POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
affiliée à l'Université de Montréal

Éco-efficience et valeur fonctionnelle : développement d'un outil d'aide à la décision dans l'industrie agroalimentaire

CAMILLE CHAUDRON
Département de mathématiques et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
Génie industriel
Février 2019

© Camille Chaudron, 2019.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Éco-efficience et valeur fonctionnelle : développement d'un outil d'aide à la décision dans l'industrie agroalimentaire

présenté par **Camille CHAUDRON**
en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Robert LEGROS, président
Manuele MARGNI, membre et directeur de recherche
Laurent BAZINET, membre et codirecteur de recherche
Réjean SAMSON, membre

DÉDICACE

À Mamie Louise et Grand-maman Bouton,
pour qui mon éducation était si importante.
Vous me manquez.

REMERCIEMENTS

Je dois commencer par remercier tous ceux qui m'ont aidée à la réalisation de ce mémoire de maîtrise. Ce travail a été fait avec le soutien de la Chaire de Recherche industrielle du CRSNG en «Procédés électro-membranaires visant l'amélioration de l'éco-efficience de lignes de production bioalimentaires » et au sein du Centre international de référence sur le cycle de vie des produits procédés et services (CIRAIG).

Premièrement, je veux remercier Manuele pour son aide et son soutien à travers toutes les étapes de ma maîtrise. Je lui suis vraiment reconnaissante pour avoir cru en moi et m'avoir donné l'opportunité de faire ce projet que j'ai énormément aimé. Merci aussi à Laurent Bazinet pour sa supervision, ses conseils et l'atmosphère chaleureuse qu'il a su créer dans le groupe de recherche !

Deuxièmement, je veux remercier toute l'équipe de Fruit d'Or, Guy St-Amant, Kathleen Beaulieu, Simon Bonin, et tous ceux qui ont participé aux tests de goût pour leur aide précieuse.

Troisièmement, un grand merci à Mélanie Faucher, pour son enseignement des procédés, son aide en laboratoire et surtout son amitié. C'était vraiment un plaisir de travailler avec toi. Merci à toute l'équipe du laboratoire de Québec et plus particulièrement à Véronique Perreault, Jacinthe Tibodeau et Sergey Mikhaylin pour le soutien et l'aide technique, mais surtout pour les dîners et les fous rires. Merci aussi à l'équipe du CIRAIG, Estelle Louineau, Annie Levasseur, Pascal Lesage, Pablo Tirado-Seco et mes autres collègues.

Finalement, sur le plan personnel je veux remercier par ma famille et mes proches. D'abord mes parents pour l'ensemble de leurs efforts pour m'aider, me soutenir dans mes hauts et mes bas. Ensuite, Chloé pour ton affection sauvage et Julien pour les sorties, les vaisselles en chantant et les imitations de papa. Enfin, merci à mon amoureux pour qui je n'ai pas les mots pour exprimer ma reconnaissance et mon affection.

RÉSUMÉ

L'impact environnemental du secteur agroalimentaire est maintenant responsable de 42% des émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial. Les entreprises doivent intégrer les aspects environnementaux lors de prises de décisions stratégiques. Dans ce secteur, l'industrie de la production de canneberge cherche à supporter ses décisions d'affaires selon des critères environnementaux sans compromis sur la valeur des produits.

Afin de réduire la quantité d'acide organique dans le jus de canneberge, notre partenaire industriel doit choisir entre deux différentes technologies de désacidification : l'électrodialyse avec membrane bipolaire et la désacidification avec les résines échangeuses d'ions. Il aimerait inclure l'impact environnemental et la valeur ajoutée de cette désacidification dans la prise de décision.

Une analyse d'éco-efficience est faite sur les deux technologies de désacidification ainsi que sur le jus non-désacidifié. L'originalité de ce travail de recherche consiste à identifier et proposer des alternatives au cout de production et/ou au prix de vente au calcul pour mesurer la valeur du produit. En effet, dans ce cas-ci, le coût de l'ajout d'une unité de désacidification et le coût du produit en tablette ne sont pas disponibles. Trois paramètres ont été utilisés pour mesurer la valeur du jus : la teneur en polyphénols, la quantité d'acide nuisible pour la santé retirée et le goût.

Les résultats montrent que l'utilisation de la technologie d'électrodialyse est plus éco-efficiente que la technologie de résine échangeuse d'ions. Par contre, puisque l'acide organique récupéré par l'électrodialyse est sous une forme réutilisable, le scénario de revalorisation de la résine pourrait avoir un impact important sur les résultats d'éco-efficience selon les scenarios de valorisation.

Ce modèle d'éco-efficience permet de prendre une décision éclairée combinant de manière explicite et cohérente des indicateurs d'impact environnemental sur l'ensemble de la chaine de valeurs et sur la valeur du produit. Cela permet également d'identifier les stratégies d'amélioration du bilan environnemental du produit et d'identifier les scénarios de revalorisation les plus intéressants qui ne se trouvent nécessairement pas dans le périmètre du processus, mais peuvent être influencés par des décisions opérationnelles. Finalement, l'intégration de la valeur fonctionnelle peut comporter plusieurs critères et représenter différents aspects qui représentent mieux la valeur du produit pour le consommateur final.

ABSTRACT

The food industry is now responsible for 42% of the world's greenhouse gas (GHG) emissions. This industry now faces the need to integrate environmental aspect in decision making process. The cranberry processing industry wants to support their decision making with environmental criteria without compromising the product value. In order to decrease the amount of organic acid in cranberry juice, our industrial partner has the choice between two different deacidification technologies: Electrodialysis with bipolar membrane and deacidification with ion exchange resins. The partner wants to include both the environmental impact and the added value in the decision making process.

An eco-efficiency analysis is made on both deacidification technologies as well as non-deacidified cranberry juice. The originality of this research is in the identification and proposal of alternatives to the production cost and market cost to determine the value of the product. Indeed, the investment cost and the market cost are both unknown. Three different parameters are used: Polyphenols content, harmful acid removal, and taste.

The results show that electrodialysis with bipolar membranes is a more eco-efficient deacidification method compared to the resin deacidification process. Because the electrodialysis allows the extraction of organic acid in a usable form, the re-utilization scenario has a great impact on the eco-efficiency results.

This eco-efficiency model maximizes the amount of information provided to the partner, letting him taking a decision based on his own priorities. It makes it possible to identify environmental improvement strategies in the life cycle of the product. Moreover, the partner can identify environmental improvement strategies for all the processes and interesting re-utilization scenarios. Finally, the integration of functional value can be multi-criterial and represent several aspects of the product value.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iii

REMERCIEMENTS iv

RÉSUMÉ v

ABSTRACT vi

TABLE DES MATIÈRES vii

LISTE DES TABLEAUX x

LISTE DES FIGURES xii

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS xiv

LISTE DES ANNEXES xv

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 3

2.1 Développement durable 3

2.2 Économie circulaire 4

2.3 Analyse du cycle de vie 5

2.3.1 Définition des objectifs de l'étude et du champ de l'étude 6

2.3.2 Inventaire des émissions et des extractions 7

2.3.3 Analyse de l'impact environnemental 8

2.3.4 Interprétation des résultats 10

2.4 Éco-efficience 11

2.4.1 Méthodologie 12

2.4.2 Analyse d'impact environnemental 13

2.4.3 Valeur du système de produit 13

2.4.4 Quantification de l'éco-efficience 14

2.4.5 Interprétation 15

2.5 Jus de canneberge 17

2.5.1 Consommation de la canneberge 17

2.5.2 Polyphénols et propriétés santé 18
2.5.3 Acides organiques 19
2.5.4 Production de jus de canneberge 20
2.5.5 Procédés de désacidification 21
2.5.6 Impact environnemental des procédés de désacidification 25

CHAPITRE 3 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS 27
3.1 Problématique 27
3.2 Objectif principal 27
3.3 Objectif secondaire 28

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE 29
4.1 ACV 29
4.1.1 Désacidification par électrodialyse 30
4.1.2 Désacidification par résine échangeuse d'ions 32
4.2 Valeur et éco-efficience 36

CHAPITRE 5 ARTICLE 1: THE COST IS NOT ENOUGH - AN ALTERNATIVE ECO - EFFICIENCY APPROACH APPLIED TO CRANBERRY DE - ACIDIFICATION 37
5.1 Transition 37
5.2 Résumé 37
5.3 Abstract 38
5.4 Introduction 38
5.5 Methodology 40
5.5.1 Juice production scenarios 40
5.5.2 Life Cycle Assessment 43
5.5.3 Functional value metrics 44
5.6 Result and discussion 45
5.6.1 Life cycle assessment 46
5.6.2 Functional value 47
5.6.3 Eco-Efficiency 49
5.6.4 Theoretical implications, limitations and outlook 51
5.7 Conclusion 53
5.8 Acknowledgements 53

CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE 54

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 56
7.1 Synthèse des travaux 56
7.2 Limitations et amélioration future 57

RÉFÉRENCES 58

ANNEXES 68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Méthode d'expression de l'éco-efficience 15
Tableau 4.1 Mise à l'échelle du procédé de désacidification par membranes échangeuses d'ion 32
Tableau 4.2 Mise à l'échelle du procédé de désacidification par résine échangeuse d'ions 34
Tableau 4.3 Paramètre fournit par le fournisseur de résine 34
Tableau 4.4 Perte de charge de la désacidification du jus de canneberge par résine échangeuse d'ions 36
Table 5.1 Four different contexts for the EDBM scenario with the added input and the avoid product 43
Table 5.2 Main inventory data used needed for the production of 1000 liters of de-acidified Cranberry juice 44
Table A.1. Input for 1000 liters of non-de-acidified cranberry juice (NDA) 68
Table A.1. Input for 1000 liters of non-de-acidified cranberry juice (NDA) (continued and end) 69
Table A.2. Input of the process Production at Farm for 1000 liters de-acidified cranberry juice with ion exchange resin (IER) 70
Table A.2. Input of the process Production at Farm for 1000 liters de-acidified cranberry juice with ion exchange resin (IER)) (continued and end) . 71
Table A.3. Input for 1000 liters de-acidified cranberry juice with electro-dialysis with bipolar membranes (EDBM) 72
Table A.3. Input of the process Production at Farm for 1000 liters de-acidified cranberry juice with ion exchange resin (IER)) (continued and end) . 73
Table B.1 Climate change impact of 1000 liter of non-de-acidified cranberry juice (NDA), ions exchange resin de-acidified cranberry juice (IER) and electro-dialysis with bipolar membranes (EDBM) with four acid revalorization method. 74
Table B.2 Ecosystem impact of 1000 liter of non-de-acidified cranberry juice (NDA), ions exchange resin de-acidificated cranberry juice (IER) and electro-dialysis with bipolar membranes (EDBM) with four acid revalorisation method. 75

Table B.3 Human health impact of 1000 liter of non-de-acidified cranberry juice (NDA), ions exchange resin de-acidificated cranberry juice (IER) and electro-dialysis with bipolar membranes (EDBM) with four acid revalorisation method. 76
Table B.4 Ressource impact of 1000 liter of non-de-acidified cranberry juice (NDA), ions exchange resin de-acidificated cranberry juice (IER) and electro-dialysis with bipolar membranes (EDBM) with four acid revalorisation method. 77
Table C.1 Matrix of pairwise Monte Carlo for Climate change 78
Table C.2 Matrix of pairwise Monte Carlo for Ecosystem quality 79
Table C.3 Matrix of pairwise Monte Carlo for Human health 80
Table C.4 Matrix of pairwise Monte Carlo for Ressource 81
Tableau E.1 Présentation du ph, de l'acidité titrable et du pourcentage de dés-acidification lors de la dés-acidification par résine de 4 volumes de jus dés-acidifié à la suite lors de l'utilisation de résine neuve 85
Tableau E.2 Présentation du ph, de l'acidité titrable et du pourcentage de dés-acidification lors de la dés-acidification par résine de 4 volumes de jus dés-acidifié à la suite lors de la deuxième utilisation de résine 85
Tableau E.3 Présentation du ph, de l'acidité titrable et du pourcentage de dés-acidification lors de la dés-acidification par résine de 4 volumes de jus dés-acidifié à la suite lors de la troisième utilisation de résine 86
Tableau E.4 Présentation de la concentration en ppm du Calcium, du Potassium, du Magnésium, du Sodium et du Phosphore dans les échantillons de jus désacidifié avec la résine échangeuse d'ion 86
Tableau E.5 Présentation de la concentration en ppm des Polyphénols Cyanidine et Peonidine dans les échantillons de jus désacidifié avec la résine échangeuse d'ion 87

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Schématisation de l'économie linéaire [13] 4
Figure 2.2 Schématisation de l'économie circulaire [13] 5
Figure 2.3 Catégories intermédiaires et catégories de dommage de la méthode d'allocation Impact 2002+ 10
Figure 2.4 Étapes d'une analyse d'éco-efficience [19] 12
Figure 2.5 Exemple de présentation de résultats d'éco-efficience comparant cinq scénarios à un scénario de base (en noir) 16
Figure 2.6 Structure d'une molécule de résine échangeuse de cations contenant un site échangeant un ion H+ pour un ion Na+ [52] 22
Figure 2.7 Schéma d'une colonne d'adsorption industrielle utilisant une résine échangeuse d'ions pour traiter une solution. Elle est constituée de a) un distributeur de fluide, b) une résine échangeuse d'ion et de c) un collecteur du fluide [52] 23
Figure 2.8 Schéma d'une cellule de désacidification pour le jus de canneberge. Cette configuration appelée ÉDMB a été développée pour retirer des ions acides (RCOO-) du jus et les récupérer dans un liquide de récupération (C1) [31] 25
Figure 4.1 Procédé de désacidification par membrane échangeuse d'ions dans un contexte industriel 30
Figure 4.2 Procédé de désacidification par résine échangeuse d'ions dans un contexte industriel 33
Figure 5.1 System boundaries of 1000 liters Non-de-acidified cranberry juice production (NDA) 40
Figure 5.2 System boundaries of 1000 liters De-acidified cranberry juice production by ions exchange resin process (IER) 41
Figure 5.3 System boundaries of 1000 liters De-acidified cranberry juice production by electro-dialysis with bipolar membranes (EDBM) 42
Figure 5.4 Comparative life cycle assessment of non de-acidified cranberry juice production (NDA) vs de-acidified cranberry juice by ions exchange resin (IER) process and de-acidified by electrodialysis with a bipolar membrane (EDBM). The values are expressed relative to NDA scenario (100%). Net impact absolute values (blue dot) are provided above the histogram of each scenario. 46

Figure 5.5 Comparative life cycle assessment results of four EDBM alternative cranberry juice production scenarios. Each of them considers alternative citric and malic acid valorization pathways. The values are expressed relative terms to the NDA scenario (100%). Net impact absolute values are provided above the histogram of each scenario . . . 48
Figure 5.6 Functional value results of non de-acidified cranberry juice production (NDA) vs de-acidified cranberry juice by ions exchange resin (IER) process and de-acidified by electrodialysis with a bipolar membrane (EDBM). a) Cranberry juice polyphenol content; b) Cranberry juice Organic Acid concentration. c) Cranberry juice taste 49
Figure 5.7 Eco-effficiency result of the comparison of non-de-acidified cranberry cranberry juice production (NDA) vs de-acidified cranberry juice by ions exchange resin (IER) process and de-acidified by electrodialysis with a bipolar membrane (EDBM). Results are express as the difference (in percentage) between the given value and the base scenario (NDA) in the origin of each figure. 50
Figure 5.8 Eco-effficiency result of the comparison of non de-acidified cranberry cranberry juice production (NDA) vs de-acidified by electrodialysis with a bipolar membrane (EDBM) revalorisation context. Results are express as the difference (in percentage) between the given value and the base scenario (NDA) in the origin of each figure. 52
Figure D.1 Résultats d'éco-efficience pour les jus NDA, IER et EDBM 82
Figure D.2 Résultats d'éco-efficience pour les différents scénarios de réutilisation de l'acide organique avec le jus EDBM pour les catégories Changement climatique et Ecosystème 83
Figure D.3 Résultats d'éco-efficience pour les différents scénarios de réutilisation de l'acide organique avec le jus EDBM pour les catégories Santé humaine et Ressource 84

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACV	Analyse du cycle de vie
AEM	Membrane échangeuse d'anions
CRSNG	Natural Sciences and Engineering Research Council
NDA	Jus de canneberge non désacidifié (Non-de-acidified cranberry juice)
IER	Jus de canneberge désacidifié à l'aide de résine échangeuse d'ion (ions exchange resin process)
EBDM	Jus de canneberge désacidifié à l'aide de d'électrodyalise avec membrane bipolaire (electrodialysis with bipolar membranes)
PAC	Proanthocyanidines
GES	Gaz à effet de serre
GHG	Green house gas

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Entrées utilisées pour l'analyse du cycle de vie 68

Annexe B Résultats détaillés de l'analyse du cycle de vie 74

Annexe C Matrice du Monte Carlo comparatif 78

Annexe D Résultats détaillés d'éco-efficience 82

Annexe E Résultats de dés-acidification par résine échangeuse d'ion 85

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'industrie de la canneberge prend de plus en plus de place dans l'économie québécoise. Le nombre de fermes a doublé entre 2005 et 2015, passant de 40 à 81. Cette culture a des retombées économiques de 121M$ et fournit des emplois principalement dans les régions [1]. Cette industrie a montré son intérêt à préserver l'environnement à travers ses activités en réduisant sa consommation d'eau [2] et en valorisant la culture biologique [1].

La popularité de la canneberge s'explique en partie par sa réputation santé. Santé Canada considère qu'elle fait partie des aliments fonctionnels, c'est-à-dire que la canneberge a la double fonction de nourrir et de prévenir des maladies [3] comme les infections urinaires [4], le cancer colorectal [5] et la plaque dentaire [6]. La haute teneur en acide du jus de canneberge pourrait pourtant être un frein à sa consommation à l'état pur, poussant les acteurs de l'industrie à se tourner vers une désacidification partielle. Cette étape de production supplémentaire pourrait alourdir le bilan environnemental de la production de jus. Des acteurs de l'industrie s'intéressent donc à de nouveaux procédés minimisant l'impact environnemental. Les procédés évalués sont la désacidification par résine échangeuse d'ion et l'électrodialyse avec membrane bipolaire.

Les deux méthodes de désacidification sont évaluées à l'aide d'une éco-efficience pour faire un écodesign de cette nouvelle unité de production. L'éco-efficience est une méthodologie reconnue pour faire un bilan environnemental. Elle met en perspective l'impact environnemental avec la valeur ajoutée de ce procédé supplémentaire. L'évaluation environnementale est faite en accord avec les principes de l'analyse du cycle de vie et l'évaluation de la valeur doit refléter la valeur perçue du produit, que ce soit sur une base économique, une base fonctionnelle ou sur une autre base pertinente.

Dans le cadre de cette maîtrise, deux échantillons de jus de canneberge désacidifié à l'aide de deux technologies différentes sont évalués sur la base de l'éco-efficience. Ces deux échantillons sont aussi comparés au produit de base, soit le jus de canneberge non désacidifié. La valeur économique du produit n'est pas disponible dans le cas du jus de canneberge désacidifié. D'autres indicateurs de valeur sont proposés pour déterminer la valeur de chaque échantillon de jus.

La première partie de ce mémoire présente une revue de littérature expliquant, dans un premier temps, l'évolution de la conscience environnementale pour l'industrie et les concepts d'éco-efficience. Dans un deuxième temps, la canneberge, ses bienfaits pour la santé et des problématiques reliées à son acidité sont présentés. Une description des méthodes de désacidi-

fication utilisées est décrite dans cette revue de littérature. Ce document est un mémoire par article, il y aura donc une présentation des objectifs et un résumé de la méthodologie avant l'introduction d'un article scientifique. Finalement, la discussion générale fera un retour sur les résultats et les perspectives futures de ce champ d'études.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Développement durable

L'expression «Développement durable» a été utilisée pour la première fois dans le Rapport Brundtland en 1987. Ce document, dont le nom officiel est «Our common future», a été rédigé par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations Unies [7]. Posant les premières bases du développement durable, le concept est décrit ainsi :

«Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.

— the concept of 'needs', in particular the essential needs of the world's poor, to which overriding priority should be given ; and
— the idea of limitations imposed by the state of technology and social organization on the environment's ability to meet present and future needs. [7]»

Il faut en comprendre que le développement durable tente de répondre à un besoin sur le long terme en réduisant les inégalités.

Le développement durable comprend trois dimensions, soit l'économie, la société et l'environnement [8]. Une compagnie en agroalimentaire qui voudrait se développer de manière durable devra respecter ces trois piliers. Par contre, ces concepts restent peu contraignants et propres à l'interprétation [9].

Plusieurs grandes compagnies se sont donc engagées à faire du développement durable comme celles impliquées dans l'initiative Business for 2030. Ce projet tente de répondre aux différents objectifs de l'ONU en termes de développement durable. Les entreprises Intel, Dupont, Ericsson, P&G, Walmart et Citi se sont engagées pour l'objectif 12, «Ensure Sustaibable consumption and production» [10]. Pour aider les compagnies à faire le pas, un modèle économique différent qui minimise l'utilisation des ressources naturelles serait pertinent à proposer. Un outil intéressant à cette transition est l'économie circulaire qui sera expliquée dans la prochaine section.

2.2 Économie circulaire

Dans une économie linéaire, comme présentées à la Figure 2.1, les ressources naturelles sont extraites pour être transformées, vendues et utilisées avant d'être jetées. Puisque le système économique a été dans l'abondance de ressources pendant longtemps, il s'est développé selon ce modèle linéaire qui a aujourd'hui des conséquences sur l'épuisement des ressources [11]. Tant que la consommation est plus faible que ce que l'environnement est capable de régénérer, ce modèle peut être viable. Ce n'est plus le cas aujourd'hui puisque les ressources de l'année 2018 étaient épuisées le premier août comme l'annonce l'organisme Global Footprint Network. En effet, les ressources renouvelables comme le bois, l'eau et les poissons régénérés dans l'année sont épuisées après cette date [12].

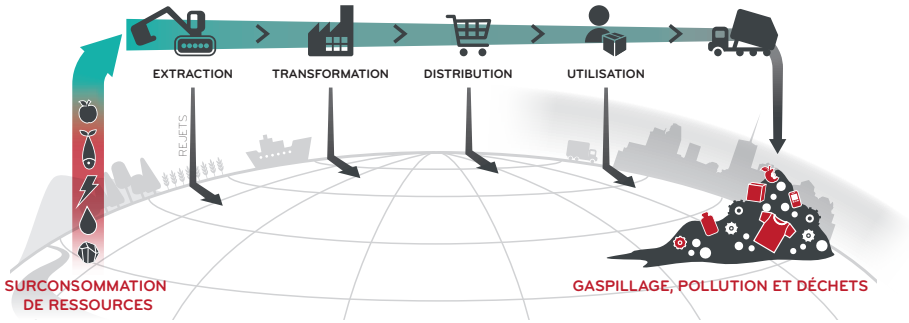


Figure 2.1 Schématisation de l'économie linéaire [13]

L'économie circulaire tente de limiter l'utilisation de ressource naturelle et la production de déchets. Plutôt que ressources soient à usage unique (économie linéaire), l'économie circulaire tend à maximiser les boucles de réutilisation. Ce modèle de développement économique vise donc à repousser l'épuisement des matières premières qu'elle exploite [14].

Comme dans la Figure 2.2, l'économie circulaire utilise un système de boucles pour maximiser la durée de vie des produits à toutes les étapes du cycle de vie [9].

Un des aspects importants de l'économie circulaire est de trouver des débouchés utiles aux déchets d'une activité économique. En valorisant ainsi un coproduit, il est possible de diminuer les émissions d'une autre activité économique. Dans une économie totalement intégrée, les déchets d'un secteur deviendraient la matière première d'une autre industrie.

La transition vers une économie circulaire nécessite par conséquent de changer le modèle d'affaire de certains produits et services. Dans certains cas, plusieurs scénarios sont possibles,

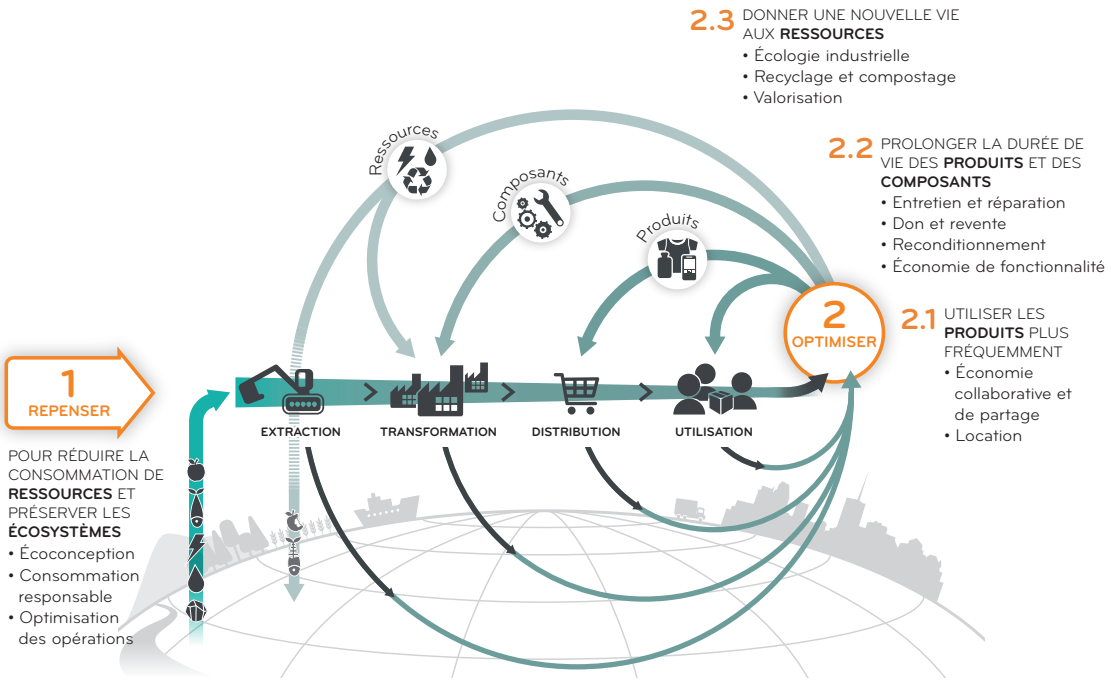


Figure 2.2 Schématisation de l'économie circulaire [13]

mais pas nécessairement égaux sur le plan environnemental puisque l'impact peut être déplacé vers une autre étape du cycle de vie. L'analyse du cycle de vie, expliqué à la prochaine section, permet aux décideurs de faire un choix éclairé sur les conséquences environnementales.

2.3 Analyse du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode d'évaluation de l'impact environnemental d'un objet ou d'un service. Cette méthode évalue l'impact complet du cycle de vie du produit à partir de l'extraction des matières premières jusqu'à sa fin de vie [15]. Le cycle de vie complet est constitué de quatre étapes, soit l'extraction des matières premières, la transformation des matières premières en produit, l'utilisation du produit et la fin de vie [15].

Il y a plusieurs motivations pour un industriel de demander une ACV. Un partenaire industriel pourrait découvrir à quelles étapes du procédé il faut concentrer les ressources pour maximiser le retour environnemental sur l'investissement. Une ACV peut aussi démontrer un avantage concurrentiel entre le produit de l'industriel et celui de son concurrent. Finalement, l'ACV peut aider un partenaire industriel à prendre une décision d'affaires. Que ce soit le choix d'un fournisseur, d'un nouveau marché ou le choix d'une technologie, les différents scénarios peuvent être évalués avec une ACV.

L'Organisation Internationnal de Normalisation (ISO) a publié la norme ISO14044 qui fixent le cadre de réalisation des ACV [16]. Cette norme présente les quatre phases de l'ACV :

— Définition des objectifs de l'étude et du système étudié
— Inventaire des émissions et extractions
— Analyse de l'impact environnemental
— Interprétation des résultats

La réalisation de l'ACV est un processus itératif [16]. Les étapes ne sont pas réalisées de manière linéaire, et il est normal de réaliser plusieurs itérations à chaque étape.

2.3.1 Définition des objectifs de l'étude et du champ de l'étude

La première étape d'ACV est la définition des objectifs de l'étude. Ces objectifs doivent inclure la raison de faire l'étude et son application potentielle, son commanditaire ainsi que le public cible [17].

