



**Analyse et comparaison de l’empreinte carbone de la production conventionnelle et biologique de bleuet sauvage : étude de cas à la Bleuetière d’enseignement et de recherche de l’Université du Québec à Chicoutimi au Saguenay–Lac-Saint-Jean**

**Par N’guessan Charles Yao**

**Mémoire présenté à l’Université du Québec à Chicoutimi en vue de l’obtention du grade de Maîtrise ès sciences (M. Sc.) en ressources renouvelables**

Québec, Canada

© N’guessan Charles Yao, 2026

## RÉSUMÉ

La lutte contre les changements climatiques est une préoccupation majeure pour l'agriculture, et la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) est un enjeu clé. L'industrie du bleuet sauvage est une activité économique importante dans la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean, qui abrite la plus grande superficie cultivée du Québec. Cependant, aucune étude n'a évalué les implications climatiques de sa production. Ce mémoire vise à évaluer et à comparer l'empreinte carbone de la culture conventionnelle et biologique du bleuet sauvage par une étude de cas sur la Bleuetière d'enseignement et de recherche (BER) de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) au Saguenay–Lac-Saint-Jean. L'objectif est d'analyser et de comparer l'empreinte carbone des deux systèmes de production et d'identifier les principales étapes émettrices de GES.

Cette étude s'appuie sur une évaluation de l'empreinte carbone de la production de bleuet dans une perspective de cycle de vie conforme à la norme ISO 14044 et effectuée à l'aide du logiciel OpenLCA. L'analyse couvre l'ensemble du processus de production, soit « du berceau à la porte » : fabrication et transport des intrants agricoles, opérations culturales (fauchage, fertilisation, pollinisation et récolte), et transport des bleuets vers l'usine de congélation. Les effets sur l'environnement ont été évalués à l'aide de la méthode IPCC 2013 et exprimés en kilogrammes équivalents en dioxyde de carbone (kg CO<sub>2</sub>-éq). Nous avons utilisé deux unités fonctionnelles : les émissions par kilogramme de bleuet produit et les émissions par 100 \$ de bleuets vendus. Les données d'inventaire principales ont été collectées à la BER de l'UQAC située à Normandin, tandis que les données secondaires viennent de la base de données Ecoinvent.

L'analyse des résultats de la simulation Monte Carlo montre qu'il est impossible de tirer une conclusion sur la différence significative des empreintes carbone des systèmes conventionnel et biologique. Dans ce contexte, il devient alors clair que les différences entre les systèmes de production sont seulement des tendances non significatives. Les résultats montrent que la production biologique a généralement une empreinte carbone plus faible que la production conventionnelle. Les émissions de GES varient entre 0,42 et 0,57 kg CO<sub>2</sub>-éq kg<sup>-1</sup> de bleuets pour la production biologique, comparativement à 0,46 et 0,72 kg CO<sub>2</sub>-éq kg<sup>-1</sup> de bleuets pour la production conventionnelle, selon les scénarios considérés. En ce qui concerne l'unité fonctionnelle « émissions par 100 \$ de bleuets vendus », les émissions varient de 13,36 à 18,12 kg CO<sub>2</sub>-éq 100 \$<sup>-1</sup> de bleuets vendus pour la production biologique et de 23,37 à 36,64 kg CO<sub>2</sub>-éq 100 \$<sup>-1</sup> pour la production conventionnelle. Toutefois, lorsque les estimations reposent sur des données locales d'émissions de N<sub>2</sub>O issues de mesures expérimentales, l'écart entre les deux systèmes devient marginal, avec une différence observée d'environ 8,7 % avec l'unité fonctionnelle des émissions par kg de bleuets produits au champ. Ces estimations différentes selon les types de sources de données suggèrent que les distinctions entre les systèmes biologique et conventionnel sont fortement atténuées lorsque les données locales d'émissions de N<sub>2</sub>O sont utilisées. Par conséquent, l'avantage environnemental du système biologique dépend de la source des

émissions des émissions de N<sub>2</sub>O du sol, ce qui met en évidence l'importance du choix des données dans l'analyse comparative des systèmes de production de bleuet. L'analyse indique que lorsque les données empiriques propres au site sont utilisées, la fertilisation et la consommation de carburant des opérations mécanisées constituent les principales sources d'émissions. Elle souligne l'utilité importante de s'appuyer sur des données d'inventaire d'émissions locales pour accroître la fiabilité des évaluations environnementales.

Mots-clés : gestion des gaz à effet de serre, gestion du cycle de vie, bleuet sauvage, empreinte carbone, émissions de N<sub>2</sub>O

# TABLE DES MATIERES

|                                                                                                                                            |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| RÉSUMÉ .....                                                                                                                               | II   |
| TABLE DES MATIERES.....                                                                                                                    | IV   |
| LISTES DES TABLEAUX .....                                                                                                                  | VI   |
| LISTE DES FIGURES .....                                                                                                                    | VII  |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS.....                                                                                                                | VIII |
| REMERCIEMENTS.....                                                                                                                         | IX   |
| INTRODUCTION.....                                                                                                                          | 1    |
| 1. LE SECTEUR DE LA PRODUCTION DE BLEUET ET LES EMISSIONS DE GES .....                                                                     | 2    |
| 2. LES DIFFERENTES PRATIQUES DANS LA PRODUCTION DE BLEUETS SAUVAGES .....                                                                  | 4    |
| 2.1 Les étapes de la phase végétative du bleuët .....                                                                                      | 4    |
| 2.2 Les étapes de la phase productive du bleuët.....                                                                                       | 5    |
| 3. LA PRODUCTION CONVENTIONNELLE DU BLEUET SAUVAGE .....                                                                                   | 5    |
| 4. LA PRODUCTION BIOLOGIQUE DU BLEUET SAUVAGE .....                                                                                        | 6    |
| 5. LES ETUDES SUR L'EMPREINTE CARBONE DU BLEUET .....                                                                                      | 7    |
| 6. OBJECTIF DE L'ETUDE ET HYPOTHESES .....                                                                                                 | 9    |
| CHAPITRE 1 MATÉRIEL ET MÉTHODES .....                                                                                                      | 12   |
| 1.1 SITE DE L'ETUDE .....                                                                                                                  | 12   |
| 1.2 PARAMETRES DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE .....                                                                                          | 13   |
| 1.2.1 Définition de l'analyse de cycle de vie .....                                                                                        | 14   |
| 1.2.2 Conformité à ISO 14044 .....                                                                                                         | 14   |
| 1.2.3 Le logiciel OpenLCA .....                                                                                                            | 15   |
| 1.2.4 Les unités fonctionnelles.....                                                                                                       | 15   |
| 1.2.5 Les périmètres des systèmes étudiés.....                                                                                             | 16   |
| 1.3 INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE .....                                                                                                       | 19   |
| 1.4 METHODE D'EVALUATION DU CYCLE DE VIE .....                                                                                             | 23   |
| 1.5 LES FACTEURS D'EMISSIONS UTILISES DANS L'EVALUATION DE L'EMPREINTE CARBONE DU BLEUET SAUVAGE .....                                     | 26   |
| 1.6 ANALYSE D'INCERTITUDE ET DE SENSIBILITE .....                                                                                          | 30   |
| CHAPITRE 2 RÉSULTATS .....                                                                                                                 | 37   |
| 2.1 COMPARAISON DES EMPREINTES CARBONE DE LA PRODUCTION CONVENTIONNELLE ET BIOLOGIQUE DU BLEUET SAUVAGE .                                  | 37   |
| 2.1.1 Comparaison des empreintes carbone des postes d'émissions : unité fonctionnelle – émissions par kg de bleuets produits au champ..... | 38   |
| 2.1.2 Comparaison des empreintes carbone des postes d'émission : unité fonctionnelle – émissions par 100 \$ de bleuets vendus .....        | 40   |
| 2.2 ANALYSE D'INCERTITUDE ET DE SENSIBILITE .....                                                                                          | 43   |
| TEST DE SENSIBILITE : ÉMISSION DE N <sub>2</sub> O DES CHAMPS.....                                                                         | 47   |
| TEST DE SENSIBILITE : TRANSPORT DU FUMIER DE VOLAILLE .....                                                                                | 47   |
| CHAPITRE 3 DISCUSSION.....                                                                                                                 | 51   |
| 3.1 COMPARAISON DES RESULTATS A LA LITTERATURE .....                                                                                       | 51   |
| 3.2 SIMULATION MONTE CARLO.....                                                                                                            | 57   |
| 3.3 TESTS DE SENSIBILITE : ÉMISSION DE N <sub>2</sub> O AU CHAMP ET TRANSPORT DU FUMIER DE VOLAILLE .....                                  | 59   |
| 3.4 LIMITES DE L'INTERPRETATION DES RESULTATS DE L'ETUDE .....                                                                             | 60   |
| 3.4.1 Rendement des deux systèmes de production .....                                                                                      | 60   |
| 3.4.2 Unité fonctionnelle : émissions de GES par 100 \$ de bleuets vendus .....                                                            | 61   |
| CONCLUSION .....                                                                                                                           | 63   |

|                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| LISTE DES RÉFÉRENCES .....                                                                                                                                                                     | 65 |
| ANNEXE 1 : LISTE DES DONNÉES D'INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE COLLECTÉES .....                                                                                                                     | 68 |
| ANNEXE 2 : DONNÉES D'ÉMISSION DE N <sub>2</sub> O – ÉCHANTILLONNAGE À LA BER.....                                                                                                              | 71 |
| ANNEXE 3 : LISTES DES PROCESSUS INCLUS ET EXCLUS POUR LA PRODUCTION DE FRUITS SELON LE PRODUCT<br>CATEGORY RULES (PCR) DE LA DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE DE PRODUIT « FRUITS AND NUTS » ..... | 72 |
| ANNEXE 4 : MATRICE DE PEDIGREE POUR L'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES DONNÉES (QDD) DE L'ACV<br>SELON LES 6 CRITÈRES .....                                                                        | 75 |
| ANNEXE 5 : RÉSULTATS DES MODÉLISATIONS OPENLCA DES DEUX DIFFÉRENTS SCÉNARIOS .....                                                                                                             | 77 |

## LISTES DES TABLEAUX

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau 1</b> : Données collectées pour les phases végétative et de production du bleuets. Les engrais minéraux et herbicides sont utilisés uniquement dans le système conventionnel et les engrais organiques sont appliqués dans le système biologique, les autres étapes sont communes aux deux systèmes. ....                                       | 21 |
| <b>Tableau 2</b> : Potentiel de réchauffement global des principaux GES avec un horizon temporel de 100 ans (GWP100) (IPCC 2013). ....                                                                                                                                                                                                                     | 23 |
| <b>Tableau 3</b> : Émissions de N <sub>2</sub> O directes et indirectes dues à l'utilisation d'engrais, estimées avec le logiciel Holos et échantillonnées sur le terrain par Pelletier et al. (2025). Les détails des émissions de N <sub>2</sub> O à partir des données locales d'échantillonnage de N <sub>2</sub> O sont montrés dans l'annexe 2. .... | 26 |
| <b>Tableau 4</b> : les processus et facteurs d'émissions utilisés dans la modélisation d'ACV. Les détails des processus inclus et exclus sont présentés dans l'annexe 3. La description (version anglaise) des processus est prise intégralement de la base de données Ecoinvent v3.10. ....                                                               | 28 |
| <b>Tableau 5</b> : matrice à cinq indicateurs de qualité des données d'ACV (Weidema et Wesnæs 1996). L'attribution des scores et le remplissage de la matrice de pedigree sont détaillés et présentés à l'annexe 4. ....                                                                                                                                   | 33 |
| <b>Tableau 6</b> : Empreintes carbone des systèmes de production selon les différents scénarios et les unités fonctionnelles utilisées dans la modélisation. Les résultats détaillés sont présentés dans l'annexe 5. ....                                                                                                                                  | 37 |
| <b>Tableau 7</b> : Empreintes carbone des différents postes d'émissions dans le scénario 1 : unité fonctionnelle – émissions par kg de bleuets produits au champ. ....                                                                                                                                                                                     | 39 |
| <b>Tableau 8</b> : Empreintes carbone des différents postes d'émissions dans le scénario 2 : unité fonctionnelle – émissions par kg de bleuets produits au champ. ....                                                                                                                                                                                     | 39 |
| <b>Tableau 9</b> : Empreintes carbone des différents postes d'émissions dans le scénario 1 : unité fonctionnelle – émissions par 100 \$ de bleuets vendus. ....                                                                                                                                                                                            | 41 |
| <b>Tableau 10</b> : Empreintes carbone des différents postes d'émissions dans le scénario 2 : unité fonctionnelle – émissions par 100 \$ de bleuets vendus. ....                                                                                                                                                                                           | 42 |
| <b>Tableau 11</b> : Contribution des émissions de N <sub>2</sub> O des champs après application d'engrais dans les deux scénarios sur un cycle de production (2 ans) – Les valeurs des contributions sont présentées pour le test de sensibilité. ....                                                                                                     | 47 |

## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 1</b> Bleuetière d'enseignement et de recherche accréditée à l'UQAC située à Normandin. ....                                                                                                                                                                                                                | 13 |
| <b>Figure 2</b> Périmètres des deux systèmes de production de bleuets : du berceau à la barrière.....                                                                                                                                                                                                                 | 18 |
| <b>Figure 3</b> Distribution des émissions de GES ( $\text{kg CO}_2\text{-eq kg}^{-1}$ ) des systèmes de production de bleuets conventionnel et biologique obtenue par simulation Monte Carlo – Scénario 1 (émissions de $\text{N}_2\text{O}$ basées sur les données de Holos). ....                                  | 44 |
| <b>Figure 4</b> Distribution des émissions de GES ( $\text{kg CO}_2\text{-eq kg}^{-1}$ ) des systèmes de production de bleuets conventionnel et biologique obtenue par simulation Monte Carlo – Scénario 2 (émissions de $\text{N}_2\text{O}$ basées sur les données expérimentales de Pelletier et al. (2025)). .... | 46 |
| <b>Figure 5</b> l'impact du transport du fumier en fonction de la distance d'approvisionnement dans le scénario 1 – Les émissions de la production conventionnelle sont présentées à titre comparatif. ....                                                                                                           | 48 |
| <b>Figure 6</b> l'impact du transport du fumier en fonction de la distance d'approvisionnement dans le scénario 2 – Les émissions de la production conventionnelle sont présentées à titre comparatif. ....                                                                                                           | 49 |

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

|                  |                                                                                                        |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ACV              | Analyse de cycle de vie                                                                                |
| CABC             | Centre d'agriculture biologique du Canada                                                              |
| CH <sub>4</sub>  | Méthane                                                                                                |
| CO <sub>2</sub>  | Dioxyde de carbone                                                                                     |
| GES              | Gaz à effet de serre                                                                                   |
| HFC              | Hydrofluorocarbures                                                                                    |
| IPCC             | Intergovernmental Panel on Climate Change                                                              |
| ISO              | Organisation internationale de normalisation                                                           |
| ICV              | Inventaire du cycle de vie                                                                             |
| LUC              | Land use change                                                                                        |
| MAPAQ            | Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec                               |
| MELCCFP          | Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs |
| N <sub>2</sub> O | Oxyde nitreux                                                                                          |
| PFC              | Perfluorocarbures                                                                                      |
| PRG              | Potentiel de réchauffement global                                                                      |
| SF <sub>6</sub>  | Hexafluorures de soufre                                                                                |
| UNEP             | United Nations Environment Programme                                                                   |
| UQAC             | Université du Québec à Chicoutimi                                                                      |

## **REMERCIEMENTS**

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma gratitude envers Monsieur Patrick Faubert, mon directeur de recherche, mon co-directeur, Maxime Paré, et ma co-directrice, Emna Marouani, pour leur encadrement, leurs avis éclairés, leur suivi constant et leur transmission de savoir.

Je tiens également à remercier chaleureusement toute l'équipe de la Chaire en éco-conseil, et plus particulièrement Monsieur Pierre-Luc Dessureault, qui a toujours été disponible pour répondre à mes questions et m'aider à orienter mon travail.

Enfin, je remercie ma famille, mes proches et mes ami(e)s, particulièrement Aya Mathilde Priscilla Diby, qui ont toujours été là pour m'encourager tout au long de cette étude.

## INTRODUCTION

Il est manifeste que l'influence des activités humaines est responsable du réchauffement de l'atmosphère, de l'océan et de la Terre (IPCC 2021b). Selon les modèles climatiques et les engagements actuels des pays signataires de l'Accord de Paris, la température moyenne mondiale devrait continuer à augmenter au cours des prochaines décennies (UNEP 2025). Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (IPCC 2021a), les gaz à effet de serre (GES) générés par l'activité humaine sont la principale cause du réchauffement climatique. Selon le sixième rapport d'évaluation du Groupe de travail # 1 du GIEC, le réchauffement climatique sera plus prononcé que prévu, pouvant même dépasser la limite critique de 1,5 °C entre 2030 et 2040 (IPCC 2021b). Ce phénomène pourrait se produire en l'absence de mesures d'urgence et radicales visant à réduire les GES (IPCC 2021b). En réponse à cette situation, le groupe de travail # 3 du GIEC recommande des réductions drastiques, immédiates et globales des émissions de GES dans tous les secteurs (IPCC 2022).

Les engagements pris par les gouvernements dans leurs plans nationaux en matière de climat projettent une hausse des températures comprise entre 2,3 °C et 2,5 °C d'ici la fin du siècle (UNEP 2025). Par conséquent, il est peu probable que l'objectif de l'Accord de Paris, qui vise à limiter le réchauffement planétaire en deçà de 2 °C et, si possible, à 1,5 °C, soit atteint (UNEP 2025). C'est pourquoi des mesures sont prises à l'échelle mondiale pour lutter contre le réchauffement climatique. Pour amorcer et accélérer la transformation nécessaire, chacun doit assumer sa part de responsabilité en éliminant les obstacles qui entravent l'évolution

des projets en faveur du climat. Si toutes ces mesures sont mises en œuvre individuellement, aucune d'entre elle ne provoquera de changement majeur. Toutefois, si elles sont appliquées simultanément, elles pourraient déclencher un changement systémique plus profond et durable (UNEP 2023).

Au Canada, le secteur agricole est responsable d'environ 10 % des GES, avec comme principales sources les émissions d'oxyde nitreux ( $\text{N}_2\text{O}$ ) des sols agricoles fertilisés et les émissions de méthane ( $\text{CH}_4$ ) provenant de l'élevage (ECCC 2025). Les émissions totales de GES du secteur de l'agriculture au Canada sont passées de 43 Mt d'éq.  $\text{CO}_2$  en 1990 à 55 Mt d'éq.  $\text{CO}_2$  en 2023 (MELCCFP 2025). Au Québec, les inventaires de GES indiquent que les émissions liées au secteur de l'agriculture se classaient au troisième rang avec 7,7 Mt éq.  $\text{CO}_2$ , soit 9,9 % des émissions totales de GES en 2023 (MELCCFP 2025). Ce projet de maîtrise étudiera l'impact environnemental des activités dans le secteur de la production de bleuet sauvage au Canada, dans la province du Québec, plus précisément dans la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean.

## **1. Le secteur de la production de bleuet et les émissions de GES**

La culture et la production de bleuet sont d'une grande importance économique pour plusieurs pays dans le monde. Les États-Unis sont le plus grand producteur mondial de bleuet avec 32 % de la production mondiale, dominée à 70 % par le bleuet en corymbe (FEPEX 2020a). Le Canada, le Chili et le Pérou représentent ensemble 43 % de la superficie de production mondiale de bleuet (FEPEX 2020b) . Le Chili et le Canada sont les deux plus grands exportateurs de

bleuet et représentent respectivement 20 % et 19 % des exportations mondiales de bleuet (FAO 2022).

L'industrie du bleuet sauvage au Québec a un impact économique majeur pour la province. La région du Saguenay–Lac-Saint-Jean regroupe plus de 80 % des surfaces cultivées dans la province du Québec (MAPAQ 2022). Cette production représente la deuxième activité agricole la plus importante de la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean, après la production laitière en termes de revenu généré (MAPAQ 2016). Par conséquent, la culture du bleuet sauvage a un impact important pour l'économie de cette région. En 2020, le Québec comptait 440 producteurs de bleuet sauvage pour une superficie totale de 37 254 hectares (MAPAQ 2022). Entre 2015 et 2019, les recettes annuelles moyennes de la production de bleuet au Québec ont augmenté, passant de 31 à 52 millions de dollars canadiens, malgré les variations de rendement dues aux conditions climatiques (MAPAQ 2022).

Le bleuet sauvage québécois pousse dans deux types de territoire : la forêt et les bleuetières aménagées. Au Saguenay–Lac-Saint-Jean, 56 % des bleuetières sont situées sur des terres publiques et 44 % se trouvent sur des terres privées (MAPAQ 2022). Toutefois, la production du bleuet sauvage, qu'elle soit biologique ou conventionnelle, n'est pas sans impacts environnementaux. En effet, la production du bleuet sauvage nécessite plusieurs activités importantes à la gestion et à la récolte qui entraînent des émissions directes et indirectes de GES. Les principales sources d'émissions de GES dans la production de bleuet en corymbe sont liées à la consommation de carburants fossiles pour la machinerie (Cordes *et al.* 2016). De plus, l'utilisation d'engrais qu'elle soit d'origine chimique ou organique

génère des GES tant au niveau de leur production qu'à la suite de leur application au champ (Cordes *et al.* 2016). De ce fait, la culture du bleuets sauvage qui constitue une culture adaptée au milieu boréal et qui joue un rôle important dans l'économie de la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean, génère des impacts environnementaux qui doivent être pris en compte dans une perspective d'évaluation de la durabilité.

## **2. Les différentes pratiques dans la production de bleuets sauvages**

La culture du bleuets sauvage se pratique en deux phases : végétative et productive. De plus, il existe deux systèmes de production de bleuets sauvage qui sont : la production conventionnelle et la production biologique.

### **2.1 Les étapes de la phase végétative du bleuets**

La phase végétative de la culture du bleuets comprend plusieurs étapes clés, chacune d'entre elles génère des GES (MAAPNB 2017b; Paré *et al.* 2022; CABC 2024a). Tout d'abord, il y a le fauchage mécanique qui est essentiel pour contrôler la concurrence des mauvaises herbes et stimuler la croissance du bleuets (CABC 2024a). Cette opération nécessite l'utilisation d'équipement agricole, ce qui entraîne des émissions de GES principalement liées à la consommation de carburant (CABC 2024a). Ensuite, on applique des herbicides pour contrôler également les mauvaises herbes. La production, le transport et l'utilisation de ces herbicides entraînent des émissions de GES. Enfin, il y a la fertilisation qui est essentielle pour assurer une croissance optimale des bleuets (CABC 2024a), que ce soit par l'utilisation d'engrais chimiques ou organiques. Ces derniers entraînent des émissions au champ de  $N_2O$ , un GES doté d'un potentiel de réchauffement global élevé (IPCC 2013b). Ainsi, chacune de ces opérations dans la phase végétative contribue à l'empreinte carbone

de la culture du bleuet.

## **2.2 Les étapes de la phase productive du bleuet**

La phase de production de bleuets comporte plusieurs étapes importantes qui entraînent des émissions de GES. Tout d'abord, il y a la pollinisation des fleurs qui nécessite le transport de ruches de pollinisation de bourdons fébriles (*Bombus impatiens*) de type Quad, nommées ci-après ruches Quad, et de ruches d'abeille domestique (MAAPNB 2017b; CABC 2024a), ce qui entraîne des émissions indirectes liées à la consommation de carburant pour le transport et la manutention. Ensuite, la seconde étape est la récolte des bleuets qui requiert, quant à elle, l'utilisation de machines fonctionnant au diesel (CABC 2024a), ce qui génère également des émissions de GES. Finalement, les bleuets récoltés sont transportés vers les usines de congélation, par camion réfrigéré générant des émissions supplémentaires qui sont essentiellement des émissions indirectes.

