

Haute École
« ICHEC – ECAM – ISFSC »



Enseignement supérieur de type long de niveau universitaire

Étude de faisabilité des potentielles synergies éco-industrielles impliquant les drêches de brasseries au sein du territoire bruxellois

Mémoire présenté par :
Clotilde CHASTANET

Pour l'obtention du diplôme de :
Master Ingénieur commercial
Année académique **2023-2024**

Promoteur :
Pascal VERHASSELT

Boulevard Brand Whitlock 6 - 1150 Bruxelles

Haute École
« ICHEC – ECAM – ISFSC »



Enseignement supérieur de type long de niveau universitaire

Étude de faisabilité des potentielles synergies éco-industrielles impliquant les drêches de brasseries au sein du territoire bruxellois

Mémoire présenté par :
Clotilde CHASTANET

Pour l'obtention du diplôme de :
Master Ingénieur commercial
Année académique **2023-2024**

Promoteur :
Pascal VERHASSELT

Boulevard Brand Whitlock 6 - 1150 Bruxelles

Engagement anti-plagiat

Je soussignée, CHASTANET, Clotilde, en Master 2, déclare par la présente que le travail ci-joint respecte les règles de référencement des sources reprises dans le règlement des études signé lors de mon inscription à l'ICHEC (respect de la norme APA concernant le référencement dans le texte, la bibliographie, etc.) ; que ce travail est l'aboutissement d'une démarche entièrement personnelle; qu'il ne contient pas de contenus produits par une intelligence artificielle sans y faire explicitement référence. Je certifie sur l'honneur avoir pris connaissance des documents précités et que le travail présenté est original et exempt de tout emprunt à un tiers non-cité correctement.

Dans le cadre du dépôt en ligne, la signature consiste en l'introduction du mémoire via la plateforme ICHEC-Student.

Déclaration sur l'honneur sur le respect des règles de référencement et sur l'usage des IA génératives dans le cadre du mémoire ou d'un travail

Pour les travaux et le mémoire, l'étudiant mentionne sur la page de garde qu'il a pris connaissance des règles en matière de référencement des sources et qu'il les a respectées dans le travail en question, en insérant et signant le paragraphe suivant :

« Je soussigné, NOM, Prénom, Année d'études, déclare par la présente que le travail ci-joint respecte les règles de référencement des sources reprises dans le règlement des études en signé lors de mon inscription à l'ICHEC (respect de la norme APA concernant le référencement dans le texte, la bibliographie, etc.) ; que ce travail est l'aboutissement d'une démarche entièrement personnelle; qu'il ne contient pas de contenus produits par une intelligence artificielle sans y faire explicitement référence. Par ma signature, je certifie sur l'honneur avoir pris connaissance des documents précités et que le travail présenté est original et exempt de tout emprunt à un tiers non-cité correctement. » Date et Signature.

L'étudiant(e) doit également compléter, signer et faire figurer dans le travail / mémoire le document ci-dessous. L'objectif est un usage transparent de l'IA. Merci de cocher les cases qui vous concernent.

Chastanet Clotilde, 150069

Je soussigné(e), (nom + numéro de matricule), déclare sur l'honneur les éléments suivants concernant l'utilisation des intelligences artificielles (IA) dans mon travail / mémoire :


Type d'assistance		Case à cocher
Aucune assistance	J'ai rédigé l'intégralité de mon travail sans avoir eu recours à un outil d'IA générative.	X
Assistance avant la rédaction	J'ai utilisé l'IA comme un outil (ou moteur) de recherche afin d'explorer une thématique et de repérer des sources et contenus pertinents.	
Assistance à l'élaboration d'un texte	J'ai créé un contenu que j'ai ensuite soumis à une IA, qui m'a aidé à formuler et à développer mon texte en me fournissant des suggestions.	
	J'ai généré du contenu à l'aide d'une IA, que j'ai ensuite retravaillé et intégré à mon travail.	
	Certaines parties ou passages de mon travail/mémoire ont été entièrement générés par une IA, sans contribution originale de ma part.	
Assistance pour la révision du texte	J'ai utilisé un outil d'IA générative pour corriger l'orthographe, la grammaire et la syntaxe de mon texte.	
	J'ai utilisé l'IA pour reformuler ou réécrire des parties de mon texte.	
Assistance à la traduction	J'ai utilisé l'IA à des fins de traduction pour un texte que je n'ai pas inclus dans mon travail.	
	J'ai également sollicité l'IA pour traduire un texte que j'ai intégré dans mon mémoire.	
Assistance à la réalisation de visuels	J'ai utilisé une IA afin d'élaborer des visuel, graphiques ou images.	
Autres usages		

Je m'engage à respecter ces déclarations et à fournir toute information supplémentaire requise concernant l'utilisation des IA dans mon travail / mémoire, à savoir :

J'ai mis en annexe les questions posées à l'IA et je suis en mesure de restituer les questions posées et les réponses obtenues de l'IA. Je peux également expliquer quel le type d'assistance j'ai utilisé et dans quel but.

Fait à Bruxelles (ville), le 19.08.2024(date)

Signature : Clotilde Chastanet, 150069[Prénom Nom de l'étudiant(e) et matricule]



À ma Tante Sophie

Le 26 juin 2024, alors que tu rejoignais cette Terre que tu as tant protégé, je passais en revue ta bibliothèque. Un livre a retenu mon attention, « Pour que la terre reste humaine » (Hulot et al., 1999). Je l'ai ouvert, au hasard, et voilà ce que j'ai pu lire en titre de la page 157 : « Pour une écologie industrielle ? Est-ce qu'une telle expression n'est pas une contradiction dans les termes ? » (Hulot et al., 1999, p. 157).

Tomber sur la méthodologie qui sous-tend mon mémoire et sur cet oxymore qui me taraudait depuis le début de mon étude, en ouvrant un de tes livres au hasard, ça n'arrive qu'en ta présence.

Ce mémoire est pour toi. J'espère qu'il t'aurait rendue fière.

Table des matières

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : LES DRECHES, UN RESIDU SOLIDE LIGNOCELLULOSIQUE ISSU DU BRASSAGE.....	4
1. LES DRECHES DE BRASSERIE : UN RESIDU, DES STATUTS JURIDIQUES	4
1.1 <i>Le statut juridique de déchet</i>	4
1.2 <i>Matières premières pour l'alimentation des animaux</i>	6
1.3 <i>Sous-produits, co-produits, flux connexe, denrées alimentaires</i>	6
2. UN FLUX CONNEXE ISSU DU BRASSAGE	7
2.1 <i>Des céréales maltées</i>	7
2.2 <i>L'hydrolyse enzymatique des céréales lors de l'empâtage</i>	8
3. UN MATÉRIAU LIGNOCELLULOSIQUE	10
3.1 <i>La cellulose</i>	10
3.2 <i>L'arabinoxylane</i>	12
3.3 <i>Les lignines</i>	13
4. DES PROPRIÉTÉS PHYSICOCIMIQUES	15
4.1 <i>La température</i>	16
4.2 <i>La couleur</i>	17
4.3 <i>Taille des particules et granulométrie</i>	18
4.4 <i>Le taux d'humidité</i>	19
4.5 <i>L'activité hydrique</i>	21
4.6 <i>La capacité de rétention d'eau (WHC) et la capacité de rétention d'huile (OHC)</i>	22
4.7 <i>Les masses volumiques en milieu granulaire</i>	23
4.8 <i>La densité réelle</i>	26
4.9 <i>Le potentiel hydrogène pH</i>	27
4.10 <i>Le rapport carbone/azote (rapport C/N)</i>	28
4.11 <i>Le pouvoir énergétique</i>	29
5. DES CRITÈRES DE FAISABILITÉ MIS EN ÉVIDENCE PAR LE CADRE JURIDIQUE, LE PROCESSUS DE BRASSAGE, LA COMPOSITION CHIMIQUE ET LES PROPRIÉTÉS PHYSICOCIMIQUES DES DRÊCHES DE BRASSERIE	30
5.1 <i>Des critères qualitatifs propres aux drêches de brasserie</i>	30
5.2 <i>Des critères techniques propres aux drêches de brasserie</i>	34
5.3 <i>Des critères quantitatifs propres aux drêches de brasserie</i>	35

5.4	<i>Des critères légaux/réglementaires propres aux drêches de brasserie</i>	36
5.5	<i>Des critères économiques propres aux drêches de brasserie</i>	37
5.6	<i>Des critères de faisabilité culturelle.....</i>	39
5.7	<i>Des critères de faisabilité environnementale</i>	39
CONCLUSION DU CHAPITRE 1		40
 CHAPITRE 2 UN PROJET D'ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE POUR LA VALORISATION DES FLUX DE DRÊCHES ISSUES DES BRASSERIES DE LA RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE. 41		
1.	L'ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE, BOUCLAGE DE FLUX DE MATIÈRE AU SEIN DE TERRITOIRE.....	42
1.1	<i>L'écologie industrielle et territoriale.....</i>	42
1.2	<i>Le bouclage de flux de matières</i>	46
1.3	<i>Une gestion de projet et une étude de faisabilité inspirées de l'écologie industrielle.....</i>	49
2.	UN ÉCOSYSTÈME DE BRASSERIES DANS UN TERRITOIRE URBAIN, DE LA NÉCESSITÉ D'ADOPTER UNE DÉMARCHE SYSTÉMIQUE	52
2.1	<i>La résilience territoriale, une approche systémique au sein de Bruxelles-Capitale.....</i>	53
2.2	<i>Le gisement de drêches en Région de Bruxelles-Capitale.....</i>	54
2.3	<i>La cartographie du gisement de drêches en Région de Bruxelles-Capitale</i>	57
3.	DES SYNERGIES ÉCO-INDUSTRIELLES IMPLIQUANT LES DRÊCHES DE BRASSERIES AU SEIN DE LA RÉGION BRUXELLOISE	59
3.1	<i>Des synergies existantes.....</i>	59
3.2	<i>Des synergies potentielles.....</i>	60
3.3	<i>Identification de quelques synergies potentielles impliquant les drêches de brasseries bruxelloises.....</i>	63
CONCLUSION DU CHAPITRE 2		65
 CHAPITRE 3 ÉTUDE DE FAISABILITÉ DE POTENTIELLES SYNERGIES ÉCO- INDUSTRIELLES IMPLIQUANT LES DRÊCHES DE BRASSERIE AU SEIN DU TERRITOIRE BRUXELLOIS 67		
1.	DES SYNERGIES DE SUBSTITUTION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DES AMÉNAGEMENTS DU SOL PAR LES DRÊCHES DE BRASSERIE	67
 CHAPITRE 4 L'ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE, OXYMORE NATUREL 70		
1.	QUELLES SONT LES LIMITES ET LES BIAIS DE CETTE ÉTUDE DE FAISABILITÉ ?	70
2.	QUELS SONT LES FREINS AUX SYNERGIES ÉCO-INDUSTRIELLES IMPLIQUANT LES DRÊCHES DE BRASSERIE À BRUXELLES ?	71
3.	COMMENT FAVORISER LES SYNERGIES ÉCO-INDUSTRIELLES IMPLIQUANT LES DRÊCHES À BRUXELLES ?	72

