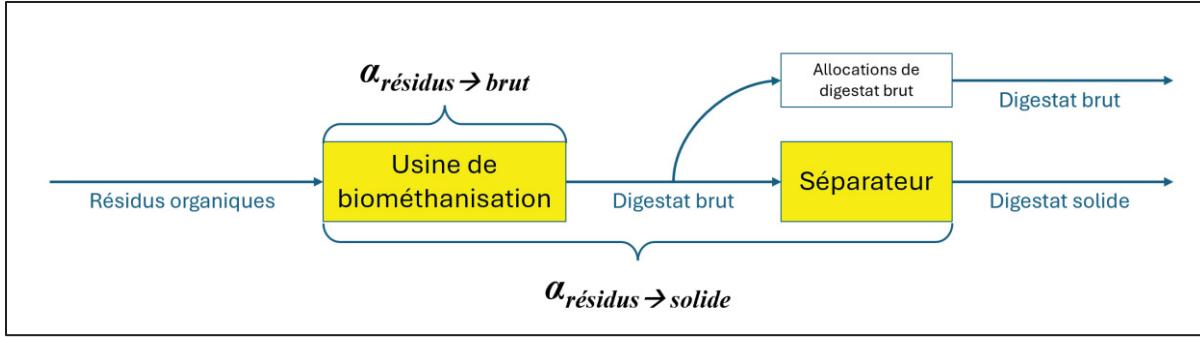


Figure 3.2. Explication détaillée de plusieurs paramètres

- **Fonction objectif**

La fonction objectif minimise le coût total des activités de transport et de séparation. La formulation de l'équation (3.1) est valide pour toutes les stratégies d'allocation utilisant un séparateur. Toutefois, il est important de signaler qu'à l'exception des stratégies ST05 et ST06 (où $D_{e,m}$ est une variable de décision et non un paramètre, voir la section 5.1.), l'équation de la régression linéaire qui caractérise les coûts liés au séparateur grâce aux coefficients β_1 et β_2 ne contient pas de variables de décision et n'impacte pas les décisions du modèle. Elle est toute de même ajoutée par défaut afin d'obtenir le coût total de la CA et pouvoir comparer sur une base commune les coûts totaux des différentes stratégies. Dans les stratégies ST08b et ST09 (voir la section 5.1.), aucun séparateur n'est requis, l'usine ne fait donc pas l'acquisition d'un séparateur et il n'y a pas de coûts fixes et variables liés au séparateur. Par conséquent, la droite caractérisant les coûts liés au séparateur est retirée de la fonction objectif dans les stratégies ST08b et ST09.

$$\begin{aligned}
 \text{Coût total} = & \sum_m \sum_s (N_{m,s} * CAC_{m,s}) \\
 & + \sum_e \sum_m \sum_s [(AREC_{e,m,s} * T_{AREC_{e,m,s}} * COC_{AREC_s}) \\
 & + (AEC_{e,m,s} * T_{AEC_{e,m,s}} * COC_{AEC_s}) + (REC_{e,m,s} \\
 & * T_{REC_{e,m,s}} * COC_{REC_s})] + \beta_1 * \sum_e D_{e,vrac solide} + \beta_2
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

- **Contraintes**

La demande doit être satisfaite; tous les ÉP doivent recevoir la quantité de digestat allouée.

$$\sum_s ((AREC_{e,m,s} + AEC_{e,m,s}) * C_{m,s}) = D_{e,m} \quad \forall e \in E_p, \forall m \in M \quad (3.2)$$

Tous les émetteurs de résidus doivent fournir l'ensemble des résidus organiques disponibles à l'usine de biométhanisation.

$$\sum_s ((AREC_{e,m,s} + REC_{e,m,s}) * C_{m,s}) = R_{e,m} \quad \forall e \in E, \forall m \in M \quad (3.3)$$

Le temps de disponibilité des conducteurs de camions ne peut pas être dépassé.

$$\begin{aligned} \sum_e (AREC_{e,m,s} * T_{AREC_{e,m,s}} + AEC_{e,m,s} * T_{AEC_{e,m,s}} + REC_{e,m,s} \\ * T_{REC_{e,m,s}}) \leq T * TC * N_{m,s} \quad \forall s \in S, \forall m \in M \end{aligned} \quad (3.4)$$

Le modèle mathématique doit respecter la balance des flux de la biométhanisation; une partie des résidus est consommée et transformée en biogaz, laissant un mélange liquide à la fin du procédé. Pour expliciter ces contraintes nous avons séparé les deux flux de digestat grâce à la variable $D_{e,m}$ et en séparant le flux de digestat brut ($m = citerne$) et le flux de digestat solide ($m = vrac solide$).

$$\alpha_{r\acute{e}s\acute{u}dus \rightarrow brut} * \sum_e \sum_m R_{e,m} = \sum_e D_{e,citerne} \quad (3.5)$$

$$\alpha_{r\acute{e}s\acute{u}dus \rightarrow solide} * \sum_e \sum_m R_{e,m} = \sum_e D_{e,vrac solide} \quad (3.6)$$

Les variables de décision sont des nombres continus ou des entiers positifs.

$$AREC_{e,m,s} \in \mathbb{R}^+, AEC_{e,m,s} \in \mathbb{R}^+, REC_{e,m,s} \in \mathbb{R}^+, N_{m,s} \in \mathbb{N}^+ \quad (3.7)$$

CHAPITRE 4

ANALYSES DE PRATIQUES LOGISTIQUES POUR RÉDUIRE LE COÛT TOTAL DE TRANSPORT

Ce chapitre du mémoire est une extension d'un article de conférence (Faure et al., 2025) que nous avons présenté à la conférence CoDIT 2025, qui s'est déroulée à Split (Croatie) en juillet 2025.

Dans ce chapitre nous étudions les pratiques logistiques (flotte hétérogène et retours en charge) permettant de réduire le coût total de transport. Dans un premier temps nous détaillons les quatre scénarios mis en place pour tester différentes configurations de pratiques logistiques. Ensuite nous expliquons la mise en application de ces scénarios et enfin nous présentons et commentons les résultats obtenus.

4.1 Présentation des différents scénarios logistiques étudiés

L'objectif est d'étudier l'impact de deux principales pratiques logistiques, à savoir la configuration de la flotte (soit homogène - les camions sont de la même taille -, ou hétérogène - les camions peuvent être de trois différentes tailles -), et la possibilité de réaliser des retours en charge, sur :

- 1) les coûts de transport,
- 2) les distances parcourues (en charge et à vide),
- 3) les émissions des GES, et
- 4) le taux d'utilisation des camions (de chaque type).

Pour les flottes hétérogènes, trois tailles de camions ont été retenues. Le plus petit (P) a une capacité de 35,5 tonnes métriques (notées « t » dans la suite du mémoire) le moyen (M) a une capacité de 40,5 t et le plus grand (G) a une capacité de 46,5 t. Dans le cas d'une flotte homogène, tous les camions sont de taille M. Quatre scénarios ont été considérés, comme le montre le Tableau 4.1, le scénario S01 étant le scénario de base.

Tableau 4.1. Scénarios

Nom	Type de flotte	Retour en charge autorisé
S01	Homogène	Non
S02	Hétérogène	Non
S03	Homogène	Oui
S04	Hétérogène	Oui

4.2 Application au cas d'étude réel

Spécifiquement, le modèle utilisé dans ce chapitre est l'une des variantes du modèle présenté dans le CHAPITRE 3 où $D_{e,m}$ est un paramètre. Les quatre scénarios considèrent une allocation du digestat calculée selon un principe de proportionnalité bien connu, c'est-à-dire que les ÉP se voient allouer une quantité de digestat proportionnelle à la quantité de résidus organiques qu'ils fournissent à l'usine. Cette stratégie d'allocation est celle qui est actuellement considérée par les gestionnaires de l'usine. Par conséquent la taille du séparateur sera identique dans l'ensemble des scénarios et n'a donc pas d'impact sur les décisions réalisées par le modèle ; il produit la quantité exacte de digestat solide requise.

Dans un premier temps nous avons étudié ces pratiques logistiques sur le cas réel. Pour ce faire, nous avons reçu de notre entreprise partenaire des informations et des données concernant, entre autres, les émetteurs de résidus organiques (localisation, type d'émetteur, quantité de résidus fournis, etc.), la localisation prévue de l'usine de biométhanisation, les types de camions considérés (les capacités de chaque camion sont issues du guide des normes sur les tailles de camion (Gouvernement du Québec, 2013), les vitesses de chargement et de déchargement des camions ainsi que la consommation de carburant de chaque camion ont été déterminées à partir des standards actuels). À partir de ces données, nous avons pu évaluer approximativement la durée de chaque trajet, les coûts d'acquisition amortis sur sept ans et les coûts d'exploitation des camions, en tenant compte de la consommation moyenne de carburant en charge et à vide, de la vitesse moyenne, du coût des consommables (pneus, freins, etc.), du

coût de l'assurance et des salaires des chauffeurs. Une partie de ces données est confidentielle. L'horizon de planification est fixé à un an.

4.3 Résultats

Le modèle a été résolu en utilisant le logiciel IBM ILOG CPLEX Optimization studio v12.8.0.0 sur un ordinateur de bureau équipé d'un processeur intel core i7-8700 @3,20 GHz et de 64 Go de RAM sous Windows 10. Les formulations mathématiques de tous les scénarios ont été résolues en moins de cinq secondes chacune.

4.3.1 Les économies potentielles

Comme anticipé, la valeur de la fonction objectif obtenue pour le scénario S01 est la plus élevée. Les économies potentielles en termes de pourcentages obtenues pour les scénarios S02, S03 et S04 sont présentées dans le Tableau 4.2, montrant une augmentation continue au fur et à mesure que les pratiques logistiques sont mobilisées.

Tableau 4.2. Économies réalisées par chaque scénario par rapport au cas de référence (S01) pour le cas réel

Scénario	S02	S03	S04
Économies	10,33%	15,38%	17,38%

La réduction des coûts du scénario (S04) par rapport au scénario de base (S01) est d'environ 17 %. Nous notons que les deux pratiques logistiques testées ici (à savoir l'utilisation d'une flotte hétérogène et la mise en place de retours en charge) n'ont pas le même impact en termes d'économies de coûts ; lorsque nous utilisons une flotte hétérogène et que nous ne mettons pas en place les retours en charge (S02), l'économie de coûts obtenue est d'environ 10 %. Lorsque la flotte est homogène mais que les retours en charges sont mis en place (S03), la réduction des coûts est d'environ 15 %. Les scénarios S03 et S02 améliorent tous deux le scénario de base en recourant à deux pratiques. Nous constatons que la pratique mise en œuvre dans S03 permet de réaliser des économies beaucoup plus importantes que la pratique du scénario S02, ce qui

montre que les retours en charge mènent à plus d'économies de coût que l'utilisation d'une flotte hétérogène dans le cas réel. En combinant les deux pratiques, nous obtenons une amélioration de 2 % par rapport à S03, de 7 % par rapport à S02 et de 17 % par rapport au scénario de base. En conclusion, la pratique des retours en charge a un impact plus important sur les économies de coûts que l'utilisation d'une flotte hétérogène, et la mobilisation des deux pratiques simultanément est encore plus efficace pour réduire le coût total du transport.

4.3.2 Distances parcourues

Outre les coûts, il est intéressant d'analyser le nombre total de kilomètres parcourus pour chaque scénario, ainsi que le nombre de kilomètres parcourus en charge et à vide (voir Figure 4.1).

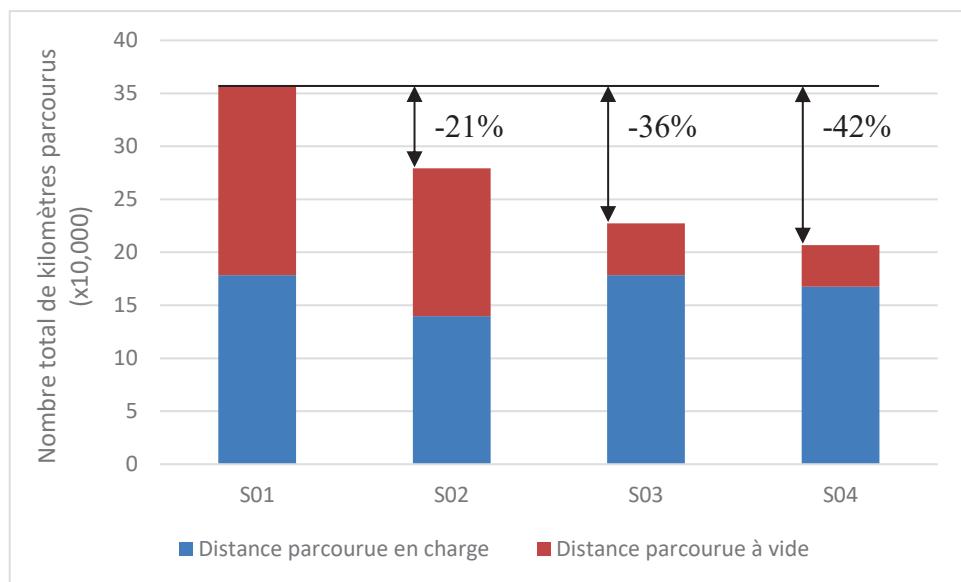


Figure 4.1. Distances totales parcourues en charge et à vide pour chaque scénario pour le cas réel

La Figure 4.1 montre que pour les scénarios S01 et S02, les retours en charge n'étant pas mis en place, les camions couvrent autant de distance lorsqu'ils sont chargés que lorsqu'ils sont vides.

Par rapport au scénario de base, le nombre de kilomètres parcourus dans le scénario S02 est plus faible avec une flotte hétérogène. Si nous examinons plus en détail la flotte de camions utilisée dans chaque scénario (voir le Tableau 4.4), nous constatons que dans le scénario S02, seuls les gros camions sont utilisés par rapport aux camions moyens utilisés dans le scénario S01. Comme les camions de grande taille ont une capacité de transport plus élevée, il n'est pas nécessaire d'effectuer autant de trajets qu'avec les camions moyens pour livrer la même quantité de digestat, et la flotte parcourt donc moins de kilomètres.

En comparant S03 et S01, nous pouvons voir que le nombre total de kilomètres parcouru en charge est presque identique. Cependant, le nombre total de kilomètres parcouru à vide est presque divisé par quatre dans S03, ce qui entraîne une réduction globale de 130 000 km de la distance totale parcourue. S03 présente une amélioration globale par rapport à S02. Dans le scénario S03, la distance parcourue en charge est plus importante, tandis que la distance parcourue à vide et la distance totale parcourue sont plus faibles que dans le scénario S02. Enfin, le scénario S04 est celui qui présente la plus courte distance parcourue à vide et la plus courte distance totale parcourue, avec près de 42 % de distance parcourue en moins par rapport au scénario S01.

4.3.3 Réduction des émissions de GES

Pour estimer la valeur des émissions de GES des camions, nous nous sommes basées sur le Tableau 4.3 obtenu auprès de notre partenaire industriel. Ce tableau présente les valeurs de consommation de carburant de chaque taille de camion en fonction de son chargement.

Tableau 4.3. Consommation de carburant de chaque camion selon sa taille en fonction du chargement

	P	M	G
Consommation carburant du camion (en charge) en L/km	0,44	0,50	0,56
Consommation par tonne total (en charge) en L/km/t	0,01240	0,01076	0,00983
Consommation par tonne utile (en charge) en L/km/t	0,01910	0,01526	0,01324
Consommation carburant du camion (à vide) en L/km	0,314	0,320	0,325
Consommation par tonne total (à vide) en L/km/t	0,02516	0,02339	0,02233
Émission de CO ₂ par litre de diesel consommé kg/L	2,31		

En utilisant ce tableau conjointement avec nos résultats obtenus précédemment nous obtenons la Figure 4.2

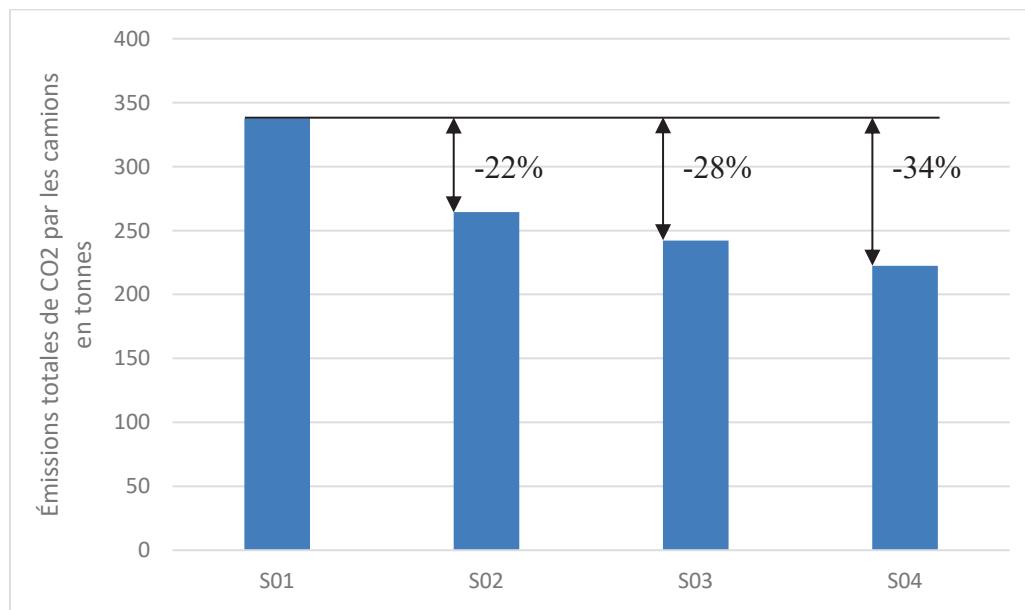


Figure 4.2. Émissions totales de GES par les camions pour chaque scénario pour le cas réel

La Figure 4.2 nous montre que les scénarios logistiques S02, S03 et S04 permettent de réduire la quantité totale de GES émise par l'ensemble des camions par rapport au scénario de référence S01.