## **3. La production conventionnelle du bleuet sauvage**

Les pratiques agricoles de la production conventionnelle du bleuet sauvage reposent principalement sur l'utilisation d'engrais minéraux et de traitements phytosanitaires (pesticides). Ces pratiques visent à optimiser le rendement de la production (Montalba *et al.* 2019). Les producteurs de bleuets conventionnels utilisent des herbicides à larges spectres, ce qui permet de limiter la présence de mauvaises herbes sur une longue durée (CABC 2024b). Cependant, l'application d'herbicides dans la culture conventionnelle des bleuets peut être programmée en fonction des stades de développement des bleuets et des adventices. L'application d'herbicides intervient avant la période de croissance des bleuets (début du

printemps). Elle peut se faire aussi après la croissance des bleuets c'est-à-dire à la fin du printemps/été. On peut également appliquer les herbicides pendant la période de dormance en l'absence de fruits (fin de l'automne) (MAAPNB 2017a). Ces différentes périodes d'application sont déterminées en fonction des effets des herbicides dans les bleuetières (MAAPNB 2017a). Toutefois, il est recommandé de choisir des produits adaptés et de suivre les directives pour préserver les cultures et contrôler les mauvaises herbes de manière efficiente (MAAPNB 2017b). De plus, au Québec, les engrais minéraux et organiques sont appliqués au cours de la phase végétative tôt au printemps, après la fauche du bleuet (Lafond et Ziadi 2013). Cependant, ces intrants utilisés dans la culture du bleuet ont un impact environnemental. Cet impact est notamment dû aux émissions de GES générées par leur production et leur application (Cordes *et al.* 2016; Montalba *et al.* 2019). La culture conventionnelle recourt également à des machines agricoles. Si leur utilisation est indispensable, elle entraîne malheureusement des émissions de GES liées à la combustion de carburant (Montalba *et al.* 2019).

#### **4. La production biologique du bleuet sauvage**

Dans les systèmes de production biologique, les engrais organiques et l'épandage de fumier composté servent à assurer l'apport nutritif aux plantes et à améliorer la fertilité du sol (Montalba *et al.* 2019; CAB 2024b). Les méthodes de rotation culturale et d'engrais verts ne sont pas adaptées à la culture des bleuets biologiques. Par conséquent, les producteurs de bleuets biologiques doivent s'appuyer sur des apports d'amendements du sol autorisés pour garantir la fertilité du sol et la productivité des cultures (CAB 2024b). Pour lutter contre les insectes

nuisibles qui menacent ses bleuets biologiques, le producteur doit s'appuyer sur un ensemble de techniques culturales et physiques. Il s'agit de sélectionner un endroit adéquat, de procéder à une inspection visuelle, d'installer des pièges à insectes pour détecter la présence d'insectes dans les bleuetières, et d'utiliser diverses méthodes d'assainissement (CABC 2024b). Selon la méthode utilisée, la taille peut permettre de maîtriser certaines espèces de mauvaises herbes, d'insectes et de maladies dans les bleuetières sous régie biologique (CABC 2024b). Contrairement à la méthode de production conventionnelle qui dépend des engrais chimiques, les producteurs biologiques s'appuient sur des sources organiques de nutriments pour assurer la vitalité des terres. Ils emploient des engrais organiques solubles, tels que la farine de poisson, le fumier animal, comme le fumier de poulet ou le compost, pour apporter des éléments nutritifs au sol et préserver sa fertilité à long terme (Paré *et al.* 2022; CABC 2024b). La culture biologique du bleuet utilise de la machinerie responsable d'émissions de GES, tout comme la culture conventionnelle.

## **5. Les études sur l'empreinte carbone du bleuet**

L'analyse du cycle de vie (ACV) est un outil couramment utilisé pour évaluer l'impact environnemental des processus et des produits (ISO 2006). Les études sur l'empreinte carbone du bleuet révèlent des émissions variables en fonction des pratiques agricoles et des régions géographiques. Si on tient compte du changement d'affectation des terres (LUC), l'empreinte carbone de la production biologique de bleuets dans les bleuetières chiliennes étudiées varie entre des absorptions ( $-0,94 \text{ kg CO}_2\text{-}\text{eq kg}^{-1}$ ) et des émissions ( $0,61 \text{ kg CO}_2\text{-}\text{eq kg}^{-1}$ ) de GES par kilogramme de bleuets en corymbe (Cordes *et al.* 2016). En revanche, l'empreinte carbone sans

prise en compte du changement d'affectation des terres, varie de 0,27 à 0,69 kg CO<sub>2</sub>-éq kg<sup>-1</sup> de bleuets en corymbe (Cordes *et al.* 2016). La grande variabilité dans les résultats montre que les méthodes de production influencent considérablement l'empreinte carbone de la production de bleuets. Les facteurs qui contribuent le plus aux émissions de GES du bleuet sont les engrais minéraux et organiques, suivis de la consommation d'énergie pour les activités sur le terrain, ce qui représente en moyenne respectivement 50 % et 43 % des émissions globales (Cordes *et al.* 2016). D'après une étude de Resque Porto (2023), les champs de bleuet en corymbe en Colombie-Britannique dont la nappe phréatique est plus élevée émettent plus de CO<sub>2</sub> et de N<sub>2</sub>O que les champs dont la nappe phréatique est plus basse, respectivement de 29 % et 130 %. Ce facteur a entraîné des émissions annuelles globales plus élevées de 36 095 kg CO<sub>2</sub>-éq ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> en nappe élevée contre 28 755 kg CO<sub>2</sub>-éq ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> en nappe basse dans les champs (Resque Porto 2023). Aussi, une étude menée en Italie a examiné les impacts de l'ensemble de la chaîne de production conventionnelle de bleuet en corymbe. Elle a conclu que l'ensemble de la chaîne de production du bleuet émet 0,44 kg CO<sub>2</sub>-éq par kg de bleuets produits (Girgenti *et al.* 2013). Percival et Dias (2014) ont analysé la consommation d'énergie et les émissions de GES liées à la production de bleuet sauvage, à partir de pratiques observées entre 2005 et 2008. Ils ont démontré qu'un système de production typique, incluant le fauchage, l'utilisation de produits agrochimiques et la récolte mécanisée, consomme environ 1 398 MJ d'énergie et émet 80,7 kg de CO<sub>2</sub> pour chaque tonne de bleuets produite (Percival et Dias 2014). Cependant, l'adoption de pratiques plus énergivores, telles que l'utilisation de brûleurs au mazout et de systèmes d'irrigation supplémentaires alimentés au diesel,

entraîne une hausse de la consommation énergétique à 7 200 MJ et des émissions de GES à 239,7 kg CO<sub>2</sub> par tonne de bleuets (Percival et Dias 2014). La production, le transport et l'utilisation des produits agrochimiques représentent 73,7 % de l'énergie utilisée dans le système de production (Percival et Dias 2014). Ces résultats démontrent l'impact significatif des méthodes de gestion sur l'empreinte carbone de la production de bleuets sauvages. Ils révèlent que l'adoption de procédés fortement dépendants des combustibles fossiles peut entraîner une hausse de la consommation énergétique et des émissions de GES (Percival et Dias 2014).

Bien que la culture de bleuets soit un secteur économique clé au Québec, il n'existe pas d'études évaluées par les pairs qui examinent les impacts environnementaux. Ce projet de recherche permettra donc de répondre au manque de connaissances concernant l'empreinte carbone la production conventionnelle et biologique de bleuets sauvages au Québec en utilisant le contexte de la région la plus productrice du Saguenay–Lac-Saint-Jean.

## **6. Objectif de l'étude et hypothèses**

Le principal objectif de l'étude est de déterminer et de comparer l'empreinte carbone de la production conventionnelle et biologique de bleuets sauvages par étude de cas sur la Bleuetière d'enseignement et de recherche (BER) de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) au Saguenay–Lac-Saint-Jean. À ce jour, il n'existe pas d'étude sur l'empreinte carbone de bleuets sauvages au Québec. En quantifiant les émissions de GES à chaque étape de la chaîne de production, de la culture de bleuets au transport de la récolte vers les usines de congélation, cette étude vise à identifier les activités les plus émettrices et les pratiques agricoles les plus efficaces

pour minimiser l'impact environnemental. Dans un contexte de lutte contre les changements climatiques, qui cible notamment une réduction des émissions de GES à travers les pratiques agricoles appropriées, documenter l'impact environnemental de la production de bleuets sauvages au Saguenay–Lac-Saint-Jean pourrait permettre aux principaux acteurs du secteur de prendre des décisions appropriées et adéquates.

### **Hypothèses pour l'objectif de l'étude :**

En supposant qu'il n'existe aucune différence de rendement entre la production conventionnelle et la production biologique de bleuet sauvage :

1. Il n'y aurait pas de différence significative dans les émissions de GES entre la production biologique et conventionnelle de bleuet sauvage, bien que certaines différences pourraient s'observer à différents postes d'émission.
2. Dans la production conventionnelle, les activités les plus émettrices dans la chaîne de production de bleuets seraient les suivantes : l'utilisation de l'engrais minéral (production, transport et épandage), le fauchage et les émissions de  $N_2O$  que les sols de culture de bleuets pourraient générer.
3. Dans la production biologique, les activités les plus émettrices dans la chaîne de production de bleuets seraient les suivantes : l'utilisation d'engrais organique, le fauchage et les émissions de  $N_2O$  générées par les sols de culture.

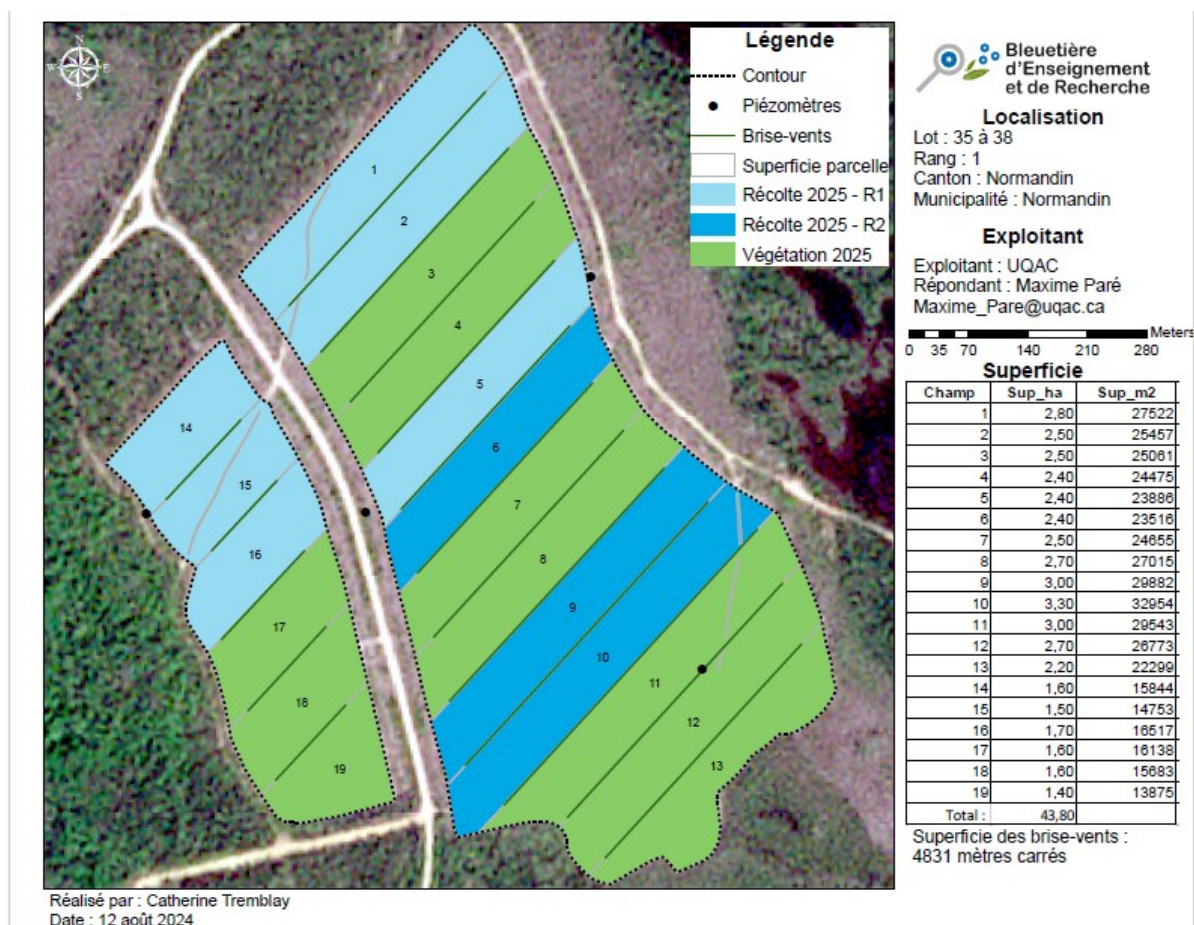
Toutefois, des différences pourraient apparaître selon les techniques agricoles spécifiques et les conditions locales de production. Ce projet fournira des données essentielles pour orienter les pratiques agricoles vers une approche plus durable et aider les producteurs à réduire leur empreinte carbone tout en préservant la viabilité économique de leurs exploitations.

# CHAPITRE 1

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 1.1 Site de l'étude

Cette étude a été menée à la BER, à Normandin, dans la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean, au Québec (48° 49'35"N ; 72° 39'35"W) (Figure 1). Ce site se trouve dans une zone au climat tempéré nordique, avec une température annuelle moyenne de 0,9 °C et des précipitations annuelles de 871 mm (Environnement Canada 2020). La bleuetière a été créée en 2019. Deux espèces de bleuet sauvage (*Vaccinium angustifolium* Aiton et *Vaccinium myrtilloides* Michx) sont cultivées sur le site (Paré *et al.* 2022). La bleuetière couvre une superficie totale de 43,64 hectares et est divisée en deux zones distinctes. La superficie est divisée en deux sections : 40 % est consacré à la phase végétative et 60 % à la phase de production, en fonction des rotations culturales. Ce système de gestion suit un cycle de deux ans : la première année est consacrée à la croissance des plantes (phase végétative) et la seconde année à la phase de production (Paré *et al.* 2022). Ainsi, chaque zone de la bleuetière est cultivée alternativement tous les deux ans.



**Figure 1** Bleuettière d'enseignement et de recherche accréditée à l'UQAC située à Normandin.

## 1.2 Paramètres de l'analyse de cycle de vie

L'ACV réalisée pour cette bleuettière s'est concentrée sur l'évaluation des émissions de GES liées à toutes les étapes de la production de bleuets sauvages, en considérant les deux phases de la culture du bleuet. Cette approche permet d'examiner en profondeur l'impact environnemental des pratiques agricoles dans un système de culture alternée. Elle évalue les écarts éventuels entre la production conventionnelle et biologique de bleuets sauvages, ainsi que les intrants et pratiques spécifiques employés dans chaque système.

L'étude compare les émissions de GES des régies conventionnelles et biologiques en conformité avec la norme ISO 14044 à l'aide du logiciel OpenLCA et de données issues de la BER. Deux unités fonctionnelles clés ont été utilisées dans cette étude : la quantité de GES émis par la production d'un kilogramme de bleuets et la quantité de GES émis par 100 \$ de bleuets vendus.

### **1.2.1 Définition de l'analyse de cycle de vie**

L'ACV est la compilation et l'évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie (ISO 2006). Cette méthode d'analyse servira à comparer les GES associés aux différentes pratiques agricoles et à identifier celles qui minimisent les impacts environnementaux.

### **1.2.2 Conformité à ISO 14044**

Cette étude s'appuie sur la norme ISO 14044 (ISO 2006) pour établir son cadre méthodologique. Cette norme énonce les principes, les exigences et les lignes directrices à suivre pour mener une ACV exhaustive. Elle exige la clarté des hypothèses, la traçabilité des données et l'exactitude du processus d'interprétation. Elle exige également que l'étude contienne une description détaillée des objectifs, des limites du système, des unités fonctionnelles et des critères de qualité des données utilisées (ISO 2006).

En réponse à ces directives, cette étude utilise des données primaires provenant de la BER et de producteurs collaborateurs du Saguenay–Lac-Saint-Jean, ainsi que des données secondaires tirées de la base de données Ecoinvent (Ecoinvent 2023). Toutes les hypothèses, les calculs et les décisions de

modélisation ont été méticuleusement consignés en annexe pour assurer la capacité de reproduire l'étude. La cohérence méthodologique est conforme aux recommandations de la norme ISO 14044. En outre, la catégorie d'impact retenue pour cette recherche est celle du changement climatique, exprimée en kilogrammes d'équivalent CO<sub>2</sub> (kg CO<sub>2</sub>-eq) pour une période de 100 ans. Ce critère est légitime en raison de son utilité pour mesurer l'empreinte carbone liée à l'agriculture, ainsi que de sa conformité aux directives méthodologiques du GIEC (IPCC 2013b)

### **1.2.3 Le logiciel OpenLCA**

OpenLCA est un logiciel libre de droits (*open-source*) dédié à l'ACV, c'est un outil qui permet d'évaluer l'impact environnemental des processus et des produits. Dans le cadre de cette étude, il a été utilisé pour modéliser les différentes étapes de la production des phases végétative et de production du bleuet, afin d'évaluer leur impact environnemental. Ce logiciel dispose d'une plateforme adaptable pour incorporer des bases de données environnementales, des méthodes d'évaluation des impacts et des scénarios spécifiques grâce à sa capacité à gérer des modèles complexes et à appliquer des procédures normalisées. Pour déterminer l'empreinte carbone de la production de bleuet sauvage avec OpenLCA, le cycle de vie du bleuet sauvage a été modélisé en intégrant tous les processus associés aux différentes activités de production du bleuet. Après avoir intégré ces processus, la méthode d'évaluation des impacts - IPCC 2013 a été appliquée pour déterminer l'empreinte carbone totale de la production du bleuet sauvage (IPCC 2013a).

### **1.2.4 Les unités fonctionnelles**

Nous avons déterminé l'impact environnemental de la production de bleuet

en se servant de l'unité fonctionnelle « kg équivalent CO<sub>2</sub> par kg de bleuets produits au champ (kg CO<sub>2</sub>-éq kg<sup>-1</sup>) ». Cette unité est essentielle pour comparer l'efficacité des pratiques agricoles en termes d'émissions par unité de produit. La deuxième unité fonctionnelle est le « kg équivalent CO<sub>2</sub> par 100 \$ de bleuets vendus (kg CO<sub>2</sub>-éq 100\$<sup>-1</sup>) ». Cette unité fonctionnelle a permis de déterminer les émissions de GES en relation avec la rentabilité économique de chaque type de production de bleuets. Elle permet donc d'évaluer l'efficacité des émissions de GES par rapport aux revenus issus de la vente des bleuets produits par chaque type de culture, établissant ainsi un aperçu de l'impact environnemental en lien avec la viabilité économique (Nemecek *et al.* 2011).

### **1.2.5 Les périmètres des systèmes étudiés**

L'étude s'appuie sur le périmètre d'analyse du « berceau à la porte » (cradle-to-gate) conformément aux directives de la norme ISO 14044 (ISO 2006). Cette méthode prend en compte tous les processus et flux environnementaux liés à la production de bleuets sauvages, depuis l'extraction et la fabrication des intrants agricoles jusqu'à la livraison des fruits à l'usine de congélation. Autrement dit, le système étudié comprend toutes les étapes du cycle de production situées en amont de la transformation industrielle, excluant des étapes comme la congélation, l'emballage, la distribution, la consommation et la fin de vie.

Le périmètre de l'étude couvre donc une variété de procédés et de flux clés (Figure 2) :

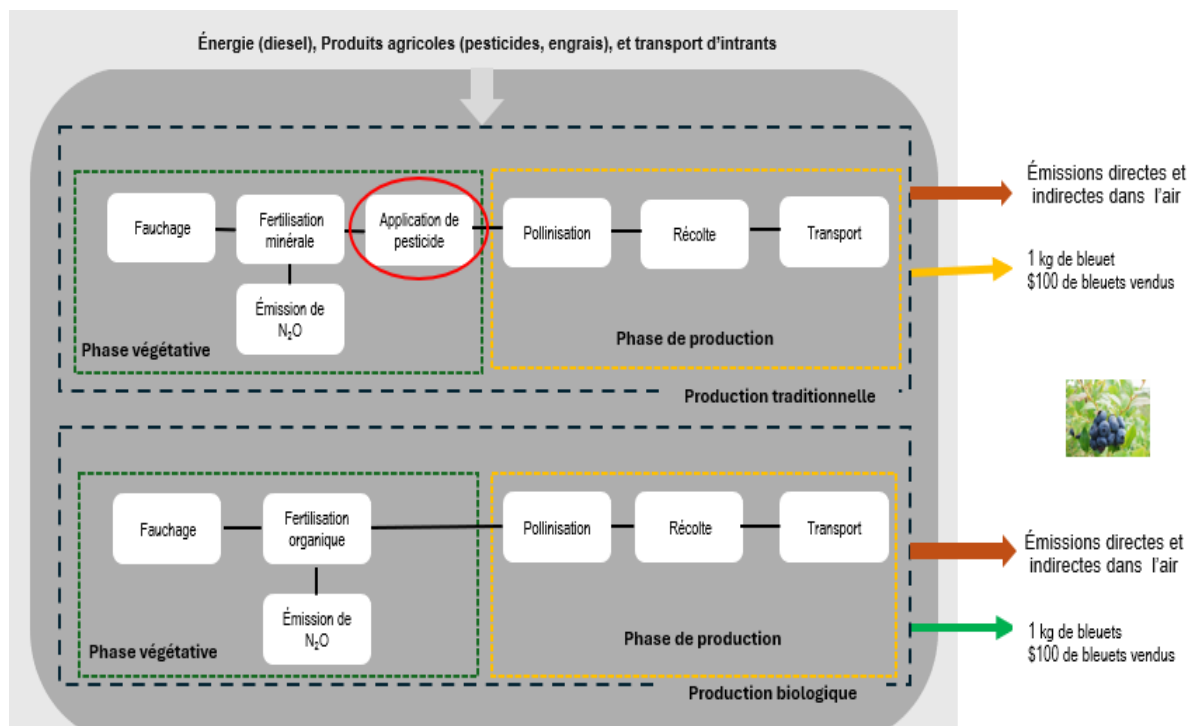
- La production et le transport des intrants agricoles, tels que les engrais minéraux, les amendements organiques, les produits phytosanitaires (pour la

régie conventionnelle) et les produits biologiques (pour la régie biologique).

- La consommation d'énergie fossile nécessaire aux activités, telles que le fauchage, la pollinisation (transport des ruches Quad et d'abeilles), la récolte et le transport des bleuets vers l'usine de congélation.
- La fabrication, l'entretien et l'utilisation du matériel agricole, considérés selon une approche d'amortissement lorsque les données étaient disponibles, afin d'intégrer partiellement leur contribution énergétique. En accord avec les principes de la norme ISO 14044 (ISO 2006), les impacts liés à la fabrication, à l'entretien et à l'utilisation du matériel agricole ont été pris en compte dans l'analyse grâce à une méthode de dépréciation. Lorsque des données étaient disponibles, ces effets ont été répartis sur la durée de vie prévue des équipements, permettant ainsi d'affecter de manière proportionnelle et cohérente leur apport énergétique au système étudié.
- Enfin, les émissions directes et indirectes de  $N_2O$  provenant des sols agricoles, qui sont le résultat des processus de nitrification et de dénitrification après l'application d'engrais azotés, que ceux-ci soient d'origine minérale ou organique.