CONCLUSION.....	73
BIBLIOGRAPHIE	74

Liste des figures et tableaux

FIGURE 1 SCHEMA DE L'OBTENTION DES DRECHES DE BRASSERIES	9
FIGURE 2 SCHEMA DE REPRESENTATION DE LA CHAINE DE CELLULOSE	11
FIGURE 3 STRUCTURE MOLECULAIRE DE L'ARABINOXYLANE	13
FIGURE 4 STRUCTURE MOLECULAIRE D'UN FRAGMENT DE LIGNINE	14
FIGURE 5 MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE DE PARTICULES DE DRECHES DE BRASSERIE (A) GROSSISSEMENT 100 FOIS ; (B) GROSSISSEMENT 300 FOIS	16
FIGURE 6 PHOTOGRAPHIE D'UN ECHANTILLON DE DRECHES DE BRASSERIE FRAICHES (88% ORGE, 12% SEIGLE)	17
FIGURE 7 MESURES EXPERIMENTALES DE LA LONGUEUR DE PARTICULES DE DRECHES ($\pm 0,5$ MM)	18
FIGURE 8 L'ECONOMIE CIRCULAIRE, SEPT PILIERS ET TROIS DOMAINES	43
FIGURE 9 CARTOGRAPHIE DU SOUS-SYSTEME TERRITORIAL CONSTITUE PAR LES BRASSERIES EN REGION DE BRUXELLES-CAPITALE	58
FIGURE 10 SCHEMA DES PRINCIPALES SYNERGIES POTENTIELLES IMPLIQUANT LES DRECHES DE BRASSERIE	61
TABLEAU 1 MESURES EXPERIMENTALES DU TAUX D'HUMIDITE DE DEUX ECHANTILLONS DE DRECHES DE BRASSERIE	20
TABLEAU 2 MESURES EXPERIMENTALES DES MASSES VOLUMIQUES DE QUATRE ECHANTILLONS DE DRECHES DE BRASSERIE	25
TABLEAU 3 DES CRITERES QUALITATIFS PROPRES AUX DRECHES DE BRASSERIE.....	33
TABLEAU 4 DES CRITERES TECHNIQUES PROPRES AUX DRECHES DE BRASSERIE.....	35
TABLEAU 5 DES CRITERES QUANTITATIFS PROPRES AUX DRECHES DE BRASSERIE	36
TABLEAU 6 DES CRITERES REGLEMENTAIRES PROPRES AUX DRECHES DE BRASSERIE	37
TABLEAU 7 PLANIFICATION DE LA GESTION DE PROJET EN SOUS-OBJECTIFS.....	49
TABLEAU 8 ESTIMATIONS DES RATIOS M DRECHES / HL EN FONCTION DES DEUX TYPOLOGIES DE BIERES BRASSEES.....	55
TABLEAU 9 ESTIMATION DU GISEMENT DE DRECHES A L'ECHELLE DE LA REGION DE BRUXELLES-CAPITALE	56
TABLEAU 10 ÉTUDE DE FAISABILITE QUALITATIVE DES SYNERGIES 1 & 2	68
TABLEAU 11 EXTRAIT D'ETUDE DE FAISABILITE QUANTITATIVE POUR LES SYNERGIES 1 & 2	68

Introduction

La Région de Bruxelles-Capitale compte en 2024 une vingtaine de brasseries sur son territoire. Cette industrie, qui a connu une forte croissance depuis 2014, produit annuellement plus de 70 000 hl de bières et génère un gisement de matière organique de plus de 2 500 t par an à Bruxelles : les drêches de brasserie.

Ce résidu non-soluble de céréales, à l'apparence d'un porridge humide et chaud, extrait des cuves de brassage, est considéré par certains comme un déchet alimentaire. Pourtant, les possibilités de valorisation de ce produit sont nombreuses. En milieu rural et de manière vernaculaire, les drêches ont souvent été utilisées comme aliment pour le bétail. À Bruxelles, la moitié des brasseries font aujourd'hui appel à une société privée de gestion des déchets qui valorise cette biomasse de manière énergétique par bio-méthanisation. En outre, ce matériau, fait de celluloses, de lignines et de protéines peut donner lieu à un grand nombre de « valorisation matière » (Adoue, 2007, p. 60). Les drêches peuvent être valorisées en compost, en paillage à froid, en substrat pour cultiver des champignons ou pour produire des enzymes, en farine, en limonade, en sauce shoyu, en biscuit, en isolant ou en panneau de construction. Si cette liste d'applications est loin d'être exhaustive, certaines de celles-ci donnent déjà lieu à des synergies dans l'écosystème bruxellois. Les drêches représentent un coût pour les brasseries alors que le potentiel économique de leur valorisation est peu exploité. Dans l'espace et le système fini dans laquelle nous évoluons, il y a urgence à utiliser les ressources issues du monde végétale de manière plus efficace, et à veiller à réduire les émissions de gaz à effet de serre liées à leurs cycles de vie. Il y a urgence à rétablir les limites planétaires environnementales et sociales et à réparer, grâce à une économie régénératrice et inclusive. De nombreuses brasseries bruxelloises, soucieuses de leur environnement au sens large, s'inscrivent dans ce paradigme.

La brasserie En Stoemelings, créée en 2014, a accueilli mon stage en gestion de projet entre 2022 et 2023. L'objectif de cette gestion de projet était d'identifier des potentielles synergies éco-industrielles impliquant les drêches de brasserie et d'étudier leur faisabilité au sein du territoire bruxellois. Ce mémoire s'inscrit dans la continuité de ce projet et de cette étude de faisabilité.

Dans un premier temps, nous tâcherons d'identifier le contexte théorique et méthodologique de la gestion de projet. Il conviendra de restituer des apports théoriques issus de la littérature scientifique afin de caractériser les drêches. Lors de l'identification de l'écosystème de brasseries qui coproduisent ce matériau lignocellulosique en Région de Bruxelles-Capitale, il sera question de la nécessité d'adopter une démarche systémique. Enfin, nous développerons la méthodologie qui structure la gestion de projet, très largement inspirée de l'ouvrage « Mettre en œuvre l'écologie industrielle » (Adoue, 2007). En effet, l'auteur propose des critères de faisabilité que nous reprendrons dans cette étude de faisabilité et que nous compléterons avec d'autres outils, notamment abordés lors des cours de l'option Nouveaux Business Modèles Durables.

Dans un second temps, nous nous emploierons à identifier les synergies éco-industrielles potentielles au sein du territoire bruxellois à l'aune de l'écologie industrielle. Tout d'abord, nous estimerons le gisement à l'échelle de la brasserie En Stoemelings. Lors de mon stage en gestion de projet, nous avons pu procéder à quelques mesures empiriques d'échantillons afin de pouvoir estimer le gisement à l'échelle de la Région de Bruxelles-Capitale. Inspirée du Design Thinking, cette phase de convergence sera suivie d'une étape de divergence dans laquelle nous identifierons les potentielles synergies éco-industrielles, en s'appuyant sur la littérature scientifique, nos recherches et les informations recueillies lors des entretiens qualitatifs menés auprès de nombreuses parties prenantes.

Nous mènerons ensuite l'étude de faisabilité des potentielles synergies éco-industrielles en empruntant la méthodologie mise au point par Adoue (2007). Les recherches de l'ingénieur en génie des systèmes industriels l'ont amené à définir les facteurs influençant la réalisation d'une synergie et à les organiser selon un ordre et une séquence logique, selon laquelle les critères influencent les prochains. L'étude de faisabilité commence par le critère qualitatif. La pureté, les caractéristiques physiques et la qualité du flux de matière à valoriser imposent parfois la mise en place de solutions techniques, de prétraitement ou de séchage. Il s'agit alors d'évaluer la faisabilité technique. Puis lorsque la qualité du flux a été potentiellement adaptée, et la taille du flux potentiellement modifiée, l'étude de faisabilité quantitative peut être menée. Elle permet d'évaluer l'adéquation entre offre et besoin, sa variabilité et souligne l'importance de la notion de territoire. Ensuite, la faisabilité réglementaire, qui découle de la qualité du flux et des techniques utilisées, peut être un facteur limitant, voire rédhibitoire. Enfin, la faisabilité économique doit être menée, eu égard aux résultats des autres critères, qui déterminent les coûts de création et de mise en œuvre de la synergie. Même économiquement viable, la faisabilité d'une synergie est encore mise à l'épreuve. En effet, Adoue (2007) met en exergue l'importance du facteur culturel. Sans adhésion, échange d'informations sur les flux de matière et sans capacité et volonté de collaborer, une synergie, même réalisable, ne sera pas mise en œuvre. Enfin, la faisabilité environnementale doit permettre de s'assurer que la synergie n'a pas d'impact négatif sur l'environnement. Pour chacune de ces études de faisabilité, il conviendra d'identifier et de sélectionner des critères pertinents et cohérents avec les drêches de brasserie et les pistes de synergies identifiées.

Finalement, nous nous attellerons à adopter une distanciation critique face à l'écologie industrielle et à notre étude de faisabilité. Nous essaierons d'identifier les limites et les biais de notre méthodologie, mais aussi comment nous aurions pu les lever. Enfin, les freins rencontrés tout au long de cette étude serviront de base à la formulation de recommandations opérationnelles.

L'étude de faisabilité des potentielles synergies éco-industrielles impliquant les drêches de brasserie, bien que limitée au territoire de Bruxelles-Capitale, est loin d'être exhaustive. Limitée par le temps et les moyens, cette étude sera qualitative et semi-quantitative. Bien que cette étude de faisabilité ne permette pas d'isoler une ou des synergies réalisables, ni même de les prototyper et de les tester, elle pourrait servir de base à une étude plus rigoureuse et approfondie, ou aider les parties prenantes concernées à la prise de décision, à la pérennisation et au développement de synergies.

Tout au long de cette étude, j'ai tâché de faciliter l'échange d'informations indirect en me positionnant comme une entité tierce issue du milieu universitaire (Adoue, 2007). Une fois les données recueillies, des potentielles synergies identifiées et une étude de faisabilité entamée, il s'agit de restituer ces informations aux acteurs concernés (Adoue, 2007). Pour ce faire, je souhaite rassembler les parties prenantes lors d'un appel vidéo, leur présenter mon étude ainsi que mes recommandations opérationnelles. Parmi celles-ci, le but de cet appel : favoriser l'échange d'informations, point de départ de la création de synergies (Adoue, 2007).