Le champ de l'étude doit mettre en lumière la fonction principale et les fonctions secondaires du produit ou du service étudié. L'unité fonctionnelle, qui doit être déterminée lors de cette étape, est le niveau de performance de l'objet étudié. L'unité fonctionnelle permet de comparer plusieurs alternatives sur la même base de comparaison [17]. Cette unité fonctionnelle permet aussi de calculer les flux de matière et d'énergie nécessaires à la production de l'objet de l'étude [15].

L'analyse du cycle de vie fait l'inventaire des échanges entre la technosphère (activités humaines) et l'écosphère (environnement) pour toutes les étapes du cycle de vie. Les processus à inclure comprennent habituellement les flux de matière première, les flux d'énergie et de transport nécessaires à toutes les étapes de production. La transformation, les emballages ainsi que les infrastructures impliquées dans ce processus doivent être identifiés. Le système inclut les flux d'avant plan, nécessaires à la phase d'utilisation du produit. Cela peut comprendre les flux d'énergie et le matériel nécessaire à une maintenance normale. Finalement, le scénario de fin de vie est défini. Que le produit soit recyclé, incinéré ou enfoui, les flux nécessaires à ce scénario doivent être pris en compte. L'ensemble de ces étapes et de ces flux de matière est appelé système de produits [16]. Ces flux d'avant plan nécessitent une collecte de données primaires. Ces données seront recueillies par des prises de mesures sur le site de production, calculées ou estimées sur la base des informations disponibles [16]. Les données d'arrière-plan sont des données secondaires qui permettent de construire l'inventaire des émissions et des extractions du cycle de vie à partir des données primaires.

Les frontières du système sont également définies lors de cette étape. Elles identifient ce qui

sera inclus dans la modélisation et ce qui sera négligé dans l'analyse du cycle de vie. Une ACV est de type «berceau à la tombe» lorsque toutes les étapes sont incluses. Une ACV de type «berceau à barrière» n'inclut pas toutes les étapes et ces choix doivent être justifiés lors de la définition du système.

La définition du champ de l'étude aussi inclut les décisions méthodologiques comme les règles d'allocation, la méthode d'évaluation d'impact et les types d'impacts qui sont utilisés à l'étape de l'analyse d'impact environnemental.

2.3.2 Inventaire des émissions et des extractions

Lorsque les flux de matière sont identifiés, l'étape de l'inventaire permet de quantifier chacun de ces flux et de les mettre à l'échelle avec l'unité fonctionnelle. Cette tâche nécessite de la recherche de données pour tous les processus inclus dans les frontières définies à l'étape précédente.

Cette collecte de données est réalisée directement sur le procédé lui-même (données primaires), en utilisation des données disponibles dans d'autres études (données secondaires) et à travers des bases de données. Le projet Écoinvent 2000 avait pour but de fournir la base de données la plus complète en centralisant les données existantes. La base de données Ecoinvent qui est issue du projet Ecoinvent 2000 est centrée sur le contexte européen, mais certains flux ont été adaptés au contexte américain.

Coproduits et Allocation

Un procédé peut avoir un ou plusieurs coproduits en plus du produit principal, nécessitant d'attribuer une partie de l'impact environnemental à chacun des produits. Plusieurs genres de procédés impliquent plus d'un produit. Un camion, par exemple, peut livrer deux différents produits et l'impact de la livraison devra être séparé entre les deux produits. D'autres procédés génèrent des produits recyclables, ce qui les rend multifonctionnels puisqu'ils produisent à la fois un bien et de la matière réutilisable.

Dans le cas d'un procédé qui génère deux produits ayant une valeur marchande, il y a une hiérarchie de méthodes d'allocation à favoriser [15]. La norme ISO 14 044 décrit trois étapes à réaliser :

1. Il convient que l'affectation soit évitée autant que possible en
   (a) divisant le processus élémentaire à affecter en deux sous-processus ou plus et en

recueillant les données d'intrant et d'extrant rattachées à ces sous-processus,

(b) étendant le système de produits pour y inclure les fonctions supplémentaires des coproduits[...].

2. Lorsque l'affectation est inévitable, il convient que les intrants et les extrants du système soient répartis entre ses différents produits ou fonctions d'une manière qui reflète les relations physiques sous-jacentes existantes entre eux ; c'est-à-dire qu'il convient que ces relations physiques illustrent la manière dont les intrants et les extrants évoluent avec les modifications quantitatives des produits ou des fonctions que le système fournit.
3. Lorsqu'une relation physique seule ne peut pas être établie ou utilisée comme base de l'affectation, il convient que les intrants soient affectés entre les produits et les fonctions d'une manière qui reflète d'autres relations mutuelles. Par exemple, des données d'intrant et d'extrant pourraient être affectées entre coproduits proportionnellement à la valeur économique des produits [16].

2.3.3 Analyse de l'impact environnemental

À cette étape de l'ACV, l'inventaire de tous les flux utilisés et de tous les flux émis par l'objet de l'analyse est disponible. Pour connaître leurs conséquences sur l'environnement, différentes méthodologies d'évaluation des impacts du cycle de vie sont disponibles. Les émissions sont caractérisées en fonction de leurs impacts environnementaux potentiels et sont additionnées pour déterminer l'importance des impacts totaux du procédé. Pour réaliser cette caractérisation, il faut calculer l'influence de chacune des émissions sur des catégories intermédiaires (midpoint). Ensuite, une étape supplémentaire peut être ajoutée en observant les impacts du résultat de chaque catégorie intermédiaire sur les catégories de dommages (endpoint). Une catégorie de dommage est habituellement quelque chose à protéger, par exemple la santé humaine, la qualité des écosystèmes et les ressources. Ces catégories changent en fonction de la méthodologie choisie [15].

Parmi les méthodes d'analyse d'impact, certaines sont orientées sur les catégories intermédiaires comme TRACI (Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other Environmental Impacts) qui caractérise les impacts dans un contexte américain [15]. La méthode européenne Éco-indicateur 99 et la méthode japonaise LIME (Life Cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modeling) sont orientées sur les catégories de dommages. D'autres méthodes sont orientées sur les deux types de catégories comme ReciPe 2008 et Impact 2002+.

Pour caractériser les catégories intermédiaires (midpoint) en impact intermédiaire, chaque émission est multipliée à un facteur de caractérisation puis additionnée aux autres émissions comme montrées à l'équation 2.1.

$$\mathrm{SI_i} = \sum_{\mathrm{S}} \mathrm{M_S} * \mathrm{FC_{s,i}} \tag{2.1}$$

où $\mathrm{SI_i}$ est le score d'impact intermédiaire de la catégorie intermédiaire i, $\mathrm{M_s}$ est la masse de la substance S et $\mathrm{FC_{s,i}}$ est le facteur de caractérisation intermédiaire de la substance S sur la catégorie intermédiaire i.

Pour caractériser les dommages (endpoint), les résultats d'impact de catégorie intermédiaire sont alors multipliés par un facteur de caractérisation de dommages et additionnés entre eux comme montré à l'équation 2.2.

$$\mathrm{SD_d} = \sum_{\mathrm{i}} \mathrm{SI_i} * \mathrm{FD_{i,d}} \tag{2.2}$$

où $\mathrm{SD_d}$ est le score d'impact de dommage de la catégorie de dommage d, $\mathrm{SI_i}$ est le score d'impact intermédiaire de la catégorie intermédiaire i et $\mathrm{FD_{i,d}}$ est le facteur de caractérisation de dommage du score d'impact intermédiaire de la catégorie intermédiaire i.

Méthode Impact 2002+

La méthode Impact 2002+ est une des méthodes disponibles pour calculer l'analyse d'impact. Cette méthode inclut quatorze catégories intermédiaires ainsi que quatre catégories de dommage. Les catégories intermédiaires sont présentées à la figure 2.3. La méthode Impact 2002+ inclut aussi quatre catégories de dommages, soit la santé humaine, la qualité des écosystèmes, les changements climatiques et les ressources. La figure 2.3 montre également les relations entre les catégories intermédiaires et les catégories de dommage.

L'impact sur la santé humaine comprend donc les effets cancérigènes et non cancérigènes des flux sur la santé et caractérise des kilogrammes de substances en années de vie en bonne santé perdue (DALY, disability adjusted life years). Des facteurs de caractérisation sont utilisés pour faire le lien entre les émissions et les catégories intermédiaires. Dans le cas de la catégorie de dommage «santé humaine», ils tiennent compte de l'exposition humaine aux produits, du potentiel de risque pour la santé (cancérigène et non cancérigène) et de la gravité des maladies. L'impact sur la qualité des écosystèmes comprend l'écotoxicité aquatique, l'écotoxicité terrestre, l'acidification terrestre, l'eutrophisation terrestre, l'acidification aqua-

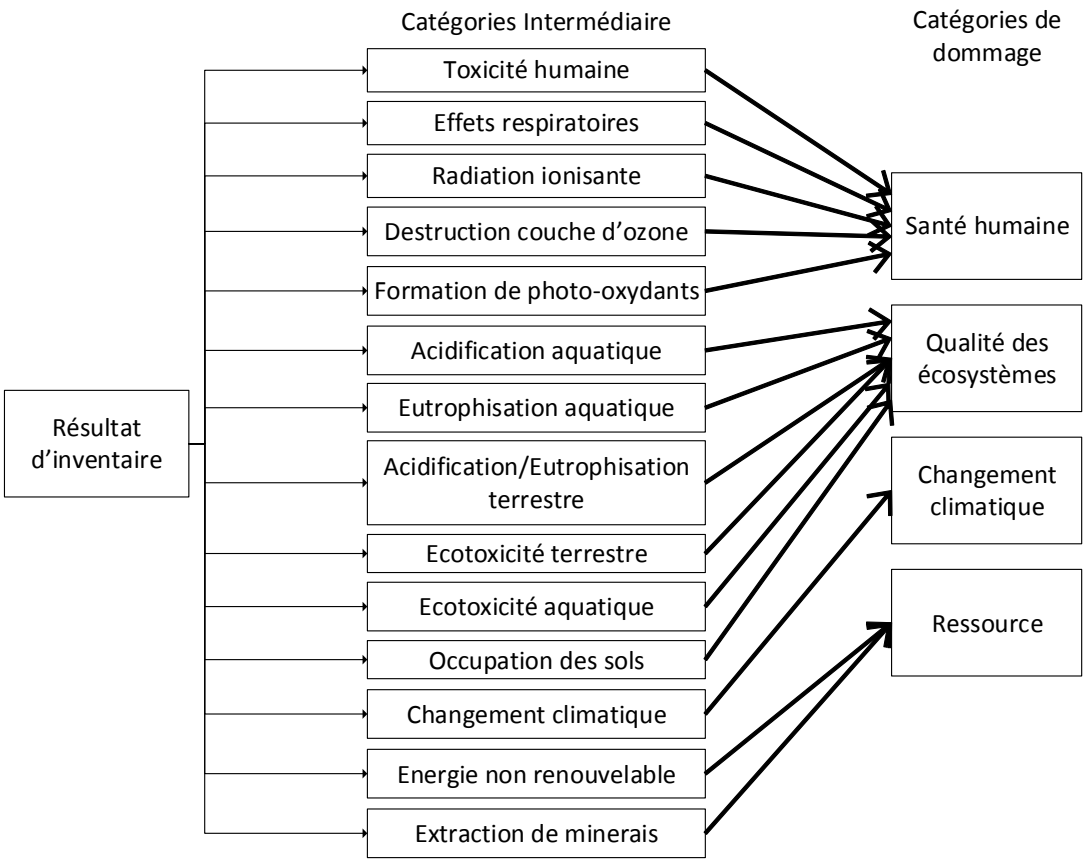


Figure 2.3 Catégories intermédiaires et catégories de dommage de la méthode d'allocation Impact 2002+

tique, l'eutrophisation aquatique et l'occupation des terres. Les dommages sur la qualité des écosystèmes sont exprimés en PDF·m^2·an, soit le produit de la fraction d'espèces disparues, de la superficie et du nombre années. L'impact sur les changements climatiques est exprimé en kg de CO_2eq. L'impact sur les ressources est exprimé en kJ d'énergie non renouvelable utilisée. Cet impact prend en compte la consommation d'énergie non renouvelable, la consommation d'énergie non renouvelable pour l'extraction de ressources minérales et fossiles, ainsi que l'énergie fossile dissipée [15].

2.3.4 Interprétation des résultats

L'étape de l'interprétation sert à revoir les résultats en trois étapes distinctes, soit l'identification des enjeux significatifs, la vérification, et finalement la conclusion, limitation et recommandation [16].

Identification des enjeux significatifs

Les enjeux significatifs sont les éléments à mettre de l'avant dans la structure de la présentation des résultats conformément aux objectifs de l'étude. Ces enjeux peuvent être des données d'inventaire particulières, une catégorie d'impact ou une contribution importante d'une des étapes du cycle de vie. Il faut donc identifier les informations importantes à souligner conformément aux objectifs de l'étude [16].

Vérification

Les vérifications à faire lors de la phase d'interprétation sont variées. Un contrôle de complétude doit être fait pour s'assurer qu'il n'y a pas d'information manquante ou incorrecte. Un contrôle de sensibilité peut être fait pour vérifier la fiabilité des résultats et savoir si les incertitudes ont un impact sur les conclusions. Un contrôle de cohérence s'assure que les hypothèses, les méthodes et les données utilisées sont pertinentes en fonction des objectifs de l'étude [16].

Conclusion, limitations et recommandations

Cette étape consiste à tirer les conclusions de l'étude tout en expliquant ses limitations. De plus, des recommandations doivent être faites au public cible de l'étude.

Dans le cas d'une décision d'affaire entre deux procédés, une ACV peut donner un avantage environnemental à une option. Par contre, il ne semble pas réaliste que 100% de la décision d'affaires soit basée sur les paramètres environnementaux. Les paramètres économiques doivent être pris en considération dans le choix d'une technologie ou d'un fournisseur, il est donc intéressant d'utiliser un outil comme l'éco-efficience qui inclue la sphère économique.

2.4 Éco-efficience

C'est en réaction au rapport Brundtland que le Conseil mondial des affaires pour le développement durable (WBCSD) présente le concept d'éco-efficience dès 1992. L'Éco-efficience est décrite comme un ratio de deux éléments : la valeur d'un produit et son impact environnemental [7]. L'éco-efficience augmente si le produit augmente en valeur ou si son impact environnemental diminue. Cet outil doit être utilisé pour faire des comparaisons [18]. En effet, un produit ne peut pas être éco-efficient par lui-même, par contre il peut être plus éco-efficient qu'un produit concurrent [19].

À titre d'exemple, l'éco-efficience est utilisée par la compagnie de produit chimique BASF

comme outil décisionnel [20]. Cette industrie a adapté l'éco-efficience pour ses besoins lors de prises de décision vis-à-vis les nouveaux marchés économiques à développer et le choix des nouvelles technologies implémentées dans l'usine [21].

2.4.1 Méthodologie

Les différentes étapes de la méthodologie sont présentées à la figure 2.4. La réalisation d'une éco-efficience est un procédé itératif comprenant cinq étapes distinctes : la définition de l'objectif, l'évaluation environnementale, l'évaluation de la valeur du système de produit, la quantification de l'éco-efficience et l'interprétation des résultats obtenus.

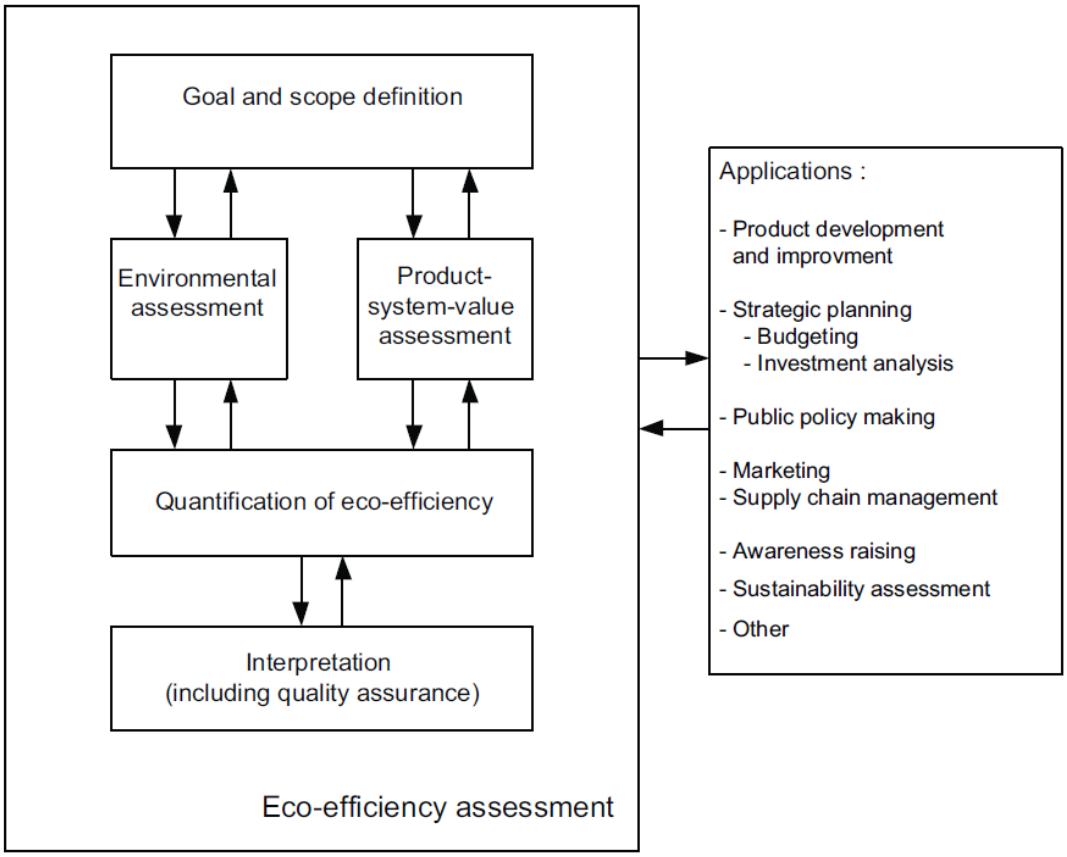


Figure 2.4 Étapes d'une analyse d'éco-efficience [19]

Définition de l'objectif et de la portée de l'étude

Pour définir l'objectif de l'étude, il faut expliquer pourquoi ce travail est pertinent à réaliser. Il faut donner la raison de réaliser l'éco-efficience, identifier le public cible et l'utilisation future des résultats.

La portée de l'étude, quant à elle, implique les éléments qui définissent les choix méthodologiques de l'étude. Le système de produit, l'unité fonctionnelle et les limites du système sont définis et la méthode de réalisation du bilan environnementale doit être choisie. C'est à cette étape que les co-produits doivent être identifiés et les méthodes d'allocations doivent être choisies pour chacun d'entre eux [19].

La méthode pour mesurer la valeur du système de produit doit être définie à cette étape. Cette valeur peut être différente en fonction des parties prenantes. Les normes ISO proposent d'utiliser soit la valeur fonctionnelle, la valeur monétaire ou une autre méthode [19].

2.4.2 Analyse d'impact environnemental

Lors de cette étape, l'analyse d'impact environnemental est réalisée sur le système de produit. L'impact environnemental est fait sur la base de l'unité fonctionnelle choisie dans la portée de l'étude. Ce bilan environnemental doit être réalisé selon les normes ISO 14040 et ISO 14044, c'est-à-dire avec une analyse du cycle de vie [19].

2.4.3 Valeur du système de produit

Lors de cette étape, le type de valeur doit être choisi pour évaluer le système de produit. La méthode pour déterminer cette valeur doit être définie. Les normes ISO donnent des balises pour la définition.

Valeur Monétaire

Pour la valeur économique, il est possible de choisir le prix du marché, le profit potentiel, la valeur ajoutée ou tout autre indicateur monétaire pertinent [19]. Dans la littérature, différentes méthodes sont proposées pour la définition de la valeur monétaire. Par exemple, BASF utilise le facteur de pertinence qu'il définisse selon l'équation 2.3 où la pertinence du coût en calculé en fonction du coût d'investissement maximal et en fonction des revenus supplémentaires apportés par l'option étudiée [21].

$$\text{Pertinence}_{\text{Coût}} = \frac{\text{Coût maximum de l'option évaluée}}{\text{Vente totale pour toutes les industries en Allemagne}} \tag{2.3}$$

Valeur fonctionnelle

La valeur fonctionnelle d'un produit peut être utilisée pour l'éco-efficience. À ne pas confondre avec l'unité fonctionnelle, la valeur fonctionnelle est la valeur associée à une fonction du système de produit. Elle est choisie en fonction de bénéfice recherché pour une des parties prenantes. Cette valeur doit être mesurable, tangible et doit être quantitative pour pouvoir comparer des scénarios les uns avec les autres. Selon nos recherches, il n'y a pas d'exemple d'éco-efficience réalisée à l'aide de la valeur fonctionnelle dans un contexte agroalimentaire.

Autre valeur

La norme ISO 14045 permet d'utiliser toutes autres méthodes pour évaluer la valeur du système de produit. Par exemple, le nombre de nouveaux emplois pourrait être un indicateur de valeur, puisque c'est une base de comparaison tangible et qualitative [19].

2.4.4 Quantification de l'éco-efficience

Dans un cas idéal, une technologie alternative permettra à la fois d'augmenter la valeur du système de produit et de diminuer l'impact environnemental. Quand ce n'est pas le cas, il faut trouver une relation entre le résultat environnemental et le résultat de valeur qui permet de comparer différents scénarios. Cette relation doit être expliquée explicitement. Pour BASF, l'éco-efficience est un ratio entre l'impact environnemental et la pertinence économique et l'augmentation de l'éco-efficience peut être faite en diminuant l'impact environnemental ou en augmentant les profits [21].

La méthode de Huppes et al. [22] propose quatre différents ratios présentés au tableau 2.1. Le ratio économie/environnement utilisé par BASF [23] est présenté dans la première case : environmental productivity, soit la valeur produite par unité d'impact environnemental. Il est aussi possible de calculer l'inverse pour trouver l'environmental intensity, c'est-à-dire le coût environnemental de chacune unité de valeur produite. Par exemple, la définition de valeur choisie est un nombre d'emplois créés, l'intensité environnementale donnera l'impact environnemental induit pour chacun des emplois créés.

La colonne de droite du tableau 2.1 utilise l'amélioration de l'impact environnemental. Ces méthodes sont utilisées lorsqu'une nouvelle technologie permettrait d'améliorer le bilan environnemental. Pour comparer deux nouvelles technologies nécessitant un investissement, la prime environnementale peut être utilisée. Le coût de l'investissement est mis en relation avec le gain environnemental. Ces ratios peuvent être faits en fonction de la grandeur de l'impact recherché (Environmental improvement cost) ou en fonction du budget disponible

Tableau 2.1 Méthode d'expression de l'éco-efficience

	Product or production prime	Environmental improvement prime
Economy divided by environment	Production/consumption value per unit of environmental impact : **1 Environmental productivity**	Cost per unit of environmental improvement : **3 Environmental improvement cost**
Environment divided by economy	Environmental impact per unit of prodution/consumption value or : **2 Environmental intensity**	Environmental improvement per unit of cost : **4 Environmental cost-effectiveness**

(Environmental cost-effectiveness) [23].

2.4.5 Interprétation

Lors de la phase d'interprétation, les barèmes utilisés en ACV dans ISO 14044 doivent être appliqués [19]. Les résultats doivent être différenciés en fonction de l'élément qui améliore le résultat d'éco-efficience. Le résultat peut être plus éco-efficient strictement grâce à une augmentation de la valeur du système de produit, strictement à une amélioration du bilan environnemental ou un mix des deux. Dans tous les cas, le type d'amélioration de l'éco-efficience doit être expliqué

Présentation des résultats

Dans le cas où l'éco-efficience est présentée comme un ratio entre l'amélioration environnementale et la valeur du produit, il est risqué de présenter le résultat avec un score unique. Bien qu'un score unique soit plus simple à interpréter, il induit une perte d'information importante. Si le produit est plus éco-efficient, il n'est pas possible de savoir si c'est le score environnemental ou l'augmentation de valeur qui en est responsable [23].

Une présentation des résultats sur deux axes permet de présenter un maximum d'information. Présentés à la figure 2.5, les différents scénarios d'une analyse d'éco-efficience sont comparés à un scénario de base, situé au centre du graphique. Pour le scénario jaune, l'impact environnemental est plus faible que le scénario de base (en noir) sans qu'il y ait de changement dans la valeur du produit, ce qui augmente l'éco-efficience. Le scénario orange est plus éco-efficient puisque la valeur du produit a augmenté malgré un impact environnemental identique. Le scénario bleu montre une éco-efficience plus basse malgré une augmentation de la valeur du produit. En effet, la dégradation de l'impact environnemental est assez importante pour passer sous la ligne d'équivalence (en noir) malgré l'augmentation de valeur.

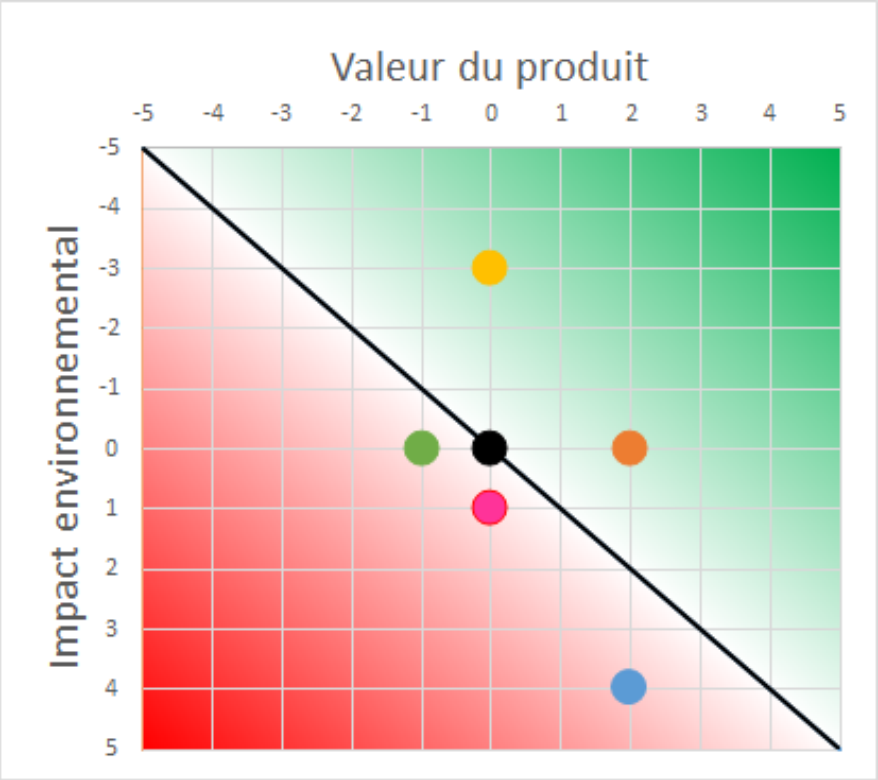


Figure 2.5 Exemple de présentation de résultats d'éco-efficience comparant cinq scénarios à un scénario de base (en noir)

Cette façon de faire permet de différencier les scénarios verts et roses qui auraient eu tous les deux le même score d'éco-efficience dans le cas d'un ratio. Étant sur la même ligne d'équivalence, ces deux scénarios auraient eu le même résultat malgré un impact différent sur l'environnement et sur la valeur du produit.

2.5 Jus de canneberge

Dans cette section, la valeur associée à la canneberge sera présentée, d'abord au niveau des raisons de sa popularité auprès des consommateurs comme le goût, les effets sur la santé ou même des traditions. Ensuite, un survol des méthodes de culture sera réalisé avec leurs avantages et leurs problématiques. Les méthodes de transformation principales seront aussi expliquées.

2.5.1 Consommation de la canneberge

La canneberge était déjà consommée par les premières nations lors de l'arrivée des Européens en Amérique. Appelée «sassamenesh» par les nations algonquines et «atoka» par les nations iroquoises [24], ce fruit est utilisé dans la cuisine traditionnelle des premières nations pour la préparation du pemmican, une pâte de viande et de fruits séchés servant à faire des réserves pour l'hiver. La canneberge était aussi mangée fraîche, séchée et cuite dans le sirop d'érable [25].

C'est à Henry Hall qu'on attribue les premiers efforts de culture de la canneberge qui deviendra un fruit consommé dans toute l'Amérique du Nord. Appréciée des marins, elle est apportée sur les bateaux afin de lutter contre le scorbut pendant les longs voyages [25].