Ces différents procédés sont les principales causes d'émissions dans le cycle de vie de la culture du bleuet sauvage, comme l'ont démontré plusieurs études précédentes sur d'autres petits fruits et cultures pérennes (Girgenti *et al.* 2013; Cordes *et al.* 2016). L'intégration simultanée de ces éléments dans le modèle d'analyse a permis d'effectuer une évaluation intégrale et fidèle des répercussions

sur l'environnement en lien avec les systèmes de culture.



© N'guessan Charles Yao, 2026

**Figure 2** Périmètres des deux systèmes de production de bleuets : du berceau à la barrière.

Les données d'inventaire (Annexe 1) provenant des deux phases du système analysé ont d'abord été combinées pour obtenir une représentation uniforme et exhaustive des flux de matières et d'énergie. Cette structure permettra de comparer plus facilement les méthodes de gestion conventionnelle et biologique, tout en reflétant avec précision les pratiques observées à la BER de Normandin. Pour assurer l'exhaustivité de l'inventaire et inclure les étapes en amont, comme la production d'engrais, les données primaires collectées sur le terrain ont été complétées par des données secondaires provenant de la base de données

Ecoinvent v3.10 (Ecoinvent 2023).

En résumé, la définition du périmètre « du berceau à la porte » représente un choix stratégique et scientifique qui permet de concentrer l'analyse sur les processus agricoles directement contrôlables par les producteurs et sur les différences structurelles entre les systèmes de production conventionnelle et biologique. Cette délimitation analytique permet d'interpréter avec précision les résultats et contribue à l'élaboration de recommandations ciblées pour réduire l'empreinte carbone de la filière du bleuet sauvage.

### **1.3 Inventaire du cycle de vie**

En vertu de la norme ISO 14040 (2006), l'inventaire du cycle de vie (ICV) représente la deuxième étape importante de l'ACV. Cette phase consiste à identifier, rassembler et quantifier tous les flux de matières et d'énergie, appelés intrants et extrants, qui sont liés à un système de produits tout au long de son cycle de vie. L'objectif principal de l'ICV est de dresser un bilan exhaustif des processus étudiés, en recensant tous les intrants (ressources naturelles, énergie, intrants agricoles) et tous les extrants (émissions atmosphériques) liés à la production du bleuet sauvage. Cette phase méthodologique vise également à collecter des données primaires mesurées sur le terrain et des données secondaires à partir de bases de données reconnues pour alimenter le modèle de simulation dans le logiciel OpenLCA.

Pendant la phase végétative, les activités recensées sont principalement la préparation et l'entretien des champs, la fertilisation et le contrôle des mauvaises herbes. Ces activités s'avèrent cruciales pour le développement des plants de bleuetiers et leur rendement futur.

Les données collectées au niveau des activités de la phase végétative sont les suivantes (Tableau 1) :

- Le fauchage mécanique, qui nécessite une faucheuse et qui dégage des émissions directes de CO<sub>2</sub>, de méthane (CH<sub>4</sub>) et de N<sub>2</sub>O en consommant du carburant diesel.
- L'utilisation d'engrais minéraux, selon la méthode conventionnelle, ou d'amendements organiques, dans le cadre de l'agriculture biologique. De plus, l'énergie nécessaire à la production et au transport des intrants agricoles (engrais, composts) est comptabilisée pour inclure les émissions en amont du système.
- Le contrôle des mauvaises herbes, qui peut être assuré par l'utilisation d'herbicides chimiques en agriculture conventionnelle. Bien que le contrôle des mauvaises herbes en agriculture biologique nécessite parfois l'utilisation de produits (ex. : cuivre, vinaigres, etc.), cette étude émet comme postulat qu'aucun produit phytosanitaire n'est appliqué en agriculture biologique.

**Tableau 1 :** Données collectées pour les phases végétative et de production du bleuet. Les engrais minéraux et herbicides sont utilisés uniquement dans le système conventionnel et les engrais organiques sont appliqués dans le système biologique, les autres étapes sont communes aux deux systèmes.

| Phase du bleuet | Étapes             | Sous-étapes                     | Description de données collectées                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------|--------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Végétative      | Engrais organiques | Produits                        | Cycle de vie des engrais organiques                                                                                                                                                                                                     |
|                 |                    | Transport                       | Carburant pour le transport des engrais organiques vers la bleuetière                                                                                                                                                                   |
|                 |                    | Épandage                        | Carburant pour l'épandage d'engrais organique dans le champ                                                                                                                                                                             |
|                 | Engrais minéraux   | Produits                        | Cycle de vie des engrais minéraux                                                                                                                                                                                                       |
|                 |                    | Transport                       | Carburant pour le transport des engrais minéraux de l'usine vers la bleuetière                                                                                                                                                          |
|                 |                    | Épandage                        | Carburant pour l'épandage d'engrais minéraux dans le champ                                                                                                                                                                              |
|                 | Herbicides         | Produits                        | Cycle de vie des herbicides utilisés                                                                                                                                                                                                    |
|                 |                    | Arrosage                        | Carburant pour l'arrosage des herbicides                                                                                                                                                                                                |
|                 | Fauchage           | Fauchage mécanique              | Carburant utilisé par la faucheuse pour le fauchage                                                                                                                                                                                     |
| Production      | Pollinisation      | Transport des ruches d'abeilles | Carburant pour le transport des ruches d'abeilles                                                                                                                                                                                       |
|                 |                    | Transport des ruches Quad       | Carburant pour le transport des ruches Quad                                                                                                                                                                                             |
|                 | Récolte            | Récolte                         | Diesel utilisé pour la machinerie de récolte                                                                                                                                                                                            |
|                 | Champ              | Émission de N <sub>2</sub> O    | Émissions de N <sub>2</sub> O du sol issues du processus de décomposition des engrais azotés durant les phases végétatives et de production. Les engrais azotés sont appliqués uniquement à la phase végétative lors du cycle de 2 ans. |
|                 | Transport          | Transport de la récolte         | Carburant pour le transport du bleuet vers l'usine de congélation.                                                                                                                                                                      |

La période de production rassemble les tâches spécifiquement liées à la floraison, à la récolte et au transport des fruits vers les usines de transformation. Les principales activités incluses dans l'inventaire sont la pollinisation, la récolte mécanique et le transport post-récolte.

Les données collectées au niveau de la phase de production sont les suivantes (Tableau 1) :

- La pollinisation constitue une étape clé du cycle productif. Cette pratique consiste à déplacer les ruches d'abeilles et les ruches Quad de bourdons vers le champ en utilisant des camions légers. Cela entraîne une consommation de carburant fossile et des émissions de GES en fonction de la distance parcourue et du nombre de trajets nécessaires.
- La récolte est assurée par une récolteuse spécialisée fonctionnant au diesel, dont la consommation énergétique peut varier selon la densité de la végétation et le rendement des parcelles.
- La consommation du camion de transport de la récolte vers l'usine de congélation.
- Les émissions résiduelles de  $N_2O$  issues de la décomposition des engrais utilisés pendant la phase végétative persistent durant la période de production. Les émissions de  $N_2O$  au champ sont présentées en totalité (phase végétative et de production) dans la phase de production.

Ces données ont servi à quantifier les émissions de GES associées à chaque phase, des étapes et sous-étapes de la production de bleuets sauvages.

## 1.4 Méthode d'évaluation du cycle de vie

L'évaluation des impacts liés au changement climatique s'est faite en suivant la méthode IPCC 2013, développée par le GIEC (IPCC 2013a; IPCC 2013b). Ce cadre est largement reconnu sur le plan international comme étant une référence pour mesurer les émissions de GES en termes de potentiel de réchauffement global (PRG) (IPCC 2013b). Chaque substance émettrice de GES possède un facteur de conversion qui exprime son effet de réchauffement relatif par rapport au CO<sub>2</sub> (Tableau 2), pris comme référence. Ainsi, les émissions sont exprimées en une unité commune, le « kilogramme CO<sub>2</sub> équivalent » (kg CO<sub>2</sub>-éq), ce qui permet d'en faciliter l'agrégation et la comparaison.

**Tableau 2 :** *Potentiel de réchauffement global des principaux GES avec un horizon temporel de 100 ans (GWP100) (IPCC 2013).*

| Gaz                                   | PRG |
|---------------------------------------|-----|
| Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> ) | 1   |
| Méthane (CH <sub>4</sub> )            | 28  |
| Oxyde nitreux (N <sub>2</sub> O)      | 265 |

La méthode IPCC 2013, intégrée dans le logiciel OpenLCA, permet de calculer l'empreinte carbone des processus agricoles à partir des inventaires de flux collectés à différentes étapes du cycle de production. Elle prend en considération les principaux GES, c'est-à-dire le CO<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub> et le N<sub>2</sub>O, mais aussi des gaz fluorés comme les hydrofluorocarbures (HFC), les perfluorocarbures (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>), même si ceux-ci sont rarement émis par les systèmes agricoles. Les valeurs de PRG employées sont celles qui correspondent à une période de 100 ans (GWP100) (Tableau 2). Cela permet d'évaluer les impacts cumulatifs des émissions sur le climat à long terme, tout en garantissant la comparabilité avec les

autres études d'ACV publiées dans la littérature scientifique.

Cette évaluation des émissions globales prend en compte les émissions résultant de l'inventaire du cycle de vie (Tableau 1) : l'utilisation de combustibles fossiles, de la fabrication et du transport des intrants, ainsi que des émissions directes et indirectes de  $N_2O$  provenant des sols fertilisés. Les calculs seront effectués à partir des données primaires recueillies auprès de la BER, ainsi que des données secondaires provenant de la base de données ecoinvent v3.10 (Ecoinvent 2023).

Cette méthode d'évaluation présente plusieurs avantages. Tout d'abord, elle garantit une comparabilité internationale des résultats grâce à l'utilisation standardisée des facteurs d'émission du GIEC dans les études d'ACV agricoles. D'autre part, elle permet une évaluation précise de l'impact de chaque source d'émission spécifique à partir de l'inventaire du cycle de vie. Enfin, les résultats obtenus grâce à cette approche permettent d'identifier les points chauds du cycle de production, c'est-à-dire les étapes les plus émettrices de GES, et d'évaluer les efficiences relatives des pratiques conventionnelles et biologiques.

Ainsi, l'intégration de la méthode IPCC 2013 dans l'analyse représente un outil robuste d'aide à la décision, permettant non seulement de mesurer l'empreinte carbone globale de la culture du bleuet sauvage dans la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean, mais aussi de suggérer des leviers d'atténuation réalistes pour une production plus durable, résiliente et en adéquation avec les objectifs climatiques de la province.

Deux scénarios distincts ont été élaborés et modélisés pour déterminer et

comparer l'impact des différents facteurs d'émission sur les résultats finaux de l'empreinte carbone :

**Scénario 1 (modèle de base) : modélisation en intégrant les données de N<sub>2</sub>O provenant de Holos :**

Dans ce premier scénario, les émissions de N<sub>2</sub>O sont calculées à l'aide des facteurs d'émission standard du modèle Holos version 4.0, un outil créé par Agriculture et Agroalimentaire Canada pour évaluer les GES dans le domaine agricole (AAC 2025). Bien que cette méthode soit largement utilisée dans les inventaires nationaux, elle a tendance à exagérer les émissions réelles dans les cultures à faible teneur en azote, comme les bleuetières, avec une marge d'erreur évaluée entre 40 et 60 % (Tableau 3; Annexe 1).

Ce scénario vise à établir une référence élevée pour les émissions, en servant de scénario de référence pour évaluer les impacts potentiels de la fertilisation. En utilisant les coefficients Holos, les émissions directes de N<sub>2</sub>O (provenant des sols) et indirectes (provenant du lessivage des nitrates et de la volatilisation du NH<sub>3</sub>) seront intégrées dans le modèle de simulation. Les résultats de ce scénario servent à évaluer la crédibilité du modèle face à l'hypothèse d'émissions maximales crédibles de N<sub>2</sub>O. Si elle se confirme, cela entraînerait probablement une surestimation du bilan global des émissions de GES des systèmes de production en question.

**Tableau 3 :** Émissions de  $N_2O$  directes et indirectes dues à l'utilisation d'engrais, estimées avec le logiciel Holos et échantillonnées sur le terrain par Pelletier et al. (2025). Les détails des émissions de  $N_2O$  à partir des données locales d'échantillonnage de  $N_2O$  sont montrés dans l'annexe 2.

| Source des données                                              | $N_2O$ directe<br>(kg $N_2O$ ha <sup>-1</sup> ) | $N_2O$ indirecte<br>(kg $N_2O$ ha <sup>-1</sup> ) |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Holos - Engrais minéraux (AAC 2025)                             | 0,47 ± 40 %                                     | 0,30 ± 60 %                                       |
| Holos - Fumier de volaille (AAC 2025)                           | 0,39 ± 40 %                                     | 0,05 ± 60 %                                       |
| Échantillonnage - Engrais minéraux<br>(Pelletier et al. 2025)   | 0,00                                            | nd                                                |
| Échantillonnage - Fumier de volaille<br>(Pelletier et al. 2025) | 0,00                                            | nd                                                |

## Scénario 2 : Modélisation en intégrant les données d'échantillonnage de $N_2O$ sur le champ à la BER

Le deuxième scénario est basé sur les données empiriques d'échantillonnage du  $N_2O$  récoltées à la BER de Normandin (Pelletier et al. 2025) (Tableau 3; Annexe 2). Ce scénario permet d'obtenir une évaluation précise et fidèle des conditions locales. Les émissions de  $N_2O$  mesurées directement sont intégrées au modèle OpenLCA pour recalculer l'empreinte carbone globale. Ce scénario est considéré comme étant le plus solide et représentatif de la réalité, puisqu'il s'appuie sur des données expérimentales propres au site d'étude. Il servira également à vérifier la pertinence des données empiriques régionales par rapport aux facteurs d'émission internationaux utilisés dans l'ACV agricole.

### 1.5 Les facteurs d'émissions utilisés dans l'évaluation de l'empreinte carbone du bleuet sauvage

Le tableau 4 illustre les principales étapes de la production du bleuet sauvage ainsi que les processus fondamentaux de l'ICV qui y sont liés, tout en mettant en

évidence les facteurs d'émissions correspondants, exprimés en kg CO<sub>2</sub>-éq. Ces émissions témoignent des implications climatiques de la fabrication des intrants, de leur acheminement et de leur utilisation dans les champs.

Le fauchage est une technique d'entretien mécanisé qui dépend uniquement de l'utilisation de machines agricoles alimentées au diesel. Ce procédé implique la combustion de diesel dans les équipements agricoles. Le coefficient d'émission correspond aux émissions directes de GES résultant de la combustion du diesel.

La fertilisation conventionnelle englobe divers procédés associés à la production et à l'utilisation d'engrais minéraux. La production de sulfate d'ammonium, de superphosphate triple et de sulfate de potassium implique des émissions en amont liées à l'extraction des matières premières, aux réactions chimiques industrielles et à la consommation d'énergie. Les facteurs d'émission associés sont assez élevés, ce qui indique leur intensité énergétique. Il faut y ajouter les émissions générées par l'utilisation d'équipement agricole au diesel lors de l'épandage. Enfin, le transport des engrais par camion représente une source supplémentaire d'émissions indirectes, qui dépendent du tonnage transporté et des trajets effectués. Le transport de l'engrais minéral est inclus dans l'estimation des émissions du processus « market » par défaut dans Ecoinvent.

La fertilisation biologique consiste à utiliser du fumier de volaille comme amendement organique. Les procédés à considérer sont la production et le traitement du fumier, le transport et l'épandage dans les champs à l'aide d'équipement hydraulique. Les facteurs d'émission associés sont en général plus faibles que ceux des engrais minéraux. Cependant, elles demeurent sensibles aux facteurs tels que le transport et l'équipement d'épandage.

La récolte est modélisée de la même manière que les autres opérations mécanisées, en utilisant le processus de combustion du diesel dans les machines agricoles. Le facteur d'émission associé représente les émissions directes générées par la combustion de carburant pendant la phase de récolte.

L'utilisation de pesticides, caractéristique du mode de production conventionnel, se divise en deux étapes bien distinctes : la production des produits phytosanitaires et leur épandage sur les cultures. Les facteurs d'émission reliés à la production des pesticides correspondent à des procédés industriels. L'application, quant à elle, entraîne des émissions supplémentaires dues à l'utilisation de machinerie agricole fonctionnant au diesel.

La pollinisation fait partie de l'inventaire par le transport des ruches d'abeilles et Quad vers la bleuetière. Ce processus correspond au transport routier de marchandises avec climatisation, prenant en compte la consommation de carburant du véhicule.

**Tableau 4** : les processus et facteurs d'émissions utilisés dans la modélisation d'ACV. Les détails des processus inclus et exclus sont présentés dans l'annexe 3. La description (version anglaise) des processus est prise intégralement de la base de données Ecoinvent v3.10.

| ÉTAPES                        | SOUS-ÉTAPES                   | PROCESSUS                                                                                                        | FACTEURS D'ÉMISSIONS | UNITÉ                                   |
|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------|
| <b>Fauchage</b>               | Activité de fauchage          | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO | 0,13784              | kg CO <sub>2</sub> -éq MJ <sup>-1</sup> |
| <b>Fertilisation minérale</b> | Produit sulfate d'ammonium    | market for ammonium sulfate   ammonium sulfate   Cutoff, U - RoW                                                 | 0,97638              | kg CO <sub>2</sub> -éq kg <sup>-1</sup> |
|                               | Produit superphosphate triple | market for triple superphosphate   triple superphosphate   Cutoff, U - RoW                                       | 0,77749              | kg CO <sub>2</sub> -éq kg <sup>-1</sup> |

|                                 |                                  |                                                                                                                                                                 |          |                                                         |
|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------------------------------------------------------|
|                                 | Produit sulfate de potassium     | market for potassium sulfate   potassium sulfate   Cutoff, U - RoW                                                                                              | 1,12404  | kg CO <sub>2</sub> -éq kg <sup>-1</sup>                 |
|                                 | Épandage                         | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO                                                | 0,13784  | kg CO <sub>2</sub> -éq MJ <sup>-1</sup>                 |
|                                 | Produit borax                    | market for borax, anhydrous, powder   borax, anhydrous, powder   Cutoff, U - GLO                                                                                | 2,05675  | kg CO <sub>2</sub> -éq kg <sup>-1</sup>                 |
| <b>Fertilisation biologique</b> | Transport du fumier de volaille  | market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   Cutoff, U - RoW                              | 0,19536  | kg CO <sub>2</sub> -éq t <sup>-1</sup> km <sup>-1</sup> |
|                                 | Production du fumier de volaille | treatment of poultry manure, drying, pelleting   poultry manure, dried   Cutoff, U - Copy - CA-QC                                                               | 0,04836  | kg CO <sub>2</sub> -éq kg <sup>-1</sup>                 |
|                                 | Épandage du fumier               | solid manure loading and spreading, by hydraulic loader and spreader   solid manure loading and spreading, by hydraulic loader and spreader   Cutoff, U - CA-QC | 0,00766  | kg CO <sub>2</sub> -éq kg <sup>-1</sup>                 |
| <b>Récolte</b>                  | Transport de la récolte          | market for transport, freight, light commercial vehicle   transport, freight, light commercial vehicle   Cutoff, U - RoW                                        | 2,17019  | kg CO <sub>2</sub> -éq t <sup>-1</sup> km <sup>-1</sup> |
|                                 | Activité de la récolte           | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO                                                | 0,13784  | kg CO <sub>2</sub> -éq MJ <sup>-1</sup>                 |
| <b>Pesticides</b>               | Produit pesticides utilisés      | market for pesticide, unspecified   pesticide, unspecified   Cutoff, U - GLO                                                                                    | 11,31006 | kg CO <sub>2</sub> -éq kg <sup>-1</sup>                 |
|                                 | Arrosage                         | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO                                                | 0,13784  | kg CO <sub>2</sub> -éq MJ <sup>-1</sup>                 |

|                      |                                         |                                                                                                                                                                                                                                          |         |                                                         |
|----------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------------------------------------------------|
| <b>Pollinisation</b> | Transport des ruches d'abeilles et Quad | market for transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO3, R134a refrigerant, cooling   transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO3, R134a refrigerant, cooling   Cutoff, U - GLO | 0,75085 | kg CO <sub>2</sub> -éq t <sup>-1</sup> km <sup>-1</sup> |
|----------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------------------------------------------------|

En établissant un lien clair entre les étapes de production, les procédés fondamentaux et les facteurs d'émissions, on peut représenter de manière cohérente et transparente les sources de GES dans les systèmes de production de bleuets sauvages. Cette structure sert de base méthodologique cruciale pour l'analyse de l'impact et la comparaison des systèmes de production conventionnelle et biologique, en conformité aux principes de l'ACV.

### 1.6 Analyse d'incertitude et de sensibilité

L'analyse d'incertitude est une étape clé du processus de l'ACV. Elle permet d'évaluer la robustesse des résultats et de mesurer la variabilité du modèle aux changements des paramètres les plus incertains. Ainsi, la simulation par méthode Monte-Carlo est effectuée pour analyser l'incertitude (Millet 2003) liée aux principaux paramètres de l'ACV, ce qui permettra de déterminer si les émissions de GES diffèrent entre la production conventionnelle et la production biologique. Les facteurs sont pondérés en utilisant la matrice de pedigree (Tableau 5). Chaque jeu de paramètres tiré est ensuite intégré dans le modèle OpenLCA afin de recalculer l'empreinte carbone des deux régies de production. Un total de 5000 itérations est

effectué pour assurer la stabilité statistique des estimations et la convergence des intervalles de confiance. Les distributions obtenues permettront de représenter la variabilité des émissions. La simulation sert donc à déterminer si les modèles du scénario 1 (modèles de base) et ceux du scénario 2 des régions conventionnelles et biologiques présentent une différence significative d'émission. Cette approche garantit une évaluation exhaustive, conforme aux exigences méthodologiques de l'ACV.

Dans le cadre de l'analyse d'incertitude par simulation Monte Carlo, la probabilité que l'empreinte carbone de la production biologique soit inférieure à celle de la production conventionnelle notée  $P(\text{Bio} < \text{Con})$  nous permettra de comparer itération par itération afin de déterminer si le système biologique émet moins comparer au système conventionnel et vice versa. La probabilité  $P(\text{Bio} < \text{Con})$  est un indicateur important pour évaluer les résultats entre les systèmes de production biologique et conventionnelle. L'évaluation se fait en examinant, itération par itération, les résultats simulés des impacts sur l'environnement. On calcule ensuite la fraction d'itérations où l'empreinte carbone du système biologique est inférieure à celle du système conventionnel. Cette probabilité empirique représente la fréquence à laquelle un système surpasse l'autre, en prenant en compte l'incertitude inhérente aux données d'inventaire et aux facteurs d'émission. Par exemple, une valeur de 70 % signifie que le système biologique a un impact inférieur dans 70 % des cas de simulation, ce qui suggère une tendance favorable, mais ne permet pas de tirer des conclusions statistiquement solides. Selon les directives méthodologiques en analyse du cycle de vie, un seuil compris entre 90 et 95 % est habituellement exigé

pour qu'un système soit considéré comme supérieur à un autre (Golsteijn 2015). Ce seuil élevé garantit une évaluation prudente et fondée sur des données scientifiques des résultats (Golsteijn 2015).

Le tableau 5 illustre l'évaluation de la qualité des données d'inventaire du cycle de vie en utilisant des critères de fiabilité, de complétude et de corrélation temporelle, géographique et technologique (Weidema et Wesnæs 1996). Les processus liés aux engrais organiques et minéraux, aux pesticides, au fauchage, à la pollinisation, à la récolte et au transport obtiennent des scores favorables, ce qui indique une bonne représentation et une cohérence satisfaisante des données utilisées. Cependant, les émissions de  $N_2O$  provenant des champs, telles que simulées par le modèle Holos, se distinguent par un indice de fiabilité inférieur, ce qui met en évidence les réserves liées aux méthodes de calcul par rapport aux données expérimentales. En revanche, les données issues de l'échantillonnage direct des émissions de  $N_2O$  se révèlent globalement plus fiables et mieux corrélées géographiquement. Ce tableau permet de mettre en évidence de manière claire et transparente les avantages et les limites des données utilisées, ce qui en fait un outil indispensable pour une évaluation critique des résultats de l'analyse du cycle de vie.