La drêche est un matériau organique et instable, qui impose une certaine complexité aux écosystèmes qui s'y intéressent. Je suis très reconnaissante d'y avoir été confrontée. L'écologie industrielle, oxymore naturel, m'a permis d'élaborer une méthodologie solide, applicable non seulement aux drêches, mais aussi à d'autres flux de matières ou d'énergie. À son échelle, cette gestion de projet résonne avec l'urgence à laquelle nous devons agir pour minimiser les impacts de notre économie sur les écosystèmes qui l'entourent, globalement, mais aussi localement, sur son territoire.

Chapitre 1 : Les drêches, un résidu solide lignocellulosique issu du brassage

L'industrie brassicole consomme principalement de l'eau, des céréales (orge, froment, avoine, seigle...), du houblon, des levures et de l'énergie et génère un gisement de matière organique conséquent : les drêches de brasserie.

Dans ce premier chapitre, des informations clé issues des textes de lois et de la littérature scientifiques seront rassemblées et analysées afin de mieux appréhender ce matériau lignocellulosique.

Tantôt caractérisées de déchets alimentaires, de coproduits ou de produits secondaires, il sera question de clarifier le statut administratif qui s'applique aux drêches, avant de s'intéresser aux étapes du brassage qui mènent à leur production. Ensuite, un changement d'échelle sera opéré afin de caractériser la composition chimique de ce résidu. Cette échelle de l'ordre du nanomètre permettra de mettre en évidence des propriétés physicochimiques et de les comprendre.

À l'issue de ce chapitre, des critères de faisabilité propres aux drêches de brasserie seront mis en évidence et commenceront à structurer l'étude de faisabilité des synergies impliquant les drêches de brasserie.

1. Les drêches de brasserie : un résidu, des statuts juridiques

La drêche de brasserie, qui peut aussi prendre l'orthographe de drèche, se retrouve dans la littérature scientifique anglophone sous le nom de *spent grain* et sous l'acronyme BSG pour Brewer' Spent Grain (Mussatto et al., 2006). Si les scientifiques s'accordent autour d'une nomenclature, tout comme les industriels, les législateurs prévoient des statuts différents pour un même résidu.

Mussatto, Dragone et Roberto (2006) décrivent les drêches comme le coproduit principal de l'industrie brassicole. En effet, les brasseries produisent également des résidus de houblons et de levures. Ces dernières sont d'ailleurs souvent valorisées comme aliment pour les porcs (Duynie Feed, 2024). Cette société, Duynie Feed, qui propose également des drêches de brasseries, n'hésite pas à se définir comme « le leader européen du marché de la transformation des coproduits » (Duynie Feed, 2022, para. 1).

1.1 Le statut juridique de déchet

Les brasseries sont des installations classées dans la rubrique 21 qui ont l'obligation de demander un permis d'environnement de Classe 1B ou 2, en fonction de la puissance électrique

totale de l'installation (Bruxelles Environnement, 2022). Sur le site web de Bruxelles Environnement, les drêches sont reprises dans la rubrique des déchets, au même titre que les eaux usées produites par les brasseries, et il est conseillé aux brasseurs de les évacuer rapidement (Bruxelles Environnement, 2022). Dans ce cas-ci, les drêches sont considérées comme des déchets. Les dits « déchets » sont définis comme « toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se débarrasser » (Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives, 2008, Article 3).

Le grain utilisé dans la fabrication de la bière, principalement de l'orge mais aussi du froment et du seigle, est considéré par l'Agence fédérale pour la sécurité de la chaîne alimentaire (nommée ci-après AFSCA) comme une matière première, mais répond également à la définition européenne d'une « denrée alimentaire », c'est-à-dire, « toute substance ou produit, transformé, partiellement transformé ou non transformé, destiné à être intégré ou raisonnablement susceptible d'être ingéré par l'être humain » (Règlement (CE) n° 178/2002 du Parlement européen et du Conseil du 28 janvier 2002 établissant les principes généraux et les prescriptions générales de la législation alimentaire, instituant l'Autorité européenne de sécurité des aliments et fixant des procédures relatives à la sécurité des denrées alimentaires, 2002, Article 2). Ainsi, les drêches peuvent être qualifiées de « déchets alimentaires », définis comme « toutes les denrées alimentaires au sens de l'article 2 du R178/2002 du Parlement européen et du Conseil qui sont devenues des déchets » (Circulaire relative aux flux valorisés en alimentation animale : interdiction d'utilisation des déchets, nouveaux statuts juridiques de ces produits, 2021, p. 3). La société Vanheede, spécialisée dans la gestion des déchets et qui valorise les drêches de presque la moitié des brasseries bruxelloises emploie également ce terme de déchets alimentaires (*Déchets alimentaires, biométhanisation - Vanheede Environnement - Vanheede*, 2024).

Enfin, les drêches répondent aussi à la définition de « biodéchets », qui englobent « les déchets biodégradables de jardin ou de parc, les déchets alimentaires ou de cuisine issus des ménages, des restaurants, des traiteurs ou des magasins de vente au détail, ainsi que les déchets comparables provenant des usines de transformation de denrées alimentaires » (Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives, 2008, Article 3).

En revanche, selon une circulaire de l'AFSCA, « depuis le 4 juillet 2020, à la suite de modifications de la directive « directive-cadre-déchets », aucun « déchet » ne peut plus être valorisé en alimentation animale. Ceci a pour conséquence que les produits issus du secteur alimentaire ne peuvent plus passer par le statut juridique de déchet, même temporairement, si leur destination est l'alimentation animale » (Circulaire relative aux flux valorisés en alimentation animale : interdiction d'utilisation des déchets, nouveaux statuts juridiques de ces produits, 2021, p. 1).

1.2 Matières premières pour l'alimentation des animaux

Le statut juridique du produit devient contraignant et oblige son producteur à penser à la prochaine étape du cycle de vie de ce matériau. Dans le cas d'une valorisation en alimentation animale, comme c'est le cas pour certaines brasseries à Bruxelles, les exploitants du secteur des denrées alimentaires doivent enregistrer auprès de l'AFSCA une nouvelle activité de « fabricant matières premières feed » (Voir ANNEXE 1 : AFSCA Fiche technique activité TRA-ACT-251-Fabricant de matières premières feed). Ils deviennent ainsi des exploitants du secteur de l'alimentation animale et les drêches deviennent juridiquement des « matières premières pour l'alimentation des animaux », définies à l'échelle européenne comme « les produits d'origine végétale ou animale dont l'objectif principal est de satisfaire les besoins nutritionnels des animaux, à l'état naturel, frais ou conservés, et les dérivés de leur transformation industrielle, ainsi que les substances organiques ou inorganiques, comprenant ou non des additifs pour l'alimentation animale, qui sont destinés à être utilisés pour l'alimentation des animaux par voie orale, soit directement en l'état, soit après transformation, ou pour la préparation d'aliments composés pour animaux ou en tant que supports des prémélanges » (Règlement (CE) n° 767/2009 du Parlement européen et du Conseil du 13 juillet 2009 concernant la mise sur le marché et l'utilisation des aliments pour animaux, modifiant le règlement (CE) n° 1831/2003 du Parlement européen et du Conseil et abrogeant la directive 79/373/CEE du Conseil, la directive 80/511/CEE de la Commission, les directives 82/471/CEE, 83/228/CEE, 93/74/CEE, 93/113/CE et 96/25/CE du Conseil, ainsi que la décision 2004/217/CE de la Commission, 2009, Article 3). Le but étant d'assurer la traçabilité et la sécurité tout au long de la chaîne alimentaire en octroyant un statut juridique cohérent aux drêches.

1.3 Sous-produits, co-produits, flux connexe, denrées alimentaires

Cependant, la fiche technique de l'activité brasserie et qui requiert une autorisation auprès de l'AFSCA, intègre des « activités implicites », couvertes légalement par l'activité principale de brasserie et qui n'impliquent pas qu'elles soient enregistrées : d'une part, la « vente des sous-produits de la production de bière pour l'aliment pour la consommation humaine » et d'autre part la « vente des co-produits de la production de bière comme alimentation animale, uniquement si destinées à un opérateur du secteur de l'alimentation animale » (AFSCA, 2023).

Autrement dit, si une brasserie décide de vendre des drêches à une société comme Duynie Feed, qui vend des drêches pour ruminants et porcs, elles seront considérées comme un co-produit.

Enfin, la première activité implicite laisse penser que les drêches, issues de denrées alimentaires telles qu'elles sont définies par le règlement européen (cf. supra p.5), peuvent hériter de ce statut juridique, sans autre enregistrement auprès de l'AFSCA, si elles sont destinées à l'alimentation humaine.

Cela étant, la circulaire de l'AFSCA souligne aussi que « (...) certains statuts sont exclusifs. Les produits visés dans le cadre de cette circulaire ne peuvent pas être en même temps une denrée alimentaire et un aliment pour animaux » (AFSCA, 2023).

L'utilisation des termes co-produit ou sous-produit n'a pas de valeur légale. Le règlement européen 2022/1104 privilégie cependant l'utilisation de coproduit ou de produit à sous-produits, « afin de refléter la situation du marché et la formulation habituellement utilisée en pratique par les exploitants du secteur de l'alimentation animale pour mettre en avant la valeur commerciale desdites matières » (Règlement (UE) 2022/1104 de la Commission du 1er juillet 2022 modifiant le règlement (UE) n° 68/2013 relatif au catalogue des matières premières pour aliments des animaux, 2022, Partie A, alinéa 11).

À l'échelle nationale, l'AFSCA a même barré et corrigé la première version de la circulaire relative aux flux valorisés en alimentation animale datant du 4 novembre 2020 et a remplacé l'utilisation du terme co-produits par celui de « flux connexes du secteur alimentaire » (Voir ANNEXE 3 : AFSCA – Circulaire relative aux flux valorisés en alimentation animale du 04.11.2020 annotée et comparée à sa version corrigée du 12.08.2021). La production de drêches engendrée par la fabrication de bière y est citée comme un flux connexe traditionnellement utilisés dans l'alimentation animale et indique que ces flux répondent à la définition de « matières premières pour aliments des animaux », développée plus haut (Circulaire relative aux flux valorisés en alimentation animale : interdiction d'utilisation des déchets, nouveaux statuts juridiques de ces produits, 2021, p. 7).

Les drêches de brasserie, sans qu'elles ne soient modifiées dans leur état ou leur matière, peuvent vêtir les statuts juridiques de déchets, déchets alimentaires, biodéchets, ou de matières premières pour l'alimentation des animaux ou de denrées alimentaires. Notons qu'il s'agit de « ou » exclusifs. Le statut juridique des drêches dépend de leur valorisation future et de leur cycle de vie. Il s'agit d'un maillon juridique qui permet de raccrocher ce résidu à une chaîne de valeur.