Comme vu précédemment, dans le scénario S02, qui utilise une flotte de camions hétérogène, le nombre de kilomètres parcourus est inférieur de 21% par rapport au scénario de référence S01. Cette diminution se traduit par une réduction des émissions de GES des camions d'environ 22% par an.

Toutefois cela n'est pas valable pour le scénario S03. Comme pour le nombre de kilomètres parcourus, la mise en place de retours en charge permet une réduction plus significative des émissions totales de GES comparé à la mise en place d'une flotte hétérogène. En revanche, là où la réduction du nombre total de kilomètres parcouru atteignait 36%, pour les émissions de GES, la réduction est plus faible avec 28%. Enfin, le scénario S04 mêlant les deux pratiques logistiques, permet la réduction la plus significative des émissions de GES. Avec une estimation à 34% de réduction, S04 s'impose une nouvelle fois comme le scénario le plus performant.

4.3.4 Nombre et taux d'utilisation des camions

Les différentes configurations de flotte sélectionnées par le modèle comme étant les plus efficaces pour chaque scénario sont présentées dans le Tableau 4.4.

Tableau 4.4. Flotte sélectionnée pour chaque scénario pour le cas réel

Scénario	Nombre de camions					
	Camion-citerne			Camion de vrac solide		
	P	M	G	P	M	G
S01	-	4	-	-	2	-
S02	0	0	3	0	0	2
S03	-	3	-	-	2	-
S04	0	2	1	0	1	1

Dans ce modèle, l'économie d'échelle offerte par les camions de plus grande taille (M et G) compense, voire rembourse, le coût d'acquisition qui est plus élevé par rapport aux camions de taille P. Dans les scénarios S02 et S04, où les flottes peuvent être hétérogènes, les camions de grande taille (46,5 tonnes) sont privilégiés par rapport à leurs homologues de plus faible

capacité. Dans le scénario S02, seuls les camions de taille G sont sélectionnés et grâce à leur plus grande capacité, le nombre total de camions dans la flotte est réduit de 6 camions dans le scénario S01 et à 5 camions dans le scénario S02, ce qui diminue le coût total d'acquisition de la flotte. Le scénario S04 est le seul dans lequel plusieurs tailles de camions sont sélectionnées. Par rapport au scénario S03, le nombre total de camions est le même, mais un camion-citerne M et un camion de vrac solide M sont remplacés par des camions de taille G. Cette configuration optimise le nombre de trajets avec retour en charge et contribue ainsi à réduire davantage les distances parcourues à vide.

Nous nous sommes ensuite intéressés au taux d'utilisation de chacun de ces camions. La mesure des taux d'utilisation est basée sur le temps de travail net du conducteur. Un taux d'utilisation proche de 100 % pourrait poser un problème de faisabilité au niveau de la planification opérationnelle, où les trajets doivent être programmés quotidiennement. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.5.

Tableau 4.5. Taux d'utilisation moyen des camions par scénario pour le cas réel

Scénario	Nombre de camions					
	Camion-citerne			Camion de vrac solide		
	P	M	G	P	M	G
S01	-	87%	-	-	67%	-
S02	-	-	98%	-	-	59%
S03	-	85%	-	-	63%	-
S04	-	95%	56%	-	21%	93%

Le taux d'utilisation des camions-citernes dans le scénario S02 est particulièrement élevé avec une valeur de 98%. Notre modèle étant déterministe et ne tenant pas compte des contraintes et aléas possibles au niveau opérationnel, cela pourrait poser des problèmes. Il serait plus réaliste d'ajouter un camion à la flotte pour réduire l'utilisation moyenne des camions. Toutefois, cela entraînerait une augmentation du coût total du transport. Ces décisions pourraient donc être étudiées de manière plus approfondie au niveau de la planification opérationnelle.

4.4 Conclusion

Les économies potentielles sur les coûts de transport sont intéressantes dans le cas d'une flotte hétérogène combinée à des retours en charge, puisque cela permet d'économiser jusqu'à 17 % du coût total lié au transport et de réduire de 42 % la distance totale parcourue par les camions, ce qui contribue à la réduction des émissions de GES d'environ 34%.

Une flotte de camions hétérogène combinée à la mise en place de retours en charge s'impose donc comme le meilleur scénario pour réduire les coûts de transport, les distances parcourues (en charge et à vide) et les émissions de GES ainsi qu'en termes de taux d'utilisation des camions de chaque type. Par conséquent, la suite du mémoire va utiliser le scénario S04 comme base pour les prochaines analyses de notre recherche.

Dans ce chapitre, nous avons étudié deux pratiques logistiques différentes ; la mise en place d'une flotte hétérogène et de retours en charge. Ces deux pratiques nous apparaissaient particulièrement pertinentes pour réduire les coûts liés au transport dans notre CA en boucle fermée et nous les avons adoptées pour la suite de ce mémoire. En analysant les autres éléments de la CA nous avons cherché quels autres points pouvaient être améliorés afin de minimiser les coûts totaux de la CA. Nous avons identifié qu'il y a un potentiel inexploité dans les décisions liées aux allocations de digestat car ceux-ci ont un impact sur le dimensionnement du séparateur et par conséquent, sur les coûts totaux. La suite de ce mémoire étudiera donc plus en détail les décisions d'allocations et le dimensionnement du séparateur.

CHAPITRE 5

PROPOSITION ET ANALYSE DE STRATÉGIES D'ALLOCATION

Ce chapitre du mémoire est une version traduite et complétée de l'article de conférence accepté à CIE 52, qui se déroulera à Lyon (France) en octobre 2025.

Dans le CHAPITRE 4, les allocations de digestat utilisées pour chaque scénario logistique étudié suivent la même règle : ces allocations sont calculées au prorata du tonnage humide de résidus fournis par les ÉP. Dans ce chapitre nous allons définir et présenter d'autres stratégies d'allocation du digestat dans le but d'étudier l'influence de ces stratégies d'allocation sur différents indicateurs de performance à savoir les gains potentiels, le nombre de kilomètres parcourus, les émissions de GES et la flotte de camion nécessaire.

5.1 Présentation des stratégies d'allocation

Les stratégies d'allocation envisagées se répartissent en trois catégories distinctes :

- 1) les allocations statiques,
- 2) les allocations dynamiques et
- 3) les allocations « extrêmes ».

Les allocations statiques sont entièrement calculées en amont du modèle selon des critères spécifiques qui seront présentés. Les résultats de ces allocations prédéterminées sont ensuite imposés comme des paramètres dans le modèle mathématique, ce qui a un effet sur les coûts totaux de la CA. Pour les allocations dynamiques et « extrêmes », une partie ou l'ensemble des allocations sont déterminées directement par le modèle mathématique selon des critères spécifiques qui seront présentés également. Le Tableau 5.1 résume les différentes stratégies considérées dans notre étude.

Tableau 5.1. Stratégies d'allocation étudiées

Nom	Type	Définition
ST01	Statique	Prorata du tonnage de matière humide (stratégie de référence)
ST02	Statique	Prorata du tonnage de matière sèche
ST05	Dynamique	Coûts totaux de la CA (transport et séparateur) minimisés
ST07a	Extrême	Distribution de digestat solide jusqu'à ce que les capacités maximales de stockage des EP soient atteintes (maximisation de la capacité du séparateur), distribution de l'excédent de digestat brut en minimisant les coûts de transport.
ST07b	Extrême	Distribution de digestat solide jusqu'à ce que les capacités maximales de stockage des EP soient atteintes, évacuation de l'excédent vers l'usine de traitement des eaux usées.
ST08a	Extrême	Distribution de digestat brut jusqu'à ce que les capacités maximales de stockage des EP soient atteintes, transformation de l'excédent de digestat brut en digestat solide à l'aide d'un plus petit séparateur et distribution du digestat solide en minimisant les coûts de transport.
ST08b	Extrême	Distribution de digestat brut jusqu'à ce que les capacités maximales de stockage des EP soient atteintes, évacuation de l'excédent vers l'usine de traitement des eaux usées.
ST09	Extrême	Évacuation de l'ensemble du digestat vers l'usine de traitement des eaux usées.

La stratégie de référence appelée ST01 fait partie des stratégies d'allocation statiques. Dans cette stratégie, les allocations sont calculées de manière à ce que chaque EP obtienne une quantité de digestat proportionnelle à la quantité de résidus organiques qu'il a fournie. Nous considérons ici le tonnage de matière humide comme unité de mesure, car la plupart des résidus organiques fournis contiennent beaucoup d'eau. La seconde stratégie, appelée ST02, est basée sur le fait que dans le processus de biométhanisation, seule la matière organique peut être dégradée et convertie en GNR. Or, les résidus organiques fournis par les émetteurs sont tous hétérogènes en qualité (plus une matière organique a un potentiel méthanogène élevé plus cette

matière produira du GNR lors du processus de biométhanisation) et en quantité. Les résidus pauvres en eau et riches en matière organique contribueront donc, en moyenne, davantage au processus de production de GNR que les résidus très aqueux. Dans cette stratégie, les allocations sont calculées telles que chaque ÉP obtienne une quantité de digestat dont la matière sèche est proportionnelle à la matière sèche contenue dans les résidus organiques qu'il fournit, les taux de siccité (taux de matière sèche) sont connus à l'avance. L'objectif de cette allocation est de récompenser les émetteurs dont les résidus sont plus performants (haut potentiel méthanogène) dans le processus de biométhanisation. Les stratégies ST01 et ST02 sont deux manières distinctes de définir l'équité. Alors que la stratégie ST01 a le mérite d'être la plus facile à comprendre, la stratégie ST02 explicite la perspective de contribution individuelle différenciées à la production de GNR dans le processus de biométhanisation et récompense les émetteurs qui y contribuent le plus, à la fois en terme de quantité que de potentiel méthanogène unitaire de leur résidu organique.

La stratégie suivante est dite « dynamique », c'est-à-dire que les allocations sont déterminées par le modèle mathématique en même temps que les autres décisions. La stratégie ST05 est purement économique. Le modèle mathématique trouve les allocations qui minimisent les coûts totaux de la CA. Tant que la totalité du digestat produit est allouée et distribuée aux ÉP, cette stratégie peut priver complètement un ÉP de digestat s'il est géographiquement plus éloigné que tous les autres pour maximiser les économies liées au transport.

Dans ces deux cas, une variante du modèle mathématique présenté dans le CHAPITRE 3 doit être utilisé spécifiquement : $D_{e,m}$ devient une variable de décision et deux contraintes doivent être ajoutées en supplément des autres :

Les allocations de digestat ne doivent pas dépasser les capacités de stockage maximale de tous les ÉP :

$$D_{e,m} \leq L_{e,m}, \forall e \in E_p, \forall m \in M \quad (5.1)$$

Tout le digestat produit doit être alloué aux ÉP. Le modèle détermine les allocations de digestat brut et de digestat solide conjointement, la somme de ces allocations de digestat brut et de

digestat solide doit être égale à la somme de tout le digestat obtenu à partir des résidus organiques fournis:

$$\begin{aligned}
 & \sum_e (D_{e,citerne} + \delta * D_{e,vrac\ solid}) \\
 &= \sum_e \sum_m R_{e,m} * (\alpha_{r\acute{e}s\acute{u}dus\rightarrow br\acute{u}t} + \delta * \alpha_{r\acute{e}s\acute{u}dus\rightarrow sol\acute{e}d}) \tag{5.2}
 \end{aligned}$$

Enfin, nous avons voulu explorer deux stratégies reflétant des décisions extrêmes (ST07a et ST07b) à partir d'une base similaire. L'hypothèse commune est que les camions de vrac solide sont moins coûteux à acquérir et à exploiter que les camions-citernes. Par conséquent, ces stratégies explorent le postulat selon lequel le digestat brut est transformé en digestat solide afin de distribuer autant de digestat solide que possible aux émetteurs de résidus solides jusqu'à ce que la capacité de stockage des EP soit atteinte. Ces deux stratégies sont celles où le séparateur sera le plus utilisé et aura sa taille maximale. Les coûts liés au séparateur seront plus élevés dans ces deux stratégies que dans les autres. Le digestat brut excédentaire peut être géré de deux manières différentes. Dans la stratégie ST07a, le digestat brut est distribué aux preneurs de digestat brut de manière à minimiser les coûts liés au transport. Les allocations de digestat brut sont alors déterminées par le modèle mathématique. Dans la stratégie ST07b, le digestat brut est évacué vers l'usine de traitement des eaux usées. Il n'est donc pas distribué et est perdu pour la CA.

Les stratégies ST08a et ST08b supposent qu'étant donné qu'un grand séparateur est trop coûteux, il est préférable de distribuer autant de digestat brut que possible jusqu'à ce que les capacités de stockage des émetteurs de résidus liquides soient atteintes. Le digestat brut excédentaire est alors traité de deux manières différentes. Dans la stratégie ST08a, l'usine de biométhanisation utilise toujours un séparateur. Le digestat brut excédentaire est alors transformé en digestat solide et est distribué aux preneurs de digestat solide de manière à minimiser les coûts liés au transport. Les allocations de digestat solide sont alors déterminées par le modèle mathématique. Dans cette stratégie le séparateur est donc plus petit que dans les stratégies ST07a et ST07b et les coûts qui y sont liés sont plus faibles. Dans la stratégie ST08b,

le digestat brut est évacué vers l'usine de traitement des eaux usées. Il n'est donc pas distribué et est perdu pour la CA.

La stratégie ST09 est simple. Il n'y a pas de distribution du digestat, et tout le digestat est déchargé directement dans la station d'épuration. Dans cette stratégie, l'usine de biométhanisation est considérée comme ayant pour seule fonction de produire du GNR. Ce traitement du digestat ne coûte rien dans le cas réel puisque l'usine de biométhanisation à l'étude est directement reliée à une usine de traitement des eaux usées. Dans un cas plus général il faudrait prendre en compte les coûts liés au transport du digestat brut vers l'usine de traitement des eaux usées et, potentiellement, un coût pour le traitement.

5.2 Résultats (cas d'étude réel)

Les données utilisées pour simuler les différentes stratégies d'allocation sont issues de la même collecte de données qu'à la section 4.2. De même, la modélisation et les simulations ont été effectuées sur le même logiciel et le même ordinateur que dans la section 4.3. Le programme utilisé pour ST05 est présenté en ANNEXE I.

Toutes les stratégies d'allocation vont être évaluées sur les mêmes critères de performance que ceux utilisés dans le CHAPITRE 4. De plus, toutes les stratégies d'allocation utilisent le scénario S04 qui met en place conjointement les deux pratiques logistiques (flotte hétérogène et retours en charge) étudiées dans le CHAPITRE 4.

5.2.1 Les économies potentielles

Le Tableau 5.2 présente les économies réalisées par les différentes stratégies d'allocation par rapport à la stratégie de référence ST01 pour le cas réel.

Tableau 5.2. Économies réalisées par chaque stratégie en comparaison à la stratégie de référence (ST01) pour le cas réel

Stratégie d'allocation	Économies totales
ST02	2,57%
ST05	3,05%
ST07a	3,05%
ST07b	54,48%
ST08a	-2,13%
ST08b	18,11%
ST09	61,42%

À première vue, c'est la stratégie ST09 qui offre les économies les plus importantes, avec plus de 61 % d'économies. Toutefois, il convient de rappeler que, par définition, les stratégies ST07b, ST08b et ST09 n'allouent pas la totalité du digestat, puisqu'une partie ou la totalité de celui-ci est considérée comme excédentaire et est rejetée directement dans la station d'épuration des eaux usées. En ne distribuant pas une partie du digestat et en n'investissant pas dans un séparateur, les économies en termes de nombre de camions utilisés et du nombre de kilomètres parcourus sont substantielles.