**Tableau 5 :** *matrice à cinq indicateurs de qualité des données d'ACV (Weidema et Wesnæs 1996). L'attribution des scores et le remplissage de la matrice de pedigree sont détaillés et présentés à l'annexe 4.*

|                           |                                                     | Indicateurs et scores |            |                        |                          |                           |
|---------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------|------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Étapes                    | Données d'ACV                                       | Fiabilité             | Complétude | Corrélation temporelle | Corrélation géographique | Corrélation technologique |
| <b>Engrais Organiques</b> | Production du fumier de volaille                    | 2                     | 1          | 1                      | 1                        | 1                         |
|                           | Transport du fumier de volaille                     | 2                     | 1          | 1                      | 1                        | 1                         |
|                           | Épandage du fumier de volaille                      | 2                     | 1          | 1                      | 1                        | 1                         |
| <b>Engrais Minéraux</b>   | Production et transport des engrais minéraux        | 1                     | 1          | 1                      | 1                        | 1                         |
|                           | Épandage des engrais minéraux                       | 1                     | 1          | 1                      | 1                        | 1                         |
| <b>Pesticides</b>         | Production et transport des herbicides utilisés     | 1                     | 1          | 1                      | 1                        | 1                         |
|                           | Épandage des herbicides                             | 1                     | 1          | 1                      | 1                        | 1                         |
| <b>Fauchage</b>           | Carburant utilisé par la faucheuse pour le fauchage | 1                     | 1          | 1                      | 1                        | 1                         |
| <b>Champ</b>              | Émissions N <sub>2</sub> O - HOLOS                  | 4                     | 3          | 3                      | 2                        | 2                         |
|                           | Émissions N <sub>2</sub> O - Échantillonnage        | 1                     | 1          | 1                      | 1                        | 1                         |
| <b>Pollinisation</b>      | Transport des ruches d'abeilles                     | 2                     | 1          | 1                      | 1                        | 1                         |
|                           | Transport des ruches Quad                           | 2                     | 1          | 1                      | 1                        | 1                         |
| <b>Récolte</b>            | Diesel utilisé pour la machinerie de récolte        | 1                     | 1          | 1                      | 1                        | 1                         |
| <b>Transport</b>          | Transport de la récolte à l'usine de congélation    | 2                     | 1          | 1                      | 1                        | 1                         |

Dans le cadre de cette étude, deux variables importantes ont été sélectionnées et seront analysées en raison de leur possible impact significatif sur les émissions de GES et de leur incertitude élevée : (1) les émissions directes et indirectes de  $N_2O$  provenant des sols de la bleuetière, et (2) le transport du fumier de volaille, qui est l'engrais organique principal utilisé dans la régie biologique.

Les quantités de  $N_2O$  émises par les sols, selon les prévisions du modèle Holos, constituent une source majeure d'incertitude dans les bilans agricoles. Cette incertitude découle de la complexité des mécanismes biologiques en jeu, tels que la nitrification et la dénitrification, qui dépendent des conditions pédoclimatiques (Pelletier *et al.* 2025). Cependant, ces valeurs de référence fournies par le logiciel Holos sont sujettes à une incertitude importante. Comme décrit plus haut, des observations et mesures sur le terrain montrent que les émissions réelles de  $N_2O$  sont généralement très faibles, voire inexistantes (Pelletier *et al.* 2025). Par conséquent, les valeurs standard utilisées par Holos pourraient surévaluer les émissions de  $N_2O$  des bleuetières.

Un test de sensibilité sur le transport du fumier de volaille a été réalisé. Le transport du fumier de volaille dépend fortement de la consommation de carburant diesel par les camions de transport. Dans la régie biologique, on utilise ce fumier comme principal amendement azoté pour remplacer les engrais minéraux. Cependant, l'empreinte écologique de cette méthode est étroitement liée à la proximité du site de production du fumier. Lorsque la distance reste raisonnable, les avantages d'un engrais biologique local peuvent contrebalancer les émissions supplémentaires causées par son transport.

Toutefois, si la distance de transport dépasse un certain seuil, cette étape peut devenir un point très critique du système biologique. Cette situation met en évidence un point de bascule logistique, où l'emplacement des ressources organiques devient décisif dans le portrait environnemental du système. L'analyse de sensibilité a donc simulé différents scénarios d'origine des engrais organiques pour évaluer le lien entre la distance de transport et les émissions globales. Nous avons considéré la provenance du fumier de volaille de Notre-Dame-du-Bon-Conseil situé à 406 km comme scénario 1. Ensuite, nous avons considéré 8 autres scénarios fictifs mais réalistes et augmenté progressivement la distance d'environ 100 km dans les scénarios 2 à 8 jusqu'à atteindre 1050 km séparant l'origine de la production du fumier à la BER. Le défi ne se limite pas à la technologie, mais englobe également des aspects stratégiques. Une dépendance excessive à l'égard de sources d'engrais organiques éloignées peut menacer la durabilité environnementale du modèle biologique. À l'inverse, l'utilisation d'intrants régionaux du Saguenay–Lac-Saint-Jean permettrait de réduire considérablement les émissions liées au transport. Ces résultats mettront en évidence l'importance d'une gestion territoriale intégrée des matières organiques agricoles et d'une valorisation locale du fumier. Cela contribuera à renforcer la résilience du système biologique face au changement climatique.

En définitive, cette analyse apportera un éclairage crucial sur la fiabilité des modèles généraux, tels que Holos, lorsqu'ils sont appliqués à des cultures spécialisées comme le bleuet sauvage. De plus, elle mettra en évidence l'importance de s'appuyer sur des données locales mesurées pour améliorer la

précision et la représentativité des analyses environnementales.

## CHAPITRE 2

### RÉSULTATS

#### 2.1 Comparaison des empreintes carbone de la production conventionnelle et biologique du bleuets sauvage

L'analyse comparative de l'empreinte carbone de la production biologique et conventionnelle de bleuets sauvage montre des écarts en termes d'émissions de GES (Tableau 6). Les analyses d'incertitude et de sensibilité de la section 2.2 montreront que ces écarts sont non significatifs. Ainsi, les écarts sont montrés dans cette section à titre descriptif et ne sont que des tendances. Pour l'unité fonctionnelle – émissions en kg CO<sub>2</sub>-éq kg<sup>-1</sup> de bleuets, la production biologique présente des émissions plus faibles d'environ 21 % que la production conventionnelle au scénario 1, mais cet écart se réduit à 8,7 % lorsque les émissions de N<sub>2</sub>O proviennent de mesures directes dans le scénario 2.

**Tableau 6 :** Empreintes carbone des systèmes de production selon les différents scénarios et les unités fonctionnelles utilisées dans la modélisation. Les résultats détaillés sont présentés dans l'annexe 5.

|                            | Scénario 1                              |                                            | Scénario 2                              |                                            |
|----------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|
| Système de production      | kg CO <sub>2</sub> -éq kg <sup>-1</sup> | kg CO <sub>2</sub> -éq 100\$ <sup>-1</sup> | kg CO <sub>2</sub> -éq kg <sup>-1</sup> | kg CO <sub>2</sub> -éq 100\$ <sup>-1</sup> |
| Production biologique      | 0,57                                    | 18,11                                      | 0,42                                    | 13,36                                      |
| Production conventionnelle | 0,72                                    | 36,64                                      | 0,46                                    | 23,37                                      |

Pour l'unité fonctionnelle économique du kg CO<sub>2</sub>-éq 100 \$<sup>-1</sup>, les écarts sont encore plus saillants. Dans le scénario 1, la production biologique émet 51 % moins de GES que la production conventionnelle. Dans le scénario 2, cet écart est réduit à

43 %. En d'autres termes, indépendamment des circonstances, la production biologique tend à avoir une empreinte carbone plus faible par 100 \$ de bleuets vendus.

### **2.1.1 Comparaison des empreintes carbone des postes d'émissions : unité fonctionnelle – émissions par kg de bleuets produits au champ**

Durant la phase végétative, la fertilisation et le fauchage représentent une source importante d'émission de GES (Tableaux 7 et 8). Dans le scénario 1, le fauchage représente 22,50 % des émissions suivi de l'utilisation de l'engrais (production, transport et épandage) qui représentent 20,10 % des émissions globales pour le système conventionnel (Tableau 7). Dans le système biologique, le fauchage représente 28,50 % des émissions et l'utilisation du fumier (production, transport et épandage) représente 30,42 % des émissions, mais le transport du fumier représente à lui seul 17,8 % des émissions totales (Tableau 7). Dans le scénario 2, les émissions liées au fauchage et à la fertilisation restent inchangées, mais leur contribution en pourcentage varie (Tableau 8). En régie conventionnelle, la production, le transport et l'épandage des fertilisants représentent 31,45 % et le fauchage représente 35,28 % des émissions totales. En régie biologique, le fauchage compte pour 38,52 % des émissions et la production et le transport des fertilisants représentent respectivement 14,71 % et 24,11 % des émissions totales. Le fauchage et la fertilisation sont les points chauds dans la phase végétative dans les deux systèmes de production.

**Tableau 7 : Empreintes carbone des différents postes d'émissions dans le scénario 1 : unité fonctionnelle – émissions par kg de bleuets produits au champ.**

| Phases     | Étapes        | Sous-étapes                 | Bleuet conv<br>(kg CO <sub>2</sub> -éq kg <sup>-1</sup> ) | Contribution<br>(%) | Bleuet bio<br>(kg CO <sub>2</sub> -éq kg <sup>-1</sup> ) | Contribution<br>(%) |
|------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------|---------------------|
| Végétative | Fertilisation | Produits                    | 0,14                                                      | 19,10 %             | 0,062                                                    | 10,90 %             |
|            |               | Transport                   | nd                                                        | nd                  | 0,1                                                      | 17,80 %             |
|            |               | Épandage                    | 0,0072                                                    | 1 %                 | 0,01                                                     | 1,72 %              |
|            | Pesticide     | Produits                    | 0,06                                                      | 8,71 %              | na                                                       | na                  |
|            |               | Arrosage                    | 0,0046                                                    | 0,64 %              | na                                                       | na                  |
|            | Fauchage      | Fauchage                    | 0,16                                                      | 22,50 %             | 0,16                                                     | 28,50 %             |
| Production | Pollinisation | Transport ruches d'abeilles | 0,0082                                                    | 1,13 %              | 0,0082                                                   | 1,43 %              |
|            |               | Transport ruches Quad       | 0,0052                                                    | 0,72 %              | 0,0052                                                   | 0,91 %              |
|            | Récolte       | Récolte                     | 0,02                                                      | 2,81 %              | 0,02                                                     | 3,56 %              |
|            |               | Transport                   | 0,05                                                      | 7,19 %              | 0,05                                                     | 9,09 %              |
|            | Champ         | Émissions N <sub>2</sub> O  | 0,26                                                      | 36,20 %             | 0,15                                                     | 26,20 %             |
|            | Total         |                             |                                                           | 0,72                | 100 %                                                    | 0,56                |

Bio : biologique ; conv : conventionnel

**Tableau 8 : Empreintes carbone des différents postes d'émissions dans le scénario 2 : unité fonctionnelle – émissions par kg de bleuets produits au champ.**

| Phases     | Étapes        | Sous-étapes                 | Bleuet conv<br>(kg CO <sub>2</sub> -éq kg <sup>-1</sup> ) | Contribution<br>(%) | Bleuet bio<br>(kg CO <sub>2</sub> -éq kg <sup>-1</sup> ) | Contribution<br>(%) |
|------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------|---------------------|
| Végétative | Fertilisation | Produits                    | 0,14                                                      | 29,89 %             | 0,062                                                    | 14,71 %             |
|            |               | Transport                   | Nd                                                        | nd                  | 0,1                                                      | 24,11 %             |
|            |               | Épandage                    | 0,0072                                                    | 1,56 %              | 0,01                                                     | 2,32 %              |
|            | Pesticide     | Produits                    | 0,06                                                      | 13,65 %             | na                                                       | na                  |
|            |               | Arrosage                    | 0,0046                                                    | 0,99 %              | na                                                       | na                  |
|            | Fauchage      | Fauchage                    | 0,16                                                      | 35,28 %             | 0,16                                                     | 38,52 %             |
| Production | Pollinisation | Transport ruches d'abeilles | 0,0082                                                    | 1,83 %              | 0,0082                                                   | 1,94 %              |
|            |               | Transport des ruches Quad   | 0,0052                                                    | 1,16 %              | 0,0052                                                   | 1,23 %              |
|            | Récolte       | Récolte                     | 0,02                                                      | 4,41 %              | 0,02                                                     | 4,82 %              |
|            |               |                             |                                                           |                     |                                                          |                     |

|       |       |                            |      |         |      |         |
|-------|-------|----------------------------|------|---------|------|---------|
|       |       | Transport                  | 0,05 | 11,28 % | 0,05 | 12,31 % |
|       | Champ | Émissions N <sub>2</sub> O | 0    | 0 %     | 0    | 0 %     |
| Total |       |                            | 0,46 | 100 %   | 0,42 | 100 %   |

Bio : biologique ; conv : conventionnel

Durant la phase de production, les émissions de N<sub>2</sub>O (incluant aussi les émissions de la phase végétative) provenant du sol après l'application de l'engrais sont plus importantes dans le scénario 1 (Tableaux 7 et 8). La pollinisation et la récolte ont des impacts moins importants (Tableaux 7 et 8). Dans le système conventionnel, les émissions de N<sub>2</sub>O représentent 36,2 % de l'empreinte carbone totale contre 26,2 % dans le système biologique. Ces résultats mettent en évidence la sensibilité des émissions de N<sub>2</sub>O dans l'empreinte carbone des systèmes agricoles lorsque les données proviennent d'estimations et non de mesures au champ. Dans le scénario 2, les émissions de N<sub>2</sub>O sont nulles dans les deux systèmes de production.

Les résultats montrent que l'utilisation des émissions de N<sub>2</sub>O estimées par le modèle Holos dans le scénario 1 entraîne une évaluation plus élevée de l'empreinte carbone globale des deux systèmes de production. Cette disparité est principalement due aux valeurs élevées des émissions de N<sub>2</sub>O estimées à partir des données génériques de Holos. Lorsque les données expérimentales issues des travaux de Pelletier *et al.* (2025) sont utilisées dans le scénario 2, l'empreinte carbone totale diminue de façon importante dans les deux systèmes de production.

### **2.1.2 Comparaison des empreintes carbone des postes d'émission : unité fonctionnelle – émissions par 100 \$ de bleuets vendus**

Durant la phase végétative, la fertilisation et le fauchage demeurent les deux

principaux points de GES (Tableaux 9 et 10). Dans le scénario 1, le fauchage émet 8,25 kg CO<sub>2</sub>-éq 100 \$<sup>-1</sup> en régie conventionnelle, représentant 22,51 % et 5,15 kg CO<sub>2</sub>-éq 100 \$<sup>-1</sup> en régie biologique, représentant 28,50 % des émissions totales (Tableau 9). Dans le scénario 2, les émissions liées au fauchage et à la fertilisation restent toujours les plus élevées en termes de pourcentage (Tableau 10). En régie conventionnelle, la production, le transport et l'épandage des fertilisants représentent 32,39 % et le fauchage représente 36,36 % des émissions totales (Tableau 10). En régie biologique, le fauchage compte pour 38,52 % des émissions et la production et le transport des fertilisants représentent respectivement 14,71 % et 24,09 % des émissions totales (Tableau 10). Le fauchage et la fertilisation sont les points chauds dans la phase végétative dans les deux systèmes de production et ce pour les scénarios 1 et 2.

**Tableau 9 : Empreintes carbone des différents postes d'émissions dans le scénario 1 : unité fonctionnelle – émissions par 100 \$ de bleuets vendus.**

| Phases     | Étapes        | Sous-étapes                 | Bleuet conv<br>(kg CO <sub>2</sub> -éq 100 \$ <sup>-1</sup> ) | Contribution<br>(%) | Bleuet bio<br>(kg CO <sub>2</sub> -éq 100 \$ <sup>-1</sup> ) | Contribution<br>(%) |
|------------|---------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------|
| Végétative | Fertilisation | Produits                    | 6,99                                                          | 19,20 %             | 1,97                                                         | 10,90 %             |
|            |               | Transport                   | Nd                                                            | nd                  | 3,23                                                         | 17,80 %             |
|            |               | Épandage                    | 0,36                                                          | 1 %                 | 0,31                                                         | 1,72 %              |
|            | Pesticide     | Produits                    | 3,19                                                          | 8,70 %              | na                                                           | na                  |
|            |               | Arrosage                    | 0,23                                                          | 0,63 %              | na                                                           | na                  |
|            | Fauchage      | Fauchage                    | 8,25                                                          | 22,51 %             | 5,15                                                         | 28,50 %             |
| Production | Pollinisation | Transport ruches d'abeilles | 0,42                                                          | 1,15 %              | 0,26                                                         | 1,45 %              |
|            |               | Transport ruches Quad       | 0,26                                                          | 0,71 %              | 0,16                                                         | 0,89 %              |
|            | Récolte       | Récolte                     | 1,03                                                          | 2,81 %              | 0,65                                                         | 3,56 %              |
|            |               | Transport                   | 2,64                                                          | 7,20 %              | 1,65                                                         | 9,09 %              |

|              |               |                                     |              |                |              |                |
|--------------|---------------|-------------------------------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
|              | <b>Champs</b> | <b>Émissions<br/>N<sub>2</sub>O</b> | <b>13,27</b> | <b>36,21 %</b> | <b>4,74</b>  | <b>26,20 %</b> |
| <b>Total</b> |               |                                     | <b>36,64</b> | <b>100 %</b>   | <b>18,12</b> | <b>100 %</b>   |

Bio : biologique ; conv : conventionnel

**Tableau 10 : Empreintes carbone des différents postes d'émissions dans le scénario 2 : unité fonctionnelle – émissions par 100 \$ de bleuets vendus.**

| <b>Phases</b> | <b>Étapes</b>   | <b>Sous-étapes</b>                  | <b>Bleuet conv<br/>(kg CO<sub>2</sub>-éq 100 \$<sup>-1</sup>)</b> | <b>Contribution<br/>(%)</b> | <b>Bleuet bio<br/>(kg CO<sub>2</sub>-éq 100 \$<sup>-1</sup>)</b> | <b>Contribution<br/>(%)</b> |
|---------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Végétative    | Fertilisation   | <b>Produits</b>                     | <b>6,99</b>                                                       | <b>29,91 %</b>              | <b>1,97</b>                                                      | <b>14,74 %</b>              |
|               |                 | <b>Transport</b>                    | <b>Nd</b>                                                         | <b>nd</b>                   | <b>3,22</b>                                                      | <b>24,09 %</b>              |
|               |                 | Épandage                            | 0,36                                                              | 1,54 %                      | 0,31                                                             | 2,32 %                      |
|               | Pesticide       | Produits                            | 3,19                                                              | 13,65 %                     | na                                                               | na                          |
|               |                 | Arrosage                            | 0,23                                                              | 0,98 %                      | na                                                               | na                          |
|               | <b>Fauchage</b> | <b>Fauchage</b>                     | <b>8,25</b>                                                       | <b>35,30 %</b>              | <b>5,15</b>                                                      | <b>38,52 %</b>              |
| Production    | Pollinisation   | Transport ruches d'abeilles         | 0,42                                                              | 1,80 %                      | 0,26                                                             | 1,94 %                      |
|               |                 | Transport ruches Quad               | 0,26                                                              | 1,11 %                      | 0,16                                                             | 1,2 %                       |
|               | Récolte         | Récolte                             | 1,03                                                              | 4,41 %                      | 0,64                                                             | 4,79 %                      |
|               |                 | Transport                           | 2,64                                                              | 11,30 %                     | 1,65                                                             | 12,34 %                     |
|               | <b>Champ</b>    | <b>Émissions<br/>N<sub>2</sub>O</b> | <b>0</b>                                                          | <b>0 %</b>                  | <b>0</b>                                                         | <b>0 %</b>                  |
| <b>Total</b>  |                 |                                     | <b>23,37</b>                                                      | <b>100 %</b>                | <b>13,36</b>                                                     | <b>100 %</b>                |

Bio : biologique ; conv : conventionnel

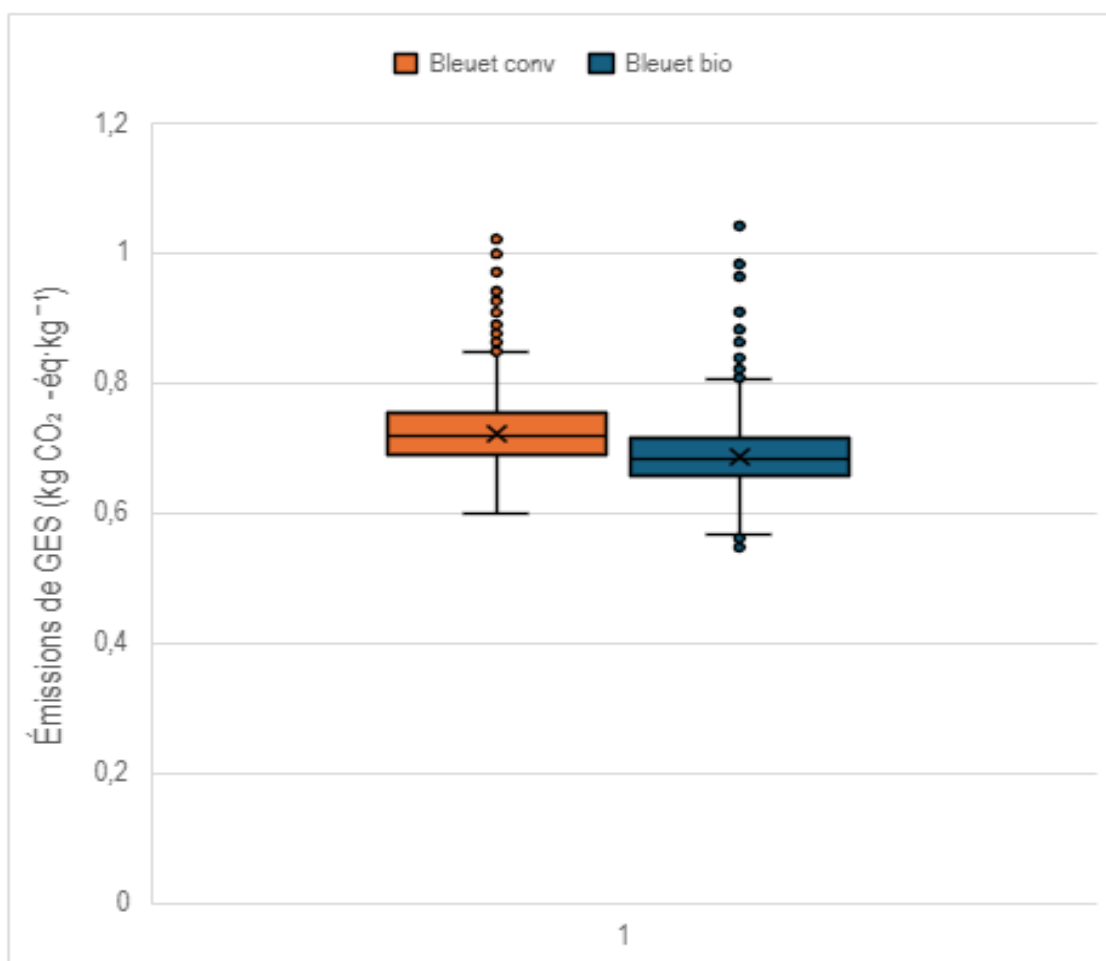
Pendant la phase de production, les émissions de N<sub>2</sub>O émettent 13,27 kg CO<sub>2</sub>-éq 100 \$<sup>-1</sup> dans le système conventionnel, représentant 36,21 %, et 4,74 kg CO<sub>2</sub>-éq 100 \$<sup>-1</sup> dans le système biologique, ce qui représente 26,20 % des émissions totales dans le scénario 1 (Tableau 9). Elles occupent donc la première place en termes d'émissions en régie conventionnelle et la seconde place en régie biologique. Dans le scénario 2, les émissions liées à la récolte ont une contribution plus élevée, 16,17 % en régie conventionnelle et 17,13 % en régie biologique. Nous

observons que les émissions nulles de N<sub>2</sub>O estimées avec des facteurs d'émissions locaux dans l'empreinte carbone (Pelletier *et al.* 2025) ont entraîné une restructuration complète du profil des contributions, faisant des activités liées à la fertilisation et au fauchage des étapes les plus émettrices.