2. Un flux connexe issu du brassage

Les drêches sont constituées des résidus solides des grains obtenus au terme de l'empâtage, après dilution de la maïsche et filtration. Sans rentrer dans le détail du brassage et de sa chimie, il s'agit d'appréhender la chaîne de valeur dans laquelle ce flux connexe s'inscrit afin d'identifier son cycle de vie.

2.1 Des céréales maltées

Il sera question de l'orge dans cette partie par souci de simplicité. Il s'agit de la céréale la plus utilisée dans le brassage, mais il faut garder à l'esprit que d'autres céréales comme le froment ou le seigle peuvent être utilisées.

Légalement, en Belgique, l'AFSCA définit la bière comme « la boisson obtenue après fermentation alcoolique d'un moût préparé essentiellement à partir de matières premières amylacées et sucrée dont au moins 60% de malt d'orge ou de froment, ainsi qu'à partir de houblon, éventuellement sous une forme transformée, et d'eau de brassage » (AFSCA, 2023).

Tout d'abord, l'orge de brassage est récolté, nettoyé et calibré. Ensuite, la céréale sera maltée. Le maltage est un processus en trois étapes :

1) la macération : le but est d'hydrater la céréale pour activer sa germination. Pour ce faire, les grains sont placés dans des cuves avec de l'eau à une température allant de 5°C à 18°C pendant une durée de deux jours ;

2) la germination : le but ici est d'activer les enzymes dont les β -glucanases en les mettant en contact avec de l'air humide à une température entre 15°C et 21°C pendant six à sept jours ;

3) le séchage, ou touraillage : l'orge est séchée à une température allant de 40°C à 60°C afin d'arriver à un taux d'humidité de 4-5% pour éviter toute contamination microbienne et pour favoriser le développement d'arômes (Mussatto et al., 2006).

2.2 L'hydrolyse enzymatique des céréales lors de l'empâtage

Livrée dans la brasserie, l'orge maltée est stockée, puis concassée avant d'entamer le brassage. Le but de ce dernier est principalement d'extraire l'amidon et de le convertir en sucres fermentescibles.

En ce sens, l'orge maltée est mélangée à de l'eau chaude lors de l'empâtage. La température passe de 37°C jusqu'à 78°C, dépendant des paliers choisis et du type de bières recherchées, afin de promouvoir une hydrolyse enzymatique des constituants du malt, c'est-à-dire, de l'amidon, des protéines, β -glucanes et arabinoxylanes. Lors de ce processus, ces composants sont solubilisés et convertis en sucre fermentescibles (principalement du maltose et du maltotriose) et en sucres non-fermentescibles (dextrines), pendant que les protéines sont dégradées partiellement en polypeptides et en acides aminés. Les parties insolubles du grain et celles qui n'ont pas été dégradées tombent dans le fond de la cuve matière. Le liquide sucré obtenu, la maïsche, sera ensuite filtré afin d'isoler la fraction liquide, le moût, de la fraction solide, les drêches (Mussatto et al., 2006).

Le moût sera ensuite porté à ébullition puis refroidi avant d'être transféré en cuve de fermentation pendant laquelle les sucres fermentescibles seront dégradés en alcool et en dioxyde de carbone par les levures, pour transformer petit à petit ce moût en bière.

La Figure 1 ci-dessous schématise le processus de production des drêches de brasseries à partir d'orge.

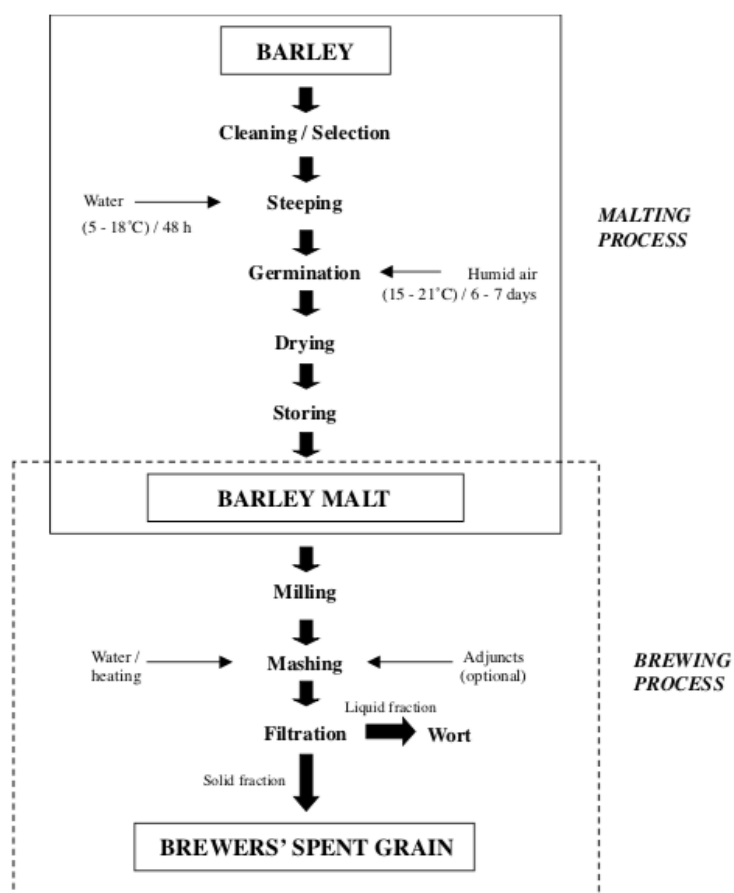


Figure 1 Schéma de l'obtention des drêches de brasseries

Source : Mussatto, S. I., Dragone, G., & Roberto, I. C. (2006). Brewers' spent grain : Generation, characteristics and potential applications. *Journal of Cereal Science*, 43, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.06.001>

En revanche, les brasseries ne sont pas les seules activités de transformation à produire des drêches d'orge. Les distilleries produisent aussi des drêches et Bruxelles en compte deux sur son territoire (cf. infra p.). Dans un souci de simplification, nous n'appréhenderons pas le procédé de fabrication des distilleries Il conviendrait pourtant de s'y intéresser afin de tirer des enseignements sur la composition de ces drêches de distillerie, qui diffèrent des drêches de brasserie.

Le procédé d'obtention des drêches met en évidence de nombreux enseignements sur cette matière. Il s'agit de la fraction solide d'une filtration, humide et à une température avoisinant les 60°C lorsqu'elle sort de la cuve matière. Cette orge maltée a également subi une hydrolyse enzymatique, ce qui a évidemment une grande influence sur sa composition chimique et ses propriétés physicochimiques.

3. Un matériau lignocellulosique

Les drêches sont constituées principalement des enveloppes primaires et secondaires du grain, qui, non solubles, constituent le résidu solide de la filtration à l'issue de l'hydrolyse enzymatique. Les drêches de brasserie sont composées principalement de fibres et de protéines. La cellulose, l'arabinoxylane et les lignines, des substances qui construisent le monde végétal, attireront notre attention.

L'orge est une graine composée de trois parties majeures : le germe (aussi appelé embryon), l'albumen (appelé endosperme dans la littérature anglo-saxonne) et les enveloppes. Ces dernières sont divisées en trois couches principales : le tégument (la paroi la plus proche des aleurones) semi-perméable, les couches de péricarpe et l'écorce la plus externe, toutes deux insolubles dans l'eau. Ces trois enveloppes ont pour but de protéger le germe et résisteront même à l'hydrolyse enzymatique. Ces trois fractions composent majoritairement les drêches et sont riches en cellulose, en polysaccharides non-cellulosiques et en lignine (Mussatto et al., 2006).

Pour les auteurs, la drêche est un matériau lignocellulosique qui contient en moyenne 20% de cellulose (+/- 4 points de %), 25% de polysaccharides non-cellulosiques (+/-3,5 points de %), principalement des arabinoxylanes, 20% de lignine (+/- 8 points de %), 20% de protéines (+/- 5 points de %) et une petite quantité de lipides et des cendres (Mussatto et al., 2006). Les pourcentages sont exprimés en pourcentage de matière sèche et varient selon les sources de la littérature scientifique et les sources des composants. Nous utiliserons des moyennes avec un intervalle de confiance afin de souligner cette variabilité. La cellulose, les arabinoxylanes et les lignines sont des fibres et rassemblent à elles seules près de 70% de la matière sèche des drêches.

Selon le maltage, les drêches peuvent présenter des petites quantités d'amidon dans l'endosperme, presque négligeable. Il en est de même pour les traces d'houblons, d'autant plus qu'il est souvent utilisé dans des sacs en textiles qui retiennent les résidus.

Pour Huig, d'une part et Santos et al. d'autre part, la composition chimique des drêches de brasserie varie en fonction de nombreux facteurs, comme la variété d'orge, le moment de récolte, le maltage, et les conditions de brassage (paraphrasés par Mussatto et al., 2006). Bien qu'elle soit relative, cette variabilité chimique devra être prise en compte lors de l'étude de faisabilité qualitative car elle pourrait avoir des impacts sur les propriétés physiques des drêches.

Dorénavant, changeons encore d'échelle et intéressons-nous de manière plus précise aux familles de molécules qui composent la drêche, dans le but d'imaginer par la suite des applications qui n'auraient pas été encore étudiées avec la drêche, mais qui impliquent au plus profond de la matière, les mêmes molécules.

3.1 La cellulose

La cellulose est le polymère le plus abondant de la biosphère, avec une production par photosynthèse d'environ 10^{12} t par an (Heinze et al., 2018). La fibre qui entoure les graines de coton, est de la cellulose presque pure et nous donne une idée de sa nature fibreuse. En revanche, la grande majorité de la cellulose que l'on retrouve de manière naturelle dans la biosphère est souvent associée à de la lignine et à des polysaccharides (des hémicelluloses) pour former les parois cellulaires des plantes, comme l'orge.

Les sources de cellulose viennent principalement du monde végétal, des algues et des champignons, mais on en retrouve également chez certains animaux et minéraux.

La structure moléculaire de la cellulose ne varie pas en fonction de sa source (bois, céréales, etc.). Elle consiste en une chaîne, plus ou moins longue, d'unités de β -D-glucopyranose (glucose), liées par une liaison β -1,4-glycosidique. Ces deux unités liées constituent la cellobiose, la maille de cellulose qui se répète tout au long de la chaîne, en pivotant d'un angle de 180° autour de l'axe. Une chaîne de cellulose contient une extrémité réductrice (une unité de D-glucopyranose en équilibre avec une fonction aldéhyde) et une extrémité non-réductrice (cf.*infra* Figure 2). Ainsi, la longueur des fibres de cellulose dépend du nombre d'unités de glucose, ou de degré de polymérisation, et varie selon l'origine de la substance (INRS, 2011).