La canneberge est encore très populaire en Amérique du Nord où elle est consommée sous forme de gelées et de sauces lors de fêtes traditionnelles comme Noël et l'action de grâce. En effet, les Américains consomment 20% de leur production de canneberge pendant la semaine de Thanksgiving [26]. À cela s'ajoute la consommation de jus de canneberge et de cocktails pour un total de 200 millions de kilogrammes consommés aux États-Unis [26].

La réputation des bienfaits sur la santé de la canneberge est bien établie dans la culture populaire. Les médias traditionnels en font la promotion pour les collations santées des enfants [27] et pour sa haute teneur en antioxydants [18]. Elle est aussi publicisée dans les médias comme prévenant les ulcères d'estomac, favorisant la santé dentaire et ralentissant le déclin cognitif [18].

Cette réputation répond à une clientèle de plus en plus soucieuse des bienfaits santé de ses aliments et de la présence d'antioxydants. Le marché des antioxydants était évalué à 2.9M$ en 2015 et devrait atteindre 4.5M$ d'ici 2022, ce qui représente une augmentation annuelle de 6.4% [28]. Selon une étude récente, 50% des Américains adultes disent croire qu'augmenter leur consommation d'antioxydants réduira leur probabilité d'avoir un cancer ou une maladie chronique [29].

2.5.2 Polyphénols et propriétés santé

Les polyphénols, soit des molécules produites par les plantes et ayant plus d'un cycle aromatique, sont des antioxydants qui ont des propriétés anticancer et anti-inflammatoire [30]. Les canneberges ont une haute concentration de molécules phénoliques. Elles contiennent plus particulièrement des anthocyanes, une molécule de la famille des flavonoïdes et responsable de la couleur du fruit [31], et des proanthocyanidines (PAC), un polymère phénolique responsable de son goût astringent [32].

Effet sur les infections urinaire

L'infection urinaire est une maladie fréquente chez les femmes [33]. Elle est causée par la bactérie Escherichia Coli qui possède des adhésines au bout de ses flagelles. Ces adhésines sont capables de s'attacher à certains récepteurs des cellules utérines et de causer une infection. In vitro, le jus de canneberge peut diminuer l'adhérence des bactéries à la paroi utérine [34]. Les PAC peuvent s'accrocher aux adhésines des bactéries, empêchant celles-ci d'adhérer à la paroi cellulaire.

In vivo, l'efficacité du jus de canneberge comme traitement reste controversée. Certaines études tendent à montrer que la consommation de 240 ml de jus de canneberge induirait une concentration de PAC dans l'urine assez élevée pour avoir un effet antiadhésif sur les bactéries [4]. Par contre, une étude démontre qu'il est difficile de prouver l'efficacité de la consommation de canneberge puisque l'effet est préventif et que les effets sont difficiles à isoler [35]. Finalement, certaines études tendent à démontrer un effet réel, mais qu'il est très faible [36].

Cancer

La consommation de certains polyphénols est aussi associée à une diminution des risques de développer certains types de cancer. C'est le cas des flavonoïdes et des protoanthocyanidines qui sont utilisés en chimio-prévention [37]. Ces molécules ont un effet positif au niveau du cancer colorectal, qui est la troisième cause de décès la plus commune aux États-Unis [5]. En effet, les flavonoïdes protègent l'ADN des cellules de l'intestin des dommages causés par différents cancérigènes [38]. Une diète constituée de fruits et légumes riches en flavonoïdes et en PAC serait efficace contre les cancers situés dans le système digestif [38]. Cette chimio-prévention consiste donc à une modification à faible coût de l'alimentation qui minimise les risques de développer un cancer [37].

Maladies cardio-vasculaires

Les anthocyanes et les PAC sont aussi efficaces dans la lutte contre les maladies cardio-vasculaires. Même une faible consommation de polyphénols aurait un impact bénéfique sur la santé cardiaque [39]. Une étude systématique a démontré que l'effet d'une alimentation riche en tous types de polyphénols mène à une diminution significative des risques de maladies cardio-vasculaires [39].

Plaque dentaire

La consommation de jus de canneberge a aussi des effets bénéfiques sur le contrôle de l'apparition de plaque dentaire. Ce bio-film est composé de près de 700 espèces de bactéries différentes déposées sur les dents et pouvant causer des maladies dentaires [31]. La plaque est inhibée significativement lors d'application de polyphénols extraits du jus de canneberge [40]. L'utilisation régulière de rince-bouche aux canneberges diminue significativement la quantité de bactéries présente dans la bouche, grâce aux propriétés antiadhésives des extraits de canneberge [6]. Par contre, le jus traditionnel ne peut pas être utilisé comme inhibiteur à cause de sa teneur en sucre et en acide qu'il contient, ce qui pourrait mener à une décalcification des dents [6].

2.5.3 Acides organiques

Le goût particulier de la canneberge est dû à l'importante teneur en acide qui peut atteindre 3% du volume du jus. Les acides présents en plus grande quantité sont l'acide citrique, l'acide quinique, l'acide malique et l'acide succinique [41]. Cette forte concentration d'acide rend le produit peu agréable à consommer, mais crée aussi des problèmes gastriques comme des maux de ventre, des diarrhées et même des vomissements [35]. Ces problèmes gastriques causés par une inflammation intestinale [42] freinent la recherche puisque plusieurs participantes abandonnent le programme lorsqu'elles ressentent ces symptômes. Jusqu'à 40% des arrêts de participation étaient attribuables aux effets gastriques tandis que 30% des participantes refusent l'étude à cause du goût du jus de canneberge non sucré [35]. Il devient ainsi difficile d'étudier les effets bénéfiques des autres composants de la canneberge.

Problématique du sucre

Pour la consommation courante, la teneur en acide du jus de canneberge est trop élevée. Cela pousse les transformateurs à proposer des produits de canneberge contenant de grandes

quantités de sucre ajouté. La liste d'ingrédients des produits de la canneberge contient plusieurs produits sucrants comme le sirop de maïs dans la sauce aux canneberges [43] et la gelé de canneberge [44], du sucre raffiné ou du succralose dans les cocktails de canneberges [45] ou des jus de fruits concentrés pour les mélanges de jus aux canneberges [46].

Malheureusement, les sucres raffinés et les sirops de maïs à haute teneur en glucose sont associés au développement de plusieurs maladies et divers problèmes de santé. Les boissons contenant des sucres raffinés, du sucrose et du sirop de maïs à haute teneur en fructoses augmentent l'accumulation de gras viscéral et ectopique, ce qui mène à l'obésité [47]. Les boissons sucrées ont des taux de sucre élevé, mais ne procurent pas de satiété, ce qui induit une consommation énergétique importante de sucre à absorption rapide [48]. De ce fait, ils ont un impact négatif sur le diabète de Type 2 ainsi que les maladies cardio-vasculaires [47]. La consommation de sucre est aussi attribuée à une dégradation de la santé dentaire chez les enfants et à une augmentation du nombre de caries[49]. Encore plus grave, il semblerait que le sucre crée une dépendance chez les rats, qui développent des comportements anxieux similaires aux effets de la morphine et de la nicotine [50].

Désacidification

Pour éviter à la fois les problèmes gastriques et le sucre ajouté, il serait possible de retirer une partie de l'acide du jus de canneberge. Des tests in vitro démontrent que les cellules intestinales sont abîmées par le jus de canneberge. Par contre, un jus dont 37% de l'acide ou plus a été retiré n'a pas d'effet négatif sur ces cellules [41]. Pour créer un produit sans sucre ajouté, une étape supplémentaire de production du jus de canneberge traditionnel serait requise.

2.5.4 Production de jus de canneberge

Il faut produire le jus de canneberge avant de penser à le désacidifier. Dans cette section, la méthode de culture des fruits est présentée et deux propositions procédées de désacidification sont expliqués.

La culture de la canneberge

La canneberge est un fruit de la famille des Éricacées, comme l'airelle rouge et l'airelle des marais, plus connues en Europe. Petit fruit de couleur rouge, la canneberge pousse bien dans un sol acide comme des tourbières. Elle s'accommode également d'un sol pauvre, réduisant les demandes en fertilisants [24]. Au Québec, 8% des canneberges sont produites en culture

biologique, plaçant la province comme le plus grand producteur de canneberge biologique [51].

Comme toutes les industries agricoles, la production de la canneberge a un impact sur l'environnement. La fertilisation azotée recommandée pour cette culture est de 25 kg N/ha à 60 kg N/ha, ce qui peut constituer un polluant. Cette application est faible comparé à la production de pomme de terre, produit généralement dans le même type de terrain [2]. De plus, les insecticides sont utilisés marginalement à cause des inondations biannuelles des champs lors de la récolte. Cette pratique permet de protéger les plants du gel au printemps et de faire une récolte rapide à l'automne. Ces inondations tuent les insectes présents dans les champs [2].

La culture de la canneberge nécessite de grandes quantités d'eau que les producteurs doivent accumuler dans des réservoirs lors de précipitations. La majorité des fermes opérant à circuit fermé, l'eau est recyclée plusieurs fois avant d'être rejetée. Cette méthode réduit considérablement la pression sur les eaux de surface [2].

Production canneberges sechées

Après la récolte, la canneberge est livrée aux transformateurs qui lavent et inspectent les fruits. Les fruits sont ensuite congelés afin de garantir un approvisionnement régulier toute l'année. En sortant du congélateur, 65% des canneberges sont transformées en canneberges séchées. Un premier procédé de séparation retirera une partie du jus contenu dans le fruit. La canneberge sera alors sucrée puis séchée. Finalement, les fruits séchés sont emballés et distribués [31].

Production jus de canneberge

Les fruits qui restent sont destinés à la production de jus de canneberge. Ils sont broyés et pressés afin de retirer un maximum de jus. Les résidus de canneberge, principalement constitués de pelure, de graines et de fibres, sont envoyés pour l'alimentation animale. Le jus est filtré et pasteurisé avant d'être emballé et distribué [31].

2.5.5 Procédés de désacidification

Lors de l'étape de désacidification, une certaine quantité d'ions acides seront retirés du jus. Les méthodes existantes pour réaliser cette séparation sont par exemple la précipitation par les sels, l'utilisation de chitosane ou la nanofiltration [31]. Dans cette section, il sera question

spécifiquement de l'utilisation de résines échangeuses d'ions et du procédé d'électrodialyse avec membrane bipolaire (EDBM).

Résine échangeuse d'ion

La résine échangeuse d'ions est composée de billes de 0.5 à 1 mm de diamètre. Ces billes sont faites de chaînes de polymères entremêlés ayant des sites ioniques chargés. La structure polymérique ouverte attire des ions et les retient sur les sites chargés comme schématisés à la Figure 2.6. Dans un contexte de désacidification, la résine entre en contact avec le liquide acide. Les groupements acides du liquide sont captés par la résine et y resteront prisonniers. En échange, la résine émet un nombre équivalent de molécules de même charge (H+ ou OH-).

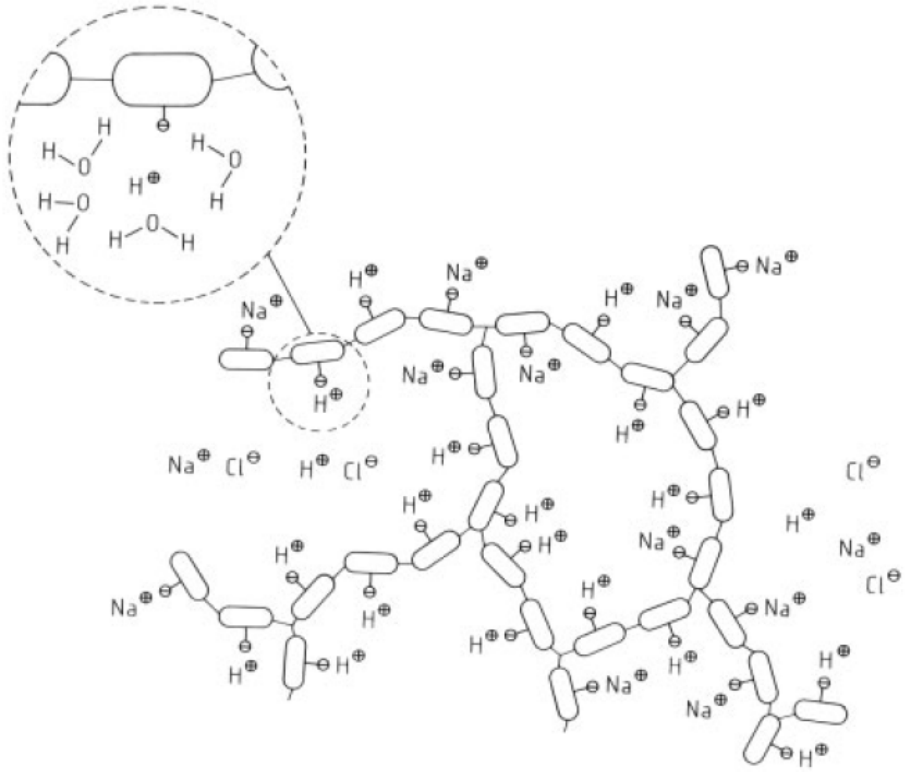


Figure 2.6 Structure d'une molécule de résine échangeuse de cations contenant un site échangeant un ion H+ pour un ion Na+ [52]

Le procédé de désacidification d'un fluide par résine se fait en plusieurs étapes, soit le traitement, le lavage à contre-courant, la régénération et le rinçage. Ces étapes se font dans une colonne d'absorption semblable à la figure 2.7.

L'étape du traitement est réalisée lorsque le fluide traverse la colonne et ressort vers le bas. Le

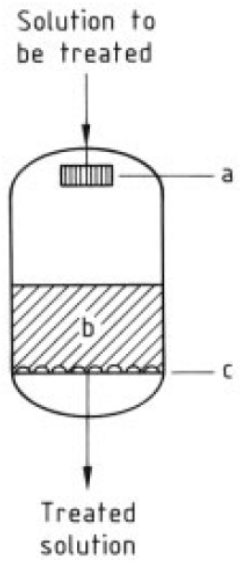


Figure 2.7 Schéma d'une colonne d'adsorption industrielle utilisant une résine échangeuse d'ions pour traiter une solution. Elle est constituée de a) un distributeur de fluide, b) une résine échangeuse d'ion et de c) un collecteur du fluide [52]

fluide doit être distribué adéquatement afin de maximiser la surface de contact de la résine, et ce qui maximise son efficacité. Lorsque le fluide de sortie atteint un taux de traitement prédéterminé, cette étape est arrêtée [52]. En effet, la résine se sature au fur et à mesure de son utilisation. Après un certain degré de saturation, le procédé doit être arrêté afin que la résine soit traitée pour retrouver son efficacité [53].

La seconde étape, le lavage à contre-courant (backwash), consiste à propulser de l'eau du bas vers le haut afin de rincer la résine et de la décompacter. Cette étape permet d'augmenter la surface de contact et maximiser l'efficacité de l'étape suivante. [52].

L'étape de régénération permet d'extraire les ions captés par la résine et les remplacer soit par des ions H+ dans le cas de résines anioniques, soit par des ions OH- pour les résines cationiques. À cette fin, un produit régénérant, généralement un acide fort ou une base forte, est utilisé en cycle continu. Cette étape dure de 15 à 60 minutes en fonction du type de résine et du type de régénérant utilisé [52].

L'étape de rinçage se fait en deux temps. D'abord, le régénérant est remplacé par de l'eau à débit lent jusqu'à ce qu'il ne reste que des traces de régénérant. Ensuite, un flux d'eau rapide est utilisé pour retirer toute trace de régénérant dans la colonne. À la fin de cette étape, le cycle de désacidification recommence à l'étape du traitement [52].

Certains défis relatifs à l'utilisation de résines échangeuses d'ions doivent être relevés lors de la

désacidification de jus de fruit dans un contexte industriel. Les résines doivent être changées régulièrement à cause de leur relative instabilité, causant des coûts élevés. De plus, l'utilisation de régénérant induit une grande utilisation de produits chimiques qu'il faut acheter et traiter. Le régénérant est nécessaire en très grande quantité comparativement au volume de fluide traité, mais il peut être utilisé jusqu'à 25 fois [54]. De plus, l'utilisation en continu est difficile avec ce procédé à cause des différents cycles de désacidification. Il faut que le procédé soit complètement automatisé, ce qui rend les lignes de production complexes à construire et à contrôler [52].

Malgré tout, les résines échangeuses d'ions ont été utilisées avec succès pour la désacidification de jus. C'est le cas du jus de fruit de la passion afin de monter le pH de 3 à 4. À cet effet, les ions d'acide citrique sont remplacés par des ions OH-[55].

Électrodialyse

Sous l'effet d'un champ électrique, il est possible de déplacer des molécules chargées à travers une membrane. Ce phénomène est utilisé par les procédés d'électrodialyse afin de retirer certaines molécules chargées d'un fluide. À cette fin, un module d'électrodialyse doit être utilisé. Les membranes appropriées sont sélectionnées en fonction de l'application et placées entre une anode et une cathode. La solution à traiter et la solution de récupération des ions passent à travers le module de part et d'autre d'une membrane. Les ions passent d'une solution à l'autre sous l'effet de la différence de potentiel induite par un champ électrique. Pour permettre ce déplacement d'ions, l'anode et la cathode doivent baigner dans un électrolyte isolé par des membranes [56].

Différentes membranes sont disponibles pour faire cette séparation. Celles utilisées pour la désacification du jus de canneberge sont les membranes échangeuses d'ions et les membranes bipolaires. Les membranes échangeuses d'ions sont perméables à certains ions seulement. Dans le cas d'une membrane échangeuse d'anions, les anions peuvent traverser la membrane, mais les cations sont repoussés grâce à des groupements ioniques fixés dans la membrane. Dans le cas d'une membrane échangeuse de cations, les cations peuvent traverser, mais les anions sont repoussés. Les membranes bipolaires, quant à elles, sont composées d'une membrane échangeuse d'anions et de membranes échangeuses de cations placés de chaque côté d'une couche hydrophile. Si une tension est appliquée, il y a dissolution des molécules d'eau grâce à un catalyseur entre les deux membranes. La membrane échangeuse d'anion émettra un ion OH- et la membrane échangeuse de cation émettra un ion H+. Ces membranes peuvent être empilées dans un module d'électrodialyse et fixées entre l'anode et la cathode [56].

La configuration du module d'électrodialyse utilisé pour la désacidification de jus de canne-

berge est composée de deux membranes bipolaires placées de chaque côté d'une membrane échangeuse d'anions. À la figure 2.8, les ions d'acide RCOO- traversent la membrane échangeuse d'anions (AEM) quittant le jus pour se retrouver dans la cellule C1 sous l'effet d'une différence de potentiel induite entre la cathode et l'anode. Pour que l'électroneutralité soit respectée, les deux membranes bipolaires compensent pour cette perte de charge ionique en émettant un anion OH- dans le jus de canneberge et un ion H+ dans la cellule C1 [31]. Ainsi, la charge de chaque compartiment soit nulle.

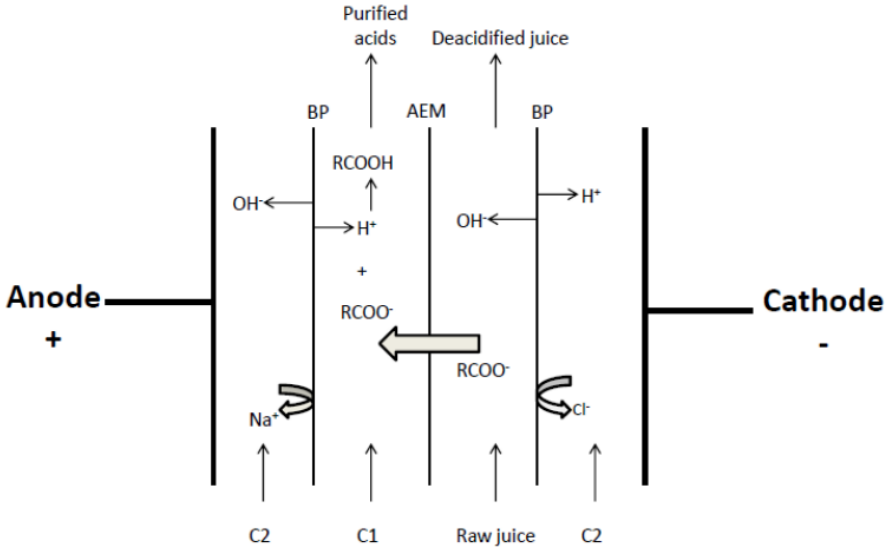


Figure 2.8 Schéma d'une cellule de désacidification pour le jus de canneberge. Cette configuration appelée ÉDMB a été développée pour retirer des ions acides (RCOO-) du jus et les récupérer dans un liquide de récupération (C1) [31]

Certains défis demeurent avant de pouvoir utiliser l'électrodialyse de façon industrielle en continu. Le jus à traiter devra être accumulé dans des réservoirs et pompé à travers le module d'électrodialyse. De plus, l'acide retiré du jus devra être accumulé et concentré afin de pouvoir être réutilisé. Enfin, des procédures de nettoyage devront être mises au point pour diminuer le temps d'arrêt et maximiser l'efficacité du procédé. Malgré tout, ce procédé a été utilisé avec succès pour la désacidification dans une usine pilote [55].

2.5.6 Impact environnemental des procédés de désacidification

Les consommateurs sont influencés par l'impact environnemental des produits lors de leurs achats [57]. Les producteurs de jus de canneberges sont donc intéressés à limiter l'impact

environnemental de leur produit [58] malgré l'ajout d'une étape de production supplémentaire. Selon nos connaissances, il n'y a pas d'analyse du cycle de vie qui ait été faite sur la désacidification du jus de canneberge, mais la littérature donne certaines pistes vis-à-vis l'utilisation des technologies de désacidification.

Les utilisateurs de l'électrodialyse dans différents contextes mettent de l'avant un bon bilan environnemental dans différents contextes industriels. C'est le cas lors de la séparation de l'acide succinique [59] ou elle présentée comme «écofriendly», lors de la désalinisation de l'eau de mer [60]. En effet, comparativement à d'autres technologies dans ce secteur, la désacidification requiert moins d'énergie. D'autres auteurs travaillent sur l'optimisation des méthodes de recyclage des membranes [61]. Dans une analyse du cycle de vie sur l'utilisation du procédé d'électrodialyse sur la concentration des protéines de lait, cette technologie a un meilleur bilan environnemental que la technologie traditionnelle [62].

Des efforts ont été réalisés pour diminuer au maximum l'impact environnemental des procédés utilisant les résines échangeuses d'ions. De nouvelles technologies de fabrication de la résine ont été développées pour diminuer l'impact de la production [63]. De nouveaux design de colonnes sont mis au point pour maximiser la réutilisation des effluents chimiques utilisée pour régénérer la résine [64]. Des produits alternatifs aux régénérants sont aussi testés pour diminuer leur impact [65].

CHAPITRE 3 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

3.1 Problématique

La mise en marché d'un jus de canneberge désacidifié à 40% est une avenue intéressante pour l'industrie de la canneberge. Ce nouveau produit vise les clients intéressés par les bienfaits du jus de canneberge, mais qui sont incommodés par le goût acide trop prononcé. Pour faire ce produit, une unité de désacidification devra être ajoutée à l'usine de production de canneberge. Les technologies identifiées pour cette désacidification sont l'électrodialyse et la désacidification par résine échangeuse d'ion. Pour répondre positivement au courant environnementaliste dans l'industrie agroalimentaire, un bilan environnemental des deux procédés est demandé.

Il n'existe pas d'analyse du cycle de vie comparative entre les deux technologies de désacidification identifiée par le partenaire industriel. De plus, la nature du produit, comme la couleur ou son odeur, pourrait être transformée lors de la désacidification, car certaines de ces molécules sont chargées [31]. Cette étape de transformation peut donc avoir un impact sur la qualité du jus, et donc sur sa valeur.

Il est possible d'adapter l'outil d'éco-efficience dans un contexte agroalimentaire pour prendre une décision technologique dont le but est de maximiser la valeur du système de produit en plus d'améliorer le bilan environnemental. L'outil doit intégrer les éléments qui donnent de la valeur au produit. Ni le prix ni les coûts de production ne sont utilisés dans cette analyse. Le jus de canneberge désacidifié est un produit nouveau dont les producteurs ne connaissent pas la valeur monétaire exacte.

3.2 Objectif principal

Proposer une nouvelle approche basée sur le concept d'éco-efficience pour supporter le choix de technologies et leur écoconception dans la transformation alimentaire. Sur le plan méthodologique, l'approche doit pouvoir mesurer l'impact environnemental sur tout le cycle de vie et la valeur du produit. Cette dernière doit pouvoir adresser la valeur fonctionnelle du produit.

3.3 Objectif secondaire

L'objectif secondaire est la réalisation de l'analyse d'éco-efficience de deux procédés de désacidification de la canneberge : la désacidification à l'aide de l'électrodialyse et la désacidification l'aide de résine échangeuses d'ions. Les résultats des deux scénarios de jus de canneberge seront comparés aux résultats du jus non désacidifié. Le jus de canneberge non désacidifié sera le scénario de base de cette analyse d'éco-efficience.

Pour réaliser cet objectif, les étapes suivantes doivent être réalisées :

1. Proposer des paramètres d'évaluation de la valeur fonctionnelle du jus de canneberge qui répond au besoin des clients.
2. Désacidifier en laboratoire du jus de canneberge en utilisant les deux technologies.
3. Mesurer la valeur de chaque jus en fonction de ces paramètres à l'aide d'analyse compositionnelle.
4. Faire l'analyse du cycle de vie de la production de jus de canneberge désacidifié par électrodialyse et de la production du jus de canneberge désacidifié à l'aide de résine échangeuses d'ions.
5. Présenter les résultats comparatifs de l'éco-efficience des trois scénarios.
6. Identifier les points chauds environnementaux de la production de jus de canneberge et des procédés de désacidification.
7. Proposer des méthodes de revalorisation des co produits et identifier leur impact sur les conclusions de l'étude d'éco-efficience.

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE

Pour atteindre les objectifs de ce mémoire, il faut fournir l'analyse d'éco-efficience nécessaire pour choisir entre les deux technologies de désacidification. Premièrement, l'analyse du cycle de vie est réalisée, comprenant la modélisation du système de produit, la collecte de données et l'évaluation environnementale. Deuxièmement, l'éco-efficience est calculée, incluant la définition de la valeur du produit, l'évaluation de cette valeur et la mise en relation de cette valeur et du bilan environnemental. Finalement, une interprétation est faite pour présenter des résultats utiles et directement applicables pour le partenaire industriel.

4.1 ACV

L'analyse d'impact est faite conformément à la norme ISO 14044 et l'unité fonctionnelle choisie est 1000 litres de jus de canneberge. Le jus utilisé est un jus de canneberge biologique. Il est fourni par notre partenaire Fruit d'Or, producteur québécois de jus de canneberge. La collecte de données secondaires est réalisée avec la base de données Ecoinvent v3.4 à l'aide du logiciel Open LCA. L'analyse de l'impact environnemental est calculée avec la méthode Impact 2002+

La modélisation des arbres de processus est faite pour les trois produits, soit le jus de canneberge non désacidifié (NDA), le jus de canneberge désacidifié à l'aide de la résine échangeuse d'ion (IER) et le jus désacidifié par électrodialyse avec membrane bipolaire (EDBM). Ces arbres de processus montrent les principales étapes de transformation nécessaires à la production de jus de canneberge ainsi que les principaux flux de matière. Les méthodes d'allocation pour chacun des processus ayant des coproduits sont choisies et justifiées. Finalement, les limites du système sont définies. Ces arbres de processus sont présentés dans l'article du chapitre 5.

Pour les étapes de désacidification, une conception sommaire des procédés est faite et présentée dans la section 4.1.1. Les deux procédés de désacidification sont adaptés à un contexte industriel. Dans le cas de la désacidification avec résine échangeuse d'ions, certaines données, comme la consommation énergétique, sont calculées à partir du design et de la littérature disponible. Dans le cas de la désacidification par électrodialyse, une mise à l'échelle d'un procédé pilote permet de déterminer la consommation énergétique. Une collecte de données primaires est aussi réalisée sur l'ensemble du procédé, commençant par la culture de la canneberge jusqu'au procédé de désacidification.