## **2.2 Analyse d'incertitude et de sensibilité**

### **Simulation Monte Carlo : analyse d'incertitude**

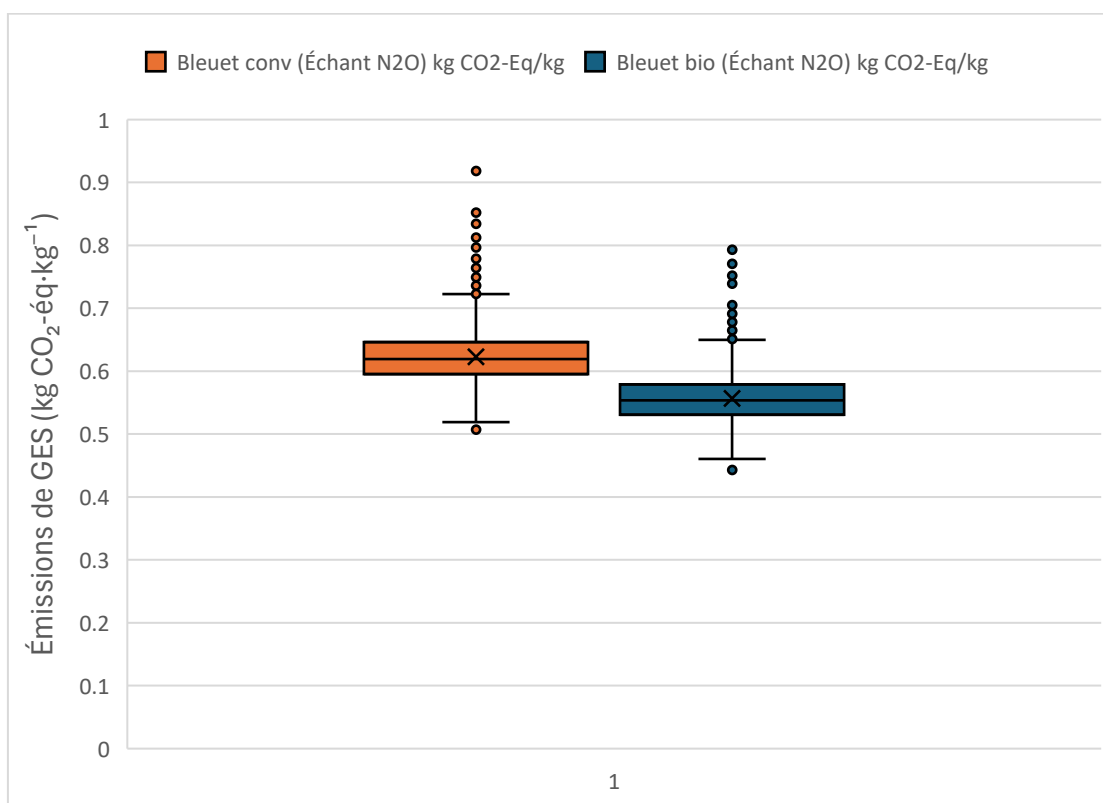
Dans le scénario 1, l'analyse de la simulation Monte Carlo montre l'impact environnemental variable des systèmes de production. Les résultats montrent que le système conventionnel a une empreinte carbone légèrement plus élevée que le système biologique, avec des médianes respectives d'environ 0,72 et 0,68 kg CO<sub>2</sub>-  
éq kg<sup>-1</sup> (Figure 3). Bien que ce décalage soit relativement faible, il est conforme aux résultats prédéterminés du scénario fondé sur les données de N<sub>2</sub>O de Holos. L'analyse des distributions révèle une dispersion similaire entre les deux systèmes, avec une variabilité légèrement plus prononcée pour la production conventionnelle. La détection de valeurs aberrantes dans les deux scénarios suggère que des combinaisons spécifiques de paramètres, notamment celles concernant les émissions de N<sub>2</sub>O au champ, peuvent entraîner des émissions plus importantes. De plus, puisque la moyenne dépasse légèrement la médiane, les distributions présentent une asymétrie, ce qui indique que des valeurs élevées mais rares exercent une influence.



**Figure 3** Distribution des émissions de GES (kg CO<sub>2</sub>-équ kg<sup>-1</sup>) des systèmes de production de bleuet conventionnel et biologique obtenue par simulation Monte Carlo – Scénario 1 (émissions de N<sub>2</sub>O basées sur les données de Holos).

Dans le scénario 1, la probabilité  $P(\text{Bio} < \text{Con})$  est évaluée à 68,93 %, ce qui signifie que, dans 68,93 % des itérations de la simulation Monte Carlo, le système biologique a une empreinte carbone plus faible que le système conventionnel. Ce résultat montre que le système biologique est favorisé, mais il n'est pas significatif car la probabilité  $P(\text{Bio} < \text{Con})$  est inférieure à 90-95%. Il y a aussi une variabilité significative dans la distribution des impacts entre les deux systèmes due aux incertitudes sur les données d'inventaire des émissions de N<sub>2</sub>O provenant de Holos.

L'analyse de la simulation Monte-Carlo dans le scénario 2 révèle une diminution globale de l'empreinte carbone ainsi qu'un changement dans la répartition des émissions pour les deux systèmes. Selon les résultats, la médiane des émissions est d'environ 0,62 kg CO<sub>2</sub>-éq kg<sup>-1</sup> pour le système conventionnel et d'environ 0,55 kg CO<sub>2</sub>-éq kg<sup>-1</sup> pour le système biologique (Figure 4). Ces résultats montrent une probabilité plus élevée que celle du scénario 1 basé sur les données de Holos, ce qui indique une réduction de l'incertitude liée aux émissions de N<sub>2</sub>O lorsqu'on utilise des données locales. Le système conventionnel montre une légère variation. Des valeurs extrêmes, s'approchant parfois de 0,9 kg CO<sub>2</sub>-éq kg<sup>-1</sup> (Figure 4), montrent que certains ensembles de paramètres peuvent encore entraîner des émissions élevées, bien que plus rares que dans le scénario 1. De plus, la proximité entre la moyenne et la médiane indique une distribution moins déséquilibrée, ce qui témoigne d'une plus grande stabilité des résultats.



**Figure 4** Distribution des émissions de GES (kg CO<sub>2</sub>-éq kg<sup>-1</sup>) des systèmes de production de bleuët conventionnel et biologique obtenue par simulation Monte Carlo – Scénario 2 (émissions de N<sub>2</sub>O basées sur les données expérimentales de Pelletier *et al.* (2025).

Dans le scénario 2, la probabilité  $P(\text{Bio} < \text{Con})$  atteint 88,9 %, ce qui signifie que, dans 88,9 % des simulations, le système biologique présente un impact environnemental relativement inférieur à celui du système conventionnel. Cette mesure montre une convergence plus nette des résultats en faveur du système biologique, mais reste toujours non-significative, et indique une diminution de l'incertitude relative entre les deux systèmes.

### Test de sensibilité : Émission de N<sub>2</sub>O des champs

Le test de sensibilité effectué sur les émissions de N<sub>2</sub>O vise à évaluer l'impact du choix des données d'émission de N<sub>2</sub>O sur l'empreinte carbone totale de la production de bleuets sauvages. Les résultats révèlent une grande fluctuation de la contribution des émissions de N<sub>2</sub>O en fonction de leur provenance (Tableau 11). Dans le scénario 1, basé sur les facteurs d'émission Holos, les émissions associées au N<sub>2</sub>O ont une contribution importante dans l'empreinte carbone des systèmes conventionnel et biologique. Selon les données d'échantillonnage direct des émissions de N<sub>2</sub>O (mesures au champ), le scénario 2 révèle des émissions nulles.

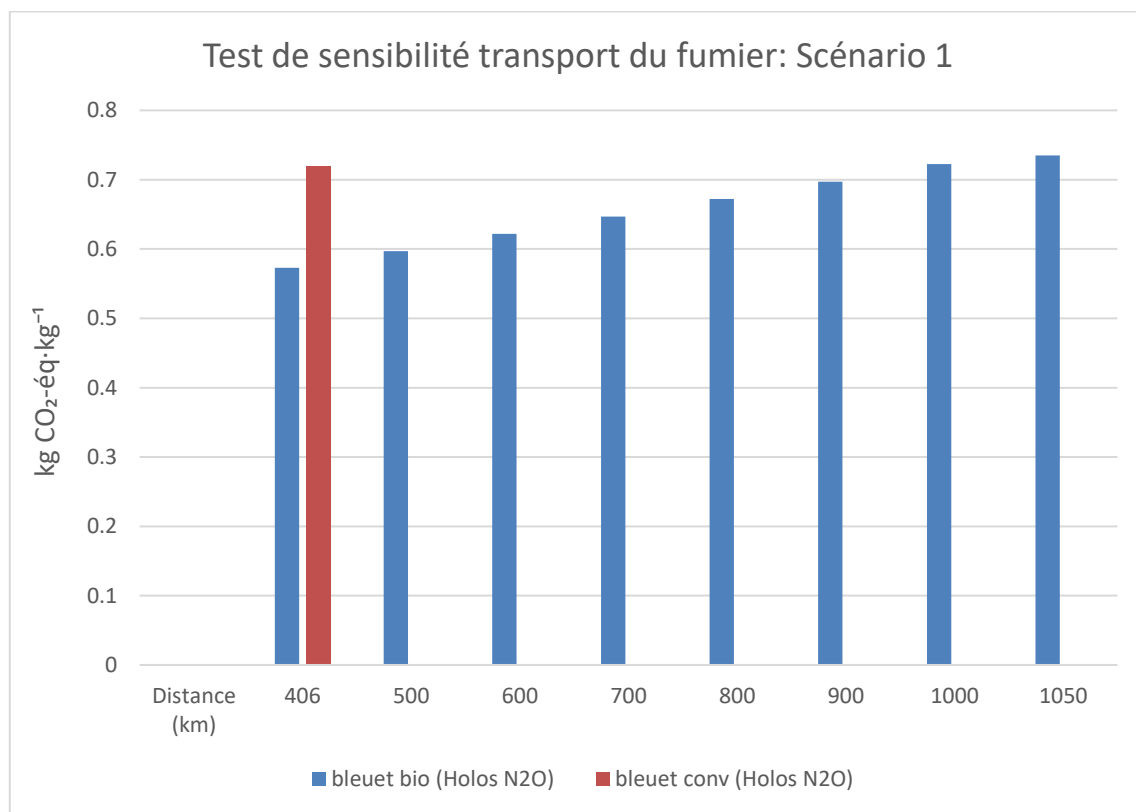
**Tableau 11 :** Contribution des émissions de N<sub>2</sub>O des champs après application d'engrais dans les deux scénarios sur un cycle de production (2 ans) – Les valeurs des contributions sont présentées pour le test de sensibilité.

|                            | Scénario 1                              |                                            | Scénario 2                              |                                            |
|----------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|
|                            | kg CO <sub>2</sub> -éq kg <sup>-1</sup> | kg CO <sub>2</sub> -éq \$100 <sup>-1</sup> | kg CO <sub>2</sub> -éq kg <sup>-1</sup> | kg CO <sub>2</sub> -éq \$100 <sup>-1</sup> |
| Production biologique      | 0,15                                    | 4,74                                       | 0,00                                    | 0,00                                       |
| Production conventionnelle | 0,26                                    | 13,27                                      | 0,00                                    | 0,00                                       |

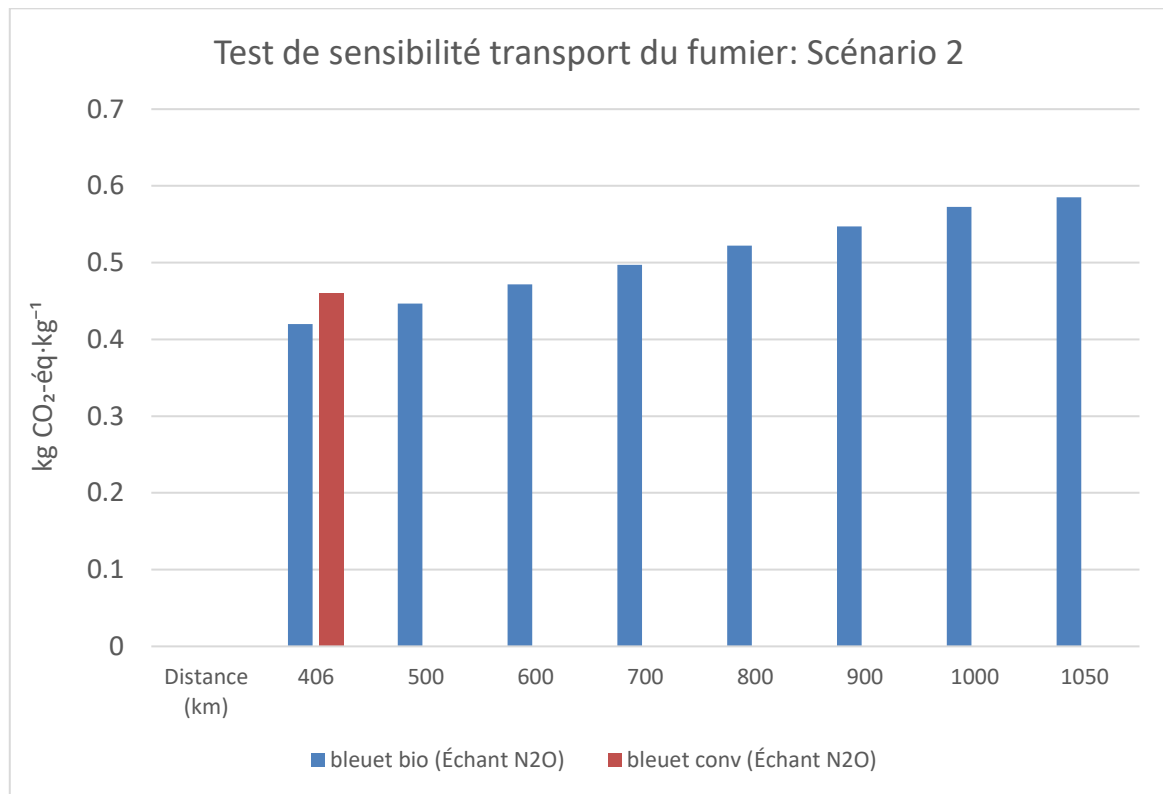
### Test de sensibilité : Transport du fumier de volaille

Le transport des intrants agricoles peut être un facteur déterminant de l'empreinte carbone des systèmes de production agricole, en particulier dans les systèmes biologiques où les fertilisants organiques doivent parfois être transportés sur de longues distances. Pour mesurer l'impact de ce facteur sur les résultats de l'ACV, une analyse de sensibilité a été effectuée en modifiant la distance de transport du fumier de volaille utilisé comme engrais organique dans le système de

production biologique. L'empreinte carbone globale de la production biologique est affectée par la distance de transport du fumier de volaille (*Figures 5 et 6*), dans les scénarios 1 et 2.



**Figure 5** l'impact du transport du fumier en fonction de la distance d'approvisionnement dans le scenario 1 – Les émissions de la production conventionnelle sont présentées à titre comparatif.



**Figure 6** l'impact du transport du fumier en fonction de la distance d'approvisionnement dans le scénario 2 – Les émissions de la production conventionnelle sont présentées à titre comparatif.

Dans le scénario 1, les résultats révèlent que l'empreinte carbone initiale de la production biologique est de 0,57 kg CO<sub>2</sub>-ék kg<sup>-1</sup>. Cette valeur est observée lorsque la distance de transport du fumier est de 406 km, qui correspond à la distance mesurée dans le système étudié. Cependant, à mesure que cette distance augmente progressivement jusqu'à 1050 km, l'empreinte carbone du système biologique augmente également de manière quasi linéaire, atteignant environ 0,73 kg CO<sub>2</sub>-ék kg<sup>-1</sup>, des émissions de GES supérieures à celles observées dans le système conventionnel. Cette hausse graduelle montre que le transport du fumier de volaille contribue de manière importante à l'empreinte carbone globale du

système biologique. La corrélation linéaire observée entre la distance de transport et l'augmentation des émissions est attribuable à la relation directe entre la distance parcourue et la consommation de carburant des véhicules employés pour le transport du fumier. Par conséquent, plus la distance de transport est grande, plus les émissions sont élevées. Les résultats du test de sensibilité sur le transport du fumier démontrent que l'avantage du système biologique comparé au système conventionnel tend à s'amenuiser avec l'accroissement de la distance de transport du fumier. Dans le scénario 1, au-delà de 1050 km, distance seuil, l'empreinte carbone du système biologique ( $0,73 \text{ kg CO}_2\text{-}\text{eq kg}^{-1}$ ) est supérieure à celle du système conventionnel. Cela souligne l'importance d'utiliser du fumier de sources locales dans les systèmes biologiques de production de bleuet.

Dans le scénario 2, l'empreinte carbone respective du système biologique et du système conventionnel est d'environ  $0,42 \text{ kg CO}_2\text{-}\text{eq kg}^{-1}$  et  $0,46 \text{ kg CO}_2\text{-}\text{eq.kg}^{-1}$  pour une distance de transport de 406 km pour le transport du fumier de volaille dans le système biologique. En revanche, à 500 km de distance, le système biologique émet pratiquement la même quantité de GES que le système conventionnel, mais à 600 km la production émet plus de GES (environ  $0,47 \text{ kg CO}_2\text{-}\text{eq kg}^{-1}$ ) que la production conventionnelle.

## CHAPITRE 3

### DISCUSSION

#### 3.1 Comparaison des résultats à la littérature

L'analyse comparative des deux systèmes de production montre que la production biologique tend à avoir une empreinte carbone plus faible que celle de la production conventionnelle dans le scénario où la modélisation est effectuée avec les données de N<sub>2</sub>O de Holos selon les deux unités fonctionnelles utilisées. Cette différence est ramenée à 8,7 % lorsque les données locales d'émissions de N<sub>2</sub>O des travaux de Pelletier *et al.* (2025) sont utilisées pour quantifier l'empreinte carbone selon l'unité fonctionnelle – émissions par kg de bleuets produits au champ. Ces résultats indiquent que la production biologique tendrait à être un avantage environnemental en termes d'émissions de GES dans le scénario 1. Cependant, le scénario 2 montre que les deux systèmes de production de bleuets émettent des quantités de GES presque similaires dues à l'utilisation des données locales d'émission de N<sub>2</sub>O. On observe une diminution des émissions de GES lorsque les données d'émissions locales d'échantillonnage de N<sub>2</sub>O sont utilisées. Cette baisse des émissions de GES est particulièrement marquée dans la production conventionnelle, où l'empreinte carbone passe de 0,72 à 0,46 kg CO<sub>2</sub>-équ kg<sup>-1</sup>, ce qui représente une réduction d'environ 36 %. Dans le système biologique, on observe aussi une baisse : l'empreinte carbone passe de 0,57 à 0,42 kg CO<sub>2</sub>-équ kg<sup>-1</sup>, soit une réduction d'environ 26 %. Ces résultats soulignent l'importance de choisir judicieusement les données d'inventaire dans les évaluations de l'empreinte carbone de la production du bleuet et d'en assurer la fiabilité. Les facteurs d'émission

utilisés dans les modèles nationaux s'appuient souvent sur des valeurs moyennes où les conditions pédoclimatiques spécifiques des systèmes étudiés ne seraient pas toujours représentées.

Les résultats de cette étude se situent dans la fourchette couramment observée dans la littérature scientifique sur l'empreinte carbone de la production de bleuets et d'autres petits fruits. La littérature scientifique montre des valeurs allant de 0,20 à 0,80 kg CO<sub>2</sub>-éq kg<sup>-1</sup> de fruits produits (Pérez *et al.* 2024). Cependant, certaines conditions de production peuvent entraîner des empreintes carbone plus élevées, atteignant même plus de 1 kg CO<sub>2</sub>-éq kg<sup>-1</sup> de fruits (Pérez *et al.* 2024). Néanmoins, Girgenti *et al.* (2013) ont évalué l'empreinte carbone de la production de bleuets à environ 0,44 kg CO<sub>2</sub>-éq kg<sup>-1</sup> en prenant en compte l'ensemble de la chaîne de production. Plus spécifiquement pour le bleuet sauvage, Percival et Dias (2014) montrent des facteurs d'émission entre 0,081 et 0,24 kg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de bleuets produits. Les résultats variés observés dans la littérature sont principalement attribuables aux divergences dans les méthodes agricoles, les caractéristiques pédoclimatiques et les limites des systèmes dans ces recherches (Pérez *et al.* 2024). La similitude des émissions observées dans diverses régions productrices laisse croire que les méthodes agricoles employées dans la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean ont un impact environnemental comparable à celui des autres systèmes de culture de petits fruits. Cette cohérence avec les conclusions des recherches antérieures est un indice démontrant la rigueur méthodologique de l'analyse effectuée dans cette étude.

L'analyse de contribution montre que le fauchage, la fertilisation et les

émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  des champs ne provenant pas de mesures locales sont les principaux émetteurs dans les deux systèmes de production examinés. Dans le système conventionnel, les émissions liées à la fertilisation sont principalement attribuables à la fabrication industrielle d'engrais minéraux, à leur transport et à leur épandage. La fabrication d'engrais azotés est particulièrement énergivore, car elle dépend du procédé Haber-Bosch, qui nécessite une quantité considérable d'énergie (Bion *et al.* 2024). Ce processus industriel entraîne également des émissions importantes de  $\text{CO}_2$ , ce qui explique l'empreinte carbone élevée de la fertilisation minérale dans les systèmes agricoles (Bion *et al.* 2024). Les émissions liées à la fertilisation comprennent également les émissions liées à l'utilisation de machines agricoles fonctionnant au diesel pour leur épandage. Ces émissions supplémentaires contribuent à augmenter l'empreinte carbone de la fertilisation dans les systèmes agricoles conventionnels.