Chaque unité d'anhydroglucose (AGU) présente trois groupes hydroxyles réactifs (-OH) qui, grâce à la géométrie du polymère, formeront des liaisons hydrogènes intramoléculaires et intermoléculaires qui favorisent la cristallinité et la rigidité des fibres (Dubois & Jannes, 2021). Les liaisons intermoléculaires vont notamment permettre aux chaînes de cellulose de s'associer et de constituer des micro fibrilles, dont les associations donneront des fibres (INRS, 2011). Les liaisons hydrogènes, la structure linéaire, l'alternance de l'orientation des unités d'AGU et la structure partiellement cristalline de cet homopolymère de β -glucoses sont responsables de la nature fibreuse des cellules de bois, mais aussi des céréales, qui nous occupent ici (ValBiom, 2018).

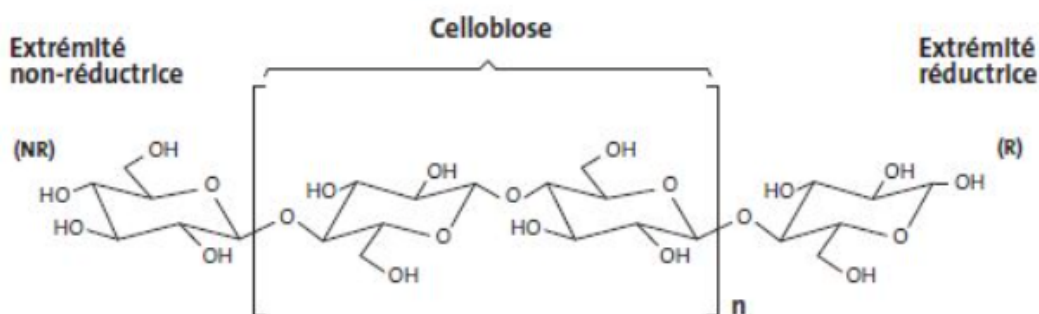


Figure 2 Schéma de représentation de la chaîne de cellulose

Source : INRS. (2011). *Fibres de cellulose (FT 282). Généralités—Fiche toxicologique—INRS*. https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_282

La cellulose est un matériau renouvelable et biodégradable, ce qui en fait un allié de taille pour les défis qui nous attendent. En effet, ses potentialités d'applications sont diverses. Si la fabrication du papier et du carton est l'usage le plus répandu, la cellulose peut être utilisée

dans des enduits, dans des matériaux bio-sourcés, dans des textiles ou des isolants, entre autres applications.

Divers procédés permettent d'isoler la cellulose, notamment de manière thermique et chimique. ValBiom (2018), une ASBL en charge d'une mission publique de coordination de la chaîne de valeur de la valorisation de la biomasse fait référence à des procédés qui permettent de détresser les fibres de cellulose afin d'obtenir des micro celluloses ou nano cellulose de longueur suffisante, de très faible diamètre et qui présentent une résistance mécanique comparable au kevlar.

La cellulose est un polysaccharide insoluble dans l'eau, abondant dans la biosphère, renouvelable, biodégradable mais qui peut également être produit par biosynthèse à partir de bactéries. Étant donné que la cellulose constitue seulement 20% de la matière sèche des drêches, nous émettons d'ores et déjà des réserves à l'égard des solutions qui proposent d'extraire ou de valoriser cette substance isolée. En outre, des végétaux, notamment comme le lin, contiennent plus de 70% de cellulose (INRS, 2011, p. 1).

3.2 L'arabinoxylane

L'arabinoxylane est une hémicellulose. Comme la cellulose, il s'agit d'un polysaccharide, mais la littérature scientifique le qualifie de « non-cellulosic polysaccharides » (Mussatto et al., 2006, p. 6). Il s'agit d'un polymère plus court que la cellulose, constitué de chaînes ramifiées (cf. *infra* Figure 3). En outre, alors que la cellulose présente la même structure peu importe sa source, la composition des hémicelluloses varient. Les arabinoxylanes provenant des céréales sont le plus souvent composés de deux pentoses (un sucre composé de cinq atomes de carbone), d'arabinose et de xylose (Sinha et al., 2011).

L'arabinoxylane est un des composants principaux des parois cellulaires végétales des céréales et des plantes. Lorsqu'elles sont liées aux parois des cellules végétales, les arabinoxylanes sont insolubles dans l'eau. Si elles ne sont pas liées aux parois des cellules végétales, les arabinoxylanes peuvent former des solutions très visqueuses et absorber jusqu'à dix fois leur poids en eau (Sinha et al., 2011).

Comme la cellulose, elles peuvent former des liaisons hydrogènes intermoléculaires.

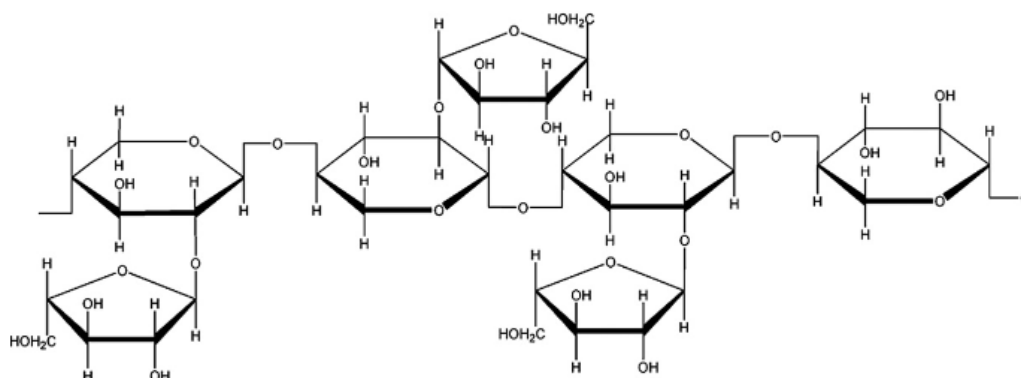


Figure 3 Structure moléculaire de l'arabinoxylane

Source : Sinha, A. K., Kumar, V., Makkar, H. P. S., De Boeck, G., & Becker, K. (2011). Non-starch polysaccharides and their role in fish nutrition – A review. *Food Chemistry*, 127(4), 1409-1426. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.02.042>

Nos recherches concernant les applications et la valorisation des arabinoxylanes doivent être approfondies. En revanche, les auteurs Sinha et al. (2011) qui ont étudié le rôle des polysaccharides non amidonnées dans l'alimentation pour poisson, concluent sur des effets potentiellement délétères. En effet, leur haute capacité de rétention d'eau peut augmenter la viscosité du digesta, allonger le temps de transit intestinal et provoquer une diminution de la disponibilité des nutriments, et une modification de la flore intestinale des poissons. À l'inverse, la société COMET, installée à Kalundborg au Danemark, dans ce que l'on pourrait appeler le berceau de l'écologie industrielle, extrait de l'arabinoxylane de la paille de blé locale à destination du secteur alimentaire (Fusiek, 2023). Leur produit, « Arrabina® », une poudre soluble et inodore d'arabinoxylane, est présentée comme, « nature's best dietary fiber, perfected » et aurait des bénéfices sur la digestion grâce à un effet prébiotique (COMET, 2022). Il convient de mener des recherches supplémentaires dans la littérature scientifique pour éprouver ces affirmations. Valoriser les résidus des cultures de blé dans l'industrie agro-alimentaire et ainsi augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources semble avoir un impact positif sur l'environnement, et s'aligne sur le concept d'économie circulaire et d'économie biosourcée. En revanche, des sources de prébiotique et de fibres ne sont-elles pas déjà à disposition dans la biosphère ? Des procédés d'extraction ou de production moins intensif en technologie et en énergie n'existent-ils pas ? Nous reviendrons sur ces questions lors de la faisabilité environnementale de telles solutions (cf. *infra* p.)

3.3 Les lignines

La lignine est une macromolécule polyphénolique (Mussatto et al., 2006). Ce polymère aromatique provient de l'association de trois monomères principaux. Ces derniers, aussi appelés monolignols, sont liés de manière non ordonnée et répétitive (cf. *infra* Figure 4). Contrairement à la cellulose et aux hémicelluloses, il ne s'agit pas d'un polymère de glucose et il serait

d'ailleurs plus prudent de parler des lignines, car leur composition et leur structure varient d'une espèce à une autre (ValBiom, 2018).

Les lignines assurent le lien entre les fibres de cellulose et confèrent aux parois des céréales leurs propriétés résistantes et hydrophobes, afin de les protéger des attaques biologiques (ValBiom, 2018). Nous comprenons donc plus facilement pourquoi les lignines ne sont pas extraites lors du brassage.

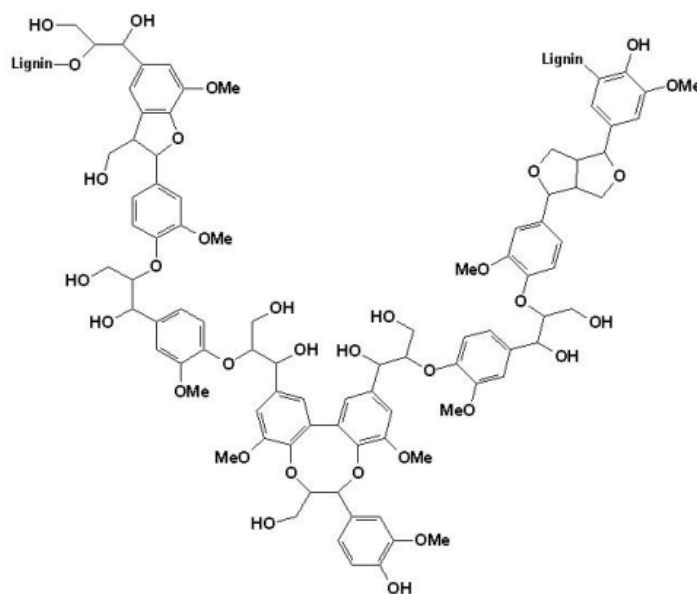


Figure 4 Structure moléculaire d'un fragment de lignine

Source : Wertz, J.-L. (2015). *Molécules issues de la valorisation de la lignine* (1; p. 1-37). ValBiom. https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/182162/1/150331_ValBiom_Vvalorisation-de-la-lignine.pdf

Les applications des lignines sont nombreuses, bien que les propriétés qui les rendent indispensables pour les végétaux sont les principaux freins de leur valorisation. En effet, « la lignine, qui protège les polysaccharides de la paroi cellulaire de la dégradation enzymatique et microbienne, est par la même occasion un de ces facteurs limitants les plus importants à la conversion de la biomasse lignocellulosique » (Wertz, 2015, p. 12).

Dans l'industrie papetière, des procédés d'extraction de lignine sont mis en place pour briser les liaisons, notamment covalentes de type éther et ester, qui lient la lignine aux chaînes de cellulose d'une part, et aux hémicelluloses d'autre part (Wertz, 2015). Les procédés de fabrication de pâte à papier dite chimique, qui visent à dissoudre et à extraire la lignine, prévoient souvent une valorisation énergétique des lignines *in situ*, qui possèdent un haut pouvoir calorifique.