4.1.1 Désacidification par électrodialyse

Dans cette section, un design sommaire d'un procédé industriel est fait à partir d'une usine pilote de la Chaire de Recherche Industrielle du CRSNG en «Procédés électromembranaires visant l'amélioration de l'écoefficience de lignes de production bioalimentaires» à l'Université Laval. Les données ont été collectées par Mélanie Faucher, étudiante à la maîtrise de ce laboratoire.

Afin d'estimer l'énergie nécessaire à la désacidification, une mise à l'échelle a été réalisée, basée sur les données collectées à l'aide de l'usine pilote. La désacidification en usine pilote est un procédé batch, mais, dans un contexte industriel, la désacidification est faite en continu [58]. La figure 4.1 montre le procédé adapté pour le contexte industriel. Le jus arrive par la conduite 1 et est ajouté au jus désacidifié arrivant au réservoir R-1, abaissant le taux de désacidification de 40% à 37% dans le réservoir. Le jus dilué est alors pompé dans le module d'électrodialyse pour atteindre un taux de désacidification de 40%. Une partie de ce jus se rend à la prochaine étape de transformation. Comme dans le procédé batch, la solution de récupération (R-2) et la solution de NaCl (R-3) sont pompées en continu à travers le module d'électrodialyse.

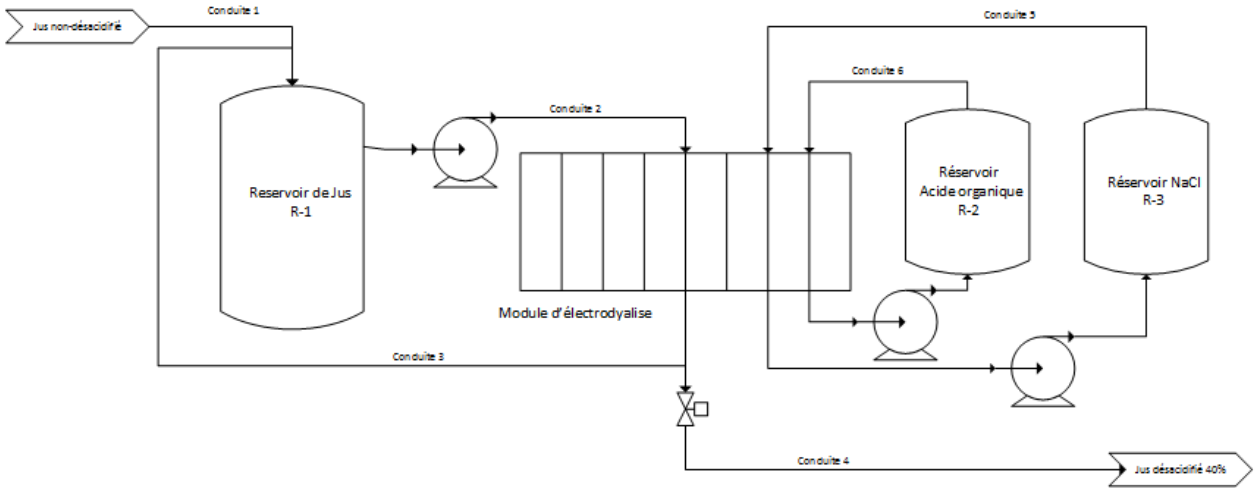


Figure 4.1 Procédé de désacidification par membrane échangeuse d'ions dans un contexte industriel

L'usine pilote a démontré que 10 L peuvent être désacidifiés en 60 minutes. Pour cela, le jus devra passer dans la cellule d'électrodialyse à un débit de 2 L/min en boucle [56]. Pour obtenir le bilan de masse du procédé industriel, il faut déterminer le taux de désacidification de chaque passage dans le module d'électrodialyse de l'usine pilote. La prochaine équation

permet de trouver le temps nécessaire pour que tout le volume de jus passe dans le module :

$$t_{\text{cycle}} = (V)/\dot{M} = 10\,\text{L}/2\,\text{L/min} = 5\,\text{min} \tag{4.1}$$

Où t_{cycle} est le temps nécessaire pour un cycle de désacidification, V est le volume total de jus et $\dot{M}$ est le débit volumique de jus dans le module de l'usine pilote.

Afin de trouver le nombre de cycles nécessaires pour désacidifier le volume de 10 litres de l'usine pilote, il faut utiliser l'équation suivante :

$$N_{\text{cycle}} = t_{\text{tot}}/t_{\text{cycle}} = 60\,\text{min}/5\,\text{min} = 12\,\text{cycles} \tag{4.2}$$

Où N_{cycle} est le nombre de cycles et t_{tot} est le temps total de désacidification.

Enfin, pour trouver le taux de désacidification réalisé par un passage dans le module, il faut utiliser l'équation suivante :

$$\text{Taux}_{\text{cycle}} = \text{Taux}_{\text{total}}/N_{\text{cycle}} = 40\%/12\,\text{cycles} = 3.33 \text{ unité de } \%/\text{cycle} \tag{4.3}$$

Où $\text{Taux}_{\text{cycle}}$ est le taux de désacidification par cycle et $\text{Taux}_{\text{total}}$ est le taux total de désacidification.

Ce taux de désacidification par cycle est une approximation basée sur les données de l'unité pilote, mais permet tout de même de fixer le taux de désacidification dans le réservoir à 37%. L'usine devant opérer à un débit de production de 5 000 L/hr [58], le débit de jus dans la conduite 2 doit être de 60 000 L/hr. La pompe devra pomper à un débit 30 fois plus élevé que le débit de sortie.

La quantité de ressources nécessaires pour la membrane et les anodes est calculée en fonction d'une ACV sur la séparation du lait qui utilise une technologie similaire [62]. Le tableau 4.1 montre les données de l'utilisation de la technologie EDBM utilisée pour 39098 L de lait et la mise à l'échelle pour 1000L de jus de canneberge. Cette mise à l'échelle est faite avec une règle de trois sauf pour l'électricité nécessaire pour les pompes. Un facteur 30 a été ajouté à l'énergie fournie aux pompes. En effet, ces données ont été prises en laboratoire sur un procédé batch qui ne nécessite pas une boucle de réutilisation du jus. C'est cette boucle qui nécessite de pomper un débit 30 fois supérieur au débit de sortie et multiplie par 30 l'énergie fournie à la pompe. Il ne reste qu'à déterminer l'énergie nécessaire pour le module d'électrodialyse et l'énergie totale du procédé pour avoir toutes les informations nécessaires à la modélisation.

Tableau 4.1 Mise à l'échelle du procédé de désacidification par membranes échangeuses d'ion

Paramètres	EDBM lait	Unité fonctionnelle
Quantité de fluide traité	39098 L	1000 L
Deionized water	30529 kg	780 kg
NaCl	182 kg	4.7 kg
Polysulfone	0.0607 kg	0.0016 kg
Polyvinyl chloride	0.0326 kg	0.00083 kg
Styrene	0.0751 kg	0.0019 kg
o-Diethylbenzene	0.00489 kg	0.00013 kg
m-Diethylbenzene	0.00489 kg	0.00013 kg
Trimethylamine	3.9×10^{-6} kg	9.9E-8 Kg
Sulfuric acid	8.43×10^{-6} kg	2.2×10^{-7} kg
Anode	9.1×10^{-5}	2.3E-6 kg
Polypropylene	9.1×10^{-5} kg	2.3E-6 kg
Steel	$9.1 \times 10^{-5}1$ kg	2.3E-6 kg
Electricity	1.36 kWh	1.04 kWh

Pour déterminer l'énergie nécessaire à la cellule d'électrodialyse, les mesures de tension et de courant prises par Faucher et al. [56] sont utilisées. L'énergie est l'intégrale de la tension ($V(t)$) et du courant ($I(t)$) en fonction du temps comme présenté dans l'équation 4.4.

$$\mathrm{E_{Up}} = \int_{t_1}^{t_2} V(t) * I(t)dt = 39\,\mathrm{Wh} \tag{4.4}$$

Où $\mathrm{E_{Up}}$ est la quantité d'énergie utilisée par l'usine pilote lors de la désacidification de 10 litres de jus. L'équation 4.5 détermine l'énergie totale en additionnant l'énergie nécessaire au module d'électrodialyse et l'énergie nécessaire aux pompes.

$$\mathrm{E_{Uf}} = \mathrm{E_{Up}} * (\mathrm{UF}/10\,\mathrm{litres}) + \mathrm{É_{pompe}} = 4.95\,\mathrm{kWh} \tag{4.5}$$

Où $\mathrm{E_{Uf}}$ est l'énergie nécessaire pour désacidifier l'unité fonctionnelle, UF est l'unité fonctionnelle et $\mathrm{É_{pompe}}$ est l'énergie fournie à la pompe.

4.1.2 Désacidification par résine échangeuse d'ions

Les ressources et l'énergie nécessaires à la désacidification par résine échangeuse d'ions doivent être déduites pour un procédé industriel. Pour cette opération, le procédé se fait avec une colonne d'adsorption comme schématisée à la figure 4.2. Lors de la désacidification, les valves 2-03 et 2-04 sont fermées et le jus arrive par la conduite 1. Une partie du jus traverse la colonne

où 96% des ions acides seront retirés. Ensuite, ce jus désacidifié sera mélangé au reste du jus brut pour atteindre un taux global de désacidification de 40%. Pendant la régénération, les valves 2-01 et 2-02 sont fermées alors que les valves 2-03 et 2-04 sont ouvertes. Le régénérant est pompé de bas en haut dans la colonne d'adsorption.

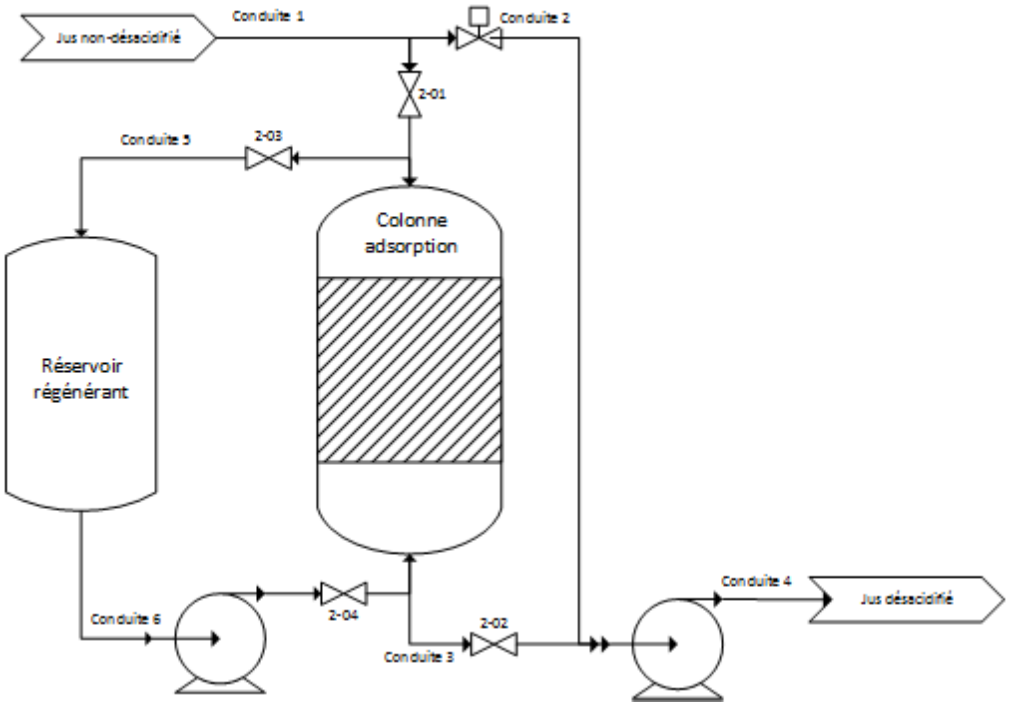


Figure 4.2 Procédé de désacidification par résine échangeuse d'ions dans un contexte industriel

Pour un cycle de désacidification, les flux de matière sont déterminés en fonction du volume de résine présent dans la colonne. Le tableau 4.2 présente les flux nécessaires pour chaque cycle de désacidification ainsi que le nombre de réutilisations possible pour chaque flux. Enfin, les flux mis à l'échelle sont présentés en fonction de l'unité fonctionnelle. Comme le taux de désacidification de la résine est de 96%, le jus sortant doit être mélangé au jus brut, produisant 2.4 litres de jus désacidifié à 40% pour chaque litre de jus passant par la colonne. La résine peut être utilisée pendant 5 ans.

La base de production étant de 5000L/h [58] à 40%, il faut que la colonne traite 2082 litres de jus à 96% de désacidification. Comme le traitement doit être fait en continu, il faudra deux colonnes d'adsorption. La première colonne sera régénérée pendant que la seconde sera en phase de désacidification. Un estimé du volume de résine peut être réalisée.

L'énergie fournie aux pompes est déterminée par la hauteur de la colonne. Cette information permet de déterminer la perte de charge lors de la désacidification et lors de la régénération. Le volume de résine nécessaire permet de calculer la hauteur de la colonne.

Tableau 4.2 Mise à l'échelle du procédé de désacidification par résine échangeuse d'ions

Flux de matière	Cycle de désacidification	Réutilisation	Unité fonctionnelle
Volume de résine	1 litre	25 000 000 [52]	8×10^{-6} litre
Volume de jus traité	2 litres	-	416 litres
Volume de jus à 40%	4.8 litres [66]	-	1000 litres
Volume de régénérant	5 litres	20 [53]	52 litres
Masse NaOH	26 g	20 [66]	274 g
Volume d'eau	12 litres [53]	1	2500 litres

Le fournisseur de résine fournit certains paramètres présentés au tableau 4.3 permettant de déterminer la hauteur de la colonne nécessaire pour cette application [66].

Tableau 4.3 Paramètre fournit par le fournisseur de résine

Paramètre fournis	Minimum	Maximum
Hauteur de la colonne	0.7 m	-
Débit	15 volume /h	-
Ratio colonne (hauteur/largeur)	2	4
Perte de charge désacidification	1Kp/m/(m/hr)	-
Vitesse de régénération	2 BV/h	8 BV/h

où la vitesse de régénération est exprimée en volume de résine (Bed volume) par heure (BV/h)

Le diamètre est calculé à partir du volume de résine et du ratio hauteur/largeur de la colonne comme présenté dans l'équation 4.6.

$$\mathrm{D} = \left(\frac{\mathrm{V_{Résine}} * 4}{\mathrm{Ratio} * \pi} \right)^{1/3} \tag{4.6}$$

Où D est le diamètre de la colonne, $\mathrm{V_{Résine}}$ est le volume de résine et Ratio est le ratio hauteur/colonne. Ces informations permettent de calculer la hauteur de la colonne avec l'équation 4.7.

$$\mathrm{h} = \mathrm{Ratio} * \mathrm{D} \tag{4.7}$$

La perte de charge en fonction de l'épaisseur de résine est fournie par le producteur de résine [66]. Cette perte de charge dépend de la viscosité du fluide et de sa vitesse. Lors de la régénération, la perte de charge dépend aussi de l'expansion du lit de résine. Cette information est fournie en fonction de la vitesse du fluide de régénération [66]. La vitesse du liquide nécessite de connaître la surface de la coupe de la colonne avec l'équation 4.8.

$$S_{Coupe} = \pi * (D/2)^2 \tag{4.8}$$

où h est la hauteur de la colonne et S_{Coupe} est la surface de la coupe de la colonne.

Lors de la désacidification, chacune des colonnes doit traiter 1041 litres en moins de 30 minutes. L'équation 4.9 montre le calcul de la vitesse du jus, v_{Jus} en fonction du débit massique, $\dot{M}_{jus}$ et de la surface de la coupe, S_{Coupe}.

$$v_{Jus} = \frac{\dot{M}_{jus}}{S_{Coupe}} \tag{4.9}$$

La perte de charge lors de la désacidification, $\Delta P_{résine}$ est calculée à partir de la vitesse du jus et la hauteur de la colonne présentée à l'équation 4.10. Le facteur qui convertit une épaisseur de résine et une vitesse de jus en perte de charge, F_{Charge}, est fourni par le fabriquant et est de 1 kPa/(mètre de résine·m/s), pour une viscosité de 1 cp [66].

$$\Delta P_{résine} = v_{Jus} * h * F_{Charge} \tag{4.10}$$

La perte de charge réelle que la pompe devra compenser est la somme de la perte de charge dans la résine et de la hauteur à laquelle le fluide doit se rendre. À l'équation 4.11, la perte de charge causée par la résine, $\Delta P_{résine}$, est additionnée à la perte de charge issue de la hauteur. La hauteur doit être divisée par la gravité normale g et la densité du jus ρ_{jus} pour représenter la perte de charge (en Pascal).

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{résine} + \frac{h_{total}}{g * \rho_{jus}} \tag{4.11}$$

Comme les paramètres fournis par les producteurs de la résine sont des données maximales et minimales, les pertes de charge ont été calculées pour les extrêmes. La puissance est calculée en fonction de cette perte de charge et du débit. L'énergie est calculée en fonction de la durée de chaque étape. Le tableau 4.4 montre les résultats de pertes de charge, de puissance et d'énergie fournie. Ces résultats sont calculés pour une production de 5000 litres/h comme dans le contexte industriel. Une mise à l'échelle est faite pour que l'énergie utilisée corresponde à l'unité fonctionnelle.

Une analyse de sensibilité a été réalisée sur la consommation d'énergie en utilisant le minimum et le maximum d'énergie calculée dans cette section. Comme il n'y avait pas de différence significative dans les résultats d'analyse du cycle de vie, il n'y a pas eu d'effort investi pour

Tableau 4.4 Perte de charge de la désacidification du jus de canneberge par résine échangeuse d'ions

Paramètre fourni	Minimum	Maximum
Désacidification	17 Kpa	60 Kpa
Régénération	21 Kpa	41 Kpa
Puissance	12 Wh	144 W
Énergie	6 Wh	70 Wh
Énergie moyenne	38 Wh	
Énergie de l'unité fonctionnelle	7.6 Wh	

diminuer l'incertitude de cette donnée.

4.2 Valeur et éco-efficience

L'évaluation de la valeur des trois différents jus ne pouvait pas être réalisée sur une base économique puisque le prix de marché des jus désacidifiés n'est pas connu. De plus, les coûts de production ne sont pas connus précisément pour des raisons de confidentialité. Trois paramètres d'évaluation de la valeur sont proposés, soit la teneur en polyphénols, la proportion d'acide retiré et le goût du produit.

L'utilisation de la teneur en polyphénols comme paramètre se justifie par l'attirance des consommateurs envers les produits concentrés en polyphénols. Ce sont ces polyphénols qui auraient un impact sur la santé des consommateurs. La compagnie Fruit d'Or a confirmé que l'impact santé de leur jus est un incitatif pour leur client. Plus la teneur en polyphénols est élevée, plus la valeur du jus est importante. Le paramètre de la proportion d'acide ayant un effet négatif retiré se justifie par leurs effets indésirables. Ce seraient les acides citrique et malique qui créent les inconforts et ce sont ces deux acides qui sont mesurés. Plus la quantité d'acide retiré est élevée, plus la valeur sera élevée. Finalement, le goût est utilisé comme indicateur de la valeur du jus. Un panel constitué de sept personnes a goûté les différents échantillons et a attribué une note entre 1 et 10. Plus la note est haute, plus la valeur du jus est élevée. Les détails des méthodes d'évaluation utilisées dans ce mémoire sont présentés au chapitre 5.

CHAPITRE 5 ARTICLE 1: THE COST IS NOT ENOUGH - AN ALTERNATIVE ECO - EFFICIENCY APPROACH APPLIED TO CRANBERRY DE - ACIDIFICATION

5.1 Transition

Ce chapitre fait l'objet d'un article intitulé: «The cost is not enough - An Alternative Eco-Efficiency Approach Applied to Cranberry De-Acidification» Présenté au Journal of Cleaner Production

Les auteurs sont : Camille Chaudron (Candidate à la maîtrise: planification et réalisation des expériences, analyse des résultats et rédaction de l'article), Mélanie Faucher (Collaboratrice scientifique du projet), Laurent Bazinet (Co-directeur de thèse: Supervision scientifique, correction et révision du manuscrit) et Manuele Margni (Directeur de thèse: supervision scientifique de l'étudiante, correction et révision du manuscrit).

5.2 Résumé

La production et la transformation des aliments ont un impact environnemental grandissant. Les outils aidant les industries à améliorer leur bilan environnemental et à augmenter la valeur de leur produit sont nécessaires. L'étude suivante répond à ce besoin en présentant une nouvelle approche pour calculer l'éco-efficience d'un produit alimentaire en utilisant sa valeur fonctionnelle. Plutôt que d'utiliser une valeur monétaire, cette étude propose l'utilisation d'un système de valeurs plus proche des intérêts du consommateur, c'est-à-dire le goût, la concentration en nutriments et la diminution de substances nuisibles. Cette approche a été utilisée lors d'une analyse d'éco-efficience de la désacidification du jus de canneberge selon deux technologies différentes: la désacidification par résine échangeuse d'ion (IER) et la désacidification par électrodialyse avec membrane bipolaire (EDBM). Les deux jus ont été comparés au jus de canneberge non désacidifié (NDA). La valeur des jus a été mesurée en fonction de la concentration de polyphénols, du goût du produit et de la quantité d'acide retiré. Les résultats montrent que l'utilisation de l'IER est moins éco-efficiente que le jus NDA pour les résultats de teneur en polyphénols et de goût du produit, mais montre un meilleur résultat pour la quantité d'acide retiré. La technologie EDBM permet de retirer les acides sous une forme réutilisable, permettant de les revaloriser. Quatre méthodes de revalorisation ont été testées et les résultats montrent que la méthode choisie a un impact sur la conclusion de l'analyse d'éco-efficience. L'utilisation de système de valeur plus proche des intérêts de

la clientèle rend l'éco-efficience plus pertinente pour la prise de décision, particulièrement lorsque la valeur monétaire n'est pas dispon

5.3 Abstract

Food production and transformation have an increasing impact on the environment. Tools to help the agri-food industry improving its environmental performance whilst increasing the value of the products are highly needed. The present study proposes a new approach to calculate eco-efficiency that goes beyond the production costs, but accounts for the functional value of the foodstuff. Instead of using the monetary unit as the product value, we propose value-based metrics closer to consumer interests, such as content of functional nutrients, taste and abatement of harmful substances. The approach was applied to evaluate the eco-efficiency of de-acidified cranberry juice by two alternative technologies in Quebec: ion-exchange resin process and de-acidification by electrodialysis with a bipolar membrane. Both are compared to non-de-acidified cranberry juice. The parameters chosen to quantify cranberry juice are polyphenol content, product taste, and percentage of harmful acid removed. Results show ion-exchange resin de-acidified juice is less eco-efficient than non-de-acidified cranberry juice for polyphenol content and product taste indicator but shows better results for the removed harmful acid parameter. The electrodialysis with a bipolar membrane technology allows the extraction of organic acids in a usable form. We evaluated their re-utilization in four different contexts showing that this context choice might have a key impact on the eco-efficiency conclusion. The most eco-efficient scenario is the utilization of the removed acid in dried cranberry production with the addition of sugar beet. By using an approach closer to consumers' interests, eco-efficiency results can be more relevant for decision making in the context of cleaner production, particularly when the monetary value is not reliable.

5.4 Introduction

Food production has a significant impact on the environment. For instance, it is responsible for annual releases of 3.3 G tonnes of CO2 equivalent [67], which is about 24% of the overall worldwide GHG emissions [68]. It is also responsible for 92% of humanity's water footprint [67]. The increase in human population and the growing food demand set the challenge for the food industry to raise the productivity [69] in a context of increased competition on use of land and where the crop yields might be affected the climate change driven effects such as increased water scarcity, rising global temperatures, and extreme weather events [70].

Increasing the yield of agricultural production have to come with a more efficient use of the agricultural feedstock in the food industry, decreasing food waste and losses, maximizing the use of co-products and foster material loops through an improved eco-design of the product value chains.

This study is about cranberry juice production. Cranberry juice has the reputation to reduce the risk of a bladder infection for certain woman [71] due to the anti-adhesion effect of the cranberry proanthocyanidins (PAC) [4]. The PAC also decrease inflammatory effect [72] which contributes to the development of diseases like cancer, type 2 diabetes, and cardiovascular diseases. Recent studies demonstrate PAC's positive effect on postprandial glucose excursions[73] and that cranberry's phenolic compounds have anticancer properties [74].

On the other hand, cranberry's high acid content induces moderate to severe gastrointestinal disturbances [36] that lead to 40% of the drop-out in the clinical studies. Plus, 30% of the participates refuse the study due to the cranberry juice strong acidic taste [35]. This side-effect limits the ingestion amount, thereby limiting PAC's health effects. To protect the intestinal cell barrier integrity and make the product more drinkable, at least 37% of the acid should be removed by de-acidification [41]. Several de-acidification technologies exist to increase the value of the product, but adding a step to the cranberry juice production can increase the environmental impact. Eco-efficiency is a management tool that relates life cycle environmental indicators and product value to support decision making [19]. It aims to identify scenarios that decrease environmental impact while increasing the product value. Indeed, to improve the eco-efficiency one can choose a different supplier, change to a greener process or technology, or develop a product with a stronger valued market. The life cycle assessment (LCA) is recommended to evaluate the environmental impact of resource consumption and emissions over the whole lifecycle.

In most cases, eco-efficiency studies in the agro-food sector define the product value by the monetary unit, such as the potential benefits of a crop[75] , the economic value added of a change in the product line or activities net sales [21]. To our knowledge so far, no studies determined the value base on the functional value of a foodstuff. According to ISO, «product system value may encompass different value aspects, including functional, monetary, aesthetic, etc» [19]. By using different value indicators, the decision maker could target his decision on important product functionalities the consumer is looking for, beyond price.

The aim of this study is to support the eco-design of new transformation technologies in the food industry by the development of an eco-efficiency based approach that addresses the functional value of foodstuff and illustrates the necessity to adopt a holistic view beyond the process itself. More specifically, a non-de-acidified cranberry juice was compared

to a de-acidified cranberry juice obtained by two distinct de-acidification processes: electro-dialysis with bipolar membranes and ion-exchange resins, respectively. The environmental performance of each option were first evaluated by applying the Life cycle assessment (LCA) approach. Then several new functional value metrics was proposed to integrate into an eco-efficiency approach together with LCA results and discuss the benefits of such an alternative eco-efficiency approach applied to the cranberry de-acidification case study.

5.5 Methodology

5.5.1 Juice production scenarios

Two different de-acidification technologies were identified as an alternative to a non-de-acidified juice which is the base scenario.

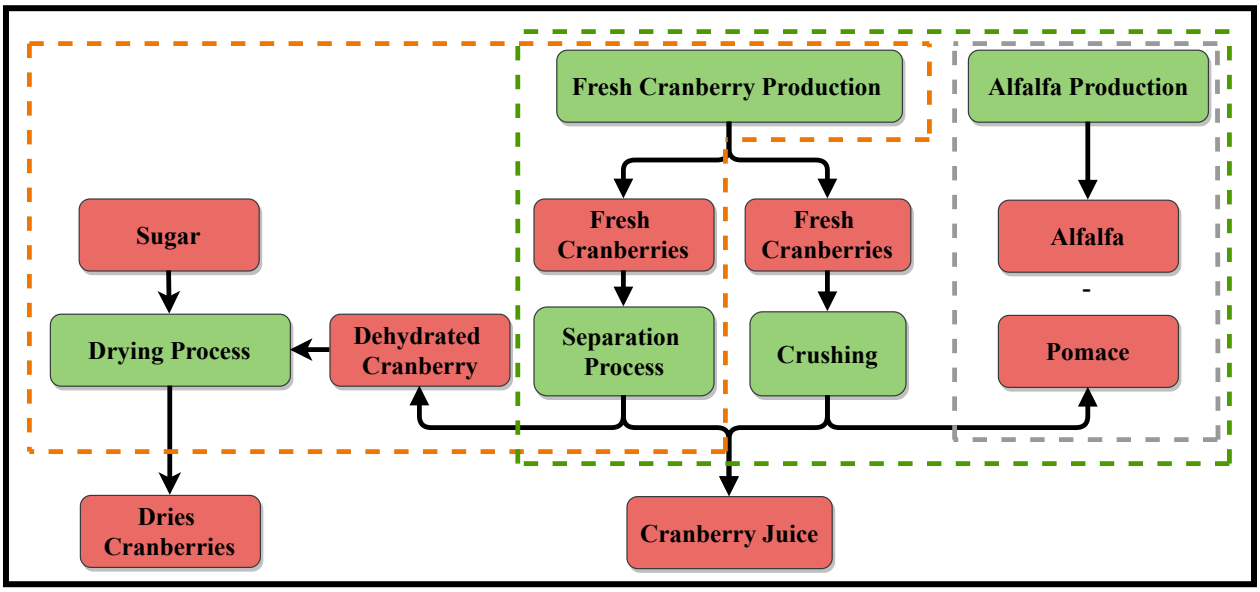


Figure 5.1 System boundaries of 1000 liters Non-de-acidified cranberry juice production (NDA)

In the NDA scenario, fresh cranberries are produced in the Quebec province of Canada, according to organic standard and certified by Bio-Ecocert. Dried cranberries and cranberry juice are produced out of fresh cranberries as presented in Figure 1. The juice is made of crushed cranberries and collected juice through a separation process to dehydrate the fruits. The solid part of the fruit will be sweetened and dried into dry cranberries. The crushing process generates pomace as a co-product which is given for animal feedstuff. Figure

1, identify cradle to gate system boundary that includes fresh fruit production and juice production.