Dans le système de production biologique, l'engrais provient principalement de matières organiques, à savoir le fumier de volaille. Les émissions associées à la fertilisation biologique proviennent notamment du traitement et du stockage du fumier, du transport vers les exploitations agricoles et de l'épandage mécanique dans les champs. Cependant, tel que démontré dans la présente étude, l'impact environnemental de l'engrais organique dépend considérablement de la distance parcourue par le fumier. Lorsque les sources de fumier sont proches des exploitations agricoles, les émissions liées au transport peuvent être relativement faibles. En revanche, lorsque les engrais organiques doivent être transportés sur de longues distances, les émissions liées au transport peuvent devenir un facteur

prépondérant dans l'empreinte carbone du système biologique. Cordes *et al.* (2016) ont montré qu'en tenant compte des changements d'affectation des terres, l'empreinte carbone de la production biologique de bleuet en corymbe varie de -0,94 kg CO<sub>2</sub>-éq kg<sup>-1</sup> (absorption) à 0,61 kg CO<sub>2</sub>-éq kg<sup>-1</sup> (émissions). Ils ont montré également que l'empreinte carbone, sans le changement d'affectation des terres, varie de 0,27 à 0,69 kg CO<sub>2</sub>-éq kg<sup>-1</sup> (Cordes *et al.* 2016). Ils suggèrent que la variabilité des résultats observés dans les systèmes de production de bleuet repose sur les pratiques de production (Cordes *et al.* 2016). Ils ont conclu que les facteurs contribuant le plus aux émissions de GES sont les engrais organiques, suivis par la consommation d'énergie, qui représentent en moyenne respectivement 50 % et 43 % des émissions totales (Cordes *et al.* 2016).

Les émissions associées aux autres opérations mécanisées (ex. : herbicide, pollinisation et récolte) sont moins importantes. La fertilisation et le fauchage demeurent les principaux points chauds dans l'empreinte carbone globale des deux systèmes de production du bleuet sauvage. Ces observations correspondent à celles de plusieurs ACV effectuées dans la production de petits fruits, qui montrent que la fertilisation influence de manière significative les émissions de GES des systèmes de production agricole (Cordes *et al.* 2016). Par exemple, Pérez *et al.* (2022) ont démontré que la fertilisation représentait la principale source d'impact environnemental dans la production de bleuets, suivie par la consommation d'énergie utilisée pour les opérations agricoles. Cependant, certains procédés peuvent contribuer à diminuer l'empreinte carbone de ces activités. Parmi ceux-ci, on compte l'amélioration de l'efficacité énergétique des machines agricoles,

l'adoption de carburants de substitution ou l'optimisation de la gestion des opérations agricoles, ce qui entraînerait une baisse de la consommation de carburant.

Cette analyse met en évidence une différence notable entre les émissions de  $N_2O$  au champ calculées par le modèle Holos et celles mesurées directement sur le terrain. Les résultats indiquent que les émissions calculées par le modèle Holos sont nettement supérieures à celles mesurées à la BER. Selon Pérez *et al.* (2022), les émissions de  $N_2O$  du sol sont faibles représentant 1,8 % à 4 % des émissions totales de l'ACV de la production de bleuet, donc le  $N_2O$  direct du sol des bleuetières n'est pas le principal point chaud. En revanche, les auteurs soulignent explicitement que les émissions de GES des fruits et légumes proviennent notamment de la production d'engrais et de la consommation d'énergie, ce qui signifie que le « point chaud » n'est pas toujours le flux direct de  $N_2O$  isolé, mais plus largement le complexe fertilisation–sol–énergie. Pour le bleuet sauvage de la BER, Pelletier *et al.* (2025) concluent que des fertilisations minérales et organiques n'ont pas d'effet significatif sur l'augmentation des émissions de GES dans des sols sableux sous production de bleuet sauvage.

Ces différents résultats dans la littérature scientifique suggèrent que les facteurs génériques, comme ceux utilisés dans l'estimation des émissions de  $N_2O$  de Holos, pourraient surestimer les émissions réelles dans certains contextes pédologiques acides et bien drainés tels qu'observés dans le bleuet sauvage. Par conséquent, dans un cadre similaire au Saguenay–Lac-Saint-Jean, il est préférable d'aborder la question de la contribution des émissions de  $N_2O$  du champ en fonction

de la provenance des données d'inventaire de N<sub>2</sub>O et de la méthode d'estimation. Il est recommandé d'utiliser des données régionales ou des mesures de terrain pour effectuer des comparaisons détaillées de différents systèmes de production. En ce qui concerne les sols de bleuetières du Saguenay–Lac-Saint-Jean, plusieurs facteurs contribuent à la réduction des émissions de N<sub>2</sub>O. Les sols sont généralement acides et bien drainés, ce qui limite les conditions anaérobies nécessaires à la dénitrification (Pelletier *et al.* 2025). Ces caractéristiques pédologiques et agronomiques favorisent la réduction des émissions directes de N<sub>2</sub>O dans les sols de la BER. Cela pourrait expliquer les émissions relativement faibles qui ont été mesurées sur le terrain.

L'utilisation d'une unité fonctionnelle économique constitue une approche complémentaire dans les analyses du cycle de vie appliquées aux systèmes agricoles (Hayashi *et al.* 2006; Caffrey et Veal 2013). Cette approche est reconnue dans la littérature scientifique comme pertinente pour analyser la durabilité des systèmes agricoles dans une perspective intégrant simultanément les dimensions environnementales et économiques (Nemecek *et al.* 2011). En effet, l'évaluation des impacts environnementaux par unité monétaire permet de lier directement les émissions de GES aux revenus de chaque système de production. Les résultats obtenus indiquent que le système biologique tend à avoir une empreinte carbone plus faible comparé au système conventionnel lorsqu'on la rapporte à la valeur économique qu'il génère. La faible différence de rendement et le prix plus élevé du bleuet biologique expliquent ce résultat.

L'utilisation de l'unité fonctionnelle économique offre de nombreux avantages

d'analyse. Premièrement, cela permet une meilleure prise en compte de la dimension économique dans l'évaluation environnementale des systèmes agricoles. Selon Nemecek *et al.* (2024), l'intégration de la valeur économique dans les ACV permet une évaluation plus efficace de l'impact environnemental des systèmes agricoles, en tenant compte de leur durabilité économique. Deuxièmement, cette unité fonctionnelle permet de mieux représenter la réalité des systèmes agricoles, où les cultures à haute valeur marchande peuvent générer des revenus élevés tout en générant des émissions de GES relativement faibles. Cependant, certaines limites méthodologiques associées à cette unité fonctionnelle limitent les interprétations des résultats. En effet, l'empreinte carbone par unité fonctionnelle monétaire est étroitement liée au prix du produit sur le marché, la différence de rendement n'étant pas pris en compte, cela peut entraîner des interprétations partielles et/ou erronées des résultats. Les variations du prix de bleuet peuvent donner l'impression d'une empreinte carbone moins importante dans le système de production, sans qu'il n'y ait de changement réel dans les émissions. Selon Hayashi (2013), cette dépendance aux variables économiques peut rendre la comparaison entre différentes études très complexe, car les prix utilisés dans les analyses peuvent varier en fonction du contexte géographique ou temporel.

### **3.2 Simulation Monte Carlo**

La méthode Monte Carlo a permis de créer une distribution des résultats potentiels et de calculer des intervalles de confiance pour les émissions de GES. Les résultats de la simulation révèlent que les distributions d'émissions des deux systèmes de production se chevauchent partiellement, mais plus prononcées dans

le scénario 1. Cela indique que, bien que la production biologique ait généralement un impact carbone comparativement faible, certains ensembles de paramètres peuvent entraîner des émissions similaires dans les deux systèmes. Cette observation met en évidence la nécessité de prendre en compte l'incertitude lors de l'analyse du bilan carbone. Les résultats de l'analyse des distributions Monte Carlo indiquent également que certaines données, par exemple les émissions de  $N_2O$  du champ, sont une source d'incertitude importante dans le modèle. Cette observation est cohérente avec les résultats de plusieurs études sur les émissions agricoles, qui ont identifié les émissions de  $N_2O$  comme l'un des paramètres les plus difficiles à estimer avec précision (Wang *et al.* 2020; Hung *et al.* 2025). En effet, ces émissions varient considérablement en fonction de facteurs tels que la température, l'humidité du sol, la texture du sol et les pratiques de gestion agricole (Wang *et al.* 2020; Hung *et al.* 2025). Hung *et al.* (2025) mettent de l'avant la grande variabilité spatiale et temporelle de ces émissions qui complexifie leur estimation dans les inventaires agricoles.

Les résultats de la probabilité  $P(\text{Bio} < \text{Con})$  reflètent les tendances observées dans les résultats où le système biologique tend à avoir des impacts environnementaux légèrement moins importants que le système conventionnel car les différences ne sont pas significatives. L'augmentation de la probabilité  $P(\text{Bio} < \text{Con})$  du scénario 1 (68,93 %) au scénario 2 (88,9 %) traduit un renforcement de cette tendance lorsque les données, notamment liées aux émissions de  $N_2O$  au champ, sont ajustées aux conditions locales. Cette augmentation de probabilité met en évidence l'impact des décisions méthodologiques sur la répartition des résultats

et sur la supériorité relative entre les deux systèmes. Cependant, en accord avec les directives méthodologiques en ACV, l'échec à atteindre le seuil minimal de 90-95 % ne permet pas de déterminer une supériorité statistique significative (Golsteijn 2015). Par conséquent, il est impossible de tirer une conclusion nette sur la différence significative de l'empreinte carbone des systèmes conventionnels et biologiques.

### **3.3 Tests de sensibilité : Émission de N<sub>2</sub>O au champ et transport du fumier de volaille**

Les tests de sensibilité réalisés dans cette recherche ont évalué l'impact de facteurs critiques sur les résultats de l'empreinte carbone : les émissions de N<sub>2</sub>O provenant des champs et le transport du fumier de volaille utilisé comme engrais dans le système biologique.

Les résultats obtenus montrent que les émissions de N<sub>2</sub>O du sol, lorsqu'elles sont estimées de manière générique avec Holos, sont l'un des facteurs déterminants les plus importants dans les deux systèmes de production dans le scénario 1. Le logiciel Holos 4.0 utilise les lignes directrices du GIEC pour les inventaires nationaux et des facteurs d'émissions contextualisés au milieu (région, sols et climats) pour effectuer les calculs. Cependant, il est possible que ces émissions soient surestimées par Holos, car des mesures locales d'échantillonnage de N<sub>2</sub>O ont montré que les émissions directes de N<sub>2</sub>O très faibles voire nulles dans le champ de bleuet sauvage (BER) (Pelletier *et al.* 2025). Il est à noter que le logiciel Holos n'a pas de facteurs d'émissions adaptés à la culture du bleuet sauvage. Plusieurs raisons expliquent la faible émission de N<sub>2</sub>O au champ de bleuet sauvage (BER).

Tout d'abord, les sols acides et bien drainés du Saguenay–Lac-Saint-Jean limitent la dénitrification (Pelletier *et al.* 2025). Ensuite, la décomposition lente des engrais organiques entraîne une minéralisation progressive, ce qui réduit la disponibilité immédiate de l'azote pour les micro-organismes nitrifiants (Pelletier *et al.* 2025). Enfin, les faibles apports d'engrais pourraient être une autre explication possible de la faible émission de N<sub>2</sub>O au champ de bleuets sauvage (BER) (Pelletier *et al.* 2025).

Le transport du fumier de volaille joue un rôle important dans le système biologique. En effet, plus la distance de transport est longue (1000 km dans le scénario 1 et 600 km dans le scénario 2), plus les émissions liées au transport peuvent annuler les avantages écologiques de l'engrais organique. Cette observation met en évidence l'importance de la proximité géographique entre les lieux de production de l'engrais et les sites agricoles. Dans le système biologique, la fertilisation avec de l'engrais local contrairement à du fumier transporté à des centaines de kilomètres, pourrait être une approche efficace pour diminuer les émissions de GES liées au transport des engrais organiques. Cependant, la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean ne produit pas de fumier de volaille séché et granulé en quantité suffisante pour répondre à la demande.

### **3.4 Limites de l'interprétation des résultats de l'étude**

#### **3.4.1 Rendement des deux systèmes de production**

Cette étude présente une limite en termes de rendement : elle part du principe que les rendements des systèmes de production biologique et conventionnelle sont identiques. En effet, les rendements peuvent fluctuer en fonction des méthodes agricoles, des conditions météorologiques et de la technologie utilisée dans chaque

système de culture. Si le rendement de la production biologique est inférieur à celui de la production conventionnelle dans le système examiné, l'empreinte carbone par kilogramme de bleuets produits pourrait s'avérer plus importante que celle obtenue dans cette étude. En revanche, si les rendements biologiques sont supérieurs à ceux de la production conventionnelle (ce qui est peu probable), l'avantage environnemental de la production biologique pourrait s'avérer encore plus notable. Par conséquent, il serait avantageux d'intégrer le paramètre de différence de rendement dans les futures études de l'empreinte carbone du bleuet sauvage.

### **3.4.2 Unité fonctionnelle : émissions de GES par 100 \$ de bleuets vendus**

L'utilisation d'une unité fonctionnelle économique présente des limites méthodologiques dans le cadre de cette analyse. Elle ne prend pas en considération les gains nets et la différence de rendement. Selon diverses études, les unités fonctionnelles économiques ont des limites en ACV. Nemecek *et al.* (2011) ont mis en évidence le fait que l'expression des impacts en termes monétaires peut masquer les différences réelles entre les systèmes de production en raison de leur dépendance aux conditions du marché. Selon Guinée (2002), les unités fonctionnelles économiques sont soumises à des influences externes, telles que les politiques de prix, les subventions ou les stratégies commerciales, ce qui entrave leur stabilité et rend complexe leur utilisation pour les comparaisons environnementales. Dans ce contexte, l'empreinte carbone associée à 100 \$ de bleuets vendus peut fluctuer indépendamment des émissions réelles de GES. Cette variation peut limiter les résultats de l'analyse et rendre la comparaison entre les systèmes biologiques et conventionnels moins pertinente. Ainsi, bien que cette unité

permette d'intégrer une dimension économique, son utilisation doit être interprétée avec prudence et d'autres paramètres comme la différence de rendement afin de garantir la rigueur scientifique et la validité comparative de l'analyse. Il est donc impossible de tirer une conclusion claire en se basant uniquement sur l'unité fonctionnelle des émissions par 100 \$ de bleuets vendus.

## CONCLUSION

La présente étude visait à évaluer et à comparer l'empreinte carbone des systèmes de production conventionnelle et biologique de bleuet sauvage par une étude de cas sur la BER de l'UQAC au Saguenay–Lac-Saint-Jean, selon une approche d'ACV conforme à la norme ISO 14044. Cette comparaison des deux systèmes s'est appuyée sur deux scénarios d'estimation des émissions de  $N_2O$  provenant des sols agricoles.

Les résultats montrent que l'empreinte carbone dépend de la méthode de calcul des émissions de  $N_2O$  du champ. En utilisant les données d'émission génériques de  $N_2O$  du logiciel Holos, on obtient une empreinte carbone de  $0,57 \text{ kg CO}_2\text{-}\text{eq kg}^{-1}$  pour la production biologique et de  $0,72 \text{ kg CO}_2\text{-}\text{eq kg}^{-1}$  pour la production conventionnelle. Lorsque les émissions de  $N_2O$  du champ sont estimées à partir de données expérimentales locales provenant de la BER, les émissions de GES s'établissent à  $0,42 \text{ kg CO}_2\text{-}\text{eq kg}^{-1}$  et  $0,46 \text{ kg CO}_2\text{-}\text{eq kg}^{-1}$  pour la production biologique et conventionnelle, respectivement. Toutefois, cette différence d'émissions de GES entre les deux systèmes de production de bleuet n'est pas significative dans les deux scénarios étudiés.

L'analyse de la contribution montre que la fertilisation, les émissions de  $N_2O$  (données génériques de Holos) et la combustion de carburant pour le fauchage sont les principales étapes responsables des émissions de GES. Les résultats de l'analyse mettent en évidence l'impact significatif des méthodes de calcul du  $N_2O$  du champ sur les résultats. Dans le cas de la production biologique, la gestion des

fertilisants organiques, comme la distance de transport du fumier de volaille, a un impact majeur sur l'empreinte carbone. Cela met en évidence l'importance de tirer profit de sources locales. Il est important de garder à l'esprit certaines limites lors de l'interprétation des résultats de cette étude. Cette analyse se concentre sur un périmètre « du berceau à la porte », ce qui implique l'exclusion des étapes de transformation, de distribution et de consommation. Des travaux futurs pourraient ainsi viser à étendre le périmètre de l'analyse et à développer des facteurs d'émission spécifiques fondés sur des mesures de terrain à long terme et prendre en compte les étapes de la production des bleuets jusqu'à la consommation.

En définitive, cette étude met en évidence l'importance de la gestion des engrais et des émissions de  $N_2O$  dans les systèmes de production de bleuets sauvages ainsi que l'utilisation du carburant dans les activités de fauchage. Elle fournit une base scientifique pour guider l'évolution vers des pratiques agricoles plus durables, alliant la performance environnementale et la prospérité économique des systèmes de production de bleuets sauvages au Saguenay–Lac-Saint-Jean.

## LISTE DES RÉFÉRENCES

- AAC. 2025 (mis à jour le 23 septembre 2025). HOLOS. Consulté le 20 mai 2025, <https://agriculture.canada.ca/fr/production-agricole/holos>
- Bion N, Can F et Courtois X. 2024. Production d'ammoniac en conditions modérées- Développement de nouveaux systèmes catalytiques. Techniques de l'ingénieur Bioprocédés.
- CABC. 2024a. Renseignements sur la production de bleuets nains biologiques. Centre d'agriculture biologique du Canada, Canada.
- CABC. 2024b. Renseignements sur la production de bleuets nains biologiques. Centre d'agriculture biologique du Canada, Canada.
- Caffrey KR et Veal MW. 2013. Conducting an agricultural life cycle assessment: challenges and perspectives. The Scientific World Journal, 2013 : 472431.
- Canada E. 2020. Données climatiques historiques: Conditions météorologiques et climatiques passées. Consulté le 7 janvier 2025, <https://climat.meteo.gc.ca/>
- Cordes H, Iriarte A et Villalobos P. 2016. Evaluating the carbon footprint of Chilean organic blueberry production. The International Journal of Life Cycle Assessment, 21 : 281–292.
- EC. 2020. Données climatiques historiques: Conditions météorologiques et climatiques passées. Consulté le 7 janvier, <https://climat.meteo.gc.ca/>
- ECCC. 2025. Rapport d'inventaire national 1990–2023 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada. Environnement et Changement climatique Canada, Canada.
- Ecoinvent. 2023. Ecoinvent database. Dans : Association E éd., Ecoinvent Association.
- FAO. 2022. FAOSTAT. Dans : Nations FaAOotU éd.
- FEPEX. 2020a. Fédération Espagnole des Associations de Producteurs Exportateurs de Fruits, Légumes. Consulté le 15 mars <https://www.fepex.es/inicio.aspx>
- FEPEX. 2020b. Fédération Espagnole des Associations de Producteurs Exportateurs de Fruits, Légumes. Consulté le 15 mars 2025, <https://www.fepex.es/inicio.aspx>.
- Girgenti V, Peano C, Bounous M et Baudino C. 2013. A life cycle assessment of non-renewable energy use and greenhouse gas emissions associated with blueberry and raspberry production in northern Italy. Science of the Total Environment, 458 : 414–418.
- Golsteijn L. 2015. Behind the scenes at Monte Carlo simulations. SimaPro.
- Guinée JB. 2002. Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards. Springer Science & Business Media.
- Hayashi K. 2013. Practical recommendations for supporting agricultural decisions through life cycle assessment based on two alternative views of crop production: the example of organic conversion. The International Journal of Life Cycle Assessment, 18 : 331–339.
- Hayashi K, Gaillard G et Nemecek T. 2006. Life cycle assessment of agricultural production systems: current issues and future perspectives. Good Agricultural Practice (GAP) In Asia and Oceania Food and Fertilizer Technology Center, Taipei, Taiwan, ROC : 98–110.

Hung C-Y, Liang C, Pelster D, Grant B, Smith W et VanderZaag A. 2025. Review of research studies on nitrous oxide emissions from manure-amended soils in Canada from 1990 to 2023. *Canadian Journal of Soil Science*, 105 : 1–16.

IPCC. 2013a. Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge university press.

IPCC. 2013b. Anthropogenic and natural radiative forcing. *Climate Change 2013-The Physical Science Basis* : 659–740.

IPCC. 2021a. Climate Change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; technical summary.

IPCC. 2021b. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. . Press CU.15.

IPCC. 2022. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. . Change IPoC.

ISO I. 2006. 14044: Management environnemental-Analyse du cycle de vie-Exigences et lignes directrices. ISO, Editor.

Lafond J et Ziadi N. 2013. Biodisponibilité de l'azote et du phosphore dans les sols de bleuetières du Québec. *Canadian Journal of Soil Science*, 93 : 33–44.

MAAPNB. 2017a. Guide de lutte intégrée contre les mauvaises herbes dans les bleuetières. Nouveau Brunswick Agriculture, Pêches et Aquaculture., Nouveau Brunswick

MAAPNB. 2017b. Guide de lutte intégrée contre les mauvaises herbes dans les bleuetières. Nouveau Brunswick Agriculture PeA, Nouveau Brunswick

MAPAQ. 2016. Monographie de l'industrie du bleuet sauvage au Québec.

MAPAQ. 2022. Portrait-diagnostic sectoriel de l'industrie du bleuet sauvage au Québec. Gouvernement du Québec, Quebec.

MELCCFP. 2025. Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2023 et leur évolution depuis 1990. Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs.

Millet A. 2003. Méthode de Monte Carlo. Université Paris VI et Paris VII, Polycopié.

Montalba R, Vieli L, Spirito F et Muñoz E. 2019. Environmental and productive performance of different blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) production regimes: Conventional, organic, and agroecological. *Scientia Horticulturae*, 256 : 108592.

Nemecek T, Dubois D, Huguenin-Elie O et Gaillard G. 2011. Life cycle assessment of Swiss farming systems: I. Integrated and organic farming. *Agricultural Systems*, 104 : 217–232.

Nemecek T, Roesch A, Bystricky M, Jeanneret P, Lansche J, Stüssi M et Gaillard G. 2024. Swiss agricultural life cycle assessment: a method to assess the emissions and environmental impacts of agricultural systems and products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 29 : 433–455.

Paré MC, Fournier M-P, Lafond J et Deslauriers A. 2022. How management practices influence vegetative and reproductive plant traits of wild lowbush blueberry species. *Canadian Journal of Plant Science*, 102 : 1007–1015.

Pelletier AJ, Faubert P, Lafond J, Bertrand N, Legault J, Ouimet R, Pelster DE, Pichette A, Ziadi N et Paré MC. 2025. Conventional and industrial by-product fertilization do not induce greenhouse gas emissions in sandy soils under wild lowbush blueberry cropping in eastern Canada. *Geoderma Regional* : e01024.

Percival D et Dias G. 2014. Energy consumption and greenhouse gas production in wild blueberry production. *X International Symposium on Vaccinium and Other Superfruits* 1017 : 163–168.

Pérez R, Laca A, Laca A et Díaz M. 2022. Environmental behaviour of blueberry production at small-scale in Northern Spain and improvement opportunities. *Journal of cleaner production*, 339 : 130594.

Pérez R, Argüelles F, Laca A et Laca A. 2024. Evidencing the importance of the functional unit in comparative life cycle assessment of organic berry crops. *Environmental Science and Pollution Research*, 31 : 22055–22072.

Resque Porto P. 2023. Impacts of field hydrology management on two years of soil greenhouse gas emissions from blueberry crop rows in Delta, British Columbia. University of British Columbia.

UNEP. 2023. Emissions Gap Report 2023: Broken Record—Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again). United Nations Environment Programme, Nairobi.

UNEP. 2025. Emissions Gap Report 2025: Off target—Continued collective inaction puts global temperature goal at risk.

Wang Q, Zhou F, Shang Z, Ciais P, Winiwarter W, Jackson RB, Tubiello FN, Janssens-Maenhout G, Tian H et Cui X. 2020. Data-driven estimates of global nitrous oxide emissions from croplands. *National science review*, 7 : 441–452.

Weidema BP et Wesnæs MS. 1996. Data quality management for life cycle inventories—an example of using data quality indicators. *Journal of cleaner production*, 4 : 167–174.