L'artiste Basse Stittgen, qui développe une pratique artistique à l'intersection du design et de la recherche en matériaux, utilise la lignine dans différentes applications. La première est la production d'un biocomposite thermoformé composé de lignine et de cellulose. La chaleur

et la pression activent les propriétés liantes des deux polymères et forment un bioplastique inspiré de la nature. Le Studio Basse Stittgen travaille également avec les lignosulfates produites par l'industrie papetière qui utilise un procédé d'extraction de la lignine dit Kraft au sulfure, ou au sulfite. Ce dérivé de lignine, qui a la propriété d'être soluble, forme des liens hydrogènes intermoléculaires qui lui permettent, lorsqu'ils sont mélangés à de la cellulose, de produire un argile d'origine végétal. Enfin, il utilise la lignine mélangée à de la gomme arabique, de la térébenthine issue des orangers, de l'huile de lin et de l'eau pour réaliser un encre et un vernis, utilisé dans les deux premières applications (Stittgen, 2024).

En outre, les lignines peuvent être aussi utilisées pour leur propriétés émulsifiantes (dans des colorants, des cires, des bétons), dans la production de fibres de carbone ou même dans le secteur alimentaire pour produire de la vanilline, l'arôme de vanille (ValBiom, 2018).

La cellulose, l'arabinoxylan et la lignine sont les principaux composants des parois cellulaires végétales, et donc de la drèche. Ils lui confèrent sa nature fibreuse mise en évidence dans la Figure 5 (cf. infra Figure 5). D'ailleurs, il est amusant de voir que ces images microscopiques nous rappellent des écorces d'arbres. Le bois est un matériau naturel composite, aux propriétés certes très différentes des drèches, mais composé d'une fibre d'une matrice formée de lignine, renforcée par des fibres de cellulose, et dont l'interaction fibre-matrice est assurée par les hémicelluloses.

Pour la première fois dans cette gestion de projet la question d'échelle pourrait nous échapper.

4. Des propriétés physicochimiques

La composition chimique des drèches, leur structure moléculaire et les techniques de brassage sont quelques facteurs qui confèrent aux drèches des propriétés physicochimiques.

Ces propriétés ont un rôle important dans l'étude de faisabilité qualitative notamment, et dans la recherche de potentielles applications de valorisation. Les propriétés physicochimiques étudiées dans ce chapitre sont loin d'être exhaustives mais visent à caractériser ce résidu lignocellulosique solide et humide. L'aspect itératif d'une méthodologie basée sur le design thinking nous exhorte à identifier de nouvelles caractéristiques et à les mesurer, au fur et à mesure que des synergies potentielles se dessinent. La littérature scientifique propose une base de données solide et rigoureuse. En outre, nous avons également réalisé des mesures empiriques afin d'estimer les données manquantes ou de confronter la théorie. Ces mesures comportent des limites et des imprécisions, mais elles étaient aussi l'occasion de se familiariser avec les drèches de brasserie. Afin d'être rigoureux, il aurait été préférable de contacter un laboratoire, comme l'Institut Meurice à Bruxelles, afin de mettre en place des méthodes expérimentales et des protocoles scientifiques, en utilisant des instruments de laboratoire plus précis. Nous ne manquerons pas d'y penser dans nos futures recherches.

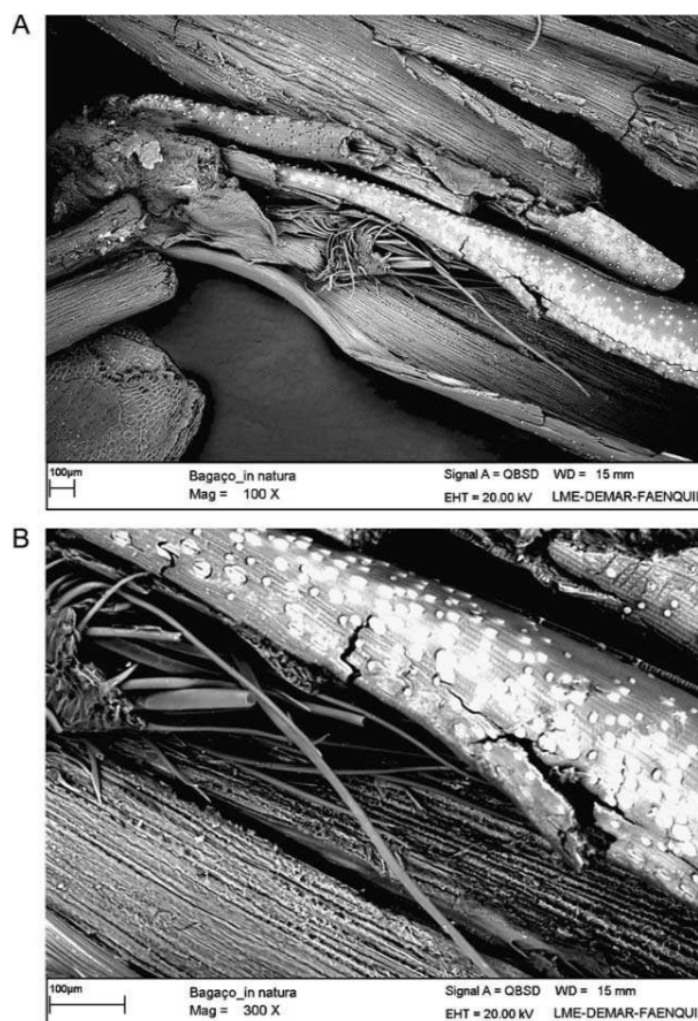


Figure 5 Microscopie électronique à balayage de particules de drêches de brasserie (A) Grossissement 100 fois ; (B) Grossissement 300 fois

Source : Mussatto, S. I., Dragone, G., & Roberto, I. C. (2006). Brewers' spent grain : Generation, characteristics and potential applications. *Journal of Cereal Science*, 43, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.06.001>

4.1 La température

Lors de l'empâtage, différents paliers de températures sont atteints afin de promouvoir l'activité enzymatique et la formation de sucres fermentescibles et non-fermentescibles. Un bon ratio de ces deux sucres peut être atteint à une température de 68°C. La température maximale atteinte est de 78°C, afin d'inhiber les enzymes. Les drêches, lorsqu'elles viennent de quitter la cuve matière, sont chaudes et vont le rester pendant quelques heures.

Il conviendrait dans cette étude de mesurer la température des drêches à différents moments à partir de la filtration ($t(0)$), à intervalles réguliers ($t(1)$, $t(2)$, $t(3)$, etc.) jusqu'à observer une stabilisation. La mesure de la température à l'aide d'un thermomètre digital n'a

pas abouti. Un thermomètre sonde de cuisson semble plus adapté, mais il n'était pas à notre disposition.

Afin d'expliquer cette capacité à conserver de la chaleur, sans avoir connaissance de la capacité calorifique des drêches, rappelons qu'elles sont très humides à ce stade-ci (cf. *infra* p.) et que l'eau a une capacité calorifique élevée.

La température des drêches, inexacte et trop variable, ne sera pas retenue comme un critère dans cette étude de faisabilité. Cependant, dans l'hypothèse selon laquelle la synergie implique de chauffer les drêches, il sera nécessaire et intéressant économiquement de travailler la matière rapidement après la filtration pour profiter de cette chaleur. À l'inverse, si les drêches nécessitent d'être refroidies, il faudra aussi prendre en compte des facteurs temps et/ou énergie.

4.2 La couleur

Les drêches ont une couleur entre le jaune et le marron, avec des reflets dorés (cf. *infra* Figure 6). Lorsqu'elles sont humides, leur couleur est plus foncée.

La couleur des drêches est réputée pour être un facteur limitant dans le mélange avec d'autres farines et dans le secteur alimentaire en général (Naibaho & Korzeniowska, 2021). Les industriels, afin de répondre aux exigences des consommateurs habitués à manger des produits qui n'ont bien souvent plus leurs couleurs habituelles, mais pour qui ces couleurs sont des signes de qualité. Ce facteur limitant sera repris dans l'étude de faisabilité qualitative et culturelle (cf. *infra* p.)



Figure 6 Photographie d'un échantillon de drêches de brasserie fraîches (88% orge, 12% seigle)

4.3 Taille des particules et granulométrie

Les drêches sont constituées des enveloppes du grain, du tégument, du péricarpe et de l'écorce (cf. supra p.). Si différencier ces trois parties à l'œil n'est pas possible, nous remarquons une certaine hétérogénéité des formes, des transparences et de la taille des particules (cf. supra Figure 6). Ces différences pourraient être causées entre autres par les caractéristiques propres à chaque céréale utilisée, par le concassage, l'utilisation de grains crus (non concassés), ou même par un brassage et une extraction qui présente des petites irrégularités. Le brassage reste un procédé artisanal qui conserve précieusement une certaine hétérogénéité.

Dans le but de mesurer la variabilité de granulométrie des particules qui composent les drêches, un échantillon de drêches issues de la brasserie Wolf et composées à 88% d'orge et 12% de seigle a été analysé à l'œil nu. Il était question d'isoler quelques particules en fonction de leur taille et de les mesurer. Ces mesures expérimentales ne sont pas précises mais tendent à rendre compte de l'hétérogénéité de la longueur des particules qui composent la drêche. La longueur des particules varie de 1 mm à 10 mm ($\pm 0,5$ mm d'incertitude absolue) (cf. infra Figure 7).