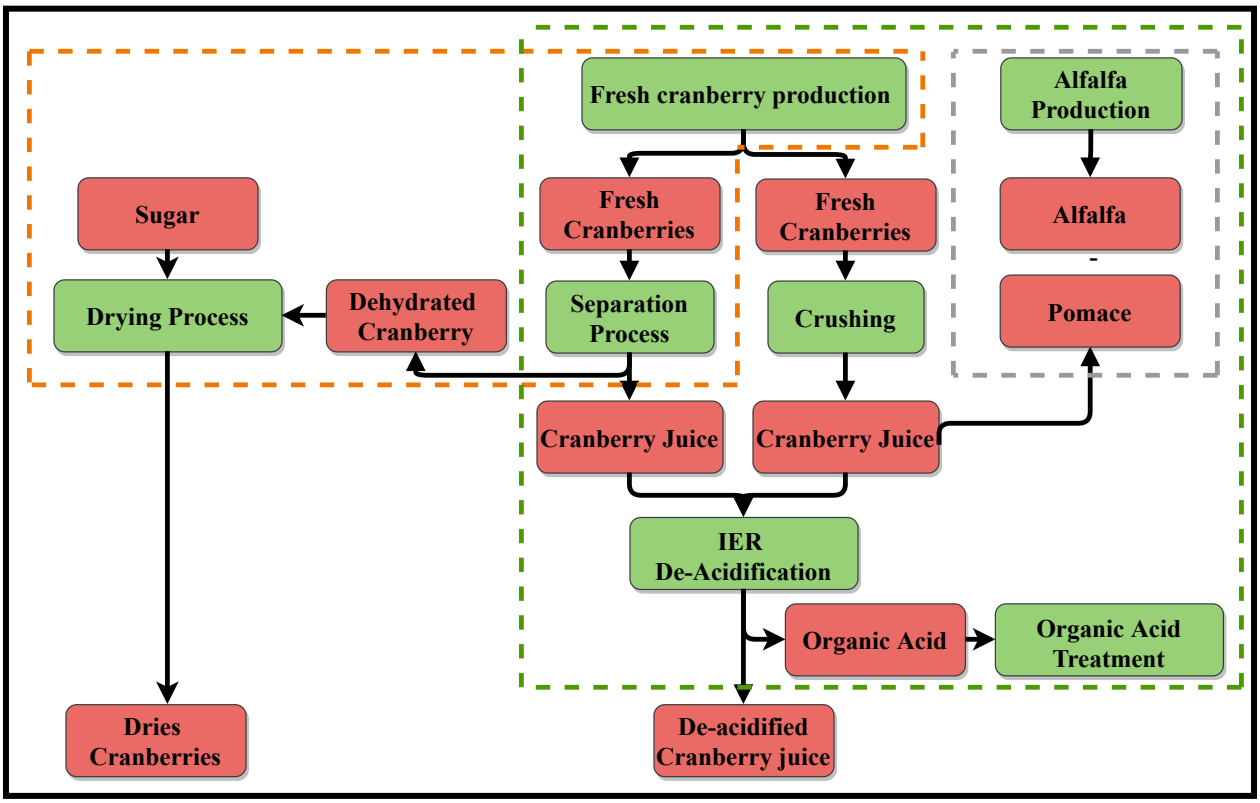


Figure 5.2 System boundaries of 1000 liters De-acidified cranberry juice production by ions exchange resin process (IER)

In the IER scenario, a de-acidification process follows the cranberry juice produced as per the scenario NDA. The de-acidification is made with a Weakly Basic Anion Exchanger with a Phenol-formaldehyde resin. A share of the juice goes through an ion exchange resin packed column that exchange 95% of the acidic ions for OH- ions. The de-acidified juice is mix with non-de-acidified juice to reach a 40% de-acidification rate. The ion exchange resin needs frequent regeneration to keep efficiency and rising water. This regeneration is processed by passing high content of NaOH solution in the ion exchange resin packed column. In contact with the NaOH, the ions exchange resin releases the organic acid ions and absorbs OH- ions. As organic acids ions diluted in a chemical solution cannot be reused, they have to be neutralize and treated through a waste water treatment plant from municipal sewage as considered within the system boundary shown in Figure 2.

The EDBM scenario implies electrodialysis with bipolar membranes with is an electromem-

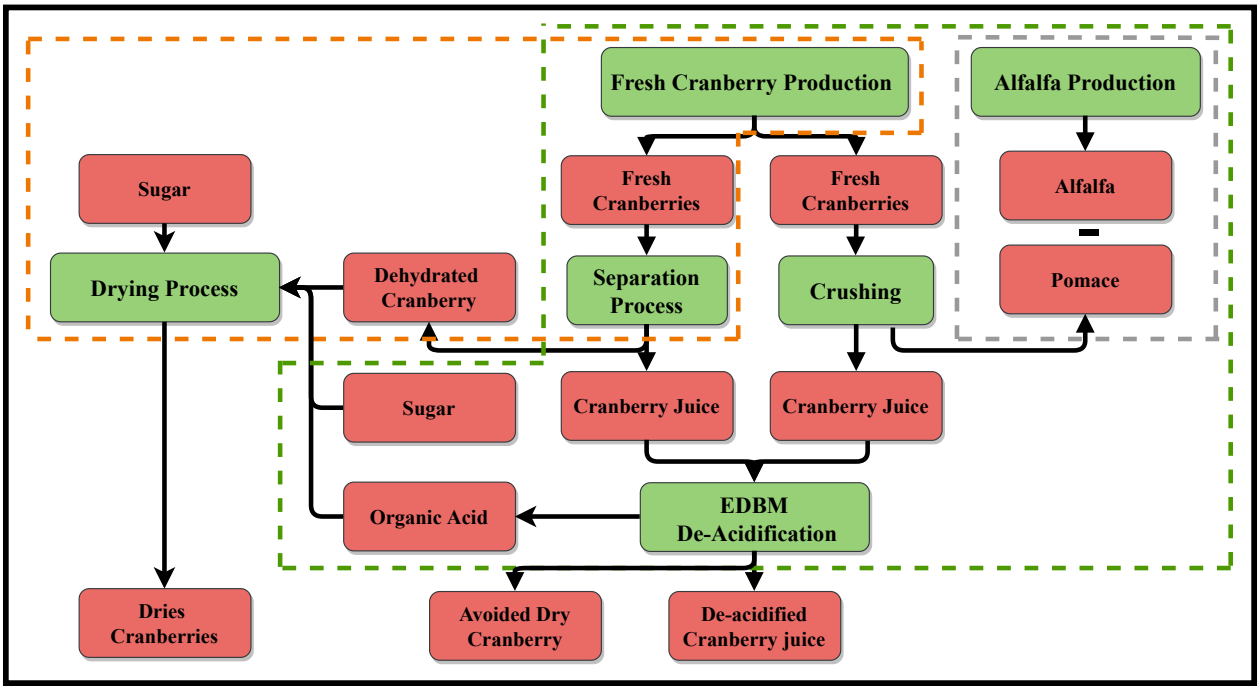


Figure 5.3 System boundaries of 1000 liters De-acidified cranberry juice production by electro-dialysis with bipolar membranes (EDBM)

brane process. The EDBM cell configuration consists of two compartments forms by two bipolar membranes and one anion exchange membrane (Serre et al., 2016). The cranberry juice passes through a compartements and an organic avid recovery solution is in the other one. Citric and quinic organic acids across the anion exchange membrane from juice to organic acid recovery solution. It allows to separate citric and malic organic acids that can be re-used for several other purposes in the food industry.

Acids could be re-used to respect circular economy creeds. For example, organics acids can be reused internally in the drying process with an addition of sugar. As the amount of needed sugar is unknown a the current stage of development, we estimated its quantity based on the sugar/acidic ratio of the dried cranberry. The increase in dried cranberries production is presented in Figure 3. Usually, in dried cranberry process Brazil sugarcane is used, but alternative supply, such as sugar beet, are also available. Recovered citric and quinic acids could also be re-used as a preservative agent in foodstuff. Finally, recovered acids could simply be wasted without re-utilisation as it is in the IER Scenario. The different possibilities are presented on Table 1.

Table 5.1 Four different contexts for the EDBM scenario with the added input and the avoid product

	Context	
Scenario	Added input	Avoid product
Sugarcane	44 Kg Brazilian Sugar canne	121 Kg Avoid Dried Cranberries
Sugar beet	44 Kg Brazilian Sugar canne	121 Kg Avoid Dried Cranberries
Preservative agent	-	55 Kg Avoid Benzoic Acid
No reuse	-	-

5.5.2 Life Cycle Assessment

This Life Cycle Assessment was conducted according to ISO 14044 to compare the three different scenarios for cranberry juice production. The functional unit is 1000 liters of cranberry juice at the cranberry's transformation plant. The product systems described in Figure 1, 2 and 3 include several multifunctional processes, where allocation needs to be modeled. In all scenario, the Fresh Cranberry Production and Separation Process impacts were allocated to Cranberry Juice and Dehydrated Cranberry according to mass attribution. System expansion is applied for the valorization of Pomace as an animal feedstuff, substituting alfalfa based on the calorific content. In the EDBM scenario, all three valorization pathways of the extracted organic acid are modeled through system expansion. In the case of internal valorization through the drying process, the impact of added sugar to balance the sugar/acid ratio of dried cranberries is accounted for, whilst the impact corresponding to the avoided dry cranberry production is subtracted. Two different sugar sources were tested: American sugar beet and Brazilian sugar cane. In the case organic acids are used as a preservative agent they replace an equivalent amount of 121kg and 55kg respectively. The ecoinvent v3.4 version is used to model the life cycle inventory of the supply chain, where as the IMPACT2002+ [15] methodology was used to determine the life cycle impact assessment profile. LCA results were computed using the Open-LCA software.

Primary data for fresh cranberry production and non-de-acidified juice production were provided by the company Fruit d'Or [76], from five Quebec different farms in 2015 and 2016. The data collected include land used electricity and diesel consumption (see Table 2). Total production of 2016 and 2017 was 13 500 tons on a total of 300 acres field. Details on the the input parameters are presented in the supplementary material (Table1.1, Table1.2 and Table1.3).

For the juice production from fresh cranberries, data were provided by the juice producing

Table 5.2 Main inventory data used needed for the production of 1000 liters of de-acidified Cranberry juice

Fresh Cranberry Production			
Input	NDA	IER	EDBM
Land use (M^2)	510	521	520
Electricity (kWh)	96	100	100
Diesel (MJ)	4990	5089	5089
Crushing			
Heat (MJ)	180	181	181
Electricity (kWh)	232	234	234
Separation process + Drying process			
Electricity (kWh)	232	234	234
Heat (MJ)	2230	2293	2293
De-acidification			
Electricity (KWh)	0	7.42	4.95
Deionised water (Ton)	0	3.6	0
Sodium hydroxide NAOH (g)	0	274	0

company Fruit d'Or[58]. Data include used electricity, heat, and transport (see Table 2). Primary data were estimated from different sources for both de-acidification technologies and scaled up to the functional unit. For the ion exchange resin de-acidification process, theoretical process design building on technical sheets was used to approximate input data such as NaOH needed and water amount (see Table 2). Supporting information provides detailed information on the parameters of the theoretical design. For electro-membrane technology, the semi-industrial de-acidification cell (EUR-6) from Eurodia Industry was used for approximated inputs. It is the same as the one used by Faucher and al. (Faucher et al., 2018) and the same experimental conditions.

5.5.3 Functional value metrics

The metrics characterizing the functional value of the cranberry juice have to align with the criteria consumers are interested in when buying such a juice. According to the cranberry juice provider we collaborated with, clients select their product for healthy reasons, which are associated to a high polyphenol content (first functional value parameter we select). On the other side, the taste – particularly the acidic taste – refrain some clients to buy cranberry juice and others experience gastrointestinal disturbances [36]. We then select the percentage of removed harmful acid content as the second functional value parameter. The taste is the third functional value parameter we select, as a de-acidification process can have an impact on the composition but also on the product taste.

Juice production

To evaluate the functional value parameters of the raw and de-acidified juice we rely on the work of Faucher and colleagues [56]. They analyzed raw cranberry juice from Fruit d'Or (NDA Scenario) and two types of de-acidified juice produced by ion exchange resin (IER scenario) and Electrodialysis (EDBM scenario), respectively. For the IER Scenario, the raw juice was de-acidified with food grade resin through a weak base anion exchanger Amberlite FPA54. The resin treated two distinct juice volumes with a residence time of 15 minutes for every resin volume. The anion exchanger removed 95% of the titratable acidity which is the number of acidic ions removed. Raw juice was added to this 95% decidiferded juice to reach a 40% reduction of the titratable acidity. For the EDBM Scenario, Faucher and colleagues obtained 40% de-acidified juice with the semi-industrial de-acidification cell used to approximate input.

Analysis of polyphenol content, acidity ant taste

Faucher et al (2018) analyzed the titratable acidity to measure the equivalent de-acidification of juice obtained by the two respective de-acidification processes. Anthocyanin and Proanthocyanidin content were determined by high pressure liquid chromatography (HPLC). Acidic content such as citric, malic and quinic acid, was determined by HPLC.

Seven persons have been involved in the tasting of seven different products. The tasters were researchers from Laval University and cranberry juice plant workers. All the samples were presented in the same bottle numbered. They were asked to evaluate the sweetness taste, the acidity taste and an overall appreciation on a 0-10 scale. The mean of these three evaluations is used as the taste result.

5.6 Result and discussion

This section presents the life cycle assessment results of cranberry juice produced with IER and EDBM de-acidification scenarios compared with the NDA scenario (section 3.1); results on the functional value (quality) of the cranberry juice obtained by each of the three processes (section 3.2) and an interpretation combining both results through the eco-efficiency approach (section 3.3).

5.6.1 Life cycle assessment

In figure 5.4 the environmental impact over the whole life cycle of NDA scenario with the two de-acidified scenarios are compared. The contribution of the different activities involved in the production of cranberry juice (Fresh Cranberry Production, Separation Process, Crushing, De-acidification, Sugar and Acid revalorization) are identified by a colour code. Negative impacts represent the avoided impacts thanks to the valorization of co-products, organic acid in this case. The blue point represents the net impacts, i.e. the sum of potential impacts (positive values) and avoided impacts (negative values).

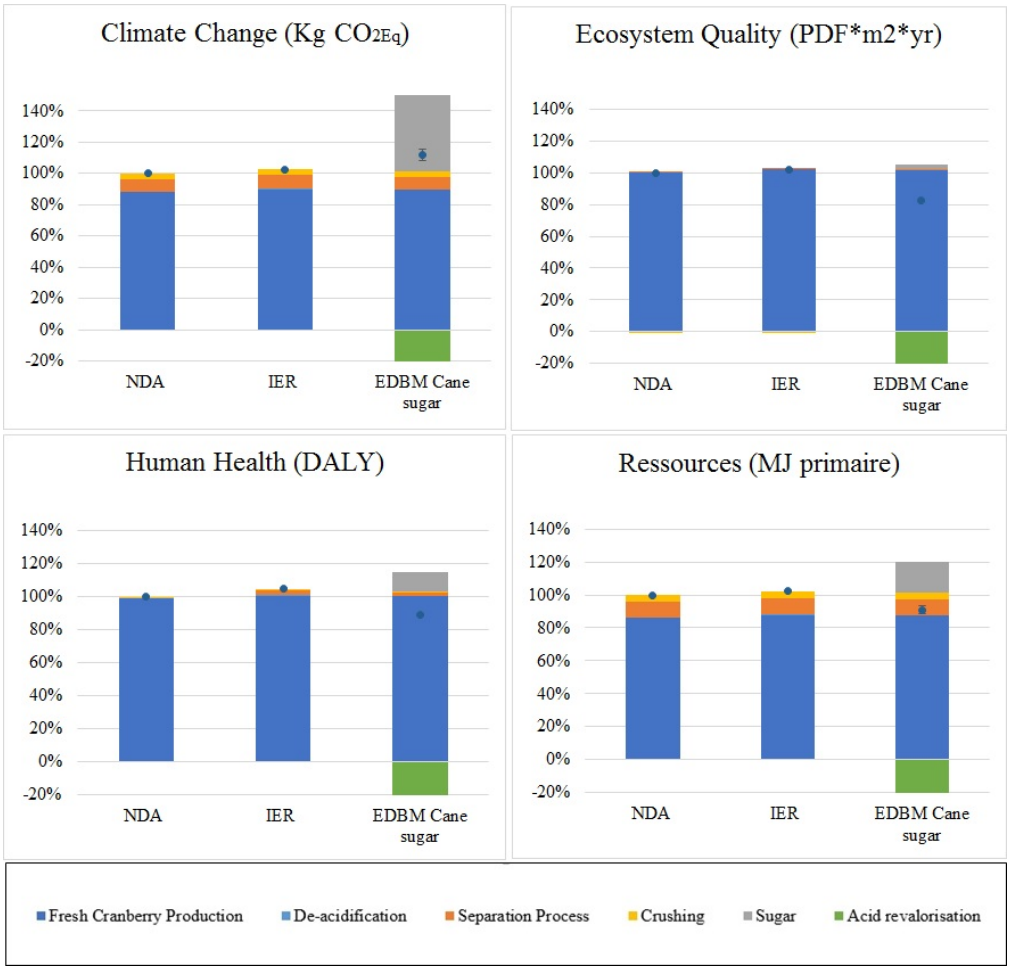


Figure 5.4 Comparative life cycle assessment of non de-acidified cranberry juice production (NDA) vs de-acidified cranberry juice by ions exchange resin (IER) process and de-acidified by electrodialysis with a bipolar membrane (EDBM). The values are expressed relative to NDA scenario (100%). Net impact absolute values (blue dot) are provided above the histogram of each scenario.

Among all processes, the Fresh Cranberry Production have the highest impact contribution,

while Separation process and Crushing contribute less than 20% regardless of the indicator. By looking only at the de-acidification step, Ion exchange de-acidification process have a bigger impact compared to EDBM de-acidification process.

The EDBM scenario has the least impact on ecosystem quality, human health and resources (850 PDF*m2*yr, 7.3E-4 DALY and 6473 MJ) followed by the NDA scenario (1028 PDF*m2*yr, 8.2E-4 DALY and 6920 MJ) and the IER scenario (1051 PDF*m2*yr, 8.6E-4 DALY and 7080 MJ). However, the EDBM scenario has 12% higher impact on climate change than NDA, because of the added sugar cane for acid valorisation in dried cranberries. IER shows slightly higher impacts on Ecosystem Quality and Human Health than the NDA scenario, essentially due to the de-acidification process. We analyzed the level of confidence of the pairwise comparison between scenarios by performing an uncertainty analysis through Monte Carlo simulations and ensuring dependent sampling within each run as described by Lesage et al. (2018). Discrimination between scenarios is robust as shown by probabilistic results of pairwise comparison presented in supplementary material (Table 3.1, Table 3.2, Table 3.3 and Table 3.4).

Alternative citric and malic organic acid valorization pathways obtained from the EDBM process are evaluated through further eco-design contexts. Sugar cane is most commonly used in Quebec, but sugar beet could be a valid alternative. Also, cranberry acid can be used as an antibacterial in food processing. Ultimately, acid can be discharged in waste water without any further use. The Figure 5.5 shows the important of considering the context in the eco-design decision. For example, using acid as a preservative product guarantees a lower environmental impact compared to NDA scenario, no matter the indicator. The electrodialysis scenario can, however, have a higher impact compared to NDA juice for climate change, because the GHG emissions from added sugar cane are higher than the avoided GHG from dry cranberry production. For the scenario without any revalorization, the impact of de-acidified juice scenarios (IER and EDBM) are always higher compared to the NDA scenario.

5.6.2 Functional value

As shown in Figure 5.6 a), the IER scenario results in a significant loss of polyphenols. This loss can be attributable to the resin that absorbed the charged molecules. No significant difference in Polyphenol content is observed between the NDA scenario and the EDBM scenario.

As presented in Figure 5.6 b), both de-acidification processes IER and EDBM significantly reduce the harmful acid content. Nevertheless Acid ion removing is more selective with the EDBM process with reducing the citric and malic content for the same de-acidification rate.

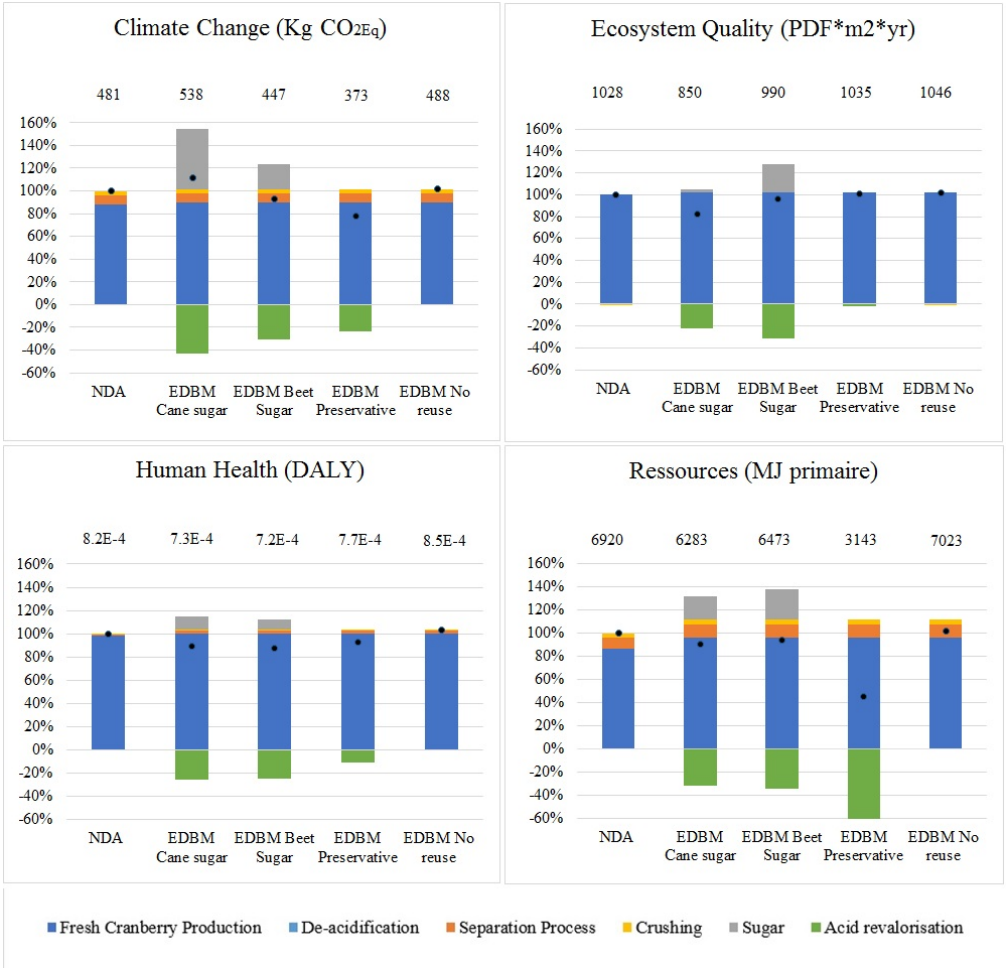


Figure 5.5 Comparative life cycle assessment results of four EDBM alternative cranberry juice production scenarios. Each of them considers alternative citric and malic acid valorization pathways. The values are expressed relative terms to the NDA scenario (100%). Net impact absolute values are provided above the histogram of each scenario

Recognizing that the methodology used for to assess the taste in this study is not robust enough - as the panel was too small and involved researchers (some of which already used to test cranberry juice) rather consumers - it provides a rough attempt to include the taste as a metric of functional value. Figure 5.6 c), indicate that the EDBM juice is slightly preferred than the NDA juice. The least preferred was the juice obtained by the resin process, because of the absence of the characteristic taste and odor of the cranberry juice. We emit the hypothesis that cranberry's aromatic molecules have a charge and because of that are absorbed by the resin and eliminated from the juice. However, other quantitative test would be necessary to verify this hypothesis.