## ANNEXE 1 : LISTE DES DONNÉES D'INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE COLLECTÉES

| Étapes                                                                                                            | Données  | Unités      | Description                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Phase végétative</b>                                                                                           |          |             |                                                                                                                                             |
| <b>Fauchage</b>                                                                                                   | 0,75     | ha/hr       | Le nombre d'hectares fauché en une heure.                                                                                                   |
|                                                                                                                   | 18       | Litre/hr    | La consommation de diesel d'un traiteur John-Deere 6430 avec faucheuse tardif de 13 pieds (24l de diesel ont été utilisés à l'hectare).     |
| <b>Pesticide</b>                                                                                                  | 2,5*0,75 | kg/ha       | Quantité de Velpar (75%hexazinone ;25%autre) appliquée à l'hectare. cyclohexyl-6-(diméthylamino) -1-méthyl-1,3,5-triazine-2,4(1H,3H) -dione |
|                                                                                                                   | 480*5.1  | g/ha        | 5.1 litres *480 Quantité de Proline 480 SC (480g Prothioconazole)                                                                           |
|                                                                                                                   | 92% *10  | g/ha        | 10 litres *0.92 Ag-Surf 11 Nonylphénoxy éthanol 92%                                                                                         |
|                                                                                                                   | 44       | ha/hr       | Le nombre d'hectares traité en une heure                                                                                                    |
|                                                                                                                   | 30       | Litre/hr    | La consommation de diesel d'un traiteur John-Deere automotrice de 100 pieds (0,68l de diesel utilisé à l'hectare).                          |
| <b>Fertilisation</b>                                                                                              | 50       | kg N/ha     | Sulfate d'ammonium                                                                                                                          |
|                                                                                                                   | 30       | kg P205 /ha | Superphosphate triple                                                                                                                       |
|                                                                                                                   | 20       | kg K20/ha   | Sulfate de potassium                                                                                                                        |
|                                                                                                                   | 1        | kg B/ha     | Borax - Tétraborate de sodium                                                                                                               |
|                                                                                                                   | 15       | ha/hr       | Le nombre d'hectares fertilisé en une heure.                                                                                                |
|                                                                                                                   | 16       | Litre/hr    | La consommation de diesel d'un traiteur John-Deere 6430 avec épandeur à engrais 50 pieds (1,067 l de diesel utilisé à l'hectare)            |
|                                                                                                                   | 406      | km          | Le fumier est récupéré à notre dame du bon conseil (3483, 10e Rang de Wendover Notre-Dame-du-Bon-Conseil (Québec) J0C 1A0 CANADA)           |
|                                                                                                                   | 1000     | kg /ha      | Fumier de volaille séché.                                                                                                                   |
|                                                                                                                   | 1,47     | kg/ha       | La consommation de diesel d'un traiteur pour épandre 1000 kg de fumier sur un hectare (Ecoinvent)                                           |
| <b>Données émissions - Échantillonnage N<sub>2</sub>O (prélevées au BER - travaux de Pelletier et al. (2025))</b> |          |             |                                                                                                                                             |

|                                           |                                      |                     |                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Émissions de N<sub>2</sub>O</b>        | 0,0                                  | kg /ha              | moyenne de flux N <sub>2</sub> O par hectare avec l'application d'engrais biologique                                                                                |
|                                           | 0,0                                  | kg /ha              | moyenne de flux N <sub>2</sub> O par hectare avec l'application d'engrais traditionnelle                                                                            |
| <b>Émissions de N<sub>2</sub>O -Holos</b> |                                      |                     |                                                                                                                                                                     |
| <b>Émissions de N<sub>2</sub>O</b>        | 0,47 ±40 %                           | kg /ha              | Émissions directes des N <sub>2</sub> O aux champs pour le bleuet traditionnel                                                                                      |
|                                           | 0,3 ±60 %                            | kg /ha              | Émissions indirectes des N <sub>2</sub> O aux champs pour le bleuet traditionnel                                                                                    |
|                                           | 0,39 ±40 %                           | kg /ha              | Émissions directes de N <sub>2</sub> O aux champs pour le bleuet biologique                                                                                         |
|                                           | 0,05 ±60 %                           | kg /ha              | Émissions indirectes des N <sub>2</sub> O aux champs pour le bleuet biologique                                                                                      |
| <b>Phase de production</b>                |                                      |                     |                                                                                                                                                                     |
| <b>Pollinisation</b>                      | 2                                    | Ruche Quad/ha       | Nombre de ruches Quad nécessaires pour un hectare cultivé. (3,67 kg)                                                                                                |
|                                           | 0,5                                  | Ruche d'abeilles/ha | Nombre nécessaire de ruches d'abeilles pour un hectare cultivé (20 kg sans miel) 35 à 50 avec miel.                                                                 |
|                                           | 3,67 kg*1470 km                      | kg.km               | Quantité de ruche Quad transportées par le nombre de kilomètres parcourus. Distance Howell, USA et Normandin, QC-CA camion réfrigéré maintenu à 55 degrés Faraneith |
|                                           | 20 kg*425 km                         | kg.km               | Quantité de ruches d'abeilles transportées par le nombre de kilomètres parcourus. Distance Victoriaville et Normandin QC-CA                                         |
| <b>Récolte</b>                            | 1                                    | ha/hr               | Nombre d'hectare récolté en 1 heure par John-Deere 1550 avec une récolteuse DH 60 pouces                                                                            |
|                                           | 3                                    | Litre/hr            | Nombre de litre de diesel consommé par John-Deere 1550 avec une récolteuse DH 60 pouces                                                                             |
| <b>Transport</b>                          | Tonne de bleuets par hectare * 24 km | t.km                | Distance entre la bleuetière et l'usine de congélation. Quantité de bleuet par nombre de kilomètres parcourus.                                                      |
|                                           | 38,3                                 | MJ                  | Facteur de conversion litre de diesel en énergie (pouvoir calorifique)                                                                                              |
|                                           | 777                                  | kg                  | Quantité de bleuets produits à l'hectare dans les deux régions de production                                                                                        |

| Prix des bleuets 2018-2022 (en dollars canadiens par kg)                     |      |      |      |      |      |              |
|------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|--------------|
| <b>Année</b>                                                                 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | Moyenne (\$) |
| <b>Bleuetière conventionnel</b>                                              | 1,19 | 1,53 | 2,26 | 3,32 | 1,59 | 1,978        |
| <b>Bleuetière Biologique</b>                                                 | 2,50 | 2,44 | 2,92 | 5,32 | 2,65 | 3,166        |
| Source : MAPAQ, Direction régionale du Saguenay-Lac-Saint-Jean, octobre 2023 |      |      |      |      |      |              |

## ANNEXE 2 : DONNÉES D'ÉMISSION DE N<sub>2</sub>O – ÉCHANTILLONNAGE À LA BER

Le facteur d'émission calculé (le pourcentage de l'azote appliqué qui émane sous forme de N<sub>2</sub>O) est nul. La fertilisation conventionnelle ou avec des sous-produits industriels (fumier de volaille) n'induit pas d'émissions de N<sub>2</sub>O (Pelletier *et al.* 2025). Le tableau est tiré de de Pelletier *et al.* (2025).

**Table 4**

Mean (standard error in parentheses;  $n = 3$ ) cumulative area-based greenhouse gas (GHG) emissions (N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub>), fertilizer-induced N<sub>2</sub>O emission factors (FIEFs) and bioavailable nitrogen (N; with ion-exchange membranes [IEM]) for the growing seasons of 2021 and 2022 for an unfertilized control soil (CTL) and seven treatments. For the area-based emissions, a positive value expresses a gas loss to the atmosphere while a negative value indicates a gas uptake. For the FIEFs, a negative value indicates that the cumulative N<sub>2</sub>O emissions from the treatment is lower compared to the CTL.

| Production phase | Treatment | Area-based emissions                                    | Fertilizer-induced emission factor                                 | Area-based emissions                                    | Cation exchange membranes                               | Anion exchange membranes                                |
|------------------|-----------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|                  |           | kg N <sub>2</sub> O-N ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> | % of kg N <sub>2</sub> O-N kg <sup>-1</sup> N applied <sup>a</sup> | kg CH <sub>4</sub> -C ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> | μg NH <sub>4</sub> -N cm <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> | μg NO <sub>3</sub> -N cm <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> |
| Pruning          | CTL       | 0.07 (0.01)                                             | –                                                                  | –2.3 (0.84)                                             | 0.3 (0.10) <sup>bc</sup>                                | 0.5 (0.33) <sup>b</sup>                                 |
|                  | MIN       | 0.05 (0.03)                                             | –0.03 (0.05)                                                       | –2.3 (0.16)                                             | 1.2 (0.44) <sup>a</sup>                                 | 0.4 (0.17) <sup>b</sup>                                 |
|                  | ORG       | 0.07 (0.03)                                             | 0.00 (0.04)                                                        | –2.0 (0.12)                                             | 1.0 (0.04) <sup>a</sup>                                 | 3.7 (1.76) <sup>a</sup>                                 |
|                  | PPMS      | 0.06 (0.02)                                             | –0.02 (0.05)                                                       | –2.1 (0.29)                                             | 0.5 (0.23) <sup>b</sup>                                 | 0.4 (0.13) <sup>b</sup>                                 |
|                  | 1SA       | 0.04 (0.02)                                             | –                                                                  | –2.3 (0.17)                                             | 0.1 (0.01) <sup>c</sup>                                 | 0.2 (0.03) <sup>b</sup>                                 |
|                  | 2SA       | 0.08 (0.04)                                             | –                                                                  | –2.0 (0.44)                                             | 0.2 (0.01) <sup>bc</sup>                                | 0.6 (0.34) <sup>b</sup>                                 |
|                  | PPMS +1SA | 0.04 (0.02)                                             | –0.05 (0.03)                                                       | –1.6 (0.26)                                             | 0.4 (0.13) <sup>bc</sup>                                | 0.5 (0.29) <sup>b</sup>                                 |
|                  | PPMS +2SA | 0.07 (0.04)                                             | 0.02 (0.06)                                                        | –1.8 (0.08)                                             | 0.2 (0.06) <sup>bc</sup>                                | 1.2 (0.90) <sup>b</sup>                                 |
|                  | Mean      | 0.06 (0.009) <sup>A</sup>                               | –0.01 (0.02)                                                       | –2.1 (0.12) <sup>B</sup>                                | 0.5 (0.13) <sup>A</sup>                                 | 0.9 (0.49) <sup>A</sup>                                 |
| Harvesting       | CTL       | 0.03 (0.01)                                             | –                                                                  | –2.0 (0.81)                                             | 0.02 (0.01)                                             | 0.003 (0.001)                                           |
|                  | MIN       | 0.03 (0.02)                                             | 0.01 (0.01)                                                        | –2.0 (0.15)                                             | 0.05 (0.03)                                             | 0.008 (0.004)                                           |
|                  | ORG       | 0.03 (0.01)                                             | 0.01 (0.01)                                                        | –1.5 (0.14)                                             | 0.05 (0.03)                                             | 0.003 (0.001)                                           |
|                  | PPMS      | 0.01 (0.00)                                             | –0.02 (0.03)                                                       | –1.7 (0.45)                                             | 0.03 (0.01)                                             | 0.001 (0.001)                                           |
|                  | 1SA       | 0.06 (0.01)                                             | –                                                                  | –1.8 (0.24)                                             | 0.06 (0.02)                                             | 0.001 (0.000)                                           |
|                  | 2SA       | 0.04 (0.01)                                             | –                                                                  | –1.6 (0.34)                                             | 0.09 (0.02)                                             | 0.002 (0.001)                                           |
|                  | PPMS +1SA | 0.03 (0.01)                                             | 0.03 (0.02)                                                        | –1.1 (0.24)                                             | 0.06 (0.01)                                             | 0.020 (0.018)                                           |
|                  | PPMS +2SA | 0.04 (0.01)                                             | 0.01 (0.07)                                                        | –1.4 (0.19)                                             | 0.10 (0.02)                                             | 0.002 (0.001)                                           |
|                  | Mean      | 0.03 (0.005) <sup>B</sup>                               | 0.00 (0.01)                                                        | –1.6 (0.13) <sup>A</sup>                                | 0.06 (0.02) <sup>B</sup>                                | 0.005 (0.003) <sup>B</sup>                              |

MIN : engrais minéral ; ORG : engrais organique

Tableau réalisé par : Anthony Pelletier (Pelletier *et al.* 2025).

**ANNEXE 3 : LISTES DES PROCESSUS INCLUS ET EXCLUS POUR LA PRODUCTION DE FRUITS SELON LE  
PRODUCT CATEGORY RULES (PCR) DE LA DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE DE PRODUIT «  
FRUITS AND NUTS »**

| <b>Les processus inclus suggérés par le PCR</b>                                                                                                | <b>Les commentaires d'inclusion et exclusion</b>                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Processus en amont</b>                                                                                                                      |                                                                                                                           |
| Opérations de transformation de l'utilisation des terres, si la durée de vie prévue de la culture est inférieure à 25 ans                      | Exclu, la durée de vie prévue est supérieure à 25 ans                                                                     |
| Opérations pour la mise en place initiale de la culture, y compris le système d'irrigation, si sa durée de vie prévue est inférieure à 25 ans. | Exclu, la durée de vie prévue est supérieure à 25 ans                                                                     |
| Production de semences, boutures ou plantes pour la culture                                                                                    | Exclu, car il n'y a pas de données associées à ce processus                                                               |
| Production d'engrais utilisées dans l'agriculture                                                                                              | Ce processus est inclus par le biais du sulfate d'ammonium, du triple superphosphate, du borax et du sulfate de potassium |
| Production d'autres produits agrochimiques utilisés dans l'agriculture                                                                         | Ce processus est inclus par l'utilisation de l'herbicide                                                                  |
| Production de compost, le cas échéant                                                                                                          | Ce processus est inclus par le biais du fumier de volaille séché                                                          |
| Production d'électricité et de combustible utilisés                                                                                            | Les mix énergétiques sont inclus dans les produits intrants utilisés                                                      |
| Production de produits auxiliaires utilisés tels que des détergents pour le nettoyage                                                          | Ce processus n'existe pas dans notre système de processus                                                                 |
| Production de semi-produits utilisés dans le processus de base, le cas échéant                                                                 | Voir production de semences                                                                                               |

|                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Production d'emballage primaires, secondaires et tertiaires                                                                                                                                                 | Ce processus est inclus dans les données utilisées pour les produits intrants                                          |
| Pépinière fournissant des semis et boutures                                                                                                                                                                 | Voir production de semences                                                                                            |
| Matériel de culture (bois, plastique, métaux, etc.)                                                                                                                                                         | Ce processus est inclus par le biais du transport des ruches d'abeilles et Quad                                        |
| Extraction et utilisation de l'eau                                                                                                                                                                          | Ce processus n'existe pas dans notre système de processus                                                              |
| Traitement des déchets générés en amont                                                                                                                                                                     | Les déchets générés sont inclus dans les données génériques utilisées                                                  |
| <b>Processus de base</b>                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                        |
| Transport externe vers les processus de base                                                                                                                                                                | Le transport des intrants vers la bleuetière est inclus                                                                |
| L'agriculture, y compris les opérations dans les exploitations                                                                                                                                              | Tous les processus liés aux opérations agricoles sont inclus                                                           |
| Entretien des machines et de l'équipement                                                                                                                                                                   | Inclus, dans les données génériques d'utilisation de la machinerie agricole                                            |
| Préparation du produit final, y compris le traitement post-récolte et post-emballage, le cas échéant                                                                                                        | La préparation du produit final se fait à l'usine de congélation, donc exclu                                           |
| Les processus de production pour la production de produits énergétiques (carburant et électricité) utilisés à la ferme et dans les installations d'emballages et autres, y compris le stockage frigorifique | Le processus de fabrication de carburant et son utilisation est inclus. Mais il n'y a pas d'utilisation d'électricité. |
| Stockage sur site, y compris le stockage au frais avant expédition                                                                                                                                          | Il n'y a pas de stockage réfrigéré sur le site                                                                         |
| La gestion de tous les sous-produits                                                                                                                                                                        | Le transport des ruches d'abeilles et Quad est inclus.                                                                 |
| Traitement des déchets produits pendant la fabrication, y compris les fruits mis au rebut                                                                                                                   | Les installations de congélation du bleuet ne sont pas incluses                                                        |

| Processus en aval                                                                             |                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Transport vers une opération de réemballage, le cas échéant                                   | Le transport vers l'usine de congélation est inclus         |
| Transport vers de la production finale / stockage du produit à une plateforme de distribution | Le transport vers les opérations de congélation sont inclus |
| Utilisation du produit par le client ou le consommateur                                       | Exclu, car externe du périmètre des systèmes étudiés        |
| Processus de fin de vie de toute partie gaspillée du produit                                  | Exclu, car externe du périmètre des systèmes étudiés        |
| Processus de fin de vie des déchets d'emballage                                               | Exclu, car externe du périmètre des systèmes étudiés        |
| Transport vers une décharge ou une autre opération de gestion en fin de vie                   | Exclu, car externe du périmètre des systèmes étudiés        |
| Les pertes résultant de l'entrepôt frigorifique, du réemballage ou du transport               | Exclu, car externe du périmètre des systèmes étudiés        |

**ANNEXE 4 : MATRICE DE PEDIGREE POUR L'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES DONNÉES (QDD) DE L'ACV  
SELON LES 6 CRITÈRES**

| <b>Score</b>                    | <b>1</b>                                                                                                                                  | <b>2</b>                                                                                   | <b>3</b>                                                                                    | <b>4</b>                                                                                                                                      | <b>5</b>                                                                                                        |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Indicateur</b>               |                                                                                                                                           |                                                                                            |                                                                                             |                                                                                                                                               |                                                                                                                 |
| <b>Fiabilité</b>                | Données vérifiées issues de mesures                                                                                                       | Données vérifiées en partie issues d'hypothèses ou données non vérifiées issues de mesures | Données non vérifiées en partie issues d'hypothèses                                         | Estimation de qualité (faite par expert industriel)                                                                                           | Estimation n'ayant pas les qualités requises                                                                    |
| <b>Complétude</b>               | Données représentatives d'un échantillon de sociétés suffisant et d'une période adéquate pour niveler les fluctuations pouvant avoir lieu | Données représentatives d'un petit nombre de sociétés mais sur une période adéquate        | Données représentatives d'un nombre de sociétés adéquate mais sur de courtes périodes       | Données d'un petit nombre de sociétés et sur de courtes périodes ou données incomplètes issues d'un nombre adéquat de sociétés et de périodes | Représentativité inconnue ou données incomplètes issues d'un petit nombre de sociétés et/ou de courtes périodes |
| <b>Corrélation Temporelle</b>   | Données moins de 3 ans avec l'année de l'étude                                                                                            | Moins de 6 ans de différence                                                               | Moins de 10 ans de différence                                                               | Moins de 15 ans de différence                                                                                                                 | Âge de la donnée inconnue ou plus de 15 ans de différences                                                      |
| <b>Corrélation Géographique</b> | Données issues de l'entreprise étudiée                                                                                                    | Données moyennées sur une large zone contenant celle de l'étude                            | Données issues d'une zone ayant des conditions de production similaires à celles de l'étude | Données issues d'une zone ayant des conditions de productions légèrement similaires                                                           | Données issues d'une zone inconnue ou d'une zone ayant des conditions de productions très différentes           |

|                                  |                                                                                 |                                                                                  |                                                                                   |                                                                                       |                                                                                              |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Corrélation Technologique</b> | Données issues d'entreprise, de process et de produits correspondants à l'étude | Données issues de process et de produits étudiés mais d'entreprises différentes. | Données issues de process et de produits étudiés mais de technologies différentes | Données en relation avec les process et les produits mais avec les mêmes technologies | Données en relations avec les process et les produits mais avec des technologies différentes |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|

### **Remplissage de la matrice de Pedigree :**

*La matrice de pedigree évalue la qualité des données en fonction de leur proximité avec une situation idéale (score 1) ou leur éloignement (score 5). Chaque critère est indépendant, et l'attribution des scores est justifiée par des preuves documentées, telles que des rapports de données ou enquête :*

**Fiabilité** : Ce critère évalue la vérifiabilité et la base empirique des données.

**Complétude** : Ce critère mesure la représentativité des données par rapport au marché ou au système étudié.

**Corrélation temporelle** : Ce critère examine la proximité chronologique des données avec la période d'étude.

**Corrélation géographique** : Ce critère évalue l'adéquation spatiale des données avec la zone d'étude.

**Corrélation technologique** : Ce critère considère la similitude des procédés et matériaux.

## ANNEXE 5 : RÉSULTATS DES MODÉLISATIONS OPENLCA DES DEUX DIFFÉRENTS SCÉNARIOS

### UNITÉ FONCTIONNELLE 1

| RESULTATS AVEC DONNÉES N2O DE HOLOS                                  |                                                                                                                                                                 |                 |                      |                                        |                |                                     |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------|----------------------------------------|----------------|-------------------------------------|
| Unité fonctionnelle : émissions associées à 1 kg de bleuets produits |                                                                                                                                                                 |                 |                      |                                        |                |                                     |
| Regie biologique - Holos N <sub>2</sub> O                            |                                                                                                                                                                 |                 |                      |                                        |                |                                     |
| Contribution [%]                                                     | Procédé                                                                                                                                                         | Required amount | Unité                | Total result kg CO <sub>2</sub> -éq/ha | Direct         | kg CO <sub>2</sub> -éq/kg de bleuet |
| <b>100</b>                                                           | <b>Bleuet bio -Holos N2O</b>                                                                                                                                    | <b>10000</b>    | <b>m<sup>2</sup></b> | <b>445,2816339</b>                     | <b>0</b>       | <b>0,57307</b>                      |
| 30,4                                                                 | <b>Fertilisation1 c</b>                                                                                                                                         | <b>10000</b>    | <b>m<sup>2</sup></b> | <b>135,3308783</b>                     | <b>0</b>       | <b>0,1741</b>                       |
| 17,8                                                                 | market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   Cutoff, U - RoW                              | 406             | t*km                 | 79,3153038                             | 0              | 0,1021                              |
| 10,9                                                                 | treatment of poultry manure, drying, pelleting   poultry manure, dried   Cutoff, U - CH                                                                         | 1000            | kg                   | 48,35548135                            | 0              | 0,0622                              |
| 1,72                                                                 | solid manure loading and spreading, by hydraulic loader and spreader   solid manure loading and spreading, by hydraulic loader and spreader   Cutoff, U - CA-QC | 1000            | kg                   | 7,660093165                            | 4,649440803    | 0,0098                              |
| 28,5                                                                 | <b>Fauchage</b>                                                                                                                                                 | <b>10000</b>    | <b>m<sup>2</sup></b> | <b>126,6987123</b>                     | <b>0</b>       | <b>0,163</b>                        |
| 28,5                                                                 | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO                                                | 919,2           | MJ                   | 126,6987123                            | 0              | 0,163                               |
| 26,2                                                                 | <b>Champ bio</b>                                                                                                                                                | <b>10000</b>    | <b>m<sup>2</sup></b> | <b>116,512</b>                         | <b>116,512</b> | <b>0,1499</b>                       |
| 12,6                                                                 | <b>Récolte</b>                                                                                                                                                  | <b>10000</b>    | <b>m<sup>2</sup></b> | <b>56,30699776</b>                     | <b>0</b>       | <b>0,0725</b>                       |
| 9,09                                                                 | market for transport, freight, light commercial vehicle   transport, freight, light commercial vehicle   Cutoff, U - RoW                                        | 18,648          | t*km                 | 40,46965872                            | 0              | 0,0521                              |
| 3,56                                                                 | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO                                                | 114,9           | MJ                   | 15,83733904                            | 0              | 0,0204                              |