Parmi les stratégies qui allouent tout le digestat (ST02, ST05, ST07a et ST08a), les meilleures sont ST05 et ST07a (suivies de près par ST02), avec des économies d'un peu plus de 3% par rapport à la stratégie de référence (ST01). En effet, dans l'étude de cas réel, les décisions prises par le modèle pour atteindre l'option la plus économique dans la stratégie ST05 ont donné des allocations de digestat identiques à celles calculées en amont avec la stratégie ST07a, qui vise à maximiser les allocations de digestat solide avant de distribuer le digestat brut restant. Ce résultat semble valider que l'hypothèse selon laquelle, dans le cas réel, il est plus intéressant de distribuer du digestat solide en grande quantité car les camions de vrac solide sont moins coûteux à acquérir et à opérer que les camions-citernes et ce malgré les coûts engendrés par l'acquisition et l'opération d'un séparateur. Cette hypothèse signifie que l'augmentation des coûts liés à un plus grand séparateur est inférieure aux gains réalisés par l'acquisition et

l'opération des camions. Toutefois, seules de petites économies par rapport à ST01 sont réalisées par les stratégies ST02, ST05 et ST07a qui allouent l'ensemble du digestat.

La stratégie ST08a alloue elle aussi l'ensemble du digestat mais ne permet pas de réaliser d'économies. Nous observons des pertes de l'ordre de 2,13% par rapport à ST01. Ceci s'explique par une utilisation plus importante de camion-citerne et la nécessité d'investir dans un séparateur pour allouer l'excédent de digestat brut sous forme de digestat solide. La Figure 5.1 permet de visualiser la répartition des coûts totaux de la CA par stratégie.

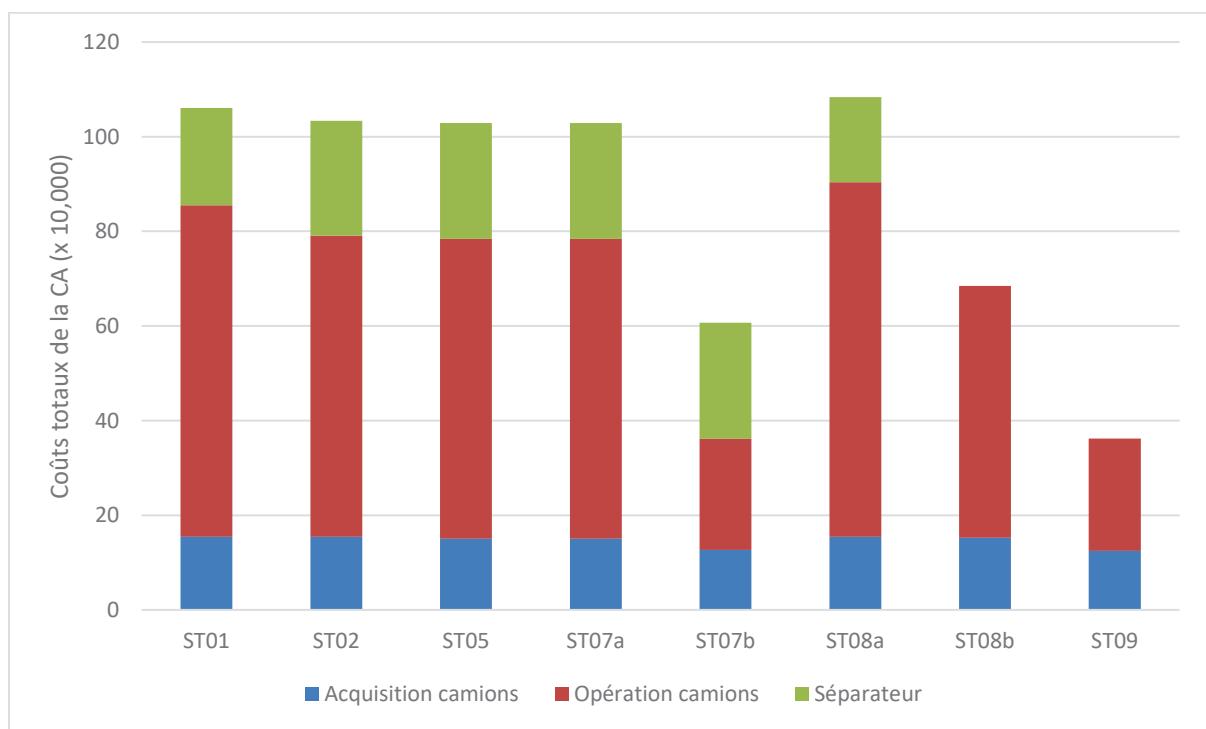


Figure 5.1. Répartition des coûts totaux de la CA par stratégie pour le cas réel

La Figure 5.1 montre que tous les coûts associés au séparateur sont inférieurs aux coûts d'opération des camions pour toutes les stratégies qui amènent à l'utiliser, à l'exception de la stratégie ST07b. En effet, dans la stratégie ST07b le digestat solide est distribué jusqu'à ce que les capacités maximales de stockage des EP soient atteintes, et l'excédent est évacué vers l'usine de traitement des eaux usées. Cette stratégie utilise donc le plus gros séparateur qui est le plus coûteux tandis que le nombre de trajets à effectuer est plus faible : seuls quatre EP sur

les dix souhaitent recevoir du digestat solide et les allocations de digestat solide sont plus faibles car la matière distribuée est plus dense en matière organique et donc elles requièrent moins de trajets par les camions.

5.2.2 Distances parcourues

En analysant la Figure 5.2, qui montre les distances totales parcourues par les camions à charge et à vide, nous pouvons voir que la stratégie ayant le kilométrage le plus élevé est ST08a, avec plus de 220 000 km en un an, tandis que la stratégie ayant le kilométrage le plus faible est ST09, avec un peu moins de 150 000 km. Cependant, la plupart des stratégies (ST01, ST02, ST05 et ST07a) présentent des distances totales parcourues similaires, comprises entre 188 000 km et 207 000 km. Cette faible variation explique en outre les économies des coûts de transport limitées réalisées grâce aux stratégies d'allocation. Les stratégies ST08a et ST08b sont les seules stratégies à dépasser la distance totale parcourue par les camions dans la stratégie de référence ST01. Cela s'explique par le fait que distribuer le digestat brut jusqu'à ce que les capacités maximales de stockage des EP soient atteintes entraîne un nombre de trajets à effectuer plus important que pour ST01.

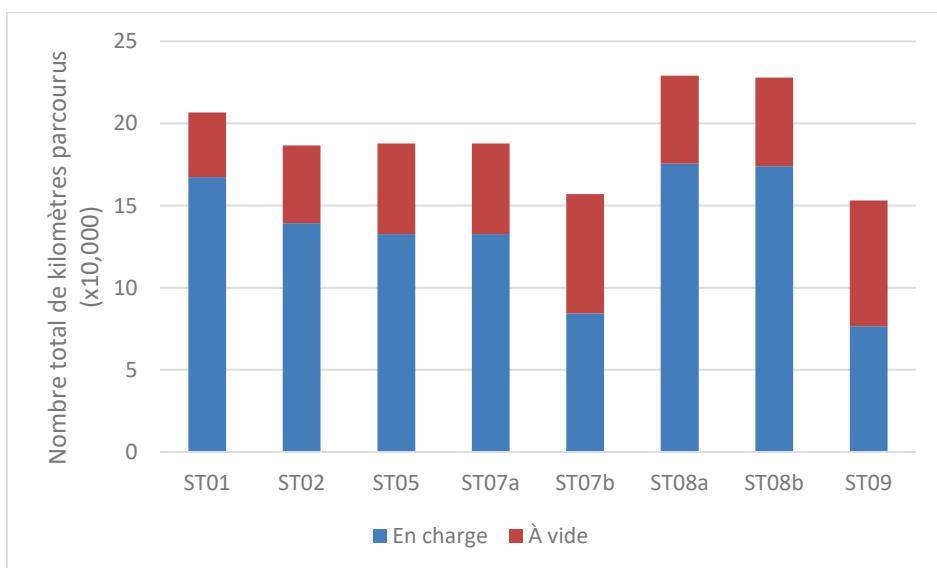


Figure 5.2. Distances totales parcourues par les camions en charge et à vide pour chaque stratégie pour le cas réel

5.2.3 Réduction des émissions de GES

Pour estimer la réduction des émissions de GES pour les différentes stratégies d’allocations nous avons procédé de manière identique à la partie 4.3.3. Dans un souci de clarté nous avons décidé de consigner les résultats dans le Tableau 5.3 ci-dessous qui compare les estimations de réduction de GES par rapport à la stratégie de référence (ST01).

Tableau 5.3. Comparaison des émissions de GES par rapport à la stratégie de référence (ST01) pour le cas réel

Stratégie d’allocation	Variation des émissions de GES
ST02	-11,9%
ST05	-12,8%
ST07a	-12,8%
ST07b	-32,0%
ST08a	+9,0%
ST08b	+8,3%
ST09	-34,8%

Ces résultats corroborent ceux obtenus dans la section 5.2.2. Les stratégies qui permettent de réduire au maximum les GES sont les stratégies qui ne distribuent pas l’ensemble du digestat (ST07b et ST09). Pour les stratégies qui distribuent l’ensemble du digestat (ST02, ST05, ST07a), les réductions des GES émis sont de l’ordre de 12%. Ces réductions sont moins importantes que celles observées dans la partie 4.3.3 ce qui signifie que les changements dans les stratégies d’allocation ont moins d’impact sur la réduction des GES que la mise en place des deux pratiques logistiques testées dans le CHAPITRE 4. Enfin seules deux stratégies (ST08a et ST08b) entraînent une augmentation des émissions de GES. Cela s’explique par l’augmentation du nombre de kilomètres parcourus observée en 5.2.2.

5.2.4 Nombre et taux d'utilisation des camions

Le Tableau 5.4, qui présente les flottes sélectionnées pour la mise en œuvre de chaque stratégie, montre que le nombre total de camions requis varie très légèrement, avec trois camions-citernes et deux camions de transport de vrac sec utilisés dans la plupart des scénarios. Les seules stratégies qui s'écartent de la règle sont ST07b et ST09. Ces deux stratégies ne distribuent pas tout le digestat disponible. Cependant, le mélange des tailles de camions composant la flotte de camions varie principalement en termes d'utilisation de camions-citernes.

Tableau 5.4. Flotte de camion retenue pour chaque stratégie pour le cas réel

Stratégie d'allocation	Nombre de camion					
	Camion-citerne			Camion de vrac solide		
	P	M	G	P	M	G
ST01	-	2	1	-	1	1
ST02	-	2	1	-	1	1
ST05	1	1	1	-	1	1
ST07a	1	1	1	-	1	1
ST07b	-	-	2	-	1	1
ST08a	-	2	1	-	1	1
ST08b	-	2	1	1	-	1
ST09	-	-	2	1	-	1

La composition de la flotte de camions sélectionnée pour chaque stratégie est également analysée en fonction du taux d'utilisation moyen de chaque camion (voir le Tableau 5.5). Comme mentionné précédemment, un taux d'utilisation des camions de 100 % pourrait entraîner des problèmes opérationnels. De nombreuses stratégies atteignent ce taux d'utilisation de 100 %, notamment les stratégies ST05, ST07a, ST08a, ST08b et ST09. Si tous les camions d'un type donné étaient utilisés à 100 %, il serait nécessaire d'ajouter au moins un camion (a priori, de petite taille) pour tenir compte des considérations opérationnelles. Heureusement, dans chacune de ces stratégies, il existe au moins un camion capable de

distribuer le même type de digestat, qui n'est pas utilisé à 100 %, et qui pourrait être utilisé pour réduire la charge des camions utilisés à 100 % et atteindre un meilleur équilibre du taux d'utilisation entre les camions de la même flotte, à un coût plus élevé, évitant ainsi la nécessité d'ajouter d'autres camions. Ajouter une contrainte pourrait aider à ne pas dépasser un certain taux d'utilisation.

Tableau 5.5. Taux d'utilisation des camions pour chaque stratégie pour le cas réel

Stratégie d'allocation	Nombre de camion					
	Camion-citerne			Camion de vrac solide		
	P	M	G	P	M	G
ST01	-	95%	56%	-	21%	94%
ST02	-	65%	78%	-	31%	90%
ST05	9%	100%	100%	-	31%	90%
ST07a	9%	100%	100%	-	31%	90%
ST07b	-	-	67%	-	31%	90%
ST08a	-	95%	88%	-	10%	100%
ST08b	-	95%	88%	2%	-	100%
ST09	-	-	67%	2%	-	100%

5.3 Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons défini et détaillé plusieurs stratégies d'allocation de digestat différentes de la stratégie de référence (ST01) qui définit les allocations de digestat en appliquant le principe de proportionnalité au tonnage humide de résidus fourni par chaque EP. Nous avons ensuite testé ces stratégies sur différentes mesures : les gains potentiels, le nombre de kilomètres parcourus, les émissions de GES et le dimensionnement des flottes de camions. Dans l'ensemble aucune stratégie ne s'est imposée face aux autres. Toutefois, au niveau des gains potentiels les stratégies ST02, ST05 et ST07a distribuant l'ensemble du digestat permettent une réduction de l'ordre de 3% sur l'ensemble des coûts de la CA, une réduction de 9% sur les distances totales parcourues et une réduction de 12% sur les émissions de GES.

Les stratégies ST07b, ST08b et ST09 permettent de plus grandes économies et des réductions importantes dans les distances parcourues et les émissions de GES mais ne distribuent pas entièrement le digestat produit par l'usine de biométhanisation ce qui n'est pas acceptable du point de vue des ÉP. Enfin la stratégie ST08a distribue certes l'ensemble du digestat mais est moins avantageuse que la stratégie de référence ST01 pour l'ensemble des indicateurs de performance testés.

Dans notre étude de cas, tous les émetteurs sont relativement proches de l'usine de biométhanisation, avec une distance moyenne de 30 km, alors que la plupart des configurations d'usines de biométhanisation ont des distances entre les fournisseurs, les clients et l'usine d'environ 100 km, c'est-à-dire trois fois plus (*Fuel LCA model methodology*, 2020). Les faibles distances dans le réseau logistique de notre étude de cas réel conduisent notre modèle d'optimisation à générer des économies de coûts de transport limitées, c'est-à-dire que les économies de coûts de transport associées aux différentes stratégies sont faibles et, par conséquent, les économies de coûts totaux sont également faibles. C'est pourquoi dans le CHAPITRE 7 nous avons construit et étudié un cas fictif où les distances moyennes entre les ÉP et l'usine de biométhanisation atteignent 100 km pour venir compléter ces résultats.

Dans notre recherche de stratégies d'allocations plus équitables, nous avons identifié deux pistes distinctes qui nous permettraient de créer un mécanisme favorisant la conservation de la volonté de collaboration entre les ÉP. La première consiste à mettre en place un mécanisme de compensation financière qui a pour but d'utiliser les gains issus de la mise en place des nouvelles stratégies d'allocation pour rémunérer les ÉP qui recevraient moins de digestat qu'avec la stratégie de référence. La seconde est de mettre en place une stratégie permettant de trouver le meilleur équilibre entre une allocation économique et une allocation équitable. Dans le chapitre suivant, nous allons tour à tour étudier ces deux pistes.

CHAPITRE 6

RECHERCHE DE L'ÉQUILIBRE

Dans ce chapitre, nous explorons deux pistes de solutions dans le but d'aboutir à un équilibre entre des allocations équitables et des allocations économiques. Dans un premier temps, nous étudions un mécanisme de compensation financière qui utilise les gains de la CA permis par les stratégies d'allocation détaillées dans le CHAPITRE 5 afin de compenser financièrement les ÉP qui reçoivent moins de digestat que dans la stratégie d'allocation de référence ST01. Nous détaillons sa conception, sa mise en place et les résultats obtenus. Dans un second temps nous étudions une nouvelle stratégie d'allocation multicritère qui détermine les allocations de digestat en équilibrant équité et économie en fonction des poids accordés à chaque objectif. Nous détaillons sa conception, sa mise en place et la recherche des optimums de Pareto.

6.1 Création d'un mécanisme de compensation financière

À la suite des résultats obtenus dans le CHAPITRE 5, nous avons remarqué que, dans certaines stratégies, les changements d'allocation étaient tels que certains ÉP étaient délaissés et recevaient beaucoup moins voire plus du tout de digestat. Comme mentionné précédemment, le digestat est un fertilisant très convoité par les exploitations agricoles et l'un des objectifs de ce projet de recherche est de créer une CA en boucle fermée. Si un ÉP se sent lésé, il pourrait perdre confiance et se retirer, ce qui nuirait à la viabilité et à la pérennité du projet. D'où la motivation de ce mécanisme de compensation financière.