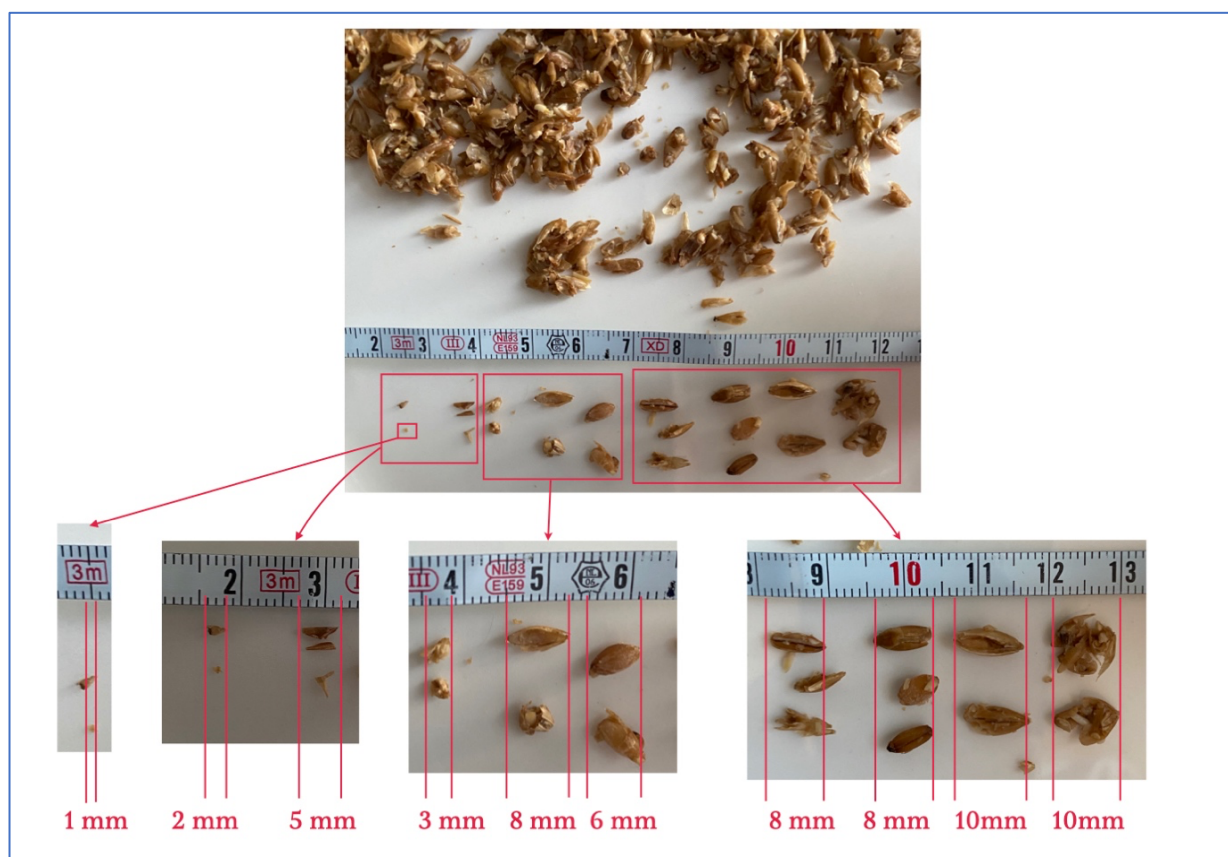


Figure 7 Mesures expérimentales de la longueur de particules de drêches ($\pm 0,5$ mm)

4.4 Le taux d'humidité

Lors de l'empâtage, les céréales sont mélangées avec de l'eau chaude. Avant d'être filtrées, les drêches sont également souvent rincées avec de l'eau chaude.

Dans leur étude de la variabilité des propriétés physico-chimiques des drêches, Naibaho et Korzeniowska (2021) comparent des résultats issus de huit échantillons. Afin d'alléger la lecture, nous avons calculé la moyenne des huit mesures et leur écart type (moyenne \pm écart type). Les drêches séchées préalablement dans un four à convection à une température de 70°C, et moulues, sont séchées à nouveau dans un four à 115°C pendant 12h jusqu'à ce que des points stables soient atteints. Le taux d'humidité moyen des huit échantillons de drêches est de 2,864 \pm 0,631 % de matière sèche.

Cependant, toutes les valorisations potentielles ne sont pas contingentes à un séchage. Il semble même évident d'essayer de s'en passer afin de diminuer le coût économique et environnemental de la synergie subséquente, bien que transporter des drêches humides ait un coût bien plus supérieur au transport de drêches sèches. Il serait dès lors intéressant de déterminer le taux d'humidité des drêches humides.

La littérature scientifique propose une valeur comprise entre 77-81 % (en pourcentage massique - % m/m) (Mussatto et al., 2006, p. 4). L'étude menée lors du projet ValorMap met en évidence 0,272 g MS (Matière Sèche)/g, ce qui correspondrait à un taux d'humidité de 72,8 % m/m (Projet ValorMap, 2018, p. 19). En revanche, Assandri et al. (2021) révisent les taux d'humidité des drêches issus de quinze références scientifiques. Par souci de lisibilité, nous avons calculé la moyenne de ces données, son écart type (moyenne \pm écart type), ainsi que quelques données de dispersion. Le taux d'humidité moyen est de 76,3 \pm 1,3 %. La valeur médiane de cet échantillon est de 76 %, et la moitié des valeurs sont comprises entre 73,7 % et 78,8 % (les valeurs des premiers et troisièmes quartiles respectivement).

Afin d'éprouver ces données théoriques à des mesures empiriques, deux échantillons de drêches ont été prélevés dans deux brasseries différentes. Des mesures ont été effectuées dans le but d'obtenir le taux d'humidité de ces deux échantillons (cf. infra Tableau 1).

Tableau 1 Mesures expérimentales du taux d'humidité de deux échantillons de drêches de brasserie

	Échantillon 1	Échantillon 2
Brasserie	En Stoemelings	WOLF
Date de prélèvement	02.12.22	09.08.24
Type de grains	Orge Vienna 90 % Froment 10%	Orge 88 %, Seigle 12 %
Masse de drêches humides (g)	620 ($\pm 0,2$ %)	362 ($\pm 0,3$ %)
Masse de drêches sèches (g)	152 ($\pm 0,7$ %)	89 ($\pm 1,1$ %)
Taux d'humidité (% massique)	75,48 ($\pm 0,7$ %)	75,41 ($\pm 1,6$ %)

Échantillon 1 : séché dans un four à gaz domestique pendant 1h10 à $\pm 180^{\circ}\text{C}$

Échantillon 2 : séché dans un four électrique domestique 41 min à $\pm 180^{\circ}\text{C}$ et 6 min à $\pm 150^{\circ}\text{C}$

Les imprécisions liées à ces mesures sont nombreuses.

- (1) Le séchage n'est pas optimal. Nous aurions dû poursuivre la cuisson et continuer de mesurer la masse de l'échantillon à intervalle de temps régulier, jusqu'à ce qu'il se stabilise.
- (2) La formule de calcul est imprécise. En effet, nous avons ici calculé un taux de variation de la masse, avant et après notre séchage au four, en partant de l'hypothèse que l'eau de brassage résiduelle s'est évaporée, mais qu'elle est le seul facteur responsable de la variation de la masse.
Taux d'humidité en % massique = $\left[\frac{\text{Masse de drêches humides} - \text{Masse de drêches sèches}}{\text{Masse de drêches humides}} \right]$
En outre, comme le montre les mesures de Naibaho et Korzeniowska (2021), même après un séchage préalable en laboratoire, les drêches conservent un taux d'humidité de 2,684 % (% matière sèche).
- (3) L'incertitude absolue liées aux manipulations : il y a une relative perte de matières lors des transvasements est inévitable.
- (4) L'instrument de mesure utilisé est une balance de cuisine numérique, avec une incertitude absolue de $\pm 1\text{g}$. Les incertitudes relatives aux mesures de masse sont indiquées dans le tableau (Valeur mesurée \pm Incertitude relative avec Incertitude relative = (Incertitude absolue / Valeur mesurée) $\times 100$). Les incertitudes du calcul de taux correspondent à la somme des incertitudes relatives multipliées par la réponse du calcul.

Malgré ces imprécisions, les valeurs des taux d'humidité obtenues empiriquement sont cohérentes avec celles sur lesquelles la littérature scientifique s'accorde. Il est nécessaire de distinguer cependant le taux d'humidité (en % massique), calculé à partir des drêches fraîches, c'est-à-dire, les drêches et l'eau de brassage résiduelle encore retenue par la matière, d'une part, et le taux d'humidité réel, d'autre part, mesuré à partir de la matière sèche.

La très haute teneur en eau des drêches fraîches, ou crues, exerce une influence directe sur la qualité de ce résidu. Cet aspect sera développé lors de l'étude de faisabilité, mais retenons que ce fort taux d'humidité, conjoint à la présence de sucres fermentescibles font de la drêche un matériau très instable, enclin à une détérioration rapide due à une activité microbienne (Mussatto et al., 2006). D'autre part, ce taux d'humidité très élevé a un impact économique conséquent au niveau du transport et du stockage et serait même susceptible d'imposer un traitement ou leur séchage, eux aussi, coûteux. Ces aspects seront développés lors de l'étude de faisabilité (cf. infra p.).

4.5 L'activité hydrique

L'activité hydrique, renseignée dans la littérature anglophone comme *water activity* (nommée ci-après *aw*), mesure la facilité avec laquelle l'eau s'évapore d'un produit. Sa formule est la suivante : $aw = p/p_s$ = pression de vapeur produite par l'humidité libre du produit / pression de vapeur de l'eau distillée dans des conditions identiques (Process Sensing Technologies, 2024). L'activité hydrique mesure l'eau disponible dans un produit qui pourrait favoriser le développement microbien et ainsi altérer la qualité de la substance. Si la valeur de l'activité hydrique vaut 1, cela signifie que toute la teneur en eau de la substance est disponible et que le milieu est favorable à la croissance de bactéries et de moisissures. Si la valeur vaut 0, il n'y a pas d'eau libre disponible.

Naibaho et Korzeniowska (2021) ont réalisé des mesures sur huit échantillons de drêches pour étudier la variabilité des caractéristiques physicochimiques. Leurs valeurs ont été retravaillées pour alléger ce travail tout en rendant compte de leur étendue. La moyenne des valeurs mesurée est de $0,110 \pm 0,037$ (moyenne \pm écart-type). La valeur médiane est de 0,102 et la moitié des valeurs de l'échantillon se situent autour de la médiane entre 0,090 et 0,118.

À titre de comparaison, la plupart des fruits et légumes ont une valeur de 0,99, alors que le miel ou les grains de cafés torréfiés ont des valeurs proches de 0,5 *aw*. L'activité hydrique des drêches est donc très faible, mais il convient de noter que les échantillons ont été séchés dans un four à convection à 70°C, moulus avec une mouture de 385 μ m maximum et qu'ils présente un taux d'humidité de $2,864 \pm 0,631$ % (% de matière sèche) (Naibaho & Korzeniowska, 2021).

Dès lors, il serait intéressant de calculer l'activité hydrique des drêches fraîches quand elles sortent de la cuve matière. Cette mesure expérimentale nécessite un *water activity meter* qui fournit des mesures de précisions. En outre, il est raisonnable de penser que la valeur serait proche de 1.

La croissance microbienne peut être favorisée par un certain nombre de facteurs, parmi lesquels la température, la teneur en oxygène, le pH, et l'activité hydrique. Cette caractéristique renseigne non seulement sur la stabilité d'un produit, mais également sur la migration de l'eau entre d'un produit à un autre. L'exemple typique est celui du muesli, dans lequel l'eau disponibles des raisins secs migre vers le son de blé ou les autres céréales, résultant en des

raisins très secs et des flocons de céréales humides, et en altérant de ce fait la qualité. Enfin, l'activité de l'eau est un point critique à retenir lors des contrôles de qualité ou pour réaliser une HACCP (*Hazard Analysis – Critical Control Point*, en français Analyse de dangers – Points critiques de contrôle pour leur maîtrise). Ce critère sera repris plus loin dans cette étude.