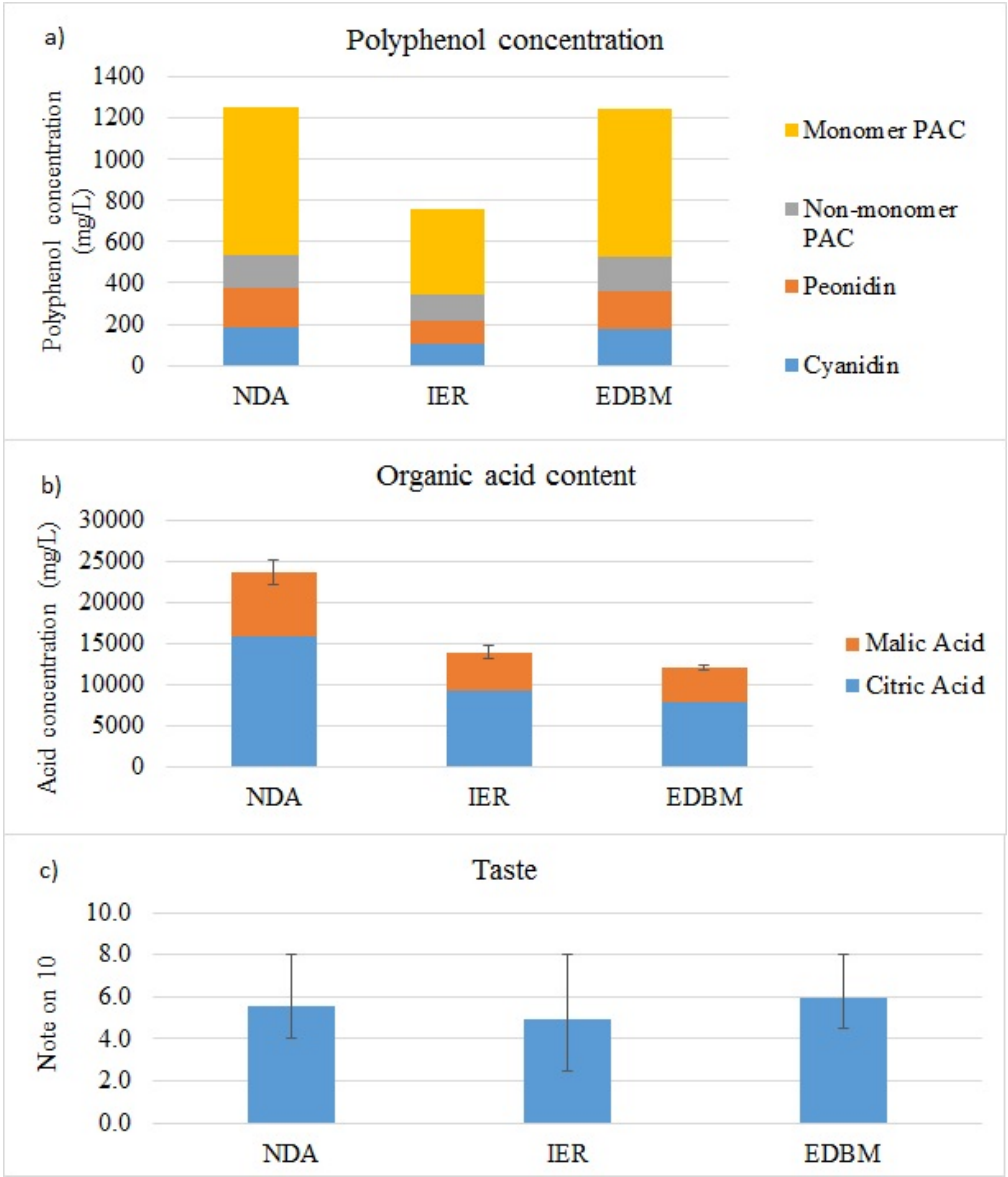


Figure 5.6 Functional value results of non de-acidified cranberry juice production (NDA) vs de-acidified cranberry juice by ions exchange resin (IER) process and de-acidified by electrodialysis with a bipolar membrane (EDBM). a) Cranberry juice polyphenol content; b) Cranberry juice Organic Acid concentration. c) Cranberry juice taste

5.6.3 Eco-Efficiency

Figure 5.7 combines functional value and environmental indicators in an eco-efficiency representation. The Raw juice is the baseline scenario, which is set at the origin of the graph. The other scenarios are placed at a distance from the origin that represent the difference in relative terms from the results of the baseline. The functional value indicators are shown

in the horizontal axis. The resin scenario (Blue) has 40% less polyphenol, 10% less taste, but 40% higher harmful acid removal as shown in Figure 5.7 a, b and c, respectively. The environmental impact indicators are shown in the vertical axis. All the impact categories are plotted in the same figure by different symbols. Three different curves are proposed to discuss

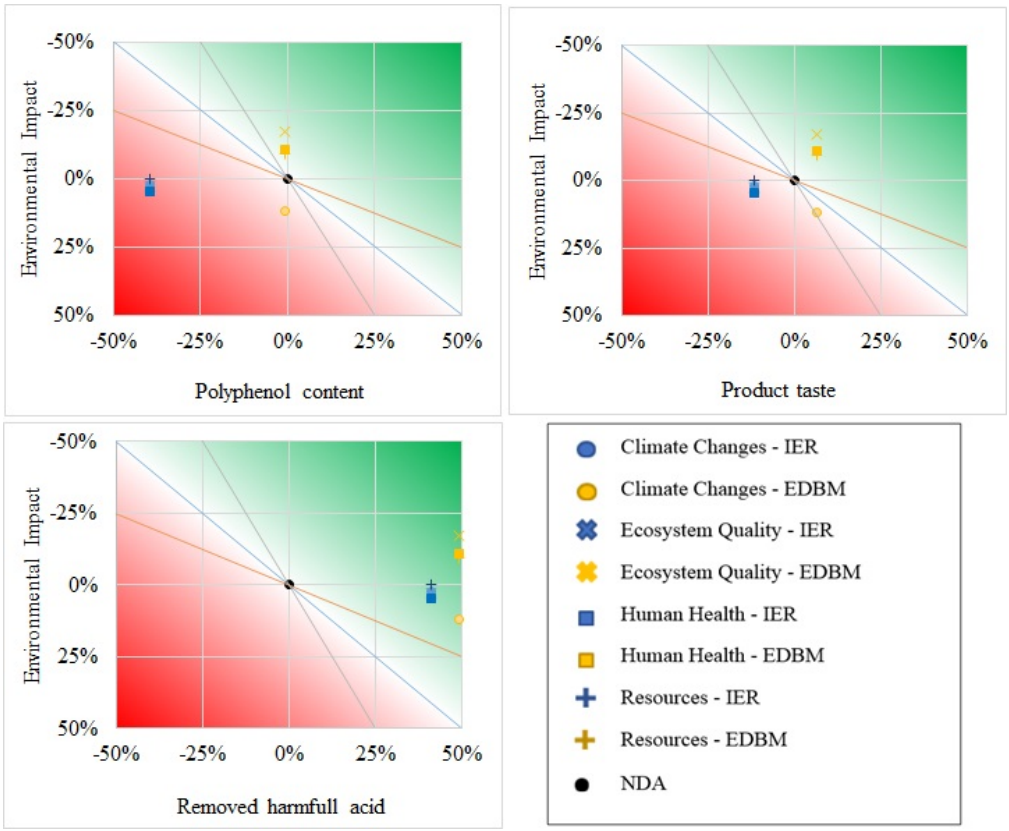


Figure 5.7 Eco-effficiency result of the comparison of non-de-acidified cranberry cranberry juice production (NDA) vs de-acidified cranberry juice by ions exchange resin (IER) process and de-acidified by electrodialysis with a bipolar membrane (EDBM). Results are express as the difference (in percentage) between the given value and the base scenario (NDA) in the origin of each figure.

the eco-efficiency of the assessed scenario. Three isolines of constant eco-efficient values are illustrated for [Impact/Value] ratio of 2:1, 1:1 and 2:1, respectively. Scenarios that fall on the same isoline have equal eco-efficiency. Scenario above the curve have a better eco-efficiency and below the curve worse. All isoline are presently shown through the origin for a direct comparison with the non de-acidified cranberry juice, but one could move such isolines up and down parallel to the respective slopes to compare different scenarios among them.

Adding a de-acidification step in the process doesn't necessarily guarantee an improved eco-efficiency. The IER scenario is less eco-efficient than raw juice scenario for all environment

indicators when using the polyphenol content or the product taste as an indicator for the value. It could be considered more eco-efficient compared to raw juice scenario on the removed harmful acid functional value indicator by an Impact/Value ratio higher than 0.05. Nevertheless it's worth to note that to claim and improved eco-efficiency in the context of a disclosure to third parties, eco-efficiency results shall demonstrate an equal or better environmental performance (section 5.7.3 of ISO 14045), which is not the case in this example.

The Electrodialysis with organic acid and sugar cane valorization scenario (shown in yellow) cannot be considered systematically more eco-efficient than the raw juice. For Ecosystem quality, human health and Resource indicators, EDBM is more eco-efficient that the other two scenarios. For the Climate change impact, the EDBM scenario is less eco-efficient compared to the NDA scenario for the Polyphenol content indicator and taste, but more eco-efficient for the removed harmful acidic content. IER scenario is less eco-efficient for polyphenol content and product taste for all environmental indicators compared to EDBM and NDA scenarios. For the Removed harmful acid IER scenario is more eco-efficient compare to NDA but less eco-efficient compare to EDBM scenario, with the exception of climate change where IER and EDBM have the same eco-efficiency.

In figure 5.8, the results are presented for all environmental impact categories but only for Polyphenol content value. It show how the context where the technology is implemented (and co-product valorized) might have an impact on the eco-efficiency conclusion. In this case study, the EDBM process with the use of extracted citric and malic acid in the production of dried cranberries with sugar beet supply is the only revalorization context that results in a better eco-efficiency than raw juice scenario for any environmental impact and any value parameter. Detailed results for all functional values are provided in supplementary information.

5.6.4 Theoretical implications, limitations and outlook

This work proposes an improved value-based eco-efficiency method with important implications for the decision making in cleaner production. First, building on the eco-efficiency concept, it stimulates the design of solutions that add value to the production system whilst minimizing the risk of burden shifting over the product life cycle (Comanita et al., 2018; Sanye-Mengual et al., 2018). Second, the use of the functional value allows overcoming the shortcomings of the cost analysis. This is particularly the case for the development of new technologies and products, where production costs are still undefined or only roughly estimated. The functional value approach does not need precise knowledge on scaled up process design. In the case of cranberry juice production, the producer was able to obtain relevant

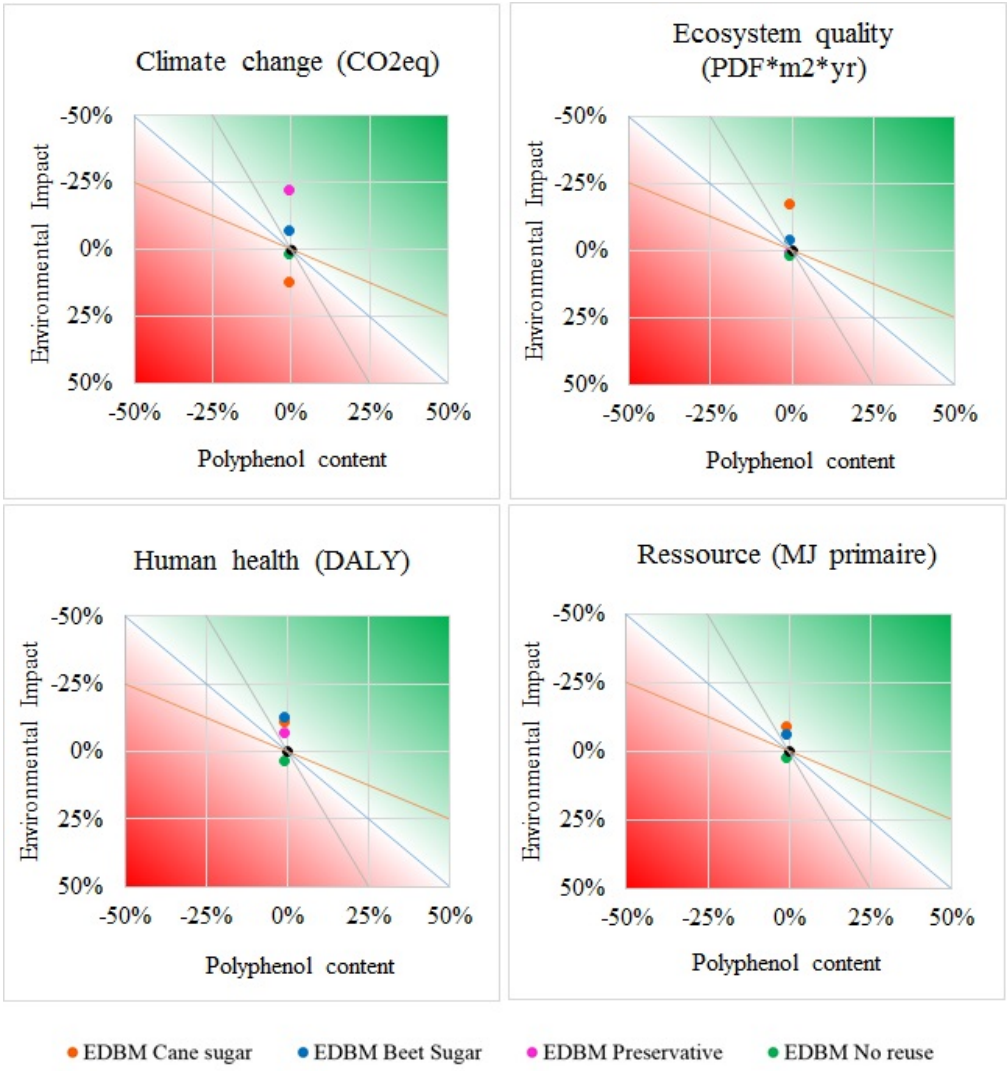


Figure 5.8 Eco-effficiency result of the comparison of non de-acidified cranberry cranberry juice production (NDA) vs de-acidified by electrodialysis with a bipolar membrane (EDBM) revalorisation context. Results are express as the difference (in percentage) between the given value and the base scenario (NDA) in the origin of each figure.

information of the product value earlier in the decisional process. Third, for a product that is sold directly to the consumer, the production cost is not representative of the perceived value, whereas the functional value is closer to the consumer's willingness to pay. In a business to business relationship, the functional value approach is probably less useful than cost, as it was the case for rapeseed and sunflower (Forleo et al., 2018), coffee grains (Ho et al., 2018) and wheat (Masuda, 2016), because the product is meant to be sold to a transformer. Finally, the composition and the taste of the juices is not the same which mean the functional unit is not the same. Using the functional value counterbalance the quality differences between

the three sample.

Some methodological limitations still need to be addressed. First, the data for the life cycle assessment are not from the same origin: the information for the IER scenario is from a simulation, while the information for the EDBM scenario comes from a pilot plant. Information's from an existing process would be a better representation. Second, the organoleptic study proves the benefit of the taste information, but it is not rigorous enough to be used as a marketing decision. Indeed, more tester would be needed to have a more representative sample of the buyers. This study provides interesting research issues for further research. The effect of the cranberry production source has not been studied as well as the effect of the electricity mix. Also, the functional value should be used for other parameter and other products.

5.7 Conclusion

This research provides a novel eco-efficiency approach for the food industry that goes beyond the monetary value, but accounts for a functional value of the foodstuff that is closer to the consumer value proposition. Applied to the case study of eco-designing a new de-acidification process for cranberry juice production, the electrodialysis de-acidification process resulted being more eco-efficient compared to the alternative resin de-acidification process and the raw non-de-acidified juice. This is true at given conditions, i.e. only if designed with the appropriate valorization scenario for recovered acid and malic acids. In this respect, our value based eco-efficiency approach allows companies to adopt cleaner production technologies that provide higher value to consumers whilst minimizing the environmental impacts across the whole life cycle.

5.8 Acknowledgements

This study was partially funded by the Sustainability Consortium and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada 418034-2012 Discovery Grant. This work was supported by the NSERC Industrial Research Chair on Electromembrane processes aiming the ecoefficiency improvement of biofood production lines [Grant IRCPJ 492889-15 to Laurent Bazinet]. We acknowledge also the financial support of the industrial partners of the International Chair in Life Cycle Assessment (a research unit of the CIRAIG): Arcelor-Mittal, Hydro-Québec, LVMH, Michelin, Nestlé, Optel, Solvay, Total, Umicore. The authors thank Jacinthe Thibodeau and Véronique Perreault, research professionals at Université Laval, for their great implication into this project.

CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE

Dans le cadre de ce mémoire, une amélioration à la méthode d'éco-efficience a été proposée pour évaluer des technologies de dés-acidification de jus de canneberge. Cette approche utilise différents facteurs fonctionnels pour quantifier la valeur de jus de canneberge en fonction des goûts des consommateurs.

Cette méthode d'éco-efficience apporte certains avantages pour l'industrie agroalimentaire quant aux choix des technologies de production qui affectent la qualité et la valeur du produit. Premièrement, son utilisation permet d'identifier le choix technologique qui minimise l'impact du produit tout en maximisant la valeur perçue par le consommateur. Ensuite, l'utilisation de la valeur fonctionnelle permet de court-circuiter le calcul de valeur économique. Dans le cas d'un choix entre des produits nouveaux ou des technologies nouvelles, éviter l'analyse de coût peut accélérer la prise de décision puisque le design précis des procédés peut être évité. Troisièmement, dans le cas de produit directement vendu au consommateur, le coût de production n'est pas nécessairement représentatif du coût perçu par le consommateur. La valeur fonctionnelle peut être plus représentative de la valeur perçue par l'acheteur. Finalement, la composition et le gout des jus comparés n'étaient pas les mêmes, ce qui signifie que l'unité fonctionnelle n'est pas la même. L'utilisation de la valeur fonctionnelle permet de contrebalancer la différence dans la qualité des trois échantillons.

Il est possible de donner un diagnostic clair quant au choix de technologie à favoriser dans cette étude. En effet, le jus désacidifié en utilisant la résine échangeuse d'ions (IER) n'a pas un bilan d'éco-efficience avantageux vis-à-vis du jus non désacidifié (NDA). Parmi les contextes d'utilisation du procédé d'électrodialyse avec membrane bipolaire (EDBM), l'utilisation du sucre de betterave lors de la revalorisation de l'acide est plus éco-efficient que la production de jus non désacidifié. Il serait donc logique de favoriser ce scénario de désacidification. L'avantage de l'utilisation du sucre de betterave versus le sucre de canne sur les changements climatiques s'explique par le procédé de production de canne à sucre qui émet une grande quantité de dioxyde de carbone. La déforestation nécessaire à la production de grandes quantités de canne à sucre en serait responsable.

Comme expliqué dans l'article, il y a certaines limitations méthodologiques à cette étude. D'abord, les données utilisées pour faire l'analyse du cycle de vie des procédés de désacidification viennent de sources différentes, soit une usine pilote et une simulation à partir de données de laboratoire. Des données provenant d'usines existantes seraient plus représentatives. Ensuite, l'analyse organoleptique montre l'intérêt de l'utilisation de cette donnée pour

le producteur de jus, mais les résultats ne sont pas représentatifs de la population due au petit nombre de participants.

Finalement, des recherches futures portant sur l'utilisation de la valeur fonctionnelle dans l'industrie agroalimentaire seraient intéressantes. Différents paramètres de valeur que ceux utilisés dans cette étude pourraient être testés et d'autres produits agroalimentaires pourraient bénéficier d'une telle analyse dans le cas d'un écodesign.

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Cette section présente un résumé des réponses aux différents objectifs et sous-objectifs de ce mémoire. Une critique est faite sur les résultats et les limitations des résultats seront expliquées. Finalement, des améliorations futures seront proposées.

7.1 Synthèse des travaux

Dans ce mémoire, une analyse d'éco-efficience a été réalisée en utilisant la valeur fonctionnelle ce qui répond à l'objectif principal. C'est une approche qui ne semble pas avoir été faite jusqu'à maintenant et qui permet de calculer l'éco-efficience d'un produit sans utiliser sa valeur son coût économique. Cette étude montre aussi la pertinence d'utiliser cet outil basé sur le concept d'éco-efficience intégrant à la fois les impacts environnementaux et sur la valeur du produit qui supporte des décisions industrielles. Cette éco-efficience a été calculée sur trois produits : le jus de canneberge désacidifié avec l'électrodialyse, le jus de canneberge désacidifié avec une membrane échangeuse d'ion et le jus de canneberge non désacidifié. Ces résultats ont été comparés et c'est l'utilisation de l'électrodialyse qui permet de désacidifier le jus de canneberge en maximisant son éco-efficience.

Trois paramètres de la valeur ont été choisis pour définir l'éco-efficience, soit la concentration de polyphénols, la teneur en acides indésirés et le goût du produit. Ces paramètres ont été sélectionnés en fonction de leur importance potentielle pour les clients visés. L'analyse du cycle de vie a aussi été réalisée sur les trois scénarios de production de jus de canneberge.

Les résultats ont été présentés aux partenaires industriels en trois étapes : la présentation des résultats d'ACV, la présentation des résultats de valeurs et la présentation de l'éco-efficience. L'analyse du cycle de vie montre que l'utilisation de l'électrodialyse a l'impact environnemental le plus faible dans les catégories d'impact suivantes : qualité des écosystèmes, santé humaine et ressource. Par contre, c'est le jus non désacidifié qui a le meilleur impact pour la catégorie changements climatiques. Les résultats de valeur montrent que le jus désacidifié avec l'électrodialyse est supérieur aux autres jus pour la concentration d'acide et le goût. Il a la même valeur que le jus non désacidifié pour la concentration de polyphénol.

Les résultats d'éco-efficience montre que le jus de canneberge désacidifié à l'aide de l'électrodialyse est avantageux comparativement au jus désacidifié avec la résine échangeuse d'ion. C'est donc l'électrodialyse qui est recommandée pour construire l'unité de désacidification du partenaire industriel.

Comme l'électrodialyse permet de récupérer l'acide organique, quatre différents scénarios de récupération ont été analysés. L'acide peut être revalorisé en conservateur alimentaire ou réutilisé dans la production des canneberges séchées avec une addition de sucre. Le sucre utilisé pour la canneberge séchée peut être du sucre de canne ou du sucre de betterave sucrière. Les deux variétés de sucre ont été testées ainsi qu'un scénario sans revalorisation de l'acide.

Seulement deux scénarios de récupération permettent au jus désacidifié d'être plus éco-efficient que le jus de canneberge non désacidifié pour toutes les catégories de dommage. Ces scénarios sont la récupération de l'acide comme conservateur alimentaire et l'utilisation de l'acide dans la production de canneberges séchées à base de sucre de canne.

7.2 Limitations et amélioration future

Il y a certaines limitations à cette étude. Premièrement, l'analyse du goût n'a pas été faite avec un panel indépendant. Puisque les goûteurs étaient tous impliqués dans le projet, ils connaissaient les produits. Cela a pu fausser les notes données au produit. Un panel plus grand permet de mieux représenter la population et le panel utilisé dans ce mémoire est très petit. Cela limite la représentativité des résultats du test de goût. Deuxièmement, la mise à l'échelle d'un procédé ne fournit pas des données aussi précises que lors de prise de mesure directe.

L'utilisation de plusieurs aspects de valeur fonctionnelle n'a pas été faite dans d'autres domaines de l'agroalimentaire. Il serait intéressant de tester cette méthode dans d'autres genres d'industries.

RÉFÉRENCES

[1] Deloitte, *Retombées économiques de l'industrie de la canneberge en 2015*, 2016.

[2] R. J. Caron, "Analyse des impacts de la production de canneberge au centre-du-Québec en fonction des objectifs de développement durable", fr, thèse de doct., Université de Sherbrooke, 2009. adresse : https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/Production_canneberges_d%C3%A9v_dur.pdf.

[3] Agriculture et Agroalimentaire Canada (last), *Les aliments fonctionnels et les produits de santé naturels du Canada : Enracinés dans la qualité et nourris par l'innovation*, fra, publication, mai 2014. adresse : http://www.agr.gc.ca/fra/industrie-marches-et-commerce/renseignements-sur-les-secteurs-canadiens-de-lagroalimentaire/aliments-fonctionnels-et-produits-de-sante-naturels/tendances-et-debouches-commerciaux-pour-le-secteur-des-aliments-fonctionnels-et-des-produits-de-sante-naturels/les-aliments-fonctionnels-et-les-produits-de-sante-naturels-du-canada-enracines-dans-la-qualite-et-nourris-par-l-innovation/?id=1400770710312 (visité le 20/11/2018).

[4] A. B. Howell, J. D. Reed, C. G. Krueger, R. Winterbottom, D. G. Cunningham et M. Leahy, "A-type cranberry proanthocyanidins and uropathogenic bacterial anti-adhesion activity", *Phytochemistry*, Tannins and Related Polyphenols (Part 2), t. 66, nº 18, p. 2281-2291, sept. 2005, issn : 0031-9422. doi : 10.1016/j.phytochem.2005.05.022. adresse : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031942205002499 (visité le 22/06/2018).

[5] P. I. Oteiza, C. G. Fraga, D. A. Mills et D. H. Taft, "Flavonoids and the gastrointestinal tract : Local and systemic effects", *Molecular Aspects of Medicine*, Bioactives and their impact on human health, t. 61, p. 41-49, juin 2018, issn : 0098-2997. doi : 10.1016/j.mam.2018.01.001. adresse : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098299717301590 (visité le 05/11/2018).

[6] E. I. Weiss, A. Kozlovsky, D. Steinberg, R. Lev-Dor, R. Bar Ness Greenstein, M. Feldman, N. Sharon et I. Ofek, "A high molecular mass cranberry constituent reduces mutans streptococci level in saliva and inhibits in vitro adhesion to hydroxyapatite", eng, *FEMS microbiology letters*, t. 232, nº 1, p. 89-92, mar. 2004, issn : 0378-1097. doi : 10.1016/S0378-1097(04)00035-7.

[7] G. H. Brundtland, *Uncertainty analysis in LCA using precalculated aggregated datasets*, en, 1987. adresse : https://www.springerprofessional.de/en/uncertainty-analysis-in-lca-using-precalculated-aggregated-datas/15551484 (visité le 27/09/2018).

[8] S. Bell, "Engineers, Society, and Sustainability", *Synthesis Lectures on Engineers, Technology, and Society*, t. 6, n° 3, p. 1-109, juil. 2011, issn : 1933-3633. doi : 10.2200/S00378ED1V01Y201108ETS017. adresse : https://www.morganclaypool.com/doi/abs/10.2200/S00378ED1V01Y201108ETS017 (visité le 10/11/2018).

[9] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken et E. J. Hultink, "The Circular Economy – A new sustainability paradigm ?", *Journal of Cleaner Production*, t. 143, p. 757-768, fév. 2017, issn : 0959-6526. doi : 10.1016/j.jclepro.2016.12.048. adresse : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616321023 (visité le 11/11/2018).

[10] United States Council for International Business, *Goal 12 : Ensure Sustainable Consumption & Production*, en-US. adresse : http://www.businessfor2030.org/goal-12-ensure-sustainable-consumption-production/ (visité le 11/11/2018).

[11] J. Potocnik, "Économie circulaire : les enjeux économiques d'une transition écologique", French, *Responsabilité & Environnement*, n° 76, p. 7-12, 108-109, 111, 114, 2014, issn : 12684783. adresse : https://search.proquest.com/docview/1679964161/abstract/C6B82D476BCD46E6PQ/1 (visité le 03/12/2018).

[12] Global Footprint Network, *Country Overshoot Days 2018*, en-US, 2018. adresse : https://www.overshootday.org/newsroom/country-overshoot-days/ (visité le 03/12/2018).

[13] EDDEC, *Économie circulaire*, fr-FR. adresse : http://instituteddec.org/themes/economie-circulaire/ (visité le 03/12/2018).

[14] C. de Perthuis, "Économie circulaire et transition écologique", French, *Responsabilité & Environnement*, n° 76, p. 23-27, 106, 109, 111, 114, 2014, issn : 12684783. adresse : https://search.proquest.com/docview/1679964109/abstract/859E632B96A645C9PQ/1 (visité le 03/12/2018).

[15] O. Jolliet, M. Saadé et P. Crettaz, *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan*, fr. PPUR Presses polytechniques, 2010, Google-Books-ID : g9S55CklsOoC, isbn : 978-2-88074-886-9.

[16] International Organization for Standardization, *ISO 14044 - Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices*, 2006.

[17] M. A. Curran, éd., *Life cycle assessment handbook : a guide for environmentally sustainable products*, en. Hoboken, N.J : Wiley/Scrivener, 2012, OCLC : ocn777617117, isbn : 978-1-118-09972-8.

[18] I. Huot, *Canneberges en folie !*, fév. 2016. adresse : https://www.journaldemontreal.com/2016/10/02/canneberges--en-folie (visité le 01/11/2018).

[19] International Organization for Standardization, *ISO 14045 :2012 - Environmental management – Eco-efficiency assessment of product systems – Principles, requirements and guidelines*, 2012. adresse : https://www.iso.org/standard/43262.html (visité le 26/07/2018).

[20] J. R. Ehrenfeld, "Eco-efficiency", *Journal of Industrial Ecology*, t. 9, n° 4, p. 6-8, 2005.

[21] P. Saling, A. Kicherer, B. Dittrich-Krämer, R. Wittlinger, W. Zombik, I. Schmidt, W. Schrott et S. Schmidt, "Eco-efficiency analysis by basf : the method", en, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, t. 7, n° 4, p. 203-218, juil. 2002, issn : 0948-3349, 1614-7502. doi : 10.1007/BF02978875. adresse : https://link.springer.com/article/10.1007/BF02978875 (visité le 23/06/2018).

[22] G. Huppes et M. Ishikawa, "An introduction to quantified eco-efficiency analysis", in *Quantified Eco-Efficiency*, Springer, 2007, p. 1-38.

[23] G. Huppes et M. A. Curran, "Environmental Life Cycle Assessment : Background and Perspective", en, in *Life Cycle Assessment Handbook*, John Wiley & Sons, Ltd, 2012, p. 1-14, isbn : 978-1-118-52837-2. doi : 10.1002/9781118528372.ch1. adresse : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118528372.ch1 (visité le 09/11/2018).

[24] C. Thomas, *La canneberge au Québec*, 2003. adresse : https://www.agrireseau.net/references/1/Canneberge%20-%20Portrait/Portrait%20canneberge%201.pdf (visité le 01/11/2018).

[25] F. Caruso, P. Bristow et P. Oudemans, *American Phytopathological Society*, 2000. adresse : https://www.apsnet.org/pages/default.aspx (visité le 02/11/2018).

[26] U. N. A. S. Service, *Cranberries | Agricultural Marketing Resource Center*, 2017. adresse : https://www.agmrc.org/commodities-products/fruits/cranberries (visité le 02/11/2018).

[27] I. Morin, *La boîte à lunch rêvée des enfants | ISABELLE MORIN | Enfants*, News paper, oct. 2018. adresse : https://www.lapresse.ca/vivre/sante/enfants/201810/11/01-5199833-la-boite-a-lunch-revee-des-enfants.php (visité le 01/11/2018).

[28] E. Prasad, *Antioxidants Market by Type (Natural (Vitamin A, Vitamin B, Vitamin C, and Rosemary Extract), Synthetic (Butylated Hydroxyanisole, Butylated Hydroxytoluene, and Others) - Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2014-2022*, 2018. adresse : https://www.alliedmarketresearch.com/anti-oxidants-market (visité le 01/11/2018).

[29] K. Wrick, "Consumer issues and expectations for functional foods : Critical Reviews in Food Science and Nutrition : Vol 35, No 1-2", *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, t. 35, nº 1-2, p. 167-173, sept. 2009. adresse : https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10408399509527696 (visité le 01/11/2018).