L'idée est de voir s'il est possible de mettre en place un mécanisme de compensation qui permettrait à la CA de réduire ses coûts tout en permettant à chaque ÉP de disposer de fertilisant naturel (digestat) ou chimique (acheté aux compagnies agricoles) en quantité suffisante. En priorisant les gains économiques avec une stratégie ST05, la CA peut économiser sur ses dépenses escomptées pour le cas de référence ST01. De plus, certains ÉP vont recevoir plus de digestat qu'attendu et, d'après notre partenaire industriel, le digestat étant

un fertilisant convoité, ces ÉP seraient capables de payer/rembourser à la CA une partie, ou l'ensemble de la valeur du digestat excédent qu'il reçoit. À l'inverse, un ÉP lésé doit pouvoir fertiliser ses terres agricoles, la CA doit lui fournir une compensation financière suffisante pour acheter auprès de compagnies de fertilisant et se faire livrer la quantité qu'il s'attendait à recevoir sous forme de digestat.

6.1.1 Mise en place du mécanisme de compensation financière

Nous avons mis en place le mécanisme de compensation suivant :

- Les ÉP recevant un excédent de digestat paient à la CA 90% de la valeur marchande de cet excédent.
- Les ÉP recevant moins de digestat qu'attendu reçoivent une compensation de la part de la CA à hauteur de 100% de la valeur marchande de la quantité manquante.

Les valeurs marchandes de l'excédent et des quantités manquantes sont calculées par rapport aux allocations prévues dans la stratégie de référence ST01. Les valeurs marchandes du digestat brut et du digestat solide ne sont pas identiques dû à la concentration plus ou moins importante du digestat en azote et en phosphore en fonction de la forme sous laquelle il est distribué. Nous avons donc défini deux nouveaux paramètres dans le Tableau 6.1.

Tableau 6.1. Paramètres liés au mécanisme de compensation financière

Notation générale	Sous-notations	Définition	Valeur marchande en \$ par tonne humide
V_m	V_{brut}	Valeur du digestat brut calculé à partir de sa composition d'azote et de phosphore	17,02
	V_{solide}	Valeur du digestat solide calculé à partir de sa composition d'azote et de phosphore	64,9

Pour les stratégies ST02, ST07a, ST07b, ST08a, ST08b et ST09, les allocations sont calculées en amont du modèle. La mise en place de ce mécanisme de compensation financière ne jouera pas de rôle sur les décisions réalisées par le modèle d'optimisation. Pour obtenir le coût total de la CA après la mise en application du mécanisme de compensation financière, il faut repartir des résultats obtenus dans le CHAPITRE 5. Nous avons alors calculé manuellement les valeurs marchandes liées à l'excédent et aux quantité manquantes de digestat pour chaque ÉP comme montré dans le Tableau 6.2 servant d'exemple :

Tableau 6.2. Exemple de calcul à effectuer pour appliquer le mécanisme de compensation financière à une stratégie d'allocation quelconque nommée ST0X

ÉP	Allocations de ST01 (en tmh/an)		Allocations de ST0X (en tmh/an)		Différence entre les allocations ST0X et ST01 (en tmh/an)	
	Brut	Solide	Brut	Solide	Brut	Solide
1	0	5	0	4	0	-1
2	5	0	5	0	0	0
3	5	0	7	0	2	0

En calculant la différence entre les allocations de ST0X et de ST01 nous obtenons :

- ÉP 1 doit recevoir une compensation de 1 tmh/an de digestat solide de valeur :

$$V_1 = -1 * V_{solide}$$

- ÉP 2 n'est pas impacté par le mécanisme de compensation financière

$$V_2 = 0$$

- ÉP 3 doit rembourser un excédent de 2 tmh/an de digestat brut

$$V_3 = 90\% * 2 * V_{brut}$$

La valeur de la compensation pour toute la CA est donc :

$$V_{compensation} = V_1 + V_2 + V_3 = -V_{solide} + 90\% * 2 * V_{brut}$$

La valeur de la compensation est ensuite soustraite à la valeur des coûts totaux de la CA pour cette stratégie.

En revanche, pour la stratégie ST05, la mise en place de ce mécanisme de compensation financière aura un impact direct sur les décisions effectuées par le modèle d'optimisation. Il faut donc réaliser des modifications dans le modèle.

Tableau 6.3. Paramètres supplémentaires pour la mise en place d'un mécanisme de compensation financière

Notation	Définition
$ST01_{e,m}$	Quantité de digestat allouée à l'émetteur e transporté par un camion de type m pour la stratégie d'allocation ST01.

Tableau 6.4. Variable de décision supplémentaire pour la mise en place d'un mécanisme de compensation financière

Notation	Définition
B_m	Booléen qui prend la valeur 1 quand la différence entre $D_{e,m}$ et $ST01_{e,m}$ est négative et prend la valeur 0 quand cette différence est positive : $B_m = \begin{cases} 1 & \text{si } (D_{e,m} - ST01_{e,m}) < 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

La fonction objectif prend en compte le mécanisme de compensation financière grâce à la formulation mathématique suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{Coût total} = & \sum_m \sum_s (N_{m,s} * CAC_{m,s}) \\
 & + \sum_e \sum_m \sum_s [(AREC_{e,m,s} * T_{AREC_{e,m,s}} * COC_{AREC_s}) \\
 & + (AEC_{e,m,s} * T_{AEC_{e,m,s}} * COC_{AEC_s}) + (REC_{e,m,s} \\
 & * T_{REC_{e,m,s}} * COC_{REC_s})] + \beta_1 * \sum_e D_{e,vrac solide} + \beta_2 \\
 & - \sum_e \sum_m [(D_{e,m} - ST01_{e,m}) \\
 & * ((1 - B_m) * 0.9 * V_m + B_m * V_m)]
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

Cette écriture permet d'inclure la variable de décision $D_{e,m}$ dans le mécanisme de compensation financière : lorsque $D_{e,m}$ est inférieure au paramètre $ST01_{e,m}$ la fonction objectif va être augmentée de la valeur de la différence multipliée par la valeur de la quantité de digestat manquante. À l'inverse, lorsque $D_{e,m}$ est supérieure au paramètre $ST01_{e,m}$, la fonction objectif va être diminuée de la valeur différence multipliée par 90% de la valeur de la quantité de digestat en excès.

6.1.2 Résultats pour le cas d'étude réel

Nous pouvons visualiser les résultats de ce mécanisme de compensation financière au niveau des économies potentielles de la CA sur le Tableau 6.5.

Tableau 6.5. Économies réalisées par chaque stratégie en comparaison à la stratégie de référence (ST01) sans et avec mécanisme de compensation financière pour le cas réel

Stratégies d'allocation	Économie totale sans compensation	Économie totale avec compensation
ST02	2,57 %	-0,51 %
ST05	3,05 %	0,58 %
ST07a	3,05 %	-0,37 %
ST07b	54,48 %	-21,68 %
ST08a	- 2,13 %	-4,83 %
ST08b	18,11 %	-20,25 %
ST09	61,42 %	-67,09 %

Nous constatons que les stratégies qui apparaissaient comme les plus intéressantes dans le cas initial (sans mise en place de compensation), à savoir ST07b, ST08b et ST09 sont les pires dans le cas avec compensation financière. À part ST05 dont l'objectif est de minimiser l'ensemble des coûts de la CA, toutes les autres stratégies se sont révélées plus coûteuses que la stratégie de référence ST01. Il faut toutefois nuancer ces résultats car l'ensemble des écarts entre ST01 et ST02, ST05 et ST07a sont inférieurs à 1%. Cela signifie que ces quatre stratégies sont à peu près équivalentes d'un point de vue économique. Les décisions à prendre

reviendraient donc soit à considérer quelle stratégie d'allocation est la plus équitable, soit évaluer les stratégies sur d'autres critères comme les émissions de GES.

6.2 Création d'une stratégie multicritère équilibrant économie et équité

6.2.1 Mise en place d'une stratégie multicritère équilibrant économie et équité

La deuxième piste que nous avons explorée afin d'aboutir à un équilibre entre économie et équité est la mise en place d'une nouvelle stratégie d'allocation dynamique ST06. La stratégie ST06 a pour but d'équilibrer les résultats de la stratégie ST05 et de la stratégie ST01. Il s'agit de trouver un compromis entre une allocation purement économique et une allocation équitable. ST06 est traduite dans le modèle mathématique par une optimisation multicritère qui vient faire l'arbitrage entre des allocations équitables (ST01) et l'allocation économique (ST05).

Pour réaliser cet arbitrage, ST06 doit être une optimisation multicritère :

- Critère 1 : minimiser les coûts totaux de la CA
- Critère 2 : minimiser les écarts entre les allocations calculées et les allocations de référence considérées comme équitables (ST01)

Pour le critère 1, il suffit de réutiliser la fonction objectif détaillée dans la partie 3.2. que l'on notera F_1 pour la suite. Pour l'objectif 2, il faut concevoir une nouvelle fonction qu'on nommera F_2 et qui calcule les écarts entre deux allocations.

• Variables de décision supplémentaires

Les variables utilisées sont définies dans le Tableau 6.6:

Tableau 6.6. Variable de décision supplémentaire pour la mise en place d'une stratégie équilibrant économie et équité

Notation	Définition
$G_{e,m}$	Écart entre l'allocation calculée et l'allocation de référence (idéale) pour l'émetteur e et pour du digestat (transporté dans un camion) de type m .

- **Fonction objectif F2**

Cette fonction vise à minimiser les écarts entre les allocations :

$$F2 = \sum_e G_{e,citerne} + \delta * \sum_e G_{e,vrac solide} \quad (6.2)$$

- **Contraintes supplémentaires**

La variable $G_{e,m}$ doit prendre uniquement des valeurs positives ou nulles afin que la fonction renvoie l'écart absolu entre l'allocation calculée et l'allocation de référence :

$$G_{e,m} \geq D_{e,m} - ST01_{e,m}, \quad \forall e \in E_p, \forall m \in M \quad (6.3)$$

$$G_{e,m} \geq -(D_{e,m} - ST01_{e,m}), \quad \forall e \in E_p, \forall m \in M \quad (6.4)$$

Les allocations calculées ne peuvent pas dépasser les limites maximales admissibles de digestat de chaque EP :

$$D_{e,m} \leq L_{e,m}, \quad \forall e \in E_p, \forall m \in M \quad (6.5)$$

Pour assurer que tout le digestat est alloué, la somme de toutes les allocations calculées doit être égale à la somme de toutes les allocations de référence :

$$\begin{aligned} & \sum_e D_{e,citerne} + \delta * \sum_e D_{e,vrac solide} \\ &= \sum_e ST01_{e,citerne} + \delta * \sum_e ST01_{e,vrac solide} \end{aligned} \quad (6.6)$$

Désormais, nous avons la fonction F1 permettant de minimiser les coûts totaux liés à la CA et une autre fonction F2 permettant de minimiser les écarts entre les allocations calculées et les allocations de la référence considérée comme équitables (ST01). Toutefois, ces deux fonctions n'ont pas d'unités de mesure ni d'ordres de grandeur homogènes puisque F1 calcule un coût et F2 calcule un écart. Pour pallier ce problème nous avons normalisé chacune de ces fonctions avec la formule de normalisation min-max (Han, Kamber, & Pei, 2012) telles que :

$$F1_{normalisée} = \frac{F1 - F1_{min}}{F1_{max} - F1_{min}} \quad (6.7)$$

$$F2_{normalisée} = \frac{F2 - F2_{min}}{F2_{max} - F2_{min}} \quad (6.8)$$

Pour calculer ces formes normalisées, il faut déterminer leur minimum et leur maximum.

Pour $F1_{min}$ et $F1_{max}$, nous appliquons la stratégie ST05 qui, comme présentée dans la section 5.1, permet de minimiser les coûts totaux liés à la CA. Les résultats nous fournissent

donc la valeur de $F1_{\min}$. Afin de déterminer $F1_{\max}$, il suffit de maximiser la fonction objectif du modèle.

Pour obtenir $F2_{\min}$ et $F2_{\max}$, nous avons utilisé le modèle capturant la stratégie ST01 qui est notre stratégie de base définie dans la section 5.1. En minimisant la fonction objectif dans ce modèle, nous obtenons $F2_{\min}$. Nous obtenons $F2_{\max}$ en maximisant la fonction objectif du même modèle.

- **Poids de chacun des objectifs**

Tableau 6.7. Poids utilisés dans la fonction multicritère

Notation	Définition
W_1	Poids de la fonction $F1_{\text{normalisée}}$
W_2	Poids de la fonction $F2_{\text{normalisée}}$

La fonction multicritère de la stratégie ST06 est donc de la forme :

$$Z = W_1 * F1_{\text{normalisée}} + W_2 * F2_{\text{normalisée}} \quad (6.9)$$

avec :

$$W_1 + W_2 = 1 \quad (6.10)$$

6.2.2 Recherche des optimums de Pareto (cas d'étude réel)

L'optimisation de systèmes complexes, où plusieurs objectifs entrent en concurrence, nécessite des outils permettant d'identifier des compromis équilibrés comme les concepts d'optimum de Pareto et de front de Pareto. Un optimum de Pareto est une solution pour laquelle il est impossible d'améliorer un objectif sans dégrader au moins un autre : ces solutions incarnent ainsi des équilibres optimaux entre deux objectifs ou plus. L'ensemble de ces optimums forme le front de Pareto, une frontière qui matérialise les compromis entre les objectifs et permet de visualiser les solutions non dominées, c'est-à-dire celles qui ne peuvent être améliorées simultanément sur tous les critères (Jacquemin et al., 2001). Nous cherchons donc à obtenir les optimums de Pareto permettant d'améliorer conjointement nos objectifs 1 et 2, à savoir,

minimiser les coûts totaux de la CA tout en minimisant les écarts entre les allocations calculées et les allocations de la référence considérées comme équitables.

Pour cela nous avons fait varier les poids W_1 et W_2 entre 0 et 1 et entre 1 et 0, respectivement (en s'assurant que la somme des deux poids est toujours égale à 1) par pas de 0.1 puis par pas de 0.01 dans les intervalles qui nous ont semblés les plus pertinents (là où les différences de résultats étaient les plus importantes). Nous avons créé 34 couples (W_1, W_2) que nous avons testés avec notre modèle mathématique pour déterminer lesquels permettent d'obtenir des optimums de Pareto et lesquels permettent d'obtenir des solutions dominées. Pour chaque couple (W_1, W_2) , nous avons calculé les valeurs de $F_{1\text{normalisée}}$ et $F_{2\text{normalisée}}$ et nous les avons représentées graphiquement comme l'illustre la Figure 6.1.

Comme nous souhaitons à la fois minimiser $F_{1\text{normalisée}}$ et $F_{2\text{normalisée}}$, nous cherchons les points qui sont les plus proches de l'origine du graphe $(0;0)$. Lorsque les points sont des optimums de Pareto (il est impossible d'améliorer un objectif sans nuire au second) nous plaçons ce point sur le front de Pareto (représenté en rouge sur la Figure 6.1).

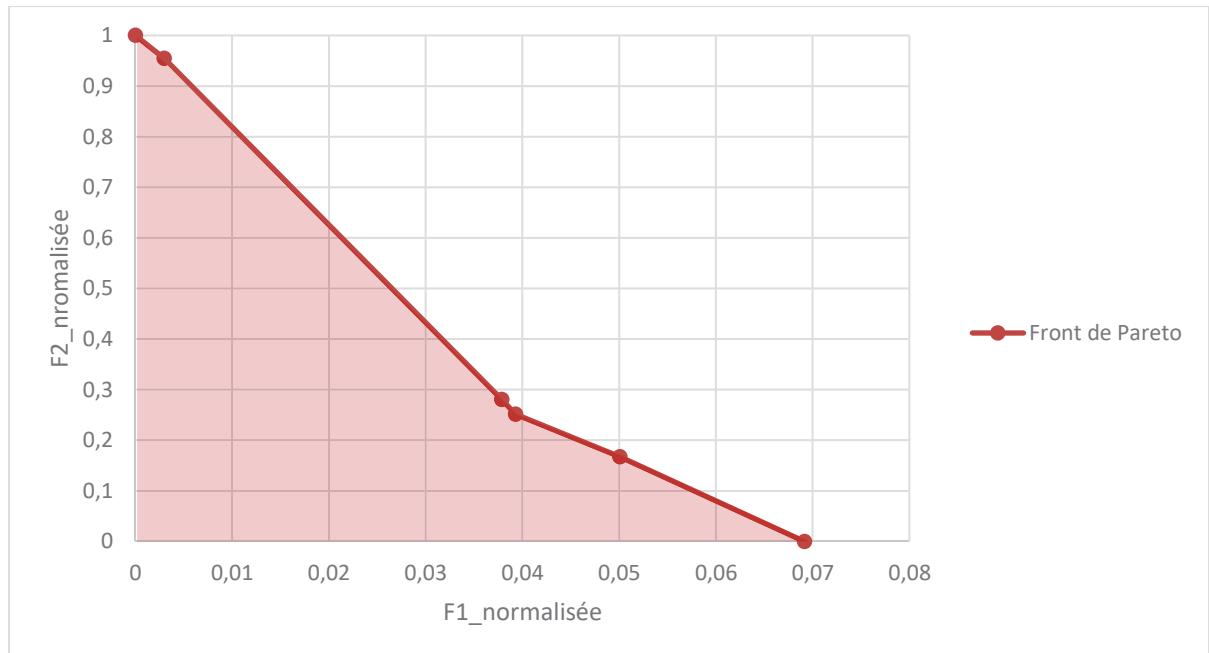


Figure 6.1. Représentation graphique du front de Pareto et des solutions dominées pour le cas réel

Dans la Figure 6.1, nous observons une très faible dispersion des points. Les points situés sur le front de Pareto correspondent à des optimums de Pareto. Il s'agit de couples de valeurs ($F1_{\text{normalisée}}$, $F2_{\text{normalisée}}$) associés à des couples de poids ($W1$, $W2$) qui ne sont dominés par aucune autre solution. Nous pouvons déduire de ces optimums de Pareto les couples de poids ($W1$, $W2$) qui permettent d'obtenir ces valeurs de compromis. Nous les avons numérotés et regroupés dans le Tableau 6.8.