4.6 La capacité de rétention d'eau (WHC) et la capacité de rétention d'huile (OHC)

La capacité de rétention mesure la capacité du produit à faire des liens avec les molécules d'eau et à retenir l'huile. Il s'agit respectivement de WHC (*Water Holding Capacity*) et de OHC (*Oil Holding Capacity*). Selon Naibaho et Korzeniowska, “*WHC is responsible for thickness and viscosity, while OHC is responsible for food stabilization, acting as a flavouring retainer and increasing mouthfeel*” (2021, p.7). Les huit valeurs mesurées par les auteurs ont été agrégées (moyenne \pm écart type). La capacité de rétention d'eau (WHC) moyenne est de $3,845 \pm 0,356$ g/g. La capacité de rétention de l'huile (OHC) moyenne est de $2,107 \pm 0,222$ g/g.

À titre de comparaison, les coproduits de la production de blé présentent une WHC de 7,7 g/g et une OHC de 7.8 g/g (Naibaho & Korzeniowska, 2021). Ce rapport du simple au double peut s'expliquer par les caractéristiques propres aux drêches, mais aussi par la mouture choisie. Les mesures de Naibaho et Korzeniowska (2021) sont réalisées à partir de drêches moulues en particules de 385 μ m, c'est-à-dire de 0,385 mm. Or, réduire la taille des particules peut affecter la structure fibreuse et réduire les rétentions en eau et en huile.

Après filtration les drêches fraîches contiennent encore entre 75-80% (cf. supra p.), ainsi, même si taux d'humidité et rétention d'eau sont différentes, elles sont corrélées positivement (WHC proche de 3-4 g/g). Comme le séchage et le fait de moudre les drêches ne sont pas contingents à son utilisation, il serait intéressant de connaître les valeurs de ces rétentions pour les drêches fraîches, séchées, mais non moulues. Puisque nous n'avons pas trouvé ces données dans la littérature scientifique, nous avons décidé d'essayer de mesurer expérimentalement la capacité de rétention d'eau de drêches séchées, non moulues. Le protocole expérimentale comporte de nombreuses imprécision. Il propose de prélever un échantillon de drêches séchées au préalable de 5g, de le mélanger avec 50 ml d'eau et de laisser ce système s'hydrater pendant 12h à température ambiante. Ensuite, l'excès d'eau est enlevé avant de procéder à la mesure de la masse finale (eau retenue + masse initiale de drêches de l'échantillon), et au calcul de la capacité de rétention d'eau : $WHC = \text{masse eau retenue} / \text{masse initiale}$. La valeur expérimentale de la capacité de rétention d'eau obtenue est de $2,4 \text{ g/g} \pm 45,9 \%$. Cette valeur est inférieure à ce que nous enseigne la littérature scientifique, et l'incertitude relative est grande, due à un petit échantillonnage. La différence entre ces valeurs est notamment imputable aux nombreuses imprécisions des mesures :

- (1) Le séchage de l'échantillon est non optimal. Il a été réalisé dans un four électrique domestique pendant 41 minutes à une température de 180°C, et puis 6 min à 150°C. Ces températures, bien plus élevées que celles pratiquées en laboratoire, pourraient certainement altérer la structure moléculaire de la matière, sa composition, et donc ses caractéristiques physico-chimiques. Ces mesures expérimentales ont au moins l'avantage de fournir un exemple supplémentaire allant dans ce sens. Il serait

opportun de réaliser les mêmes mesures à partir d'un échantillon de drêches séché à une température n'excédant pas les 100°C, pendant un temps plus long.

- (2) L'incertitude absolue des instruments : de mesure (balance de cuisine $\pm 1\text{g}$), de filtration (tamis de cuisine avec maille $\pm 1\text{mm}$) ; l'incertitude liée aux manipulations ; les incertitudes relatives des mesures et des calculs.

Face à ces résultats, et au trop grand degré d'imprécision des mesures, la capacité de rétention de l'huile ne sera pas calculée expérimentalement.

Naibaho et Korzeniowska (2021), observent une relation positive entre WHC et quantité de glucides pour certains échantillons. Il est intéressant de noter que l'on retrouve les glucides sous le terme de *carbohydrates* dans la littérature anglophone, bien que les glucides diffèrent des hydrates de carbone, pour certains, notamment par leur absence de la molécule H_2O sous cette forme. Cette observation renforce l'idée selon laquelle les différentes sources de drêches amènent une certaine variabilité dans la composition et aussi dans les propriétés physico-chimiques.

La capacité de rétention d'eau et d'huile est un critère important, notamment dans les applications alimentaires. Ce critère a un impact qualitatif, car il en résulte des propriétés mécaniques, de sensation en bouche et d'autres critères organoleptiques, qui influencent à leur tour les recettes et les procédés de fabrication, ce qui se traduira de manière quantitative.

4.7 Les masses volumiques en milieu granulaire

La masse volumique, aussi appelée densité volumique de masse, est un critère important pour l'étude de faisabilité, tant pour ses aspects qualitatifs, quantitatifs et économiques (coût de transport et de stockage). Si la mesure de la masse volumique est habituellement simple, les drêches sont un matériau solide et humide fait de particules allant de 1-10 mm (cf. supra p.) qui s'organisent naturellement dans un volume apparent, supérieur au volume réel. La densité réelle permet en outre de corriger l'imprécision et sera abordée au point suivant (cf. *infra* p.).

Les premiers écueils liés à la mesure de la masse volumique ont été rencontrés lorsqu'il a été nécessaire d'estimer le gisement des drêches à l'échelle de la brasserie En Stoemelings, lors du stage en gestion de projet qui a précédé ce travail (cf. supra p.). Mesurer la masse des drêches produite lors d'un brassin nécessiterait une balance qui n'était pas à la disposition de l'entreprise. En revanche, le volume d'une « BioBox » de la société de gestion des déchets de Vanheede est connu (680l). La masse volumique moyenne calculée à partir d'un échantillon permettrait d'obtenir la masse de drêches produite, à partir du volume occupé par ces drêches. Les imprécisions sont nombreuses et ont surtout omis la différence entre volume apparent, volume réel et volume des pores, important lorsque le milieu est granulaire. Ces concepts se sont néanmoins imposés empiriquement lorsque les brasseurs ont indiqués que le volume de drêches produit changeait considérablement en fonction de la manière dont ils tassaient ce

résidu dans les « BioBox ». L'estimation du gisement des drêches sera menée plus tard dans ce travail (*cf. infra* p.).

En raisonnant par abduction, il est primordial d'aller puiser des explications théoriques à des observations et des écueils empiriques. En effet, en milieu granulaire, trois masses volumiques sont d'application :

- (1) la masse volumique apparente : le rapport entre la masse de la matière et le volume apparent qu'il occupe ;
- (2) la masse volumique réelle : le rapport entre la masse de la matière et le volume réel des grains (qui comprend le volume des grains et le volume des pores). En effet, comme les drêches sont constituées des enveloppes primaires et secondaires de l'orge hydrolysée, elles sont aussi poreuses et contiennent de l'air ;
- (3) la masse volumique absolue : le rapport entre la masse de la matière et le volume absolu (obtenu par mesures, en broyant très finement le matériau pour considérer le volume des pores comme nul). Le volume absolu correspond au volume réel auquel on a soustrait le volume des pores.

Le Tableau 2 expose les mesures expérimentales qui ont mené aux estimations des masses volumiques. Les valeurs sont exprimées en $[\text{kg}/\text{m}^3]$, conformément au Système International (S.I.).

Les masses matières des échantillons de drêches ont été mesurée à l'aide d'une balance de cuisine (incertitude absolue ± 1 g). Les volumes apparents ont été mesurés pour les échantillons III.a et III.b, issus du même brassin. Lors des mesures effectuées auparavant, sans connaître les trois différentes masses volumiques, les échantillons de drêches avaient été tassés. Ils seront utilisés pour le calcul de la masse volumique réelle et de la masse volumique absolue.

La masse volumique apparente moyenne est de $517 \text{ kg}/\text{m}^3 \pm 15$ (\pm écart type). Les valeurs des masses volumiques des deux échantillons récoltés sont sensiblement proches, ce qui semble normal, puisqu'ils proviennent du même échantillon mais permettaient de vérifier nos mesures.

La masse volumique réelle a été calculé pour les quatre échantillons. En l'absence de données revues dans la littérature scientifique quant aux masses volumiques réelles et absolues, le volume réel a été mesuré de manière expérimentale, en appliquant une pression avec la main et un objet plat, afin de tasser les particules de drêches et de diminuer le volume présent entre les particules. Bien que le volume obtenu expérimentalement ne soit pas le volume réel, à cause des imprécisions, une différence significative entre le volume apparent et le volume réel est observée. La masse volumique réelle moyenne est de $753 \text{ kg}/\text{m}^3 \pm 55$ (\pm écart type). Les valeurs des masses volumiques réelles obtenues sont relativement proches, bien que les échantillons viennent de deux brasseries différentes, avec deux recettes différentes et des matières premières qui ne viennent pas des mêmes sources. Les deux brasseries ne disposent pas non plus des mêmes installations de brassage. En revanche, les deux recettes sont brassées à partir de 88% et de 90% d'orge provenant de sources différentes. De ce fait, les grains peuvent présenter des compositions chimiques légèrement différentes, qui impliquent à leur tour une variabilité des propriétés physico-chimiques .

Le volume absolu d'un matériau granulaire, constitué de particules, est obtenu en mesurant le volume occupé par une très fine mouture de ce dernier. Dans leur étude de variabilité, Naibaho et Korzeniowska (2021) ont mesuré les masses volumiques des huit échantillons de drêches séchées dans trois états différents ayant un impact sur leurs volumes : avant d'être moulu, avec une mouture supérieure à $385 \mu\text{m}$ et avec une mouture inférieure à $385 \mu\text{m}$. Pour cette dernière taille de particules de l'ordre de 10^{-6}m , le volume occupé tend vers le volume absolu et la masse volumique obtenue peut être considérée comme une bonne approximation de la masse volumique absolue. Les valeurs mesurées par Naibaho et Korzeniowska (2021) ont été agrégées et les unités ont été modifiées par souci de compréhension et de cohérence. La masse volumique pour une mouture $< 385 \mu\text{m}$ est de $440 \text{ kg/m}^3 \pm 36$ (\pm écart type). Cette valeur servira de référence pour calculer les volumes absolus ($V_{\text{absolu}} = m_{\text{mat}} / \rho_{\text{absolu}}$) correspondant à nos échantillons respectifs (cf. *infra* Tableau 2).

Cette dernière valeur pourrait être intéressante afin de quantifier certaines synergies et permettent de connaître le volume occupé par les pores pour chaque échantillon, qui pourrait servir de critère de porosité : $V_{\text{pores}} = V_{\text{absolu}