[30] E. d. Mejia, "Polyphenols", en, in *Encyclopedia of Cancer*, M. Schwab, éd., Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011, p. 2955-2957, isbn : 978-3-642-16483-5. doi : 10.1007/978-3-642-16483-5_4677. adresse : https://doi.org/10.1007/978-3-642-16483-5_4677 (visité le 03/11/2018).

[31] É. Serre, "Contribution à la compréhension de procédés électro-membranaires appliqués à la désacidification du jus de canneberge", fre, thèse de doct., 2017. adresse : https://corpus.ulaval.ca/jspui/handle/20.500.11794/31689 (visité le 11/12/2018).

[32] R. Puupponen-Pimiä, A.-M. Aura, S. Karppinen, K.-M. Oksman-Caldentey et K. Poutanen, "Interactions between plant bioactive food ingredients and intestinal flora - effects on human health", English, *Bioscience and Microflora*, t. 23, nº 2, p. 67-80, 2004, issn : 1342-1441. doi : 10.12938/bifidus.23.67. adresse : https://cris.vtt.fi/en/publications/interactions-between-plant-bioactive-food-ingredients-and-intesti (visité le 03/11/2018).

[33] J. Dobner et S. Kaser, "Body mass index and the risk of infection - from underweight to obesity", *Clinical Microbiology and Infection*, t. 24, nº 1, p. 24-28, jan. 2018, issn : 1198-743X. doi : 10.1016/j.cmi.2017.02.013. adresse : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1198743X17301015 (visité le 09/12/2018).

[34] I. Vasileiou, A. Katsargyris, S. Theocharis et C. Giaginis, “Current clinical status on the preventive effects of cranberry consumption against urinary tract infections”, *Nutrition Research*, t. 33, nº 8, p. 595-607, août 2013, issn : 0271-5317. doi : 10.1016/j.nutres.2013.05.018. adresse : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0271531713001280 (visité le 08/06/2018).

[35] M. E. T. McMurdo, L. Y. Bissett, R. J. G. Price, G. Phillips et I. K. Crombie, “Does ingestion of cranberry juice reduce symptomatic urinary tract infections in older people in hospital ? A double-blind, placebo-controlled trial”, en, *Age and Ageing*, t. 34, nº 3, p. 256-261, mai 2005, issn : 0002-0729. doi : 10.1093/ageing/afi101. adresse : https://academic.oup.com/ageing/article/34/3/256/40481 (visité le 08/06/2018).

[36] D. A. Wing, P. J. Rumney, C. W. Preslicka et J. H. Chung, “Daily Cranberry Juice for the Prevention of Asymptomatic Bacteriuria in Pregnancy : A Randomized, Controlled Pilot Study”, *The Journal of Urology*, t. 180, nº 4, p. 1367-1372, oct. 2008, issn : 0022-5347. doi : 10.1016/j.juro.2008.06.016. adresse : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022534708015474 (visité le 22/06/2018).

[37] V. C. George, G. Dellaire et H. P. V. Rupasinghe, “Plant flavonoids in cancer chemoprevention : role in genome stability”, *The Journal of Nutritional Biochemistry*, t. 45, p. 1-14, juil. 2017, issn : 0955-2863. doi : 10.1016/j.jnutbio.2016.11.007. adresse : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955286316302236 (visité le 05/11/2018).

[38] F. Turati, M. Rossi, C. Pelucchi, F. Levi et C. La Vecchia, “Fruit and vegetables and cancer risk : a review of southern European studies”, eng, *The British Journal of Nutrition*, t. 113 Suppl 2, S102-110, avr. 2015, issn : 1475-2662. doi : 10.1017/S0007114515000148.

[39] M. L. McCullough, J. J. Peterson, R. Patel, P. F. Jacques, R. Shah et J. T. Dwyer, “Flavonoid intake and cardiovascular disease mortality in a prospective cohort of US adults”, eng, *The American Journal of Clinical Nutrition*, t. 95, nº 2, p. 454-464, fév. 2012, issn : 1938-3207. doi : 10.3945/ajcn.111.016634.

[40] A. Yamanaka-Okada, E. Sato, T. Kouchi, R. Kimizuka, T. Kato et K. Okuda, “Inhibitory effect of cranberry polyphenol on cariogenic bacteria”, eng, *The Bulletin of Tokyo Dental College*, t. 49, nº 3, p. 107-112, août 2008, issn : 0040-8891.

[41] E. Serre, Y. Boutin, M.-E. Langevin, F. Lutin, K. Pedneault, S. Lacour et L. Bazinet, "Deacidification of cranberry juice protects against disruption of in-vitro intestinal cell barrier integrity", *Journal of Functional Foods*, t. 26, p. 208-216, oct. 2016, issn : 1756-4646. doi : 10.1016/j.jff.2016.06.021. adresse : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1756464616301645 (visité le 23/06/2018).

[42] P. Holzer, "Acid-sensing ion channels in gastrointestinal function", *Neuropharmacology*, Acid-Sensing Ion Channels in the Nervous System, t. 94, p. 72-79, juil. 2015, issn : 0028-3908. doi : 10.1016/j.neuropharm.2014.12.009. adresse : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0028390814004602 (visité le 06/11/2018).

[43] Ocean Spray, *Whole Berry Cranberry Sauce | Ocean Spray®*. adresse : https://www.oceanspray.com/Products/Sauce/Whole-Berry-Cranberry-Sauce (visité le 03/12/2018).

[44] ——, *Jellied Cranberry Sauce | Ocean Spray®*. adresse : https://www.oceanspray.com/Products/Sauce/Jellied-Cranberry-Sauce (visité le 03/12/2018).

[45] ——, *Cranberry Juice Cocktail*. adresse : https://www.oceanspray.com:443/Repository/Products/Juices%20and%20Drinks/Cranberry%20Juice%20Cocktail (visité le 03/12/2018).

[46] ——, *100 Percent Juice Cranberry | Ocean Spray®*. adresse : https://www.oceanspray.com/Products/Juices-and-Drinks/By-Type/100-Percent-Juice/100-Percent-Juice-Cranberry (visité le 03/12/2018).

[47] V. S. Malik et F. B. Hu, "Fructose and Cardiometabolic Health What the Evidence From Sugar-Sweetened Beverages Tells Us", English, *Journal of the American College of Cardiology*, t. 66, n° 14, p. 1615-1624, oct. 2015, WOS :000361945700012, issn : 0735-1097. doi : 10.1016/j.jacc.2015.08.025.

[48] Malik Vasanti S., Popkin Barry M., Bray George A., Després Jean-Pierre et Hu Frank B., "Sugar-Sweetened Beverages, Obesity, Type 2 Diabetes Mellitus, and Cardiovascular Disease Risk", *Circulation*, t. 121, n° 11, p. 1356-1364, mar. 2010. doi : 10.1161/CIRCULATIONAHA.109.876185. adresse : https://www.ahajournals.org/doi/abs/10.1161/circulationaha.109.876185 (visité le 03/11/2018).

[49] J. Hong, H. Whelton, G. Douglas et J. Kang, “Consumption frequency of added sugars and UK children’s dental caries”, English, *Community Dentistry and Oral Epidemiology*, t. 46, n° 5, p. 457-464, oct. 2018, WOS :000445178900006, issn : 0301-5661. doi : 10.1111/cdoe.12413.

[50] C. Colantuoni, P. Rada, J. McCarthy, C. Patten, N. M. Avena, A. Chadeayne et B. G. Hoebel, “Evidence that intermittent, excessive sugar intake causes endogenous opioid dependence”, English, *Obesity Research*, t. 10, n° 6, p. 478-488, juin 2002, WOS :000177241700009, issn : 1071-7323. doi : 10.1038/oby.2002.66.

[51] I. Poirier, “La canneberge au Québec et au Centre-du-Québec”, fr, MAPAQ, rapp. tech., 2010, Ministère de l’Agriculture, des Pêcheries et de l’Alimentation Direction régionale du Centre-du-Québec. adresse : https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/LaCannebergeauQuebec.pdf.

[52] F. de Dardel et T. Arden, *Ion Exchangers*. jan. 2002. adresse : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14356007.a14_393/otherversions (visité le 20/07/2018).

[53] M. D. Víctor-Ortega, J. M. Ochando-Pulido et A. Martínez-Ferez, “Impacts of main parameters on the regeneration process efficiency of several ion exchange resins after final purification of olive mill effluent”, *Separation and Purification Technology*, t. 173, p. 1-8, fév. 2017, issn : 1383-5866. doi : 10.1016/j.seppur.2016.08.037. adresse : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586616308383 (visité le 11/12/2018).

[54] B.-U. Bae, Y.-H. Jung, W.-W. Han et H.-S. Shin, “Improved brine recycling during nitrate removal using ion exchange”, *Water Research*, t. 36, n° 13, p. 3330-3340, juil. 2002, issn : 0043-1354. doi : 10.1016/S0043-1354(02)00012-X. adresse : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004313540200012X (visité le 13/06/2018).

[55] E. Vera, J. Ruales, M. Dornier, J. Sandeaux, F. Persin, G. Pourcelly, F. Vaillant et M. Reynes, “Comparison of different methods for deacidification of clarified passion fruit juice”, English, *Journal of Food Engineering*, t. 59, n° 4, p. 361-367, oct. 2003, WOS :000184176600006, issn : 0260-8774. doi : 10.1016/S0260-8774(02)00495-8.

[56] M. Faucher, É. Serre, M.-È. Langevin, S. Mikhaylin, F. Lutin et L. Bazinet, “Drastic energy consumption reduction and ecoefficiency improvement of cranberry juice deacidification by electrodialysis with bipolar membranes at semi-industrial scale : Reuse of the recovery solution”, *Journal of Membrane Science*, t. 555, p. 105-114, juin

2018, ISSN : 0376-7388. DOI : 10.1016/j.memsci.2018.02.041. adresse : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376738818302424 (visité le 08/06/2018).

[57] Y. Bernard, "L'étiquetage environnemental des produits en magasin", fr, *Revue Française du Marketing*, t. 221, n° 1/5, p. 63-83, 2008. adresse : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00443094/document (visité le 01/12/2018).

[58] G. St-Amant, *Cranberries LCA informations*, Engineer from Fruit d'Or, Plessiville, Canada, fév. 2018.

[59] J. Antczak, M. Szczygielda et K. Prochaska, "An environment-friendly multi-step membrane-based system for succinic acid recovery from the fermentation broth", English, *Desalination and Water Treatment*, t. 128, p. 51-60, oct. 2018, WOS :000448134500008, ISSN : 1944-3994. DOI : 10.5004/dwt.2018.22575.

[60] B. Chen, C. Jiang, Y. Wang, R. Fu, Z. Liu et T. Xu, "Selectrodialysis with bipolar membrane for the reclamation of concentrated brine from RO plant", English, *Desalination*, t. 442, p. 8-15, sept. 2018, WOS :000438003900002, ISSN : 0011-9164. DOI : 10.1016/j.desal.2018.04.031.

[61] J. A. Moghaddam, M. J. Parnian et S. Rowshanzamir, "Preparation, characterization, and electrochemical properties investigation of recycled proton exchange membrane for fuel cell applications", English, *Energy*, t. 161, p. 699-709, oct. 2018, WOS :000446148400060, ISSN : 0360-5442. DOI : 10.1016/j.energy.2018.07.123.

[62] S. Mikhaylin, L. Patouillard, M. Margni et L. Bazinet, "Milk protein production by a more environmentally sustainable process : bipolar membrane electrodialysis coupled with ultrafiltration", en, *Green Chemistry*, t. 20, n° 2, p. 449-456, 2018. DOI : 10.1039/C7GC02154B. adresse : https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/gc/c7gc02154b (visité le 26/09/2018).

[63] X. Zhou, Y. Yang, C. Li, Z. Yang, W. Yang, Z. Tian, L. Zhang et T. Tao, "Environmental-friendly one-step fabrication of tertiary amine-functionalized adsorption resins for removal of benzophenone-4 from water", English, *Journal of Cleaner Production*, t. 203, p. 655-663, déc. 2018, WOS :000447568700050, ISSN : 0959-6526. DOI : 10.1016/j.jclepro.2018.08.290.

[64] W. A. Tarpeh, I. Wald, M. Wiprachtiger et K. L. Nelson, "Effects of operating and design parameters on ion exchange columns for nutrient recovery from urine", English, *Environmental Science-Water Research & Technology*, t. 4, n° 6, p. 828-838, juin 2018, WOS :000434312500008, ISSN : 2053-1400. DOI : 10.1039/c7ew00478h.

[65] J. A. Korak, R. G. Huggins et M. S. Arias-Paic, “Nanofiltration to Improve Process Efficiency of Hexavalent Chromium Treatment Using Ion Exchange”, English, *Journal American Water Works Association*, t. 110, nº 6, E13-E26, juin 2018, WOS :000439044600002, issn : 2164-4535. doi : 10.1002/awwa.1051.

[66] Dupont, *AMBERLITE^{TM} FPA54*, 2010. adresse : http://www.dupont.com/products/AMBERLITEFPA54.html (visité le 11/12/2018).

[67] O. Jan, C. Tostivint, A. Turbé, C. O’Connor et P. Lavelle, *Food wastage footprint : impacts on natural resources : summary report*, en. Rome : FAO, 2013, OCLC : ocn858897065, isbn : 978-92-5-107752-8.

[68] O. US EPA, *Global Greenhouse Gas Emissions Data*, en, Overviews and Factsheets, jan. 2016. adresse : https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data (visité le 26/07/2018).

[69] H. Valin, R. D. Sands, D. v. d. Mensbrugghe, G. C. Nelson, H. Ahammad, E. Blanc, B. Bodirsky, S. Fujimori, T. Hasegawa, P. Havlik, E. Heyhoe, P. Kyle, D. Mason-D’Croz, S. Paltsev, S. Rolinski, A. Tabeau, H. v. Meijl, M. v. Lampe et D. Willenbockel, “The future of food demand : understanding differences in global economic models”, en, *Agricultural Economics*, t. 45, nº 1, p. 51-67, déc. 2013, issn : 1574-0862. doi : 10.1111/agec.12089. adresse : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/agec.12089 (visité le 16/07/2018).

[70] G. A. Meehl, F. Zwiers, J. Evans, T. Knutson, L. Mearns et P. Whetton, “Trends in Extreme Weather and Climate Events : Issues Related to Modeling Extremes in Projections of Future Climate Change”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, t. 81, nº 3, p. 427-436, mar. 2000, issn : 0003-0007. doi : 10.1175/1520-0477(2000)081<0427:TIEWAC>2.3.CO;2. adresse : https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0477(2000)081%3C0427:TIEWAC%3E2.3.CO;2 (visité le 16/07/2018).

[71] T. Kontiokari, K. Sundqvist, M. Nuutinen, T. Pokka, M. Koskela et M. Uhari, “Randomised trial of cranberry-lingonberry juice and Lactobacillus GG drink for the prevention of urinary tract infections in women”, en, *BMJ*, t. 322, nº 7302, p. 1571, juin 2001, issn : 0959-8138, 1468-5833. doi : 10.1136/bmj.322.7302.1571. adresse : https://www.bmj.com/content/322/7302/1571 (visité le 22/06/2018).

[72] S. V. Joseph, I. Edirisinghe et B. M. Burton-Freeman, “Berries : Anti-inflammatory Effects in Humans”, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, t. 62, nº 18, p. 3886-3903, mai 2014, issn : 0021-8561. doi : 10.1021/jf4044056. adresse : https://doi.org/10.1021/jf4044056 (visité le 22/06/2018).

[73] J. Schell, N. M. Betts, M. Foster, R. Hal Scofield et A. Basu, "Cranberries improve postprandial glucose excursions in type 2 diabetes", en, *Food & Function*, t. 8, n° 9, p. 3083-3090, 2017. doi : 10.1039/C7FO00900C. adresse : http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2017/FO/C7FO00900C (visité le 22/06/2018).

[74] B. Olas, "Berry Phenolic Antioxidants – Implications for Human Health ?", English, *Frontiers in Pharmacology*, t. 9, 2018, issn : 1663-9812. doi : 10.3389/fphar.2018.00078. adresse : https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphar.2018.00078/full (visité le 22/06/2018).

[75] T. Q. Ho, V.-N. Hoang, C. Wilson et T.-T. Nguyen, "Eco-efficiency analysis of sustainability-certified coffee production in Vietnam", *Journal of Cleaner Production*, t. 183, p. 251-260, mai 2018, issn : 0959-6526. doi : 10.1016/j.jclepro.2018.02.147. adresse : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618304608 (visité le 08/06/2018).

[76] S. Boivin, *Farm data*, French, Fruit d'Or Agronomist, mai 2017.

[77] L. Beaulieu, G. van Durme et M.-L. Arpin, "CIRCULAR ECONOMY : A CRITICAL LITERATURE REVIEW OF CONCEPTS", French, International Reference Centre for the Life Cycle of Products, Processes et Services (CIRAIG), rapp. tech., 2015. adresse : http://www.ciraig.org/pdf/CIRAIG_Circular_Economy_Literature_Review_Oct2015.pdf (visité le 17/09/2018).

ANNEXE A ENTRÉES UTILISÉES POUR L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Ceci est en lien avec l'article 1 du chapitre 5.

Table A.1 Input for 1000 liters of non-de-acidified cranberry juice (NDA)

Life cycle steps	Key parameters and data sources				Reference flows per funtional unit			Assumptions & comments
	Data	**Quantity**	**Unit**	**Sources**	**Flow**	**Quantity**	**Unit**	
Production at Fram	Acti-sol	0.0602	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Poultry manure	170.819	kg	
	diesel	1.758	MJ	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	diesel, low-sulfur - RoW	4988.363	MJ	
	electricity	0.034	kWh	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	electricity, medium voltage - CA-QC	96.476	kWh	
	land occupation	0.18	m2*a	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Occupation, permanent crop, fruit	510.754	m2*a	
	Pesticide Trounce (24363)	0.00171	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Pesticide Trounce (24363)	4.852	kg	
	benzoic acid - RoW	0.0000855	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	benzoic acid - RoW	0.243	kg	
	ethanol	0.0002565	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene - RoW	0.728	kg	
	fatty acid	0.000171	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	fatty acid - RoW	0.485	kg	
	isopropanol	0.0002565	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	isopropanol - RoW	0.728	kg	
	methanol	0.0000171	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	methanol - GLO	0.049	kg	
	potassium hydroxide	0.000171	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	potassium hydroxide - RoW	0.485	kg	
	Pyrethrin	0.00000513	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Pyrethrin	0.015	kg	
	water	0.0007524	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	tap water - CA-QC	2.135	kg	
	Pesticides Entrust (303802)	7.74E-05	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Pesticides Entrust (303802)	0.220	kg	
	kaolin	2.63E-06	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	kaolin - RoW	0.007	kg	
	silica sand	1.55E-06	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	silica sand - RoW	0.004	kg	
	Spinosad	6.19E-05	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Spinosad	0.176	kg	
	petrol	0.00737	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	petrol, unleaded - RoW	20.913	kg	
	potassium chloride	0.00587	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	potassium chloride, as K2O - CA-SK	16.656	kg	
	sulfur	0.0118	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	sulfur stockpiling - CA-AB	33.483	kg	
	Transport truck (+30 000lbs)	2.28E-07	t*km	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 - RoW	0.001	t*km	
	Transport truck (-18000lbs)	9.81E-08	t*km	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 - RoW	0.000	t*km	
	Transport truck (18 to 30 000lbs)	1.23E-06	t*km	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 - RoW	0.003	t*km	
	Fresh Cranberries	-1.00E+00	Kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Fresh Cranberries	-2837.5	Kg	
Separation process	Fresh Cranberries	1010	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Fresh Cranberries	2260.95	kg	
	Steel equipment	0.266667	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	chromium steel pipe - GLO	0.5970	kg	
	electricity	126	kWh	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	electricity, medium voltage - CA-QC	282.06	kWh	
	Heat	1000000	kJ	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	heat, central or small-scale, natural gas - GLO	2238569	kJ	100% of the sugar impact is attributed to dried cranberries product
	Plastic bag	0.00362	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	packaging film, low density polyethylene - GLO	0.008104	kg	
	Wood box	0.00173	m3	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	plywood, for outdoor use - CA-QC	0.003873	m3	
	End of life equipment	0.26667	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	scrap steel - GLO	0.596959	kg	

Table A.1 Input for 1000 liters of non-de-acidified cranberry juice (NDA) (continued and end)

	Sugar	220	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	sugar, from sugarcane - RoW	492.49	kg	100% of the sugar impact is attributed to dried cranberries product
	Dried cranberries	-600	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Dried cranberries	-1343.14	kg	
	Cranberry juice (SP)	-220	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Cranberry juice (SP)	-492.49	kg	
	steam	-280	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Water	-626.80	kg	
Cranberry crushing	Fresh Cranberries	1136.05897	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Fresh Cranberries	576.6	kg	
	Steel equipment	0.11578	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	chromium steel pipe - GLO	0.0588	kg	
	electricity	458.11113	kWh	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	electricity, medium voltage - CA-QC	232.50	kWh	
	Heat	356.23368	MJ	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	heat, district or industrial, natural gas - CA-QC	180.79	MJ	
	Plastic bag	0.00362	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	packaging film, low density polyethylene - GLO	1.84E-03	kg	
	Wood box	0.00195	m3	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	plywood, for outdoor use - CA-QC	9.90E-04	m3	
	End of life equipment	0.11578	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	scrap steel - CH	0.05876	kg	
	Transport	23.85724	t*km	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6 - GLO	12.1	t*km	
	Avoid animal food	-12.06	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	alfalfa-grass mixture, Swiss integrated production - GLO	-6.1	kg	Based on calorific content
	Cranberry juice (CC)	-1000	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Cranberry juice (CC)	-507.5	kg	
Raw juice	Cranberry juice (CC)	512.59	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Cranberry juice (CC)	508		
	Cranberry juice (SP)	497.41	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Cranberry juice (SP)	492		
	NDA Juice	-1010	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	NDA Juice	-1000		

Table A.2 Input of the process Production at Farm for 1000 liters de-acidified cranberry juice with ion exchange resin (IER)

Life cycle steps	Key parameters and data sources				Reference flows per funtional unit			Assumptions & comments
	Data	**Quantity**	**Unit**	**Sources**	**Flow**	**Quantity**	**Unit**	
Production at Fram	Acti-sol	0.0602	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Poultry manure	174.279	kg	
	diesel	1.758	MJ	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	diesel, low-sulfur - RoW	5089.401	kg	
	electricity	0.034	kWh	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	electricity, medium voltage - CA-QC	98.430	kWh	
	land occupation	0.18	m2*a	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Occupation, permanent crop, fruit	521.099	m2*a	
	Pesticide Trounce (24363)	0.00171	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Pesticide Trounce (24363)	4.950	kg	
	benzoic acid - RoW	0.0000855	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	benzoic acid - RoW	0.248	kg	
	ethanol	0.0002565	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene - RoW	0.743	kg	
	fatty acid	0.000171	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	fatty acid - RoW	0.495	kg	
	isopropanol	0.0002565	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	isopropanol - RoW	0.743	kg	
	methanol	0.0000171	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	methanol - GLO	0.050	kg	
	potassium hydroxide	0.000171	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	potassium hydroxide - RoW	0.495	kg	
	Pyrethrin	0.00000513	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Pyrethrin	0.015	kg	
	water	0.0007524	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	tap water - CA-QC	2.178	kg	
	Pesticides Entrust (303802)	7.74E-05	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Pesticides Entrust (303802)	0.224	kg	
	kaolin	2.63E-06	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	kaolin - RoW	0.008	kg	
	silica sand	1.55E-06	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	silica sand - RoW	0.004	kg	
	Spinosad	6.19E-05	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Spinosad	0.179	kg	
	petrol	0.00737	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	petrol, unleaded - RoW	21.336	kg	
	potassium chloride	0.00587	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	potassium chloride, as K2O - CA-SK	16.994	kg	
	sulfur	0.0118	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	sulfur stockpiling - CA-AB	34.161	kg	
	Transport truck (+30 000lbs)	2.28E-07	t*km	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 - RoW	0.001	t*km	
	Transport truck (-18000lbs)	9.81E-08	t*km	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 - RoW	0.000	t*km	
	Transport truck (18 to 30 000lbs)	1.23E-06	t*km	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 - RoW	0.004	t*km	
	Fresh Cranberries	-1.00E+00	Kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Fresh Cranberries	-2894.994883	Kg	
Separation process	Fresh Cranberries	1010	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Fresh Cranberries	2315.930305	kg	
	Steel equipment	0.266667	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	chromium steel pipe - GLO	0.611467512	kg	
	electricity	126	kWh	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	electricity, medium voltage - CA-QC	288.9180381	kWh	
	Heat	1000000	kJ	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	heat, central or small-scale, natural gas - GLO	2293000.302	kJ	100% of the sugar impact is attributed to dried cranberries product
	Plastic bag	0.00362	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	packaging film, low density polyethylene - GLO	0.008300661	kg	
	Wood box	0.00173	m3	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	plywood, for outdoor use - CA-QC	0.003966891	m3	
	End of life equipment	0.26667	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	scrap steel - GLO	0.611474391	kg	
	Sugar	220	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	sugar, from sugarcane - RoW	504.4600665	kg	100% of the sugar impact is attributed to dried cranberries product
	Dried cranberries	-600	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Dried cranberries	-1375.800181	kg	

Table A.2 Input of the process Production at Farm for 1000 liters de-acidified cranberry juice with ion exchange resin (IER)) (continued and end)

	Cranberry juice (SP)	-220	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Cranberry juice (SP)	-504.4600665	kg	
	steam	-280	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Water	-642.0400847	kg	
Cranberry crushing	Fresh Cranberries	1136.05897	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Fresh Cranberries	579.0645774	kg	
	Steel equipment	0.11578	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	chromium steel pipe - GLO	0.059014627	kg	
	electricity	458.11113	kWh	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	electricity, medium voltage - CA-QC	233.5054208	kWh	
	Heat	356.23368	MJ	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	heat, district or industrial, natural gas - CA-QC	181.5771107	MJ	
	Plastic bag	0.00362	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	packaging film, low density polyethylene - GLO	0.001845163	kg	
	Wood box	0.00195	m3	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	plywood, for outdoor use - CA-QC	0.000993941	m3	
	End of life equipment	0.11578	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	scrap steel - CH	0.059014627	kg	
	Transport	23.85724	t*km	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6 - GLO	12.16035696	t*km	
	Avoid animal food	-12.06	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	alfalfa-grass mixture, Swiss integrated production - GLO	-6.147144635	kg	Based on calorific content
	Cranberry juice (CC)	-1000	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Cranberry juice (CC)	-509.7135	kg	
IER De-acidification	Ion exchange resin	8.06E-06	kg	Dow's Product Data Sheet Amberlite FPA54	anionic resin - GLO	8.17424E-06	kg	
	Steel equipment	0.0128	kg	Dow's Product Data Sheet Amberlite FPA54	chromium steel pipe - GLO	0.0130	kg	
	electricity	7.32507	Wh	Dow's Product Data Sheet Amberlite FPA54	electricity, medium voltage - CA-QC	7.4289	Wh	
	Cranberry juice (CC)	502.59	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Cranberry juice (CC)	509.7135	kg	
	Cranberry juice (SP)	497.41	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Cranberry juice (SP)	504.4601	kg	
	End of life equipment	0.0128	kg	Dow's Product Data Sheet Amberlite FPA54	scrap steel - GLO	0.0130	kg	
	Sodium hydroxide	270.83333	g	Dow's Product Data Sheet Amberlite FPA54	Sodium hydroxide	274.6720	g	
	Hydroxude disposal	270.83333	g	Dow's Product Data Sheet Amberlite FPA54	sodium hydroxide, without water, in 50% solution state - CA-QC	274.6720	g	
	resin end of life	8.06E-06	kg	Dow's Product Data Sheet Amberlite FPA54	spent anion exchange resin from potable water production - GLO	8.17E-06	kg	
	water	3541.66667	kg	Dow's Product Data Sheet Amberlite FPA54	water, deionised, from tap water, at user - RoW	3591.8647	kg	
	IER de-acidified resin	-986.02453	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	IER de-acidified resin	-1000	kg	

Table A.3 Input for 1000 liters de-acidified cranberry juice with electro-dialysis with bipolar membranes (EDBM)