Tableau 6.8. Couple de poids liés aux optimums de Pareto obtenus pour le cas réel

Optimum de Pareto	Valeur de $W1$	Valeur de $W2$
P01	0	1
P02	0,1	0,9
P03	0,89	0,11
P04	0,94	0,06
P05	0,95	0,05
P06	0,98	0,2
P07	1	0

En analysant ces couples de poids, nous constatons qu'à part les deux premiers couples qui ont des valeurs élevées pour $W2$ (poids associé à l'objectif qui consiste à minimiser les écarts entre les allocations calculées et les allocations de la référence considérées comme équitables) tous les autres couples mettent largement en avant l'objectif 1 (minimiser les coûts totaux). Cela signifie que la majorité des optimums de Pareto sont obtenus avec des allocations très proches de celles obtenues avec ST05. La stratégie ST06 ne permet donc pas d'obtenir un large choix de compromis, les allocations obtenues mettent en avant principalement l'objectif 1 (minimiser les coûts totaux)

Il est possible de visualiser simultanément les valeurs de $F1$ et de $F2$ pour chaque optimum de Pareto sur la Figure 6.2.

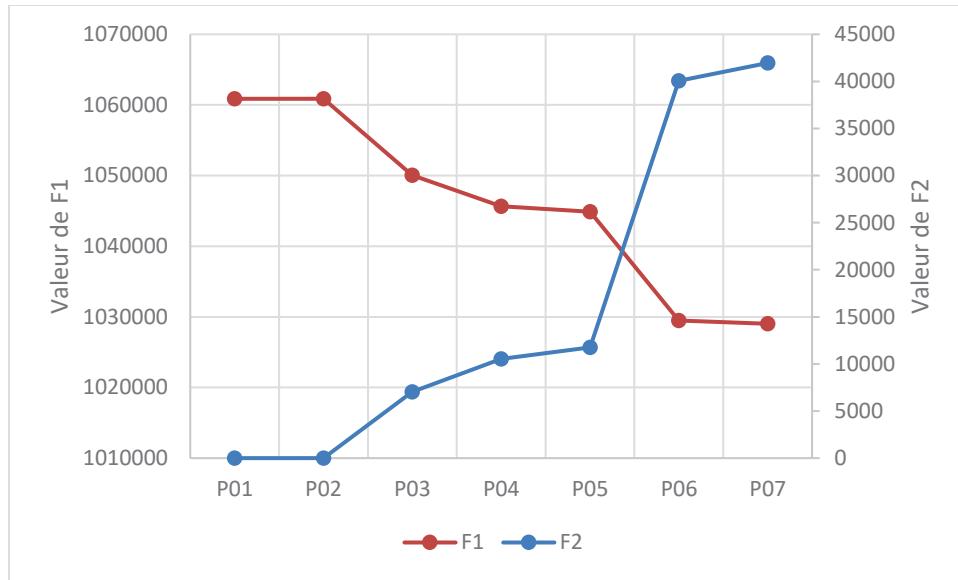


Figure 6.2. Visualisation des valeurs de F1 et de F2 pour les optimums de Pareto

Nous remarquons que la courbe de F1 diminue de façon plus linéaire que la fonction F2. En effet, nous observons un saut important de F2 entre P05 et P06 avec F2 qui passe d'environ 12 000 à plus de 40 000. La valeur de F2 se dégrade donc plus rapidement que ne s'améliore la valeur de F1. Les optimums P01 et P02 offrent pour F1 et F2 des résultats très proches et exclusivement centrés sur l'équité là où les optimums P06 et P07 offrent des résultats aussi très proches mais exclusivement centrés sur l'économie. Dans l'objectif de trouver un équilibre, il est pertinent de restreindre le choix de l'optimum à considérer entre P03, P04 et P05. La décision concernant l'optimum de Pareto à privilégier reviendra aux décideurs de la CA après qu'ils auront définis et traduits leurs préférences en poids associés aux deux critères ou qu'ils se soient intéressés à d'autres critères comme les émissions de GES ou les taux d'azote et de phosphore dans les sols (non étudiés dans ce mémoire).

6.3 Discussion

Dans ce chapitre, nous avons exploré deux manières différentes pour chercher l'équilibre entre l'équité et l'économie. Dans un premier temps, nous avons mis en place un mécanisme de compensation financière qui a pour but d'utiliser les gains obtenus par la réduction des coûts

liés aux opérations logistiques pour dédommager les ÉP qui reçoivent moins de digestat que ce qui était prévu initialement. Nous avons observé que, dans le meilleur des cas, ce mécanisme vient annuler entièrement les gains potentiels réalisés par les allocations des stratégies testées. Quatre stratégies (ST01, ST02, ST05 et ST07a) sont très proches avec moins de 1% d'écart sur les coûts finaux après application du mécanisme de compensation. La décision finale concernant quelle stratégie adopter reviendra donc à celle que les décideurs qualifient de plus équitable dans le cas étudié ou les obligera à regarder un autre critère comme les émissions de GES. Dans un second temps, nous avons créé une nouvelle stratégie d'allocation visant à trouver un ou plusieurs compromis entre l'allocation la plus économique (ST05) et l'allocation de référence (ST01) considérée comme équitable. Cette stratégie ST06 permet de distinguer plusieurs points appelés optimums de Pareto qui correspondent tous à des équilibres d'un point de vue mathématique. Écarter les optimums P01, P02, P06 et P07 est pertinent car ces optimums ne mettent pas assez en valeur la recherche de l'équilibre. Là aussi la décision finale entre P03, P04 et P05 reviendra aux décideurs de la CA qui détermineront quelle solution adopter en fonction du poids et de l'importance qu'ils accorderont à chaque objectif.

Cependant, ces deux pistes présentent des limites liées en partie au cas d'étude réel. La CA de notre cas réel présente une dispersion géographique dense, c'est-à-dire que les ÉP sont très proches géographiquement avec un éloignement moyen de 30 km de l'usine de biométhanisation (contre 100 km de moyenne selon *Fuel LCA model methodology* (2020)). Cette proximité a une influence sur les coûts totaux de la CA. Toute modification au niveau des allocations a donc un impact direct sur les distances parcourues mais ces écarts sont trop faibles pour observer une différence significative sur les coûts liés au transport. Les stratégies d'allocation ne permettent pas de dégager suffisamment d'économies avec la réduction des distances à parcourir. Une autre limite de notre cas d'étude semble être sur le type de digestat à distribuer ainsi que les limites maximales de capacités de stockage de chacun des ÉP. Si le fait que les ÉP n'acceptent de recevoir que du digestat sous la même forme que les résidus qu'ils envoient reflète la réalité de nos acteurs, il contraint grandement notre système qui a une marge de manœuvre plus faible sur les allocations à réaliser. Il serait intéressant dans une future

recherche d'explorer les gains qui pourraient être réalisés dans une situation plus permissive pour le modèle d'optimisation.

Toutefois, après discussion avec notre partenaire industriel, il s'est révélé qu'il était plus probable d'avoir une CA dont l'éloignement moyen des EP par rapport à l'usine de biométhanisation est proche de 100 km que d'avoir une CA où certains EP soient capables de s'accommoder des deux types de digestat. Ainsi, pour vérifier la pertinence et la valeur ajoutée de nos pistes de recherche de l'équilibre entre économie et équité, et de l'ensemble des résultats précédents nous avons créé un cas d'étude, fictif mais réaliste, plus générique permettant d'analyser davantage l'optimisation du transport et les stratégies d'allocation proposées pour une CA avec un éloignement moyen plus élevé.

CHAPITRE 7

APPLICATION À UN CAS FICTIF GÉNÉRALISABLE

Dans les CHAPITRE 4, CHAPITRE 5 et CHAPITRE 6 nous avons effectué différentes analyses sur le cas d'étude détaillé au CHAPITRE 2. Cependant, au fur et à mesure des diverses analyses nous nous sommes rendu compte que le cas d'étude réel est plutôt singulier par son réseau logistique rapproché. En effet, l'éloignement géographique moyen entre les ÉP/ ÉNP et l'usine de biométhanisation est de l'ordre de 30 km là où certaines documentations et notamment celle d'Environnement et Changement climatique Canada (*Fuel LCA model methodology*, 2020) prennent l'hypothèse d'un éloignement moyen de 100 km pour une CA dans le secteur. Le nombre de 13 participants dans la CA est réaliste et donc nous l'avons conservé même si le modèle fonctionne aussi avec plus ou moins de participants. De plus, une partie des données du cas d'étude réel est confidentielle ce qui nuit à la reproductibilité de notre étude. Dans ce chapitre, nous concevons un cas fictif et réaliste (dont les données sont disponibles en ANNEXE II) et nous l'analysons sur l'ensemble des critères développés dans les CHAPITRE 4, CHAPITRE 5 et CHAPITRE 6 afin de comparer le cas réel et le cas fictif.

7.1 Méthodologie de création du cas d'étude

Une partie des données du cas d'étude réel est confidentielle. Afin de nous assurer de la reproductibilité de notre approche et de généraliser nos résultats, avec l'aide de notre partenaire industriel, nous avons construit un cas d'étude fictif mais réaliste ayant les caractéristiques suivantes :

Tableau 7.1. Caractéristiques et différences entre le cas réel et le cas fictif

Élément de la CA	Cas réel	Cas fictif
Éloignement moyen entre les ÉP/ ÉNP et l'usine de biométhanisation (en km)	~ 30	100

Nombre et types d'émetteurs	13 dont 9 ÉP	13 dont 9 ÉP
Quantité de digestat produite en un an (en tmh)	~ 92 000	100 000
Capacité moyenne de stockage de digestat brut	9 852	10 685
Capacité moyenne de stockage de digestat solide	3 438	3 729

Le tableau en ANNEXE II représente les données utilisées pour construire le cas fictif répondant aux caractéristiques ci-dessus et pouvant être utilisées et modifiées pour s'adapter à d'autres cas.

Ce cas fictif présentant des distances entre les nœuds du réseau logistique bien plus importantes que dans notre cas d'étude réel devrait nous permettre de mieux mettre en valeur les améliorations au niveau des coûts liés au transport grâce à notre modèle mathématique. Afin de vérifier que les résultats obtenus dans des chapitres précédents sont toujours pertinents, nous allons conduire les mêmes tests et présenter les résultats dans des tableaux récapitulatifs.

7.2 Application des pratiques logistiques au cas fictif

Dans un premier temps, nous avons souhaité vérifier si les résultats et conclusions obtenus dans le CHAPITRE 4 étaient toujours valables pour notre cas fictif. Pour cela nous sommes repartis des mêmes scénarios définis dans la Section 4.1 et nous avons conduit les mêmes tests mais cette fois-ci sur les données du cas fictif.

7.2.1 Les économies potentielles

Le Tableau 7.2 présente les économies potentielles obtenues grâce aux pratiques logistiques de mise en place d'une flotte de camions hétérogène et des retours en charge sur le cas fictif.

Tableau 7.2. Économies réalisées par chaque scénario par rapport au scénario de référence (S01) pour le cas fictif

Scénario	S02	S03	S04
Économies	14,73%	25,46%	29,13%

Lorsque nous comparons les résultats obtenus ici avec ceux obtenus avec le cas d'étude réel, nous constatons une tendance similaire. L'implémentation de chacune des pratiques logistiques est bénéfique et permet de réduire les coûts de transport. De même la mise en place des retours en charge (S03) se révèle plus efficace que la mise en place d'une flotte hétérogène (S02). La mise en place des deux pratiques logistiques conjointement (S04) permet le plus d'économies. Nous constatons dans ce cas fictif que les gains potentiels sont plus importants que dans le cas d'étude réel. Par exemple, pour S04, il est possible d'économiser 17,38% par rapport au coût de S01 dans le cas réel alors que dans le cas fictif, il est possible d'économiser 29,13%.

7.2.2 Distances parcourues

La Figure 7.1 présente les distances totales parcourues en charge et à vide pour chaque scénario pour le cas fictif.

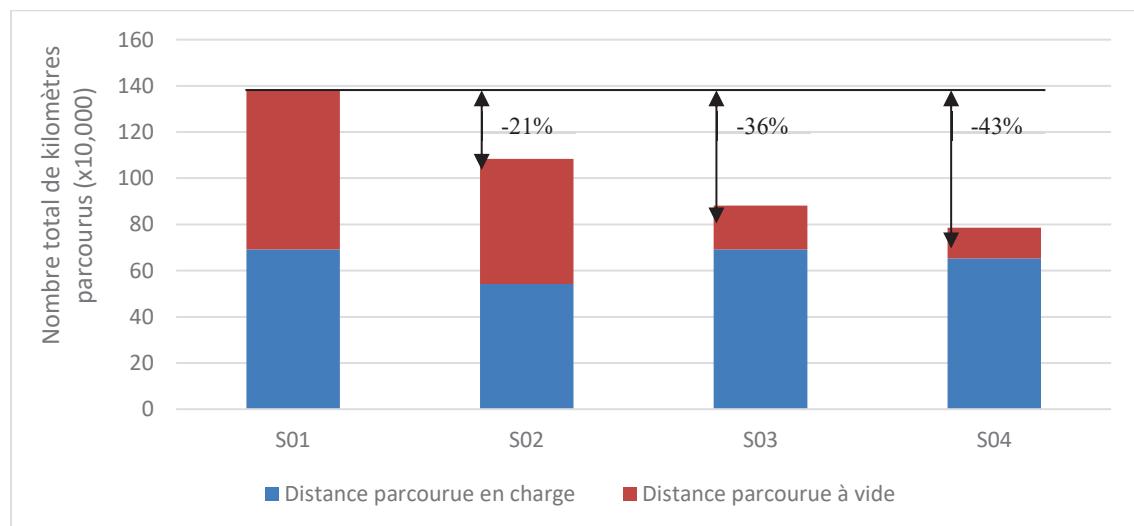


Figure 7.1. Distances totales parcourues en charge et à vide pour chaque scénario pour le cas fictif

Nous observons ici la même tendance que celle présentée dans la section 4.3.2. Les pourcentages de réduction du nombre de kilomètres parcourus en charge et à vide sont très proches de ceux obtenus dans le cas réel ce qui permet de renforcer l'idée que le scénario S04 qui met en œuvre les deux pratiques logistiques testées est le plus performant avec une réduction de 43% sur la distance totale parcourue par les camions (par rapport au scénario de référence).

7.2.3 Réduction des émissions de GES

La Figure 7.2 présente les estimations des émissions totales de GES par les camions pour chaque scénario pour le cas fictif.