|      |                                                                                                                                                                                                                                          |              |           |                    |          |               |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------|--------------------|----------|---------------|
| 2,34 | <b>Pollinisation</b>                                                                                                                                                                                                                     | <b>10000</b> | <b>m²</b> | <b>10,43304555</b> | <b>0</b> | <b>0,0134</b> |
| 2,34 | market for transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO3, R134a refrigerant, cooling   transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO3, R134a refrigerant, cooling   Cutoff, U - GLO | 13,8949      | t*km      | 10,43304555        | 0        | 0,0134        |

| <b>Regie Conventiionnelle - Holos N<sub>2</sub>O</b> |                                                                                                                          |                        |              |                                             |                |                                          |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------|---------------------------------------------|----------------|------------------------------------------|
| <b>Contribution [%]</b>                              | <b>Procédé</b>                                                                                                           | <b>Required amount</b> | <b>Unité</b> | <b>Total result kg CO<sub>2</sub>-éq/ha</b> | <b>Direct</b>  | <b>kg CO<sub>2</sub>-éq/kg de bleuet</b> |
| <b>100</b>                                           | <b>Bleuet conv - Holos N<sub>2</sub>O</b>                                                                                | <b>10000</b>           | <b>m²</b>    | <b>562,8635611</b>                          | <b>0</b>       | <b>0,7244</b>                            |
| <b>36,2</b>                                          | <b>Champ conv</b>                                                                                                        | <b>10000</b>           | <b>m²</b>    | <b>203,896</b>                              | <b>203,896</b> | <b>0,2624</b>                            |
| <b>22,5</b>                                          | <b>Fauchage</b>                                                                                                          | <b>10000</b>           | <b>m²</b>    | <b>126,6987123</b>                          | <b>0</b>       | <b>0,163</b>                             |
| 22,5                                                 | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO         | 919,2                  | MJ           | 126,6987123                                 | 0              | 0,163                                    |
| <b>20,1</b>                                          | <b>Fertilisation</b>                                                                                                     | <b>10000</b>           | <b>m²</b>    | <b>112,9320594</b>                          | <b>0</b>       | <b>0,1453</b>                            |
| 10,6                                                 | market for ammonium sulfate   ammonium sulfate   Cutoff, U - RoW                                                         | 50                     | kg           | 59,43863632                                 | 0              | 0,0765                                   |
| 4,14                                                 | market for triple superphosphate   triple superphosphate   Cutoff, U - RoW                                               | 30                     | kg           | 23,32459408                                 | 0              | 0,03                                     |
| 3,99                                                 | market for potassium sulfate   potassium sulfate   Cutoff, U - RoW                                                       | 20                     | kg           | 22,48084765                                 | 0              | 0,0289                                   |
| 1                                                    | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO         | 40,85461               | MJ           | 5,631229851                                 | 0              | 0,0072                                   |
| 0,37                                                 | market for borax, anhydrous, powder   borax, anhydrous, powder   Cutoff, U - GLO                                         | 1                      | kg           | 2,056751527                                 | 0              | 0,0027                                   |
| <b>10</b>                                            | <b>Récolte</b>                                                                                                           | <b>10000</b>           | <b>m²</b>    | <b>56,30699776</b>                          | <b>0</b>       | <b>0,0725</b>                            |
| 7,19                                                 | market for transport, freight, light commercial vehicle   transport, freight, light commercial vehicle   Cutoff, U - RoW | 18,648                 | t*km         | 40,46965872                                 | 0              | 0,0521                                   |
| 2,81                                                 | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO         | 114,9                  | MJ           | 15,83733904                                 | 0              | 0,0204                                   |
| <b>9,34</b>                                          | <b>Pesticides</b>                                                                                                        | <b>10000</b>           | <b>m²</b>    | <b>52,59674604</b>                          | <b>0</b>       | <b>0,0677</b>                            |

|             |                                                                                                                                                                                                                                          |              |           |                    |          |               |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------|--------------------|----------|---------------|
| 8,71        | market for pesticide, unspecified   pesticide, unspecified   Cutoff, U - GLO                                                                                                                                                             | 4,3322       | kg        | 48,99744679        | 0        | 0,0631        |
| 0,64        | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO                                                                                                                         | 26,11294     | MJ        | 3,599299252        | 0        | 0,0046        |
| <b>1,85</b> | <b>Pollinisation</b>                                                                                                                                                                                                                     | <b>10000</b> | <b>m²</b> | <b>10,43304555</b> | <b>0</b> | <b>0,0134</b> |
| 1,85        | market for transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO3, R134a refrigerant, cooling   transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO3, R134a refrigerant, cooling   Cutoff, U - GLO | 13,8949      | t*km      | 10,43304555        | 0        | 0,0134        |

| RESULTATS AVEC DONNÉES – ÉCHANTILLONNAGE N <sub>2</sub> O |                                                                                                                                                                 |                 |           |                                        |           |                                      |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------|----------------------------------------|-----------|--------------------------------------|
| émissions associées à 1 kg de bleuets produits            |                                                                                                                                                                 |                 |           |                                        |           |                                      |
| Regie biologique -Échantillonnage N2O                     |                                                                                                                                                                 |                 |           |                                        |           |                                      |
| Contribution [%]                                          | Procédé                                                                                                                                                         | Required amount | Unité     | Total result kg CO <sub>2</sub> -éq/ha | Direct    | kg CO <sub>2</sub> -éq/1kg de bleuet |
| <b>100</b>                                                | <b>Bleuet bio -Échant N2O</b>                                                                                                                                   | <b>10000</b>    | <b>m²</b> | <b>328,7696</b>                        | <b>0</b>  | <b>0,42313</b>                       |
| <b>41,15</b>                                              | <b>Fertilisation1 c</b>                                                                                                                                         | <b>10000</b>    | <b>m²</b> | <b>135,3308783</b>                     | <b>0</b>  | <b>0,1741</b>                        |
| 24,11                                                     | market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   Cutoff, U - RoW                              | 406             | t*km      | 79,3153038                             | 0         | 0,102                                |
| 14,71                                                     | treatment of poultry manure, drying, pelleting   poultry manure, dried   Cutoff, U - CH                                                                         | 1000            | kg        | 48,35548135                            | 0         | 0,0622                               |
| 2,32                                                      | solid manure loading and spreading, by hydraulic loader and spreader   solid manure loading and spreading, by hydraulic loader and spreader   Cutoff, U - CA-QC | 1000            | kg        | 7,660093165                            | 4,6494408 | 0,0098                               |
| <b>38,52</b>                                              | <b>Fauchage</b>                                                                                                                                                 | <b>10000</b>    | <b>m²</b> | <b>126,6987123</b>                     | <b>0</b>  | <b>0,163</b>                         |
| 38,52                                                     | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO                                                | 919,2           | MJ        | 126,6987123                            | 0         | 0,163                                |
| <b>0</b>                                                  | <b>Champs bio</b>                                                                                                                                               |                 | <b>m²</b> | <b>0</b>                               | <b>0</b>  | <b>0</b>                             |

|              |                                                                                                                                                                                                                                          |              |           |                    |          |               |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------|--------------------|----------|---------------|
| <b>17,13</b> | <b>Récolte</b>                                                                                                                                                                                                                           | <b>10000</b> | <b>m²</b> | <b>56,30699776</b> | <b>0</b> | <b>0,0725</b> |
| 12,31        | market for transport, freight, light commercial vehicle   transport, freight, light commercial vehicle   Cutoff, U - RoW                                                                                                                 | 18,648       | t*km      | 40,46965872        | 0        | 0,0521        |
| 4,82         | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO                                                                                                                         | 114,9        | MJ        | 15,83733904        | 0        | 0,0204        |
| <b>3,17</b>  | <b>Pollinisation</b>                                                                                                                                                                                                                     | <b>10000</b> | <b>m²</b> | <b>10,43304555</b> | <b>0</b> | <b>0,0134</b> |
| 3,17         | market for transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO3, R134a refrigerant, cooling   transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO3, R134a refrigerant, cooling   Cutoff, U - GLO | 13,8949      | t*km      | 10,43304555        | 0        | 0,0134        |

| Regie conventionnelle -Échantillonnage N <sub>2</sub> O |                                                                                                                  |                 |           |                                        |          |                                      |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------|----------------------------------------|----------|--------------------------------------|
| Contribution [%]                                        | Procédé                                                                                                          | Required amount | Unité     | Total result kg CO <sub>2</sub> -éq/ha | Direct   | kg CO <sub>2</sub> -éq/1kg de bleuet |
| <b>100</b>                                              | <b>Bleuet conv - Échant N<sub>2</sub>O</b>                                                                       | <b>10000</b>    | <b>m²</b> | <b>392,332361</b>                      | <b>0</b> | <b>0,5049</b>                        |
| <b>0</b>                                                | <b>Champs conv</b>                                                                                               | <b>0</b>        | <b>m²</b> | <b>0</b>                               | <b>0</b> | <b>0</b>                             |
| <b>35,28</b>                                            | <b>Fauchage</b>                                                                                                  | <b>10000</b>    | <b>m²</b> | <b>126,6987123</b>                     | <b>0</b> | <b>0,163</b>                         |
| 35,28                                                   | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO | 919,2           | MJ        | 126,6987123                            | 0        | 0,163                                |
| <b>31,45</b>                                            | <b>Fertilisation</b>                                                                                             | <b>10000</b>    | <b>m²</b> | <b>112,9320594</b>                     | <b>0</b> | <b>0,1453</b>                        |
| 16,56                                                   | market for ammonium sulfate   ammonium sulfate   Cutoff, U - RoW                                                 | 50              | kg        | 59,43863632                            | 0        | 0,0765                               |
| 6,49                                                    | market for triple superphosphate   triple superphosphate   Cutoff, U - RoW                                       | 30              | kg        | 23,32459408                            | 0        | 0,03                                 |
| 6,26                                                    | market for potassium sulfate   potassium sulfate   Cutoff, U - RoW                                               | 20              | kg        | 22,48084765                            | 0        | 0,0289                               |
| 1,56                                                    | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO | 40,85461        | MJ        | 5,631229851                            | 0        | 0,0072                               |

|              |                                                                                                                                                                                                                                          |              |           |                    |          |               |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------|--------------------|----------|---------------|
| 0,58         | market for borax, anhydrous, powder   borax, anhydrous, powder   Cutoff, U - GLO                                                                                                                                                         | 1            | kg        | 2,056751527        | 0        | 0,0027        |
| <b>15,69</b> | <b>Récolte</b>                                                                                                                                                                                                                           | <b>10000</b> | <b>m²</b> | <b>56,30699776</b> | <b>0</b> | <b>0,0725</b> |
| 11,28        | market for transport, freight, light commercial vehicle   transport, freight, light commercial vehicle   Cutoff, U - RoW                                                                                                                 | 18,648       | t*km      | 40,46965872        | 0        | 0,0521        |
| 4,41         | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO                                                                                                                         | 114,9        | MJ        | 15,83733904        | 0        | 0,0204        |
| <b>14,65</b> | <b>Pesticides</b>                                                                                                                                                                                                                        | <b>10000</b> | <b>m²</b> | <b>52,59674604</b> | <b>0</b> | <b>0,0677</b> |
| 13,65        | market for pesticide, unspecified   pesticide, unspecified   Cutoff, U - GLO                                                                                                                                                             | 4,3322       | kg        | 48,99744679        | 0        | 0,0631        |
| 0,99         | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO                                                                                                                         | 26,11294     | MJ        | 3,599299252        | 0        | 0,0046        |
| <b>2,9</b>   | <b>Pollinisation</b>                                                                                                                                                                                                                     | <b>10000</b> | <b>m²</b> | <b>10,43304555</b> | <b>0</b> | <b>0,0134</b> |
| 2,9          | market for transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO3, R134a refrigerant, cooling   transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO3, R134a refrigerant, cooling   Cutoff, U - GLO | 13,8949      | t*km      | 10,43304555        | 0        | 0,0134        |

## UNITÉ FONCTIONNELLE 2

Formule de conversion de l'empreinte carbone 1 kg de bleuet en empreinte carbone de 100\$ de bleuets vendus :

$$CF_{100\$} = CF_{kg} \times Q_{100\$}$$

$$Q_{100\$} = \frac{100\$}{P}$$

Où :  $CF_{kg}$  = empreinte carbone d'un kilogramme de bleuets produits

$P$  = prix moyen du kilogramme de bleuets

$Q_{100\$}$  = quantité de bleuet vendu à 100\$ (exprimée en kg)

$CF_{100\$}$  = empreinte carbone de 100\$ de bleuets vendus

| RESULTATS AVEC DONNÉES N2O DE HOLOS        |                                                                                                                                    |                 |                |                                             |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|---------------------------------------------|
| Unité fonctionnelle : 100\$ bleuets vendus |                                                                                                                                    |                 |                |                                             |
| Regie biologique - Holos N <sub>2</sub> O  |                                                                                                                                    |                 |                |                                             |
| Contribution [%]                           | Procédé                                                                                                                            | Required amount | Unité          | kg CO <sub>2</sub> -éq/\$100 bleuets vendus |
| 100                                        | Bleuet bio -Holos N <sub>2</sub> O                                                                                                 | 10000           | m <sup>2</sup> | 18,12                                       |
| 30,4                                       | Fertilisation <sup>1 c</sup>                                                                                                       | 10000           | m <sup>2</sup> | 5,5                                         |
| 17,8                                       | market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   Cutoff, U - RoW | 406             | t*km           | 3,23                                        |
| 10,9                                       | treatment of poultry manure, drying, pelleting   poultry manure, dried   Cutoff, U - CH                                            | 1000            | kg             | 1,97                                        |

|             |                                                                                                                                                                                                                                          |              |           |             |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------|-------------|
| 1,72        | solid manure loading and spreading, by hydraulic loader and spreader   solid manure loading and spreading, by hydraulic loader and spreader   Cutoff, U - CA-QC                                                                          | 1000         | kg        | 0,31        |
| <b>28,5</b> | <b>Fauchage</b>                                                                                                                                                                                                                          | <b>10000</b> | <b>m²</b> | <b>5,15</b> |
| 28,5        | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO                                                                                                                         | 919,2        | MJ        | 5,15        |
| 26,2        | <b>Champs bio</b>                                                                                                                                                                                                                        | <b>10000</b> | <b>m²</b> | <b>4,74</b> |
| <b>12,6</b> | <b>Récolte</b>                                                                                                                                                                                                                           | <b>10000</b> | <b>m²</b> | <b>2,29</b> |
| 9,09        | market for transport, freight, light commercial vehicle   transport, freight, light commercial vehicle   Cutoff, U - RoW                                                                                                                 | 18,648       | t*km      | 1,65        |
| 3,56        | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO                                                                                                                         | 114,9        | MJ        | 0,65        |
| <b>2,34</b> | <b>Pollinisation</b>                                                                                                                                                                                                                     | <b>10000</b> | <b>m²</b> | <b>0,42</b> |
| 2,34        | market for transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO3, R134a refrigerant, cooling   transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO3, R134a refrigerant, cooling   Cutoff, U - GLO | 13,8949      | t*km      | 0,42        |

| Regie Conventiionnelle - Holos N <sub>2</sub> O |                                                                                                                  |                 |           |                                             |
|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------|---------------------------------------------|
| Contribution [%]                                | Procédé                                                                                                          | Required amount | Unité     | kg CO <sub>2</sub> -éq/\$100 bleuets vendus |
| <b>100</b>                                      | <b>Bleuet conv - Holos N<sub>2</sub>O</b>                                                                        | <b>10000</b>    | <b>m²</b> | <b>36,64</b>                                |
| <b>36,21</b>                                    | <b>Champs conv</b>                                                                                               | <b>10000</b>    | <b>m²</b> | <b>13,27</b>                                |
| <b>22,51</b>                                    | <b>Fauchage</b>                                                                                                  | <b>10000</b>    | <b>m²</b> | <b>8,25</b>                                 |
| 22,51                                           | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO | 919,2           | MJ        | 8,25                                        |
| <b>20,1</b>                                     | <b>Fertilisation</b>                                                                                             | <b>10000</b>    | <b>m²</b> | <b>7,35</b>                                 |
| 10,56                                           | market for ammonium sulfate   ammonium sulfate   Cutoff, U - RoW                                                 | 50              | kg        | 3,87                                        |
| 4,15                                            | market for triple superphosphate   triple superphosphate   Cutoff, U - RoW                                       | 30              | kg        | 1,52                                        |
| 3,98                                            | market for potassium sulfate   potassium sulfate   Cutoff, U - RoW                                               | 20              | kg        | 1,46                                        |

|              |                                                                                                                                                                                                                                          |              |           |             |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------|-------------|
| 0,98         | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO                                                                                                                         | 40,85461     | MJ        | 0,36        |
| 0,38         | market for borax, anhydrous, powder   borax, anhydrous, powder   Cutoff, U - GLO                                                                                                                                                         | 1            | kg        | 0,14        |
| <b>10,01</b> | <b>Récolte</b>                                                                                                                                                                                                                           | <b>10000</b> | <b>m²</b> | <b>3,67</b> |
| 7,2          | market for transport, freight, light commercial vehicle   transport, freight, light commercial vehicle   Cutoff, U - RoW                                                                                                                 | 18,648       | t*km      | 2,64        |
| 2,81         | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO                                                                                                                         | 114,9        | MJ        | 1,03        |
| <b>9,36</b>  | <b>Pesticides</b>                                                                                                                                                                                                                        | <b>10000</b> | <b>m²</b> | <b>3,43</b> |
| 8,7          | market for pesticide, unspecified   pesticide, unspecified   Cutoff, U - GLO                                                                                                                                                             | 4,3322       | kg        | 3,19        |
| 0,63         | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO                                                                                                                         | 26,11294     | MJ        | 0,23        |
| <b>1,86</b>  | <b>Pollinisation</b>                                                                                                                                                                                                                     | <b>10000</b> | <b>m²</b> | <b>0,68</b> |
| 1,86         | market for transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO3, R134a refrigerant, cooling   transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO3, R134a refrigerant, cooling   Cutoff, U - GLO | 13,8949      | t*km      | 0,68        |

| RESULTATS AVEC DONNÉES ÉCHANTILLONNAGE N <sub>2</sub> O |                                                                                                                                    |                 |           |                                             |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------|---------------------------------------------|
| Unité fonctionnelle : 100\$ bleuets vendus              |                                                                                                                                    |                 |           |                                             |
| Regie biologique -Échantillonnage N <sub>2</sub> O      |                                                                                                                                    |                 |           |                                             |
| Contribution [%]                                        | Procédé                                                                                                                            | Required amount | Unité     | kg CO <sub>2</sub> -éq/\$100 bleuets vendus |
| <b>100</b>                                              | <b>Bleuet bio -Échant N<sub>2</sub>O</b>                                                                                           | <b>10000</b>    | <b>m²</b> | <b>13,36</b>                                |
| <b>41,14</b>                                            | <b>Fertilisation1 c</b>                                                                                                            | <b>10000</b>    | <b>m²</b> | <b>5,5</b>                                  |
| 24,09                                                   | market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   Cutoff, U - RoW | 406             | t*km      | 3,22                                        |
| 14,74                                                   | treatment of poultry manure, drying, pelleting   poultry manure, dried   Cutoff, U - CH                                            | 1000            | kg        | 1,97                                        |

|              |                                                                                                                                                                                                                                          |              |           |             |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------|-------------|
| 2,32         | solid manure loading and spreading, by hydraulic loader and spreader   solid manure loading and spreading, by hydraulic loader and spreader   Cutoff, U - CA-QC                                                                          | 1000         | kg        | 0,31        |
| <b>38,52</b> | <b>Fauchage</b>                                                                                                                                                                                                                          | <b>10000</b> | <b>m²</b> | <b>5,15</b> |
| 38,52        | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO                                                                                                                         | 919,2        | MJ        | 5,15        |
| <b>0</b>     | <b>Champs bio</b>                                                                                                                                                                                                                        | <b>0</b>     | <b>m²</b> | <b>0</b>    |
| <b>17,13</b> | <b>Récolte</b>                                                                                                                                                                                                                           | <b>10000</b> | <b>m²</b> | <b>2,29</b> |
| 12,34        | market for transport, freight, light commercial vehicle   transport, freight, light commercial vehicle   Cutoff, U - RoW                                                                                                                 | 18,648       | t*km      | 1,65        |
| 4,79         | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO                                                                                                                         | 114,9        | MJ        | 0,64        |
| <b>3,14</b>  | <b>Pollinisation</b>                                                                                                                                                                                                                     | <b>10000</b> | <b>m²</b> | <b>0,42</b> |
| 3,14         | market for transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO3, R134a refrigerant, cooling   transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO3, R134a refrigerant, cooling   Cutoff, U - GLO | 13,8949      | t*km      | 0,42        |

| Regie Conventiionnelle Holos N <sub>2</sub> O |                                                                                                                  |                 |           |                                             |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------|---------------------------------------------|
| Contribution [%]                              | Procédé                                                                                                          | Required amount | Unité     | kg CO <sub>2</sub> -éq/\$100 bleuets vendus |
| <b>100</b>                                    | <b>Bleuet conv - Échant N<sub>2</sub>O</b>                                                                       | <b>10000</b>    | <b>m²</b> | <b>23,37</b>                                |
| <b>0</b>                                      | <b>Champs conv</b>                                                                                               | <b>0</b>        | <b>m²</b> | <b>0</b>                                    |
| <b>35,30</b>                                  | <b>Fauchage</b>                                                                                                  | <b>10000</b>    | <b>m²</b> | <b>8,25</b>                                 |
| 35,30                                         | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO | 919,2           | MJ        | 8,25                                        |
| <b>31,45</b>                                  | <b>Fertilisation</b>                                                                                             | <b>10000</b>    | <b>m²</b> | <b>7,35</b>                                 |
| 16,56                                         | market for ammonium sulfate   ammonium sulfate   Cutoff, U - RoW                                                 | 50              | kg        | 3,87                                        |
| 6,50                                          | market for triple superphosphate   triple superphosphate   Cutoff, U - RoW                                       | 30              | kg        | 1,52                                        |
| 6,25                                          | market for potassium sulfate   potassium sulfate   Cutoff, U - RoW                                               | 20              | kg        | 1,46                                        |

|              |                                                                                                                                                                                                                                          |              |           |             |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------|-------------|
| 1,54         | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO                                                                                                                         | 40,85461     | MJ        | 0,36        |
| 0,60         | market for borax, anhydrous, powder   borax, anhydrous, powder   Cutoff, U - GLO                                                                                                                                                         | 1            | kg        | 0,14        |
| <b>15,70</b> | <b>Récolte</b>                                                                                                                                                                                                                           | <b>10000</b> | <b>m²</b> | <b>3,67</b> |
| 11,30        | market for transport, freight, light commercial vehicle   transport, freight, light commercial vehicle   Cutoff, U - RoW                                                                                                                 | 18,648       | t*km      | 2,64        |
| 4,41         | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO                                                                                                                         | 114,9        | MJ        | 1,03        |
| <b>14,63</b> | <b>Pesticides</b>                                                                                                                                                                                                                        | <b>10000</b> | <b>m²</b> | <b>3,42</b> |
| 13,65        | market for pesticide, unspecified   pesticide, unspecified   Cutoff, U - GLO                                                                                                                                                             | 4,3322       | kg        | 3,19        |
| 0,98         | market for diesel, burned in agricultural machinery   diesel, burned in agricultural machinery   Cutoff, U - GLO                                                                                                                         | 26,11294     | MJ        | 0,23        |
| <b>2,91</b>  | <b>Pollinisation</b>                                                                                                                                                                                                                     | <b>10000</b> | <b>m²</b> | <b>0,68</b> |
| 2,91         | market for transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO3, R134a refrigerant, cooling   transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO3, R134a refrigerant, cooling   Cutoff, U - GLO | 13,8949      | t*km      | 0,68        |