Life cycle steps	Key parameters and data sources				Reference flows per funtional unit			Assumptions & comments
	Data	**Quantity**	**Unit**	**Sources**	**Flow**	**Quantity**	**Unit**	
Production at Fram	Acti-sol	0.0602	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Poultry manure	174.278692	kg	
	diesel	1.758	MJ	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	diesel, low-sulfur - RoW	5089.401	kg	
	electricity	0.034	kWh	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	electricity, medium voltage - CA-QC	98.429826	kWh	
	land occupation	0.18	m2*a	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Occupation, permanent crop, fruit	521.099079	m2*a	
	Pesticide Trounce (24363)	0.00171	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Pesticide Trounce (24363)	4.95044125	kg	
	benzoic acid - RoW	0.0000855	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	benzoic acid - RoW	0.24752206	kg	
	ethanol	0.0002565	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene - RoW	0.74256619	kg	
	fatty acid	0.000171	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	fatty acid - RoW	0.49504412	kg	
	isopropanol	0.0002565	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	isopropanol - RoW	0.74256619	kg	
	methanol	0.0000171	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	methanol - GLO	0.04950441	kg	
	potassium hydroxide	0.000171	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	potassium hydroxide - RoW	0.49504412	kg	
	Pyrethrin	0.00000513	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Pyrethrin	0.01485132	kg	
	water	0.0007524	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	tap water - CA-QC	2.17819415	kg	
	Pesticides Entrust (303802)	7.74E-05	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Pesticides Entrust (303802)	0.2240726	kg	
	kaolin	2.63E-06	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	kaolin - RoW	0.00761847	kg	
	silica sand	1.55E-06	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	silica sand - RoW	0.00448145	kg	
	Spinosad	6.19E-05	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Spinosad	0.17925808	kg	
	petrol	0.00737	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	petrol, unleaded - RoW	21.3361123	kg	
	potassium chloride	0.00587	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	potassium chloride, as K2O - CA-SK	16.99362	kg	
	sulfur	0.0118	kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	sulfur stockpiling - CA-AB	34.1609396	kg	
	Transport truck (+30 000lbs)	2.28E-07	t*km	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 - RoW	0.00066006	t*km	
	Transport truck (-18000lbs)	9.81E-08	t*km	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 - RoW	0.000284	t*km	
	Transport truck (18 to 30 000lbs)	1.23E-06	t*km	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 - RoW	0.00356084	t*km	
	Fresh Cranberries	-1.00E+00	Kg	(Simon Bonin, Fruit d'Or)	Fresh cranberries	-2894.9949	Kg	
Separation process	Fresh Cranberries	1010	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Fresh cranberries	2315.93031	kg	
	Steel equipment	0.266667	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	chromium steel pipe - GLO	0.61146751	kg	
	electricity	126	kWh	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	electricity, medium voltage - CA-QC	288.918038	kWh	
	Heat	1000000	kJ	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	heat, central or small-scale, natural gas - GLO	2293000.3	kJ	100% of the sugar impact is attributed to dried cranberries product
	Plastic bag	0.00362	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	packaging film, low density polyethylene - GLO	0.00830066	kg	
	Wood box	0.00173	m3	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	plywood, for outdoor use - CA-QC	0.00396689	m3	
	End of life equipment	0.26667	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	scrap steel - GLO	0.61147439	kg	
	Sugar	220	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	sugar, from sugarcane - RoW	504.460067	kg	100% of the sugar impact is attributed to dried cranberries product
	Dried cranberries	-600	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Canneberge sechée	-1375.8002	kg	
	Cranberry juice (SP)	-220	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Cranberry juice (SP)	-504.460	kg	

Table A.3 Input of the process Production at Farm for 1000 liters de-acidified cranberry juice with ion exchange resin (IER)) (continued and end)

	steam	-280	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Water	-642.04008	kg	
Cranberry crushing	Fresh Cranberries	1136.05897	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Fresh cranberries	579.064577	kg	
	Steel equipment	0.11578	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	chromium steel pipe - GLO	0.05901463	kg	
	electricity	458.11113	kWh	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	electricity, medium voltage - CA-QC	233.505421	kWh	
	Heat	356.23368	MJ	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	heat, district or industrial, natural gas - CA-QC	181.577111	MJ	
	Plastic bag	0.00362	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	packaging film, low density polyethylene - GLO	0.00184516	kg	
	Wood box	0.00195	m3	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	plywood, for outdoor use - CA-QC	0.00099394	m3	
	End of life equipment	0.11578	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	scrap steel - CH	0.05901463	kg	
	Transport	23.85724	t*km	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6 - GLO	12.160357	t*km	
	Avoid animal food	-12.06	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	alfalfa-grass mixture, Swiss integrated production - GLO	-6.1471446	kg	Based on calorific content
	Cranberry juice (CC)	-1000	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Cranberry juice (CC)	-509.713	kg	
EDBM De-acidification	Anode	2.33E-06	kg	(Mikhaylin, 2018)	anode, for metal electrolysis - GLO	2.3605E-06	kg	
	electricity	4883.3	Wh	Labo result (Faucher, 2018)	electricity, medium voltage - CA-QC	4952.514	Wh	
	Cranberry juice (CC)	502.59	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Cranberry juice (CC)	509.713	kg	
	Cranberry juice (SP)	497.41	kg	(Guy St-Amant, Fruit d'Or)	Cranberry juice (SP)	504.460	kg	
	polypropylene	2.33E-06	kg	(Mikhaylin, 2018)	polypropylene, granulate - GLO	2.36E-06	kg	
	polysulfone	0.00155	kg	(Mikhaylin, 2018)	polysulfone - GLO	1.57E-03	kg	
	polyvinylchloride	0.00083	kg	(Mikhaylin, 2018)	polyvinylchloride, bulk polymerised - GLO	8.42E-04	kg	
	steel equipement	2.33E-06	kg	(Mikhaylin, 2018)	sheet rolling, steel - GLO	2.36E-06	kg	
	styrene	0.00192	kg	(Mikhaylin, 2018)	styrene - GLO	1.95E-03	kg	
	sugarbeet	151.07485	kg	masse balance	sugar, from sugar beet - RoW	153.216	kg	
	canesugar	0	kg	masse balance	sugar, from sugarcane - GLO	0.00E+00	kg	
	trimethylamine	9.95E-08	kg	(Mikhaylin, 2018)	trimethylamine - GLO	1.01E-07	kg	
	Avoid Dried cranberries	-165	kg	mass balance	Dried cranberries	-167.339	kg	
	citric acid	-13.97547	kg	Labo result	citric acid - GLO	-14.174	kg	
	EDBM de-acidified Juice	-986.02453	kg	Labo result	EDBM de-acidified Juice	-1000	kg	

ANNEXE B RÉSULTATS DÉTAILLÉS DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Ceci est en lien avec l'article 1 du chapitre 5.

Table B.1 Climate change impact of 1000 liter of non-de-acidified cranberry juice (NDA), ions exchange resin de-acidified cranberry juice (IER) and electro-dialysis with bipolar membranes (EDBM) with four acid revalorization method.

	Climate Change (Kg CO2 Eq)					
	NDA	IER	EDBM Cane sugar	EDBM Beet Sugar	EDBM Preservative	EDBM No reuse
Sugar	0	0	255	106	0	0
De-acidification	0	5	0.487	0.487	0.487	0.487
Separation Process	39	39	39	39	39	39
Crushing	17	18	18	18	18	18
Fresh Cranberry Production	425	431	431	431	431	431
Acid revalorisation	0	0	-205	-147	-115	0
Somme	481	493	538.5	447.5	373.5	488.5
SD	0	0.4	16.5	11.9	14.5	0.3

Table B.2 Ecosystem impact of 1000 liter of non-de-acidified cranberry juice (NDA), ions exchange resin de-acidificated cranberry juice (IER) and electro-dialysis with bipolar membranes (EDBM) with four acid revalorisation method.

	Ecosystem (PDF*m2*yr)					
	NDA	IER	EDBM Cane sugar	EDBM Beet Sugar	EDBM Preserva-tive	EDBM No reuse
Sugar	0	0	28	263	0	0
De-acidification	0	4	0.3	0.3	0.3	0.3
Separation Process	2	2	2	2	2	2
Crushing	-4	-5	-5	-5	-5	-5
Fresh Cranberry Production	1030	1050	1049	1049	1049	1049
Acid revalorisation	0	0	-224	-319	-10.5	0
Somme	1028	1051	850.3	990.3	1035.8	1046.3
SD	0	0.7	15.6	27.4	2.5	0.7

Table B.3 Human health impact of 1000 liter of non-de-acidified cranberry juice (NDA), ions exchange resin de-acidificated cranberry juice (IER) and electro-dialysis with bipolar membranes (EDBM) with four acid revalorisation method.

	Human health (DALY)					
	NDA	IER	EDBM Cane sugar	EDBM Beet Sugar	EDBM Preservative	EDBM No reuse
Sugar	0.00E+00	0.00E+00	9.32E-05	7.25E-05	0.00E+00	0.00E+00
De-acidification	0.00E+00	9.00E-06	2.41E-07	2.41E-07	2.41E-07	2.41E-07
Separation Process	1.80E-06	1.80E-05	1.80E-05	1.80E-05	1.80E-05	1.80E-05
Crushing	8.00E-06	8.00E-06	8.00E-06	8.00E-06	8.00E-06	8.00E-06
Fresh Cranberry Production	8.14E-04	8.26E-04	8.26E-04	8.26E-04	8.26E-04	8.26E-04
Acid revalorisation	0.00E+00	0.00E+00	-2.11E-04	-2.04E-04	-8.59E-05	0.00E+00
Somme	8.24E-04	8.61E-04	7.34E-04	7.21E-04	7.66E-04	8.52E-04
SD	0.00E+00	6.90E-07	1.40E-05	1.52E-05	7.52E-06	5.40E-07

Table B.4 Ressource impact of 1000 liter of non-de-acidified cranberry juice (NDA), ions exchange resin de-acidificated cranberry juice (IER) and electro-dialysis with bipolar membranes (EDBM) with four acid revalorisation method.

	Ressource (MJ primaire)					
	NDA	IER	EDBM Cane sugar	EDBM Beet Sugar	EDBM Preservative	EDBM No reuse
Sugar	0		1290	1620	0	0
De-acidification	0	70	4	4	4	4
Separation Process	680	690	690	690	690	690
Crushing	280	280	280	280	280	280
Fresh Cranberry Production	5960	6040	6050	6050	6050	6050
Acid revalorisation	0	0	-2030	-2170	-3880	0
Somme	6920	7080	6284	6474	3144	7024
SD	0	6	168	176	265	4

ANNEXE C MATRICE DU MONTE CARLO COMPARATIF

Ceci est en lien avec l'article 1 du chapitre 5.

Table C.1 Matrix of pairwise Monte Carlo for Climate change

		Climate change (kg Co2eq)					
That mean there is a 100% changes IER have a bigger impact compare to NDA.		NDA	IER	EDBM Cane sugar	EDBM Beet Sugar	EDBM Preservative	EDBM No reuse
		481	493	538	447	373	488
NDA	481		100%	100.00%	0.00%	0%	100%
IER	493	0%		100%	0%	0%	0%
EDBM Cane sugar	538	0.00%	0%		0%	0%	0.10%
EDBM Beet Sugar	447	100.00%	100%	0		0%	100%
EDBM Preservative	373	100%	100%	100%	100%		100%
EDBM No reuse	488	0%	100%	99.90%	0%	0%	

Table C.2 Matrix of pairwise Monte Carlo for Ecosystem quality

		Ecosystem quality (DALY)					
		NDA	IER	EDBM Cane sugar	EDBM Beet Sugar	EDBM Preservative	EDBM No reuse
		1028	1051	850	990	1035	1046
NDA	1028		100%	0%	4.20%	100.00%	100%
IER	1051	0%		0%	0.60%	0%	0%
EDBM Cane sugar	850	100%	100%		100.00%	100%	100%
EDBM Beet Sugar	990	96%	99%	0%		97.80%	99.95%
EDBM Preservative	1035	0%	100%	0%	2.20%		100%
EDBM No reuse	1046	0%	100%	0%	0.05%	0%	

Table C.3 Matrix of pairwise Monte Carlo for Human health

		Human health (PDF*m2*yr)					
		NDA	IER	EDBM Cane sugar	EDBM Beet Sugar	EDBM Preserva-tive	EDBM No reuse
		8.20E-04	8.60E-04	7.30E-04	7.20E-04	7.70E-04	8.50E-04
NDA	8.20E-04		100%	0%	0%	0.00%	100%
IER	8.60E-04	0.00%		0%	0%	0%	0%
EDBM Cane sugar	7.30E-04	100%	100%		18.90%	99.30%	100%
EDBM Beet Sugar	7.20E-04	100%	100%	81.10%		100%	100%
EDBM Preservative	7.70E-04	100.00%	100%	0.70%	0%		100%
EDBM No reuse	8.50E-04	0%	100%	0%	0%	0%	

Table C.4 Matrix of pairwise Monte Carlo for Ressource

		Resources (MJ Primaire)					
		NDA	IER	EDBM Cane sugar	EDBM Beet Sugar	EDBM Preservative	EDBM No reuse
		6920	7080	6283	6473	3143	7023
NDA	6920		100%	0%	0.50%	0%	100%
IER	7080	0.00%		0%	0%	0%	0%
EDBM Cane sugar	6283	100%	100%		83.40%	0%	100%
EDBM Beet Sugar	6473	99.50%	100%	16.60%		0%	100%
EDBM Preservative	3143	100%	100%	100%	100%		100%
EDBM No reuse	7023	0%	100%	0%	0%	0%	

ANNEXE D RÉSULTATS DÉTAILLÉS D'ÉCO-EFFICIENCE

Ceci est en lien avec l'article 1 du chapitre 5.

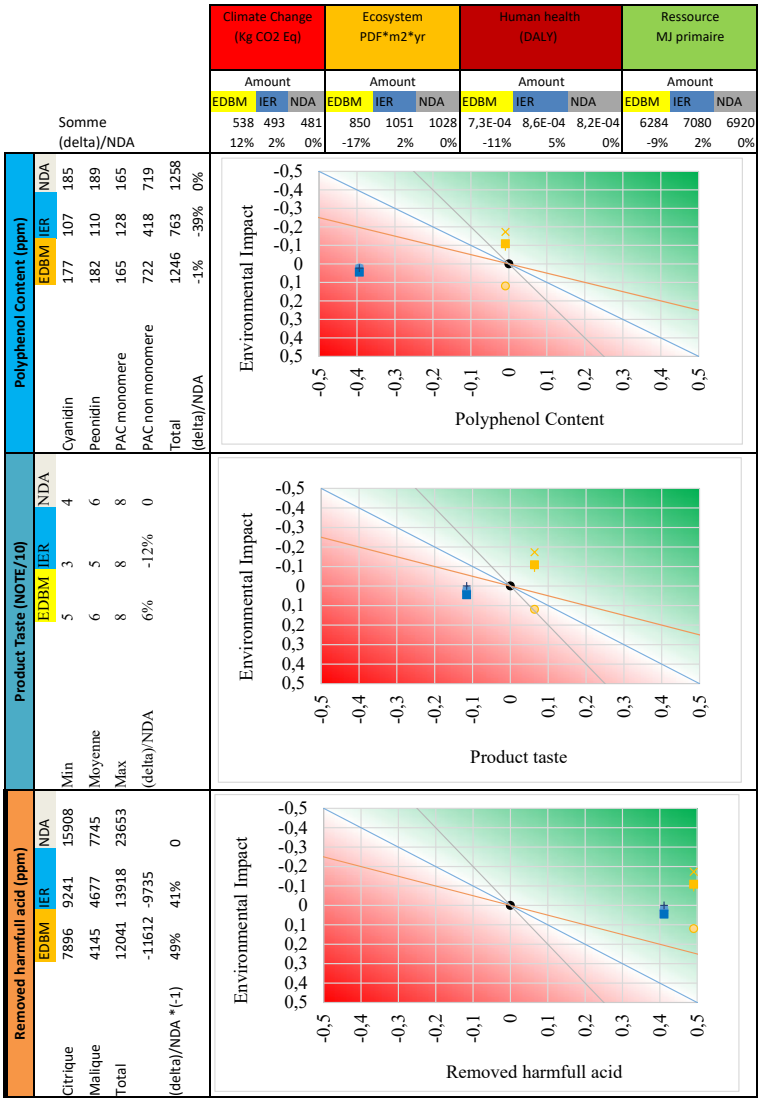
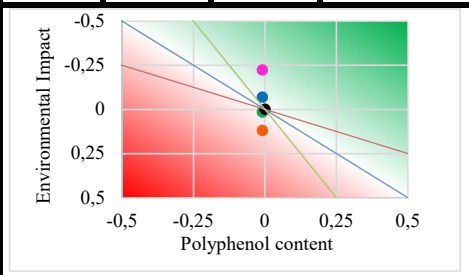


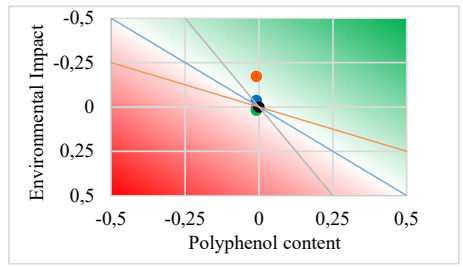
Figure D.1 Résultats d'éco-efficience pour les jus NDA, IER et EDBM

	Climate Change (Kg CO2 Eq)					Ecosystem (PDF*m2*yr)				
	EDBM Cane sugar	EDBM Beet Sugar	EDBM Preservative	EDBM No reuse	NDA	EDBM Cane sugar	EDBM Beet Sugar	EDBM Preservative	EDBM No reuse	NDA
Somme	538	447	373	488	481	850	990	1036	1046	1028
(delta)/NDA	12%	-7%	-22%	2%	0%	-17%	-4%	1%	2%	0%

Polyphenol Content (ppm)

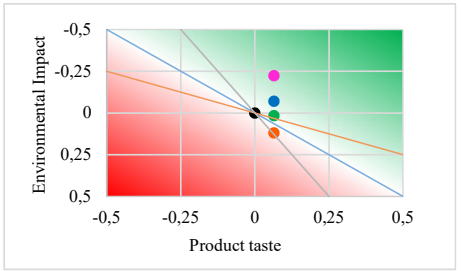
	EDBM	IER	NDA
Cyanidine	177	107	185
Péonidine	182	110	189
PAC monomère	165	128	165
PAC non monomère	722	418	719
Total	1246	763	1258
(delta)/NDA-1	-1%	-39%	0%

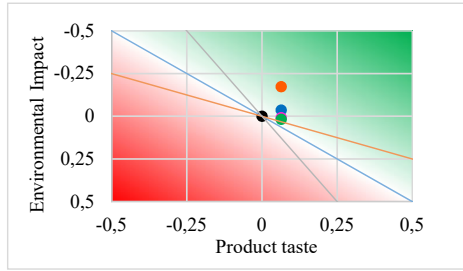




Product Taste (NOTE/10)

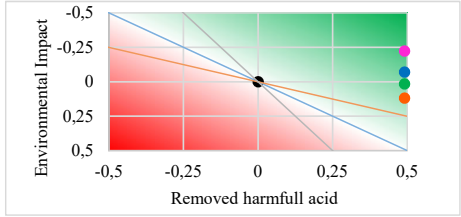
	EDBM	IER	NDA
Min	4,5	2,5	4,0
Moyenne	5,9	4,9	5,6
Max	8,0	8,0	8,0
(delta)/NDA-1	6%	-12%	0





Removed harmfull acid (ppm)

	EDBM	IER	NDA
Citrique	7896	9241	15908
Malique	4145	4677	7745
Total	12041	13918	23653
	-11612	-9735	
(delta)/NDA*(-1)	49%	41%	0



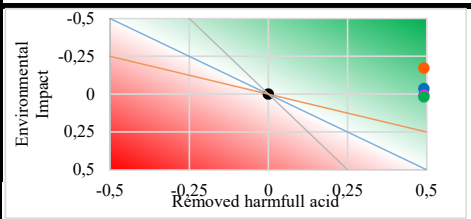


Figure D.2 Résultats d'éco-efficience pour les différents scénarios de réutilisation de l'acide organique avec le jus EDBM pour les catégories Changement climatique et Ecosystème

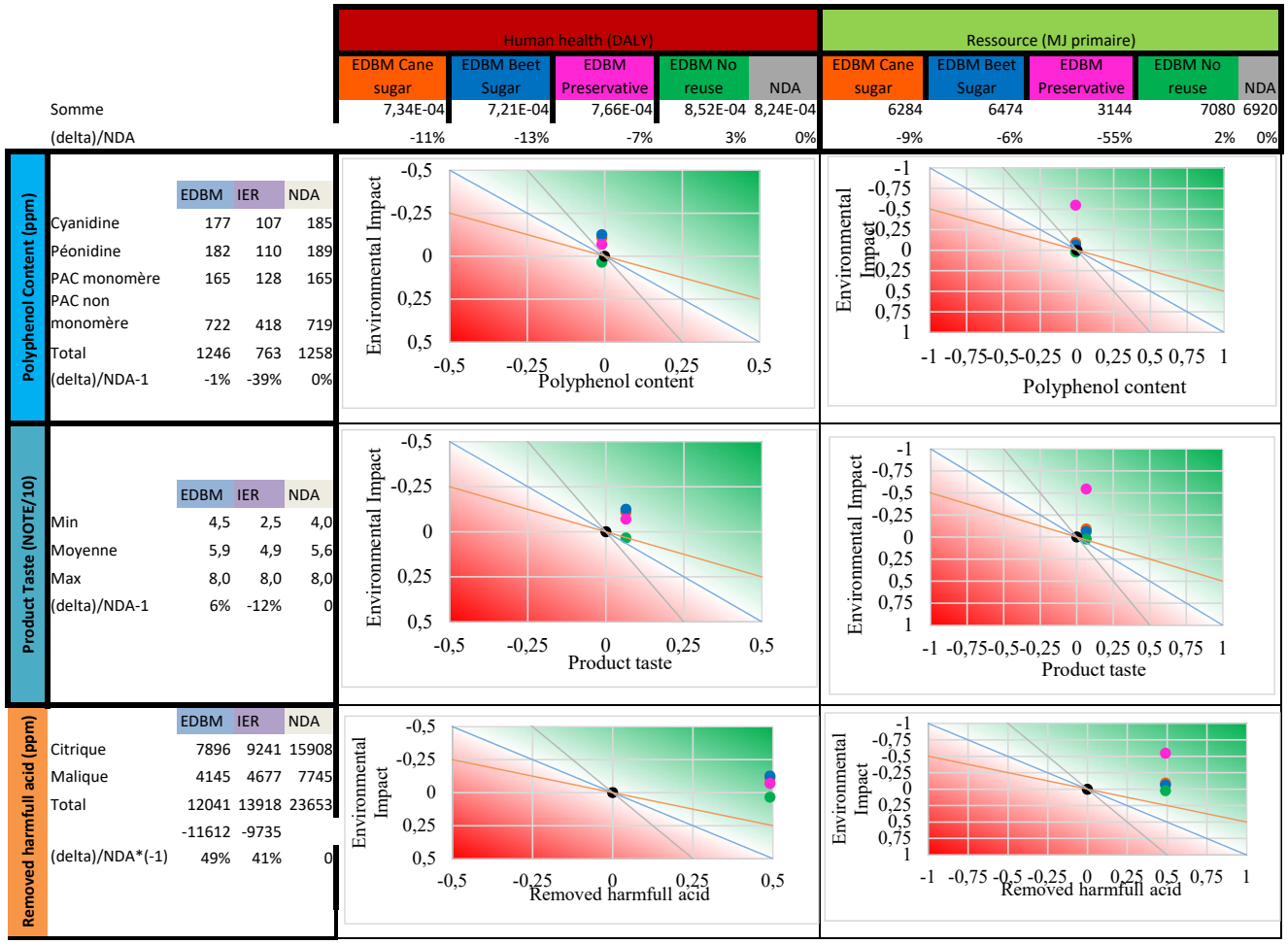


Figure D.3 Résultats d'éco-efficience pour les différents scénarios de réutilisation de l'acide organique avec le jus EDBM pour les catégories Santé humaine et Ressource

ANNEXE E RÉSULTATS DE DÉS-ACIDIFICATION PAR RÉSINE ÉCHANGEUSE D'ION

Présentation des taux de dés-acidification du jus de canneberge à l'aide de la résine échangeuses d'ion. Chaque volume de jus est de 100 ml et est mis en contact avec 100 ml de résine. Après la dés-acidification de 4 volume de jus, la résine est régénérée. La solution de régénération est du NaOH 60g/L.

Tableau E.1 Présentation du ph, de l'acidité titrable et du pourcentage de dés-acidification lors de la dés-acidification par résine de 4 volumes de jus dés-acidifié à la suite lors de l'utilisation de résine neuve

	ph	Acidité titrable (ml NaOH g/M	Pourcentage de dés-acidification
Échantillon initiale	2.56	14.92	0%
Volume 1	4,30	0,32	97,9%
Volume 2	3,40	1,00	93,3%
Volume 3	2,95	2,50	83,3%
Volume 4	2,72	4,72	68,4%

Tableau E.2 Présentation du ph, de l'acidité titrable et du pourcentage de dés-acidification lors de la dés-acidification par résine de 4 volumes de jus dés-acidifié à la suite lors de la deuxième utilisation de résine

	ph	Acidité titrable (ml NaOH g/M	Pourcentage de dés-acidification
Échantillon initiale	2.72	15,10	0%
Volume 1	4,07	0,35	97,5%
Volume 2	3,34	1,05	93,1%
Volume 3	2,90	2,7	82,1%
Volume 4	2,69	5,4	64,24%

Tableau E.3 Présentation du ph, de l'acidité titrable et du pourcentage de dés-acidification lors de la dés-acidification par résine de 4 volumes de jus dés-acidifié à la suite lors de la troisième utilisation de résine

	ph	Acidité titrable (ml NaOH g/M	Pourcentage de dés-acidification
Échantillon initiale	2.63	14.90	0%
Volume 1	4,16	0,30	98,0%
Volume 2	3,33	1,00	93,3%
Volume 3	2,91	2,60	82,6%
Volume 4	2,72	5,10	65,8%

Tableau E.4 Présentation de la concentration en ppm du Calcium, du Potassium, du Magnésium, du Sodium et du Phosphore dans les échantillons de jus désacidifié avec la résine échangeuse d'ion

		Ca	K	Mg	Na	P
Test	Volume	(ppm)				
Échantillon Initial		59,1	813,4	43,2	14,8	28,3
1	0	44,6	641,7	33,0	11,2	23,5
1	1	43,2	620,3	30,9	11,1	2,7
1	2	27,3	393,7	20,1	6,9	2,2
1	3	31,3	446,3	22,8	7,8	3,0
1	4	36,7	509,9	26,4	9,3	4,2
2	0	46,4	664,9	34,1	11,6	24,2
2	1	26,2	418,9	20,4	9,5	1,9
2	2	48,8	688,1	35,9	12,9	3,8
2	3	31,2	453,2	23,2	8,0	3,1
2	4	38,9	548,2	28,4	10,0	4,9
3	0	49,6	713,4	36,3	12,7	26,3
3	1	28,4	462,8	22,3	11,7	2,0
3	2	41,5	594,0	31,0	11,3	3,2
3	3	36,6	512,9	27,0	9,0	3,7
3	4	35,6	514,0	26,4	9,2	4,4
4	0	30,8	460,0	23,3	8,1	16,6
4	1	37,6	574,6	28,1	10,1	2,5
4	2	51,3	708,0	36,9	12,4	3,5
4	3	46,3	640,6	33,1	11,2	4,4
4	4	42,0	586,4	30,3	10,3	4,9

Tableau E.5 Présentation de la concentration en ppm des Polyphénols Cyanidine et Peonidine dans les échantillons de jus désacidifié avec la résine échangeuse d'ion

		Cyanidine	Peonidine
Test	Volume	(ppm)	
Échantillon Initial		181,1	22,8
1	0	188,2	23,4
1	1	0	0
1	2	0	0
1	3	38,7	7,4
1	4	104,0	16,0
2	0	179,9	22,6
2	1	0	0
2	2	2,0	0,7
2	3	67,1	11,7
2	4	143,4	20,4
3	0	180,0	22,9
3	1	0	0
3	2	0	0
3	3	59,2	11,4
3	4	142,9	21,1
4	0	189,9	23,9
4	1	0	0
4	2	0	0
4	3	48,9	9,0
4	4	124,3	18,8