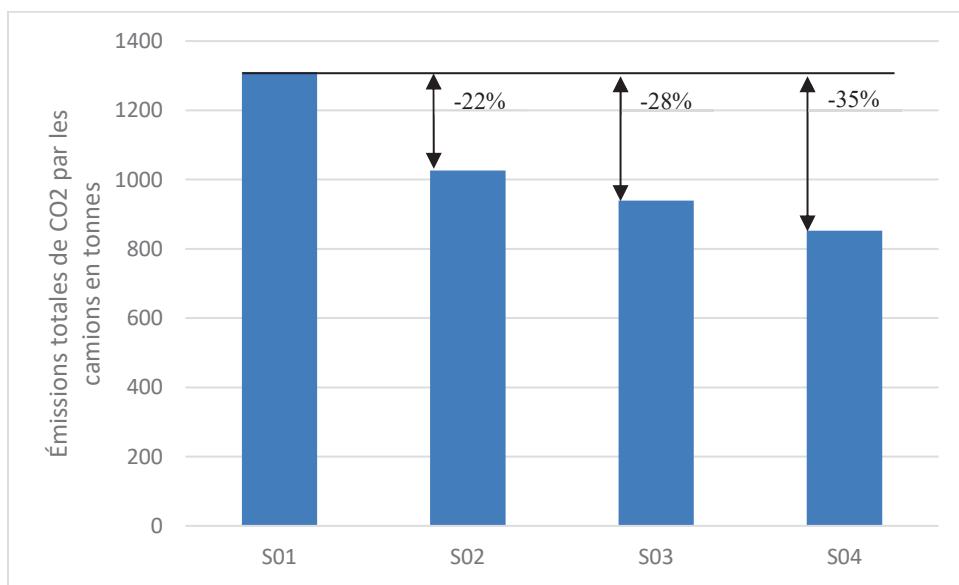


Figure 7.2. Estimations des émissions totales de GES par les camions en tonnes pour chaque scénario pour le cas fictif

Nous observons encore une fois, que la tendance en termes d'émissions de GES se maintient pour le cas fictif. Ceci s'explique par le fait que les émissions de GES sont étroitement liées aux distances totales parcourues par les camions. Comme les pourcentages de réduction des distances parcourues sont similaires dans le cas réel et le cas fictif, la même chose est observée

pour les émissions de GES. Encore une fois, le scénario S04 est le plus performant avec une réduction des émissions de GES de près de 35% par rapport à S01.

7.2.4 Nombre et taux d'utilisation des camions

Dans le Tableau 7.3, nous observons que dans le cas fictif tous les scénarios ont un nombre total de camions différents. 14 camions sont requis pour le scénario de référence S01, 11 sont requis pour S02, 10 pour S03 et seulement 9 pour S04. Ces différences dans le nombre total de camions nécessaires expliquent en partie pourquoi les économies potentielles sont plus importantes dans le cas fictif que dans le cas réel. En effet, nous observons une différence de 5 camions entre S01 et S04 dans le cas fictif contre seulement 2 dans le cas réel ce qui a une répercussion directe sur les coûts d'acquisition des camions.

Tableau 7.3. Flotte sélectionnée pour chaque scénario pour le cas fictif

Scénario	Nombre de camions					
	Camion-citerne			Camion de vrac solide		
	P	M	G	P	M	G
S01	-	10	-	-	4	-
S02	0	0	8	0	0	3
S03	-	7	-	-	3	-
S04	0	5	1	0	1	2

Dans le Tableau 7.4, nous observons que les taux d'utilisation moyen des camions par scénario pour le cas fictif sont très élevés avec des valeurs atteignant 95%, 96%, 99% et même 100%. Ces valeurs sont plus élevées que ce que nous avions observés pour le cas réel dans la section 4.3.4. Ce cas fictif avec des distances d'éloignement plus élevées entre les ÉP/ ÉNP et l'usine de biométhanisation est donc exigeant pour les camions au niveau des taux d'utilisation. Il convient donc de rappeler que des valeurs aussi élevées pour les taux d'utilisation vont entraîner des problématiques au niveau de la planification opérationnelle mais cette planification est hors de notre champ d'étude.

Tableau 7.4. Taux d'utilisation moyen des camions par scénario pour le cas fictif

Scénario	Nombre de camions					
	Camion-citerne			Camion de vrac solide		
	P	M	G	P	M	G
S01	-	99%	-	-	78%	-
S02	-	-	99%	-	-	86%
S03	-	89%	-	-	95%	-
S04	-	100%	100%	-	52%	96%

7.3 Application des stratégies d'allocation au cas fictif

Dans la section 7.2 nous avons démontré que le scénario S04 combinant les deux pratiques logistiques (flotte hétérogène et retours en charge) est meilleure que les trois autres à la fois pour le cas réel mais aussi pour le cas fictif sur l'ensemble des critères testés. Dans cette partie, nous allons analyser les résultats d'application des stratégies d'allocation détaillées dans le CHAPITRE 5 sur le cas fictif.

7.3.1 Les économies potentielles

Le Tableau 7.5 présente les économies réalisées suivant les différentes stratégies d'allocation par rapport à la stratégie de référence ST01 pour le cas fictif.

Tableau 7.5. Économies réalisées par chaque stratégie en comparaison à la stratégie de référence (ST01) pour le cas fictif

Stratégie d'allocation	Économies totales
ST02	6,20%
ST05	8,62%
ST07a	8,62%
ST07b	43,11%
ST08a	-6,11%
ST08b	3,47%
ST09	47,49%

Comme mentionné précédemment, en augmentant la distance moyenne entre les nœuds du réseau logistique d'environ trois fois par rapport à la distance moyenne du cas réel, il est possible de réaliser de plus grandes économies. La stratégie d'allocation favorisant les gains économiques à savoir ST05 permet d'économiser jusqu'à 8,6% ce qui est meilleur que les 3,05% obtenus dans la section 5.2.1 pour le cas réel. La répartition des coûts est présentée dans la Figure 7.3.

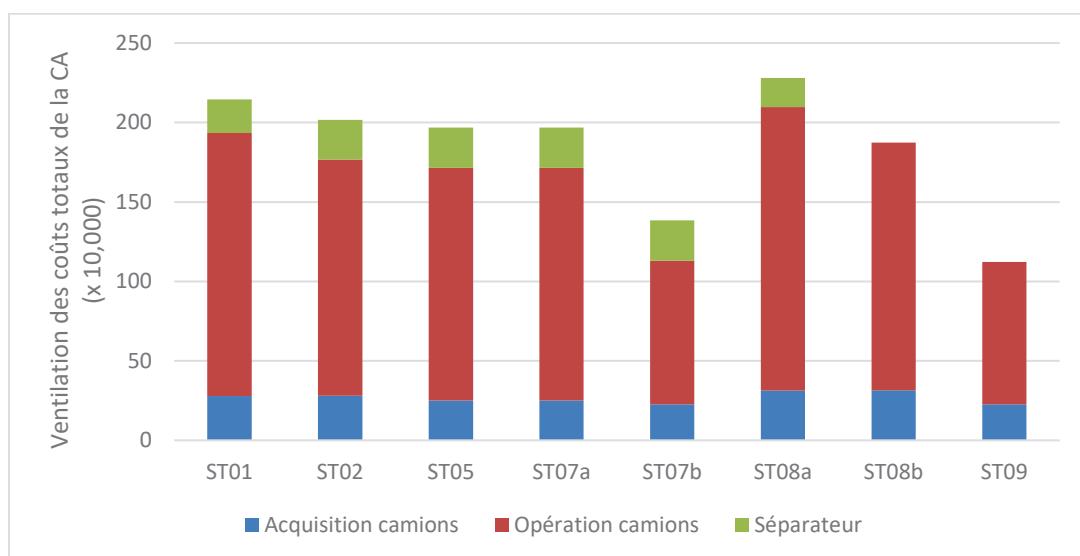


Figure 7.3. Répartition des coûts totaux de la CA par stratégie d'allocation pour le cas fictif

Dans ce cas fictif avec des ÉP géographiquement plus éloignés que dans le cas réel et avec une quantité de digestat en sortie de la biométhanisation fixée à 100 000 tmh/an, nous constatons que la répartition des coûts est assez différente de celle obtenue dans la Figure 5.1. Ici, le coût d'opérations des camions domine largement le coût d'acquisition des camions ainsi que l'ensemble des coûts liés au séparateur. Par ailleurs, les coûts liés au séparateur sont relativement proches de ceux observés dans le cas réel puisque les quantités totales de digestat brut sont différentes d'environ 10%. Les gains potentiels observés dans le Tableau 7.5, plus élevés que dans le cas réel, sont donc bien liés aux coûts d'opération des camions et donc aux différences entre les distances parcourues par les camions pour chaque stratégie d'allocation.

7.3.2 Distances parcourues

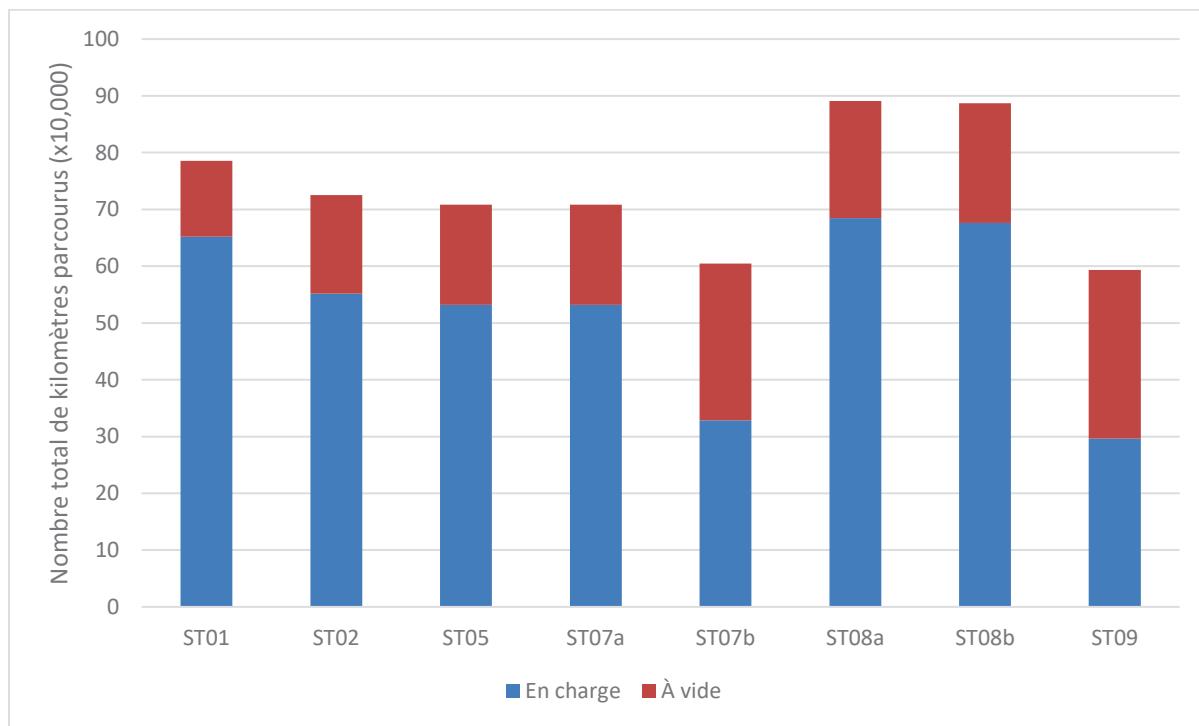


Figure 7.4. Distances totales parcourues par les camions en charge et à vide pour chaque stratégie pour le cas fictif

Au niveau des distances parcourues il n'y a pas de différences remarquables par rapport à la Figure 5.2. En revanche pour chaque stratégie, les camions parcourent en moyenne 740 000 km, soit trois fois plus que pour le cas réel, comme anticipé.

7.3.3 Réduction des émissions de GES

Tableau 7.6. Émissions de gaz à effet de serre par rapport à la stratégie de référence (ST01) pour le cas fictif

Stratégie d'allocation	Émissions de GES
ST02	-10,2%
ST05	-12,6%
ST07a	-12,6%
ST07b	-31,5%
ST08a	+10,7%
ST08b	+9,9%
ST09	-34,1%

Même si les distances parcourues changent, l'allure du graphe la Figure 7.4 est très proche de celle de la Figure 5.2. Cette similitude entre les deux graphes explique pourquoi au niveau de la réduction des émissions de GES il n'y a pas de changement remarquable entre le cas réel et le cas fictif.

7.3.4 Nombre et taux d'utilisation des camions

Nous constatons que la configuration de la flotte déterminée par le modèle mathématique exclut complètement les plus petits camions au profit des camions de taille M et de taille G. Le nombre total de camions est aussi sensiblement plus élevé que celui obtenu pour le cas réel puisqu'il double en moyenne pour chaque stratégie. Cela s'explique par le fait que chaque trajet est quasiment trois fois plus long que dans le cas réel. Les camions font des trajets plus longs mais les chauffeurs travaillent le même temps, il faut donc plus de camions. La limite de notre modèle mathématique soulevée dans les sections 4.3.4, 5.2.4 et 7.2.4 concernant le taux

d'utilisation moyen des camions très souvent proche de 100% est également constatée dans ce cas-ci.

Tableau 7.7. Flotte de camion retenue pour chaque stratégie pour le cas fictif

Stratégie d'allocation	Nombre de camion					
	Camion-citerne			Camion de vrac solide		
	P	M	G	P	M	G
ST01	-	5	1	-	1	2
ST02	-	4	2	-	1	2
ST05	-	3	2	-	1	2
ST07a	-	3	2	-	1	2
ST07b	-	-	4	-	1	2
ST08a	-	5	2	-	1	2
ST08b	-	5	2	-	-	3
ST09	-	-	4	-	-	3

Tableau 7.8. Taux d'utilisation des camions pour chaque stratégie pour le cas fictif

Stratégie d'allocation	Nombre de camion					
	Camion-citerne			Camion de vrac solide		
	P	M	G	P	M	G
ST01	-	100%	100%	-	52%	96%
ST02	-	83%	92%	-	75%	88%
ST05	-	100%	100%	-	78%	87%
ST07a	-	100%	100%	-	78%	87%
ST07b	-	-	91%	-	78%	87%
ST08a	-	97%	100%	-	37%	100%
ST08b	-	97%	100%	-	-	75%
ST09	-	-	91%	-	-	75%

7.4 Application et résultats des stratégies de recherche de l'équilibres au cas fictif

Dans cette partie nous allons appliquer les pistes de recherche de l'équité développées au CHAPITRE 6 à notre cas fictif. Le

Tableau 7.9 présente les résultats obtenus en appliquant le système de compensation financière au cas fictif.

Tableau 7.9. Économies réalisées par chaque stratégie par comparaison avec la stratégie de référence (ST01) sans et avec système de compensation financière pour le cas fictif

Stratégies d'allocation	Économie totale sans compensation	Économie totale avec compensation
ST02	6,20%	4,65 %
ST05	8,62%	6,84 %
ST07a	8,62%	6,46 %
ST07b	43,11%	-0,53 %
ST08a	-6,11%	-11,29 %
ST08b	3,47%	-16,16 %
ST09	47,49%	-33,98 %

Contrairement aux résultats obtenus dans la section 6.1.2 où seule la stratégie ST05 permettait d'effectuer des économies par rapport à ST01 avec la mise en place du système de compensation financière, ici trois stratégies d'allocation restent pertinentes après la mise en place du système de compensation financière. En effet les stratégies ST02, ST05 et ST07a permettent d'économiser jusqu'à 6,84% par rapport à la stratégie de référence (ST01). Ces différences notables s'expliquent par le fait que les distances parcourues dans le cas fictif sont plus grandes par rapport au cas réel. Les réductions dans le nombre de kilomètres parcourus étant plus importantes dans le cas fictif que dans le cas réel, cela nous permet de réaliser plus d'économies sur le coût de transport et, de ce fait, réaliser suffisamment de gains pour rembourser les ÉP qui ne seraient pas satisfaits des quantités de digestat qui leur sont allouées.

Dans un second temps nous avons calculé les optimums de Pareto en mettant en œuvre la stratégie ST06 visant à trouver un équilibre entre une allocation purement économique (ST05) et une allocation considérée comme équitable (ST01). Nous avons suivi la même méthodologie que dans la section 6.2.2 : nous avons identifié 34 points et nous avons tracé le front de Pareto composé des optimums de Pareto sur la Figure 7.5.

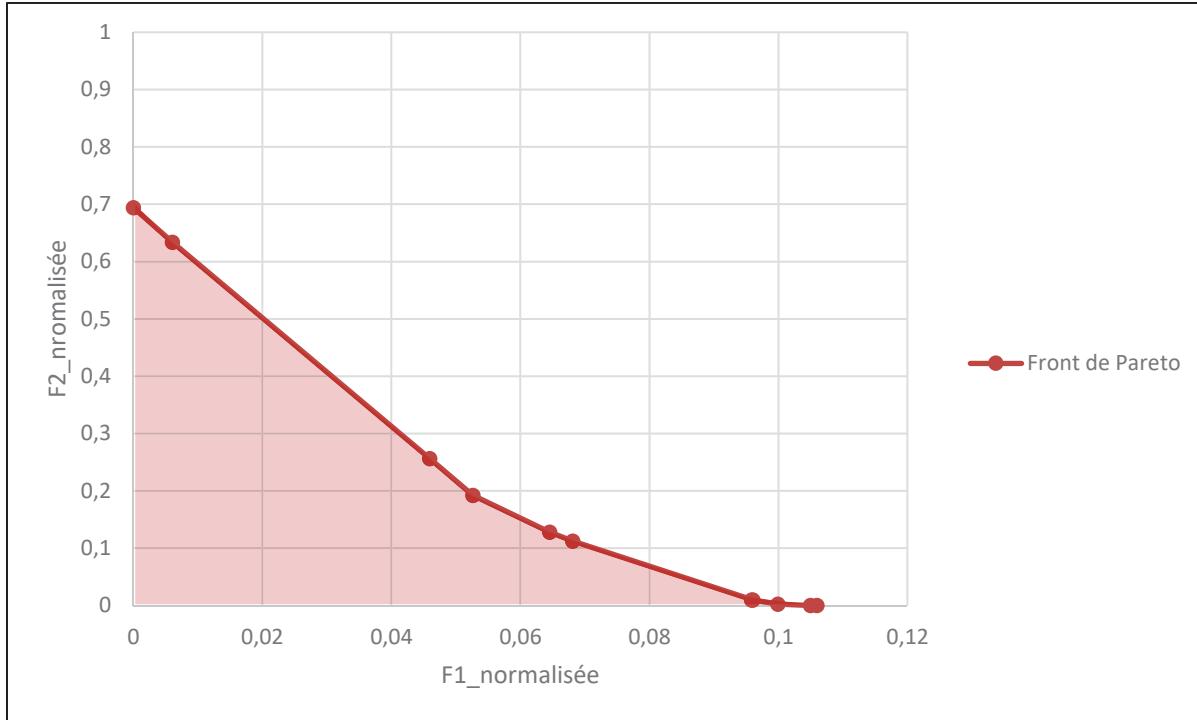


Figure 7.5. Front et optimums de Pareto pour le cas fictif

Tout d'abord nous observons que le front de Pareto contient plus de points que dans la Figure 6.1. Dans le cas fictif, 11 points sont situés sur le front de Pareto contre seulement 7 dans le cas réel. Nous observons également que les points situés sur le front de Pareto sont plus dispersés (moins proches les uns des autres) dans le cas fictif que dans le cas réel. Comme dans le chapitre précédent, nous avons présenté les optimums de Pareto que nous avons trouvés en fonction des couples de poids (W_1, W_2) qui leur sont associés dans le Tableau 7.10.

Tableau 7.10. Couple de poids liés aux optimums de Pareto obtenus pour le cas fictif

Optimums de Pareto	Valeur de W1	Valeur de W2
P01	0	1
P02	0,2	0,8
P03	0,6	0,4
P04	0,7	0,3
P05	0,78	0,22
P06	0,8	0,2
P07	0,82	0,18
P08	0,89	0,11
P09	0,9	0,1
P10	0,93	0,07
P11	1	0

Les 11 couples de poids (W_1, W_2) associés aux 11 optimums de Pareto trouvés pour le cas fictif offrent aux décideurs une plus grande latitude dans leurs décisions que dans le cas réel. En effet, contrairement au cas réel, les couples de poids associés aux optimums allant de P03 à P05 permettent de mettre en valeur des équilibres qui ne mettent pas grandement en avant l'un des objectifs par rapport à l'autre. L'équilibre entre allocation économique (ST05) et allocation équitable (ST01) peut donc être atteint pour un éventail de poids différents sur chaque objectif. La Figure 7.6 montre les valeurs de F_1 et F_2 pour les optimums de Pareto obtenus.

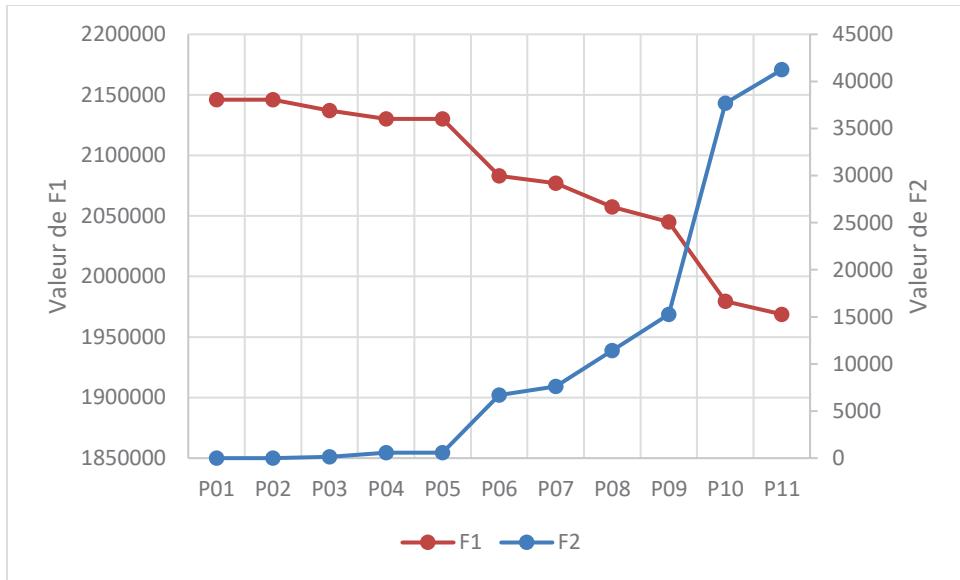


Figure 7.6. F1 et de F2 pour les optimums de Pareto obtenus pour le cas fictif

Comme sur la Figure 6.2 nous constatons que F1 suit une évolution plus linéaire que F2. Toutefois, sur la Figure 7.6 nous pouvons distinguer trois zones principales : de P01 à P05, de P06 à P09 et P10 à P11. Dans la première zone allant de P01 à P05, la dégradation de F2 est lente tout comme l'amélioration de F1. Pour les optimums P01, P02, P03, P04 et P05 les valeurs de F2 sont très proches de 0 ce qui signifie que ces optimums sont plus proches des allocations équitables (ST01) que des allocations économiques (ST05). Nous observons alors une variation importante entre P05 et P06 : F1 décroît de 213 000 à 208 000 et F2 augmente drastiquement de 600 à 6 700. Dans la deuxième zone allant de P06 à P09, la dégradation de F2 est bien plus rapide que dans la première zone tout comme l'amélioration de F1. Entre P09 et P10 nous observons à nouveau une variation importante : F1 décroît de 204 000 à 198 000 et F2 double de 15 000 à 38 000. La vitesse de dégradation de F2 et d'amélioration de F1 semble identique à celle de la deuxième zone.

De P01 à P05 les résultats obtenus pour F1 et F2 sont très proches. Ces 5 optimums de Pareto illustrent des performances tournées majoritairement vers le critère d'équité. À l'inverse, P10 et P11 sont tournés principalement vers le critère d'économie. Dans une démarche de recherche d'équilibre, il est plus pertinent de mettre de côté ces différents optimums et de s'intéresser

plus en détails aux optimums allant de P06 à P09. Ces 4 points garantissent une réduction des coûts totaux de la CA tout en restant assez proches des allocations de référence. Pour choisir entre ces points plusieurs étapes doivent être envisagées par les acteurs de la CA. Définir les poids donnés par chaque acteur pour identifier si un des optimums se démarquent et regarder d'autres indicateurs pour évaluer les performances des optimums comme les émissions de GES ou la saturation en phosphore et en azote des sols pour garantir une bonne fertilisation des sols.

7.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons confronté notre modèle mathématique et les différentes pratiques logistiques et stratégies d'allocation du digestat à un cas fictif plus général et représentatif d'une CA circulaire de biométhanisation au Québec. Les résultats obtenus concordent en grande majorité avec ceux déjà obtenus dans les CHAPITRE 4, CHAPITRE 5 et CHAPITRE 6. Par rapport au CHAPITRE 4, les pratiques logistiques mises en place (flotte hétérogène et retours en charge) ont prouvé leur efficacité et le scénario S04 mettant en pratique conjointement les deux pratiques logistiques s'est encore une fois hissé au-dessus du lot. Nous avons observé des améliorations similaires en comparant le cas réel et le cas fictif pour ce qui est de la distance totale parcourue, et des émissions de GES. Pour ce qui est des coûts totaux liés au transport et au niveau de la réduction du nombre de camions par flotte nous avons constaté de meilleurs résultats avec le cas fictif. Enfin pour ce qui est des taux d'utilisation moyen des camions les résultats sont moins bons avec le cas fictif qu'avec le cas réel. Pour l'analyse des stratégies développées au CHAPITRE 5, nous avons vu que les stratégies ST02, ST05 et ST07a étaient tout aussi pertinentes dans le cas réel que dans le cas fictif. En effet, ces trois stratégies permettent des gains sur les coûts totaux de la CA tout en réduisant le nombre de kilomètres parcourus et les émissions de GES par rapport à ST01. Les autres stratégies présentent les mêmes défauts que ceux remarqués dans le CHAPITRE 5. Enfin pour ce qui est de la recherche de l'équilibre développée dans le CHAPITRE 6, nous avons obtenu de meilleurs résultats dans le cas fictif comparé au cas réel pour les deux approches. Pour le mécanisme de compensation financière, les stratégies ST02, ST05 et ST07a permettent à la CA de conserver des gains même après compensation. Pour la stratégie d'équilibre entre

économie et équité (ST06), le cas fictif offre un plus grand nombre d'optimums de Pareto que le cas réel, offrant ainsi plus de possibilités aux décideurs. Certains de ces optimums restent proches des allocations exclusivement centrées sur l'économie ou l'équité. Dans l'objectif de trouver un réel équilibre entre les deux critères il est pertinent de considérer les optimums P06, P07, P08, P09 et de les confronter aux attentes des acteurs de la CA ou des les comparer via d'autres critères de sélection (émissions de GES, fertilisation des sols, etc.).

Ce cas fictif a donc permis de nous affranchir de certaines limites du cas réel notamment celle liée à la petite distance moyenne entre les ÉP/ ÉNP et l'usine de biométhanisation. Les résultats obtenus confirment notre hypothèse que notre modèle mathématique se comporte mieux si les distances entre les ÉP/ ÉNP et l'usine de biométhanisation sont élevées. Ce cas fictif, dont les données sont disponibles en ANNEXE II peut être modifié et adapté pour aider les décideurs d'un projet similaire à tester notre modèle sur leur propre cas d'étude.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce mémoire présente nos travaux de recherche effectués autour d'une CA de production de GNR collaborative et en boucle fermée intégrant à la fois la logistique entrante et sortante et les allocations de ressources (digestat issu de la biométhanisation) à chaque participant (EP).

Dans un premier temps, nous avons analysé deux pratiques logistiques à travers un modèle mathématique : la mise en place d'une flotte de camion hétérogène et des retours en charge. Ces deux pratiques sont complémentaires et permettent des gains significatifs au niveau des coûts de transport (17%), de la réduction des distances à parcourir (42%) et par conséquent les émissions de GES (34%).

Dans un second temps, nous nous sommes penchés sur l'allocation de digestat à chacun des EP. Nous avons alors établi huit stratégies d'allocations différentes, allant des allocations considérées comme étant équitables pour les EP à celles qui permettent de minimiser le coût total de la CA sans considérer l'équité. Les stratégies d'allocations distribuant l'ensemble du digestat produit (ST02, ST05, ST07a et ST08a) permettent d'économiser au plus 3% sur les coûts totaux de la CA par rapport à la stratégie de référence ST01 (basée sur le prorata du tonnage humide de résidus fournis par les EP).

Ensuite, nous avons cherché à établir un équilibre entre les allocations considérées équitables et celles considérées économiques. Pour cela, nous avons exploré deux pistes de solution : un mécanisme de compensation financière et une stratégie d'allocation (ST06) permettant de trouver un équilibre entre les allocations équitables et celles à but économique. Nous avons d'abord testé ces deux pistes sur le cas réel. Les résultats ont montré que le mécanisme de compensation financière annule quasiment entièrement les gains obtenus avec les stratégies d'allocation ST02, ST05 et ST07a et dévoile des pertes importantes pour les stratégies ST07b, ST08a, ST08b et ST09. De son côté, la stratégie ST06 visant à trouver un équilibre entre les allocations équitables et économique, a permis d'identifier des optimums de Pareto grâce à son modèle multicritère. Ces optimums correspondent aux valeurs obtenues par le modèle

mathématique de ST06 en fonction d'un couple de poids (W1, W2) associé à chacun des objectifs. Plus W1 est grand plus l'allocation déterminée sera économique et plus W2 est grand plus l'allocation sera équitable et vice versa. Les optimums trouvés pour le cas réel correspondent à des couples de poids où l'un des poids est considérablement plus important que l'autre. Les optimums P01, P02, P06 et P07 sont très proches des allocations extrêmes (ST01 et ST05). Les optimums P03, P04 et P05 sont les optimums pertinents à étudier dans l'objectif de recherche de l'équilibre. La sélection finale de l'optimum à retenir par les décideurs de la CA du cas réel doit alors s'appuyer sur la coïncidence entre les poids qu'ils accordent à chaque critère d'équilibre et ceux des optimums ou bien sur l'analyse et la comparaison d'autres critères de performance comme les émissions de GES ou la fertilisation des sols (non abordée dans ce mémoire).

Le long de ce projet de recherche, nous avons identifié et explicité certaines contraintes de notre cas d'étude réel qui ne permettaient pas d'obtenir des gains importants par rapport à un cas plus général. Dans le cas réel, les ÉP/ ÉNP et l'usine de biométhanisation ont une proximité moyenne d'environ 30 km. Or, en général, les nœuds dans une CA de biométhanisation ont un éloignement moyen entre eux plus élevé d'environ 100 km. Dans un cas plus général les économies liées au coût d'exploitation des camions seront donc plus élevées que ce que nous avons observé avec le cas réel. Une autre contrainte imposée du cas réel repose sur le type de digestat accepté par les ÉP. Dans la CA étudiée, un émetteur de résidus liquides ou solides n'acceptera respectivement que du digestat liquide ou brut. Cette rigidité sur le type de digestat accepté par chaque ÉP limite les options du modèle mathématique lorsqu'il détermine les allocations de digestat comme dans les stratégies ST05 et ST06. Desserrer cette contrainte dans un cas plus générique avec des ÉP capables de recevoir les deux types de digestat pourrait faciliter l'obtention d'allocations équitables et économiques.

D'après notre partenaire industriel, il est peu courant que les ÉP puissent s'accommoder des deux types de digestat là où à l'inverse il est courant d'observer des CA où l'éloignement entre les ÉP/ ÉNP et l'usine de biométhanisation est plus proche de 100km que de 30km. C'est pourquoi, dans le but de généraliser nos résultats et de faciliter la reproductibilité de notre

travail, nous avons élaboré un cas d'étude fictif présentant notamment des distances plus élevées entre les EP et l'usine de biométhanisation. Nous avons effectué les mêmes tests que ceux effectués sur le cas réel, de l'analyse des pratiques logistiques à l'analyse des stratégies d'allocation ainsi que des pistes de solution pour trouver l'équilibre. La mise en place des pratiques logistiques se sont révélées plus avantageuses dans le cas fictif que dans le cas réel avec 29% d'économies potentielles, une réduction du nombre total de kilomètres à parcourir de 43% et une réduction des émissions de GES de 35% contre 17%, 42% et 34% respectivement pour les mêmes indicateurs pour le cas réel. La mise en application des stratégies d'allocation a révélé aussi de meilleurs résultats pour le cas fictif que pour le cas réel. En effet, pour les stratégies qui allouent l'ensemble du digestat (ST02, ST05, ST07a et ST08a), elles permettent d'économiser au plus 8% là où dans le cas réel la meilleure stratégie (ST05) permettait d'économiser 3% seulement. Enfin pour ce qui est de la recherche de l'équité le cas fictif présente à nouveau des résultats plus intéressants. Pour le mécanisme de compensation financière, là où dans le cas réel l'application de ce mécanisme vient annuler quasiment entièrement les gains obtenus par les stratégies d'allocations, dans le cas fictif, les stratégies ST05 et ST07a permettent de conserver encore 6% d'économies sur les coûts totaux de la CA (soit une légère baisse comparée aux 8% d'économies trouvés sans ce mécanisme). Pour la stratégie ST06 visant à déterminer des allocations équilibrant équité et économie, nous avons relevé 11 optimums de Pareto dans le cas fictif contre 7 pour le cas réel. Comme pour le cas réel, certains optimums présentent des résultats très proches des allocations extrêmes si bien que nous recommandons de privilégier le choix de l'optimum entre P06, P07, P08 et P09. Le cas fictif offre une plus diversité de solutions d'équilibre un peu plus importante entre les deux objectifs et permet aux décideurs d'avoir plus d'options que dans le cas réel. La sélection finale par les décideurs devra aussi passer par la coïncidence entre les poids qu'ils accordent à chaque critère d'équilibre et ceux des optimums ou bien sur l'analyse et la comparaison d'autres critères de performance comme les émissions de GES ou la fertilisation des sols (non abordée dans ce mémoire).

Notre modèle mathématique présente quelques limites, notamment au niveau des taux d'utilisation moyens des camions. Dans de nombreuses stratégies d'allocation (ST05, ST07a,

ST08a, ST08b, ST09 pour le cas réel et ST01, ST05, ST08a, ST08b pour le cas fictif), un ou plusieurs camions atteignent un taux d'utilisation moyen de 100%. Ce taux d'utilisation élevé pourrait créer des problèmes lors de la planification opérationnelle. Il serait intéressant dans le futur de mettre en place une contrainte visant à limiter le taux d'utilisation moyen à une valeur inférieure à déterminer pour éviter l'apparition de conflits lors de la planification. Par ailleurs, nous n'avons pas pris en compte la saisonnalité. Comme le digestat est un fertilisant, il n'est utilisé que pendant certaines périodes de l'année. De plus, les résidus organiques ne sont pas fournis de manière linéaire tout au long de l'année. Il serait intéressant dans le futur de prendre en compte cet aspect afin de voir au niveau de la flotte de camion par exemple s'il est plus rentable pour la CA d'acquérir les camions, ou seulement la partie qui serait en utilisation toute l'année et de sous-traiter le transport lors des pics d'offre et de demande.

À la lumière de tous ces résultats, nous recommandons aux décideurs de mettre en place les pratiques logistiques testées ici (flotte hétérogène et retours en charge) car elles offrent des gains importants tant sur le plan économique (économie de coût significative) que sur le plan environnemental (réduction des émissions de GES). En regard des stratégies d'allocation, des gains sont possibles dépendant des cas d'études, mais aucune ne se hisse au-dessus des autres unilatéralement. ST02 et ST06 semblent tout de même être les stratégies les plus intéressantes car elles allient économies potentielles et équité.

Nous recommandons alors de renforcer l'objectif de collaboration visé dans notre étude, en promouvant une dynamique de co-création et de prise de décision collaborative au sein d'un théâtre de décision collaboratif réunissant les acteurs clés de la CA étudiée comme le CollabInnov de l'ÉTS. En effet, il serait possible de mieux mettre en lumière les différentes possibilités offertes par les stratégies d'allocation ainsi que les compromis qu'elles engendreraient dans ce type d'environnements. Par la visualisation des résultats (coût total, économies possibles et les allocations fournies à chaque ÉP en fonction de la stratégie mises en regard aux besoins en fertilisant de chaque exploitation), il serait possible d'accompagner les décideurs et les ÉP lors du processus décisionnel. En effet, il serait important que chaque ÉP puisse faire entendre sa voix et expliquer son point de vue en faveur de la stratégie qui lui

semble la plus profitable. L'objectif de cet atelier-théâtre serait d'expliquer les notions abordées dans ce mémoire afin de montrer la pertinence des outils développés et les mener vers une réflexion commune sur les compromis que chacun serait prêt à faire.

D'autres pistes de recherche pourraient être explorées. L'intégration de la théorie des jeux permettrait d'analyser les interactions stratégiques entre les ÉP, en étudiant comment leurs décisions individuelles influencent l'équilibre global de la CA. Une analyse détaillée des optimums de Pareto pourrait également être approfondie, en développant des indicateurs de performance plus fins pour évaluer les compromis entre équité et efficacité économique. Par ailleurs, l'utilisation de méthodes d'optimisation robuste ou stochastique pourrait aider à mieux gérer les incertitudes, comme les variations de production de digestat ou les fluctuations des coûts logistiques. La saisonnalité de productions des résidus organiques pourrait aussi être traitées par l'utilisation de séries chronologiques. Enfin, l'exploration de mécanismes incitatifs, tels que des subventions ou des pénalités, pourrait encourager les ÉP à adopter des comportements plus collaboratifs, favorisant ainsi des allocations plus équitables et durables.

ANNEXE I

SIMULATION DE ST05 DANS IBM ILOG CPLEX OPTIMIZATION STUDIO

```
*****  
* OPL 12.8.0.0 Model  
* Author: AT52820  
* Creation Date: 2025-05-12 at 14:01:50  
*****  
  
//////////  
// Ensembles //  
//////////  
  
range Emetteur=1..13;  
range Matiere=1..2; // 1 = liquide, 2 = solide  
range Taille=1..3; // 1 = petit, 2 = moyen, 3 = grand  
  
//////////  
// Paramètres //  
//////////  
  
float CAC[Matiere][Taille]=[[27223, 31337, 34766],[25851, 27909, 29280]]; //Coûts  
d'acquisition des camions amortis sur 7 ans en $  
float COC_AREC[1..3]=[1.93,2.09,3.25]; //Coûts d'opération des camions pour un  
trajet "AREC"  
float COC_AEC[1..3]=[1.76,1.85,1.94]; //Coûts d'opération des camions pour un  
trajet "AEC"  
float COC_REC[1..3]=[1.76,1.85,1.94]; //Coûts d'opération des camions pour un  
trajet "REC"  
float T_chauffeur = 228*7*60; //Disponibilité d'un conducteur de camion sur un an  
float C[Matiere][Taille]=[[20.7,29.52,37.71],[23.0, 32.8, 41.9]]; //Charge  
maximale de chaque type de camion  
  
float Temp_seuil[1..13*2]=...;  
float Temp_ST01[1..13*2]=...;  
float Temp_R[1..13*2]=...;  
float Temp_AREC[1..13*2*3]=...;  
float Temp_REC[1..13*2*3]=...;  
float Temp_AEC[1..13*2*3]=...;  
  
float seuil[Emetteur][Matiere];  
float ST01[Emetteur][Matiere];  
float R[Emetteur][Matiere];  
float T_AREC[Emetteur][Matiere][Taille];  
float T_REC[Emetteur][Matiere][Taille];  
float T_AEC[Emetteur][Matiere][Taille];  
  
// boucle permettant de mettre en forme les données issues d'un fichier excel  
execute{  
var count_emt = 0
```

```

var count_em = 0
for (var e in Emetteur){
  for (var m in Matiere){
    count_em = count_em + 1
    seuil[e][m]=Temp_seuil[count_em];
    R[e][m]=Temp_R[count_em];
    ST01[e][m]= Temp_ST01[count_em];
    for (var t in Taille){
      count_emt = count_emt + 1;
      T_AREC[e][m][t]=Temp_AREC[count_emt];
      T_REC[e][m][t]=Temp_REC[count_emt];
      T_AEC[e][m][t]=Temp_AEC[count_emt];
    }; // for t
  }; // for m
}; // for e
}; // execute

///////////////
// Variables de décision//
///////////////

dvar float+ D[Emetteur][Matiere]; //Allocations de digestat
dvar float+ AREC[Emetteur][Matiere][Taille]; //Nombre de trajets de type "AREC"
dvar float+ AEC[Emetteur][Matiere][Taille]; //Nombre de trajets de type "AEC"
dvar float+ REC[Emetteur][Matiere][Taille]; //Nombre de trajets de type "REC"
dvar int+ N[Matiere][Taille]; //Nombre de camions dans la flotte

/////////////
// Fonction objectif //
/////////////

maximize sum (m in Matiere, t in Taille) (N[m][t]*CAC[m][t]) +
  sum (e in Emetteur, m in Matiere, t in Taille)
  (AREC[e][m][t]*T_AREC[e][m][t]*COC_AREC[t] +
  AEC[e][m][t]*T_AEC[e][m][t]*COC_AEC[t] + REC[e][m][t]*T_REC[e][m][t]*COC_REC[t])
  + 2.2627 * 25/6.6*sum (e in Emetteur) D[e][2] + 127186;

/////////////
// Contraintes //
/////////////

subject to
{
  forall (e in Emetteur, m in Matiere) sum (t in Taille) ((AREC[e][m][t] +
  AEC[e][m][t])*C[m][t]) == D[e][m];
  forall (e in Emetteur, m in Matiere) sum (t in Taille) ((AREC[e][m][t] +
  REC[e][m][t])*C[m][t]) == R[e][m];
  forall (t in Taille, m in Matiere) sum (e in Emetteur) (AREC[e][m][t]*T_AREC
  [e][m][t] + REC[e][m][t]*T_REC[e][m][t] + AEC[e][m][t]*T_AEC[e][m][t]) <=
  T_chauffeur * N[m][t];
  sum (e in Emetteur) (D[e][1]+25/6.6*D[e][2]) == 92198;
  forall (e in Emetteur, m in Matiere) D[e][m] <= seuil[e][m];
}

```

ANNEXE II

CAS FICTIF GÉNÉRALISABLE (TEL QU'UTILISÉ DANS LE CHAPITRE 7)

ID	Type	Matière	Résidus organiques tmh/an	Siccité	Digestat alloué tmh/an	Siccité	Distance		Temps de déplacement min
							km	km	
1	EP	Solide	11620	18,7%	4567,2	25%	46,86	35,0	
2	EP	Liquide	8677	5,8%	8300	6,6%	146,67	109,5	
3	ENP	Solide	10304	45,4%	0	/	157,05	117,2	
4	ENP	Solide	16269	34,9%	0	/	64,39	48,1	
5	ENP	Liquide	542	8,5%	0	/	46,86	35,0	
6	EP	Solide	2711	15,8%	2085,6	25%	200,33	149,5	
7	EP	Solide	10846	22,7%	4963,2	25%	25,4	19,0	
8	EP	Liquide	17354	3,2%	8600	6,6%	183,16	136,7	
9	EP	Liquide	11001	3,2%	7500	6,6%	183,16	136,7	
10	EP	Solide	4870	23,4%	3088,8	25%	46,51	34,7	
11	EP	Liquide	2169	2,0%	5800	6,6%	46,51	34,7	
12	EP	Liquide	3221	2,0%	5900	6,6%	98,74	73,7	
13	EP	Liquide	8474	5,8%	8200	6,6%	54,38	40,6	

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Audy, J.-F., Rönnqvist, M., D'Amours, S., & Yahiaoui, A.-E. (2023). Planning methods and decision support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review. *International Journal of Forest Engineering*, 34(2), 143-167. <https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2142367>
- Boukherroub, T., LeBel, L., & Ruiz, A. (2017). A framework for sustainable forest resource allocation: A Canadian case study. *Omega*, 66, 224-235. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.10.011>
- Bräysy, O., Dullaert, W., Hasle, G., Mester, D., & Gendreau, M. (2008). An Effective Multirestart Deterministic Annealing Metaheuristic for the Fleet Size and Mix Vehicle-Routing Problem with Time Windows. *Transportation Science*, 42(3), 371-386. <https://doi.org/10.1287/trsc.1070.0217>
- Brosseau, X. (2024, 22 mai). Place du GNR dans la décarbonation. Perspectives gouvernementales. HEC Montréal. Repéré à https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2024/05/2-PPT_MEIE-1.pdf
- Derehajło, S., Tymińska, M., Skibko, Z., Borusiewicz, A., Romaniuk, W., Kuboń, M., ... Koszel, M. (2023). Heavy Metal Content in Substrates in Agricultural Biogas Plants. *Agricultural Engineering*, 27(1), 315-329. <https://doi.org/10.2478/agriceng-2023-0023>
- Desrosiers, J., Dumas, Y., Solomon, M. M., & Soumis, F. (1995). Chapter 2 Time constrained routing and scheduling. Dans *Handbooks in Operations Research and Management Science* (Vol. 8, pp. 35-139). (S.1.) : Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(05\)80106-9](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(05)80106-9)
- Dong, L., Taka, G. N., Lee, D., Park, Y., & Park, H. S. (2022). Tracking industrial symbiosis performance with ecological network approach integrating economic and environmental benefits analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 185, 106454. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106454>
- Faure, M., Boukherroub, T., Audy, J.-F., & Lemire, P.-O. (2025). Transport optimization of an anaerobic digestion co-product in a closed-loop supply chain. Communication présentée au CoDIT 2025, Split, Croatie.

Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., Van Der Laan, E., Van Nunen, J. A. E. E., & Van Wassenhove, L. N. (1997). Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research*, 103(1), 1-17. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00230-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00230-0)

Frisk, M., Göthe-Lundgren, M., Jörnsten, K., & Rönnqvist, M. (2010). Cost allocation in collaborative forest transportation. *European Journal of Operational Research*, 205(2), 448-458. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.01.015>

Fuel LCA model methodology. (2020). Gatineau, QC : Environment and Climate Change Canada = Environnement et Changement climatique Canada.

Neha, Upadhyay, S. N., & Dubey, S. K. (2020). Bio-methanol as a renewable fuel from waste biomass: Current trends and future perspective. *Fuel*, 273, 117783. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117783>

Gazran, S. (2024). *Developing planning and collaboration models for the efficient integration of truck platoons in forestry transportation*. École de Technologie Supérieure, Montréal. Repéré à https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/3589/1/GAZRAN_Saba.pdf

Gouvernement du Québec. (s.d.). Guide des normes de charges et dimensions des véhicules routiers. Repéré à <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/ent-camionnage/charges-dimensions/Documents/Guide-normes-charges-dimensions.pdf>

Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (Éds). (2012). *Data mining: concepts and techniques* (3rd ed). Amsterdam Boston : Elsevier/Morgan Kaufmann.

(2023a). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1^{re} éd.). (S.l.) : Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc). (2023b). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1^{re} éd.). (S.l.) : Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

Jacquemin, A., Tulkens, H., & Mercier, P. (2001). *Fondements d'économie politique* (3e éd). Bruxelles [Paris] : De Boeck université.

Marques, A., Soares, R., Santos, M. J., & Amorim, P. (2020). Integrated planning of inbound and outbound logistics with a Rich Vehicle Routing Problem with backhauls. *Omega*, 92, 102172. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.102172>

Messner, F., Zwirner, O., & Karkuschke, M. (2006). Participation in multi-criteria decision support for the resolution of a water allocation problem in the Spree River basin. *Land Use Policy*, 23(1), 63-75. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2004.08.008>

Milojević, S., Stopka, O., Orynycz, O., Tucki, K., Šarkan, B., & Savić, S. (2025). Exploitation and Maintenance of Biomethane-Powered Truck and Bus Fleets to Assure Safety and Mitigation of Greenhouse Gas Emissions. *Energies*, 18(9), 2218. <https://doi.org/10.3390/en18092218>

Obal, T. M., De Souza, J. T., Florentino, H. D. O., De Francisco, A. C., & Soler, E. M. (2024). A matheuristic applied to clustering rural properties and allocating plants for biogas generation. *Energy*, 305, 132249. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132249>

Pineau, P.-O. (2024, 22 mai). États des lieux du gaz naturel et du GNR au Québec : production, distribution et consommation. HEC Montréal. Repéré à https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2024/05/1-PPT_HEC.pdf

Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2018). Towards a consensus on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 179, 605-615. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.224>

Reporoussis, P. P., & Tarantilis, C. D. (2010). Solving the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows via Adaptive Memory Programming. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(5), 695-712. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2009.08.004>

Semet, F. (1995). A two-phase algorithm for the partial accessibility constrained vehicle routing problem. *Annals of Operations Research*, 61(1), 45-65. <https://doi.org/10.1007/BF02098281>

Shukla, P. R., Skea, J., Reisinger, A. R., & IPCC (Éds). (2022). *Climate change 2022: mitigation of climate change*. Geneva : IPCC.

Szwed, M., Koszel, M., & Przywara, A. (2024). Effect of Fertilization with Digestate on Crop Yields: A Review. Dans E. Lorencowicz, B. Huyghebaert, & J. Uziak (Éds), *Farm Machinery and Processes Management in Sustainable Agriculture* (Vol. 609, pp. 419-425). Cham : Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70955-5_46

Tarantilis, C. D., Kiranoudis, C. T., & Vassiliadis, V. S. (2003). A list based threshold accepting metaheuristic for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 54(1), 65-71. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601443>

D., Kiranoudis, C. T., & Vassiliadis, V. S. (2004). A threshold accepting metaheuristic for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 152(1), 148-158. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00669-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00669-0)

Taveira De Souza, J., Obal, T. M., X. Valenzuela, R., & De Oliveira Florentino, H. (2024). Optimizing the process of sewage sludge collection for bioenergy generation and biofertilizer production. *Journal of Cleaner Production*, 457, 142367. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142367>

Vázquez-Serrano, J. I., Cárdenas-Barrón, L. E., Vicencio-Ortiz, J. C., Smith, N. R., Bourguet-Díaz, R. E., & Céspedes-Mota, A. (2025). Allocation and pricing of drinking water in a sustainable closed-loop supply chain under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 521, 146051. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146051>

Wan, T., & Wang, Y. (2022). The Hazards of Electric Car Batteries and Their Recycling. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1011(1), 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1011/1/012026>

Whitmore, J., & Pineau, P.-O. (2025, février). État de l'énergie au Québec 2025. Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal. Repéré à https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2025/03/EEQ2025_WEB.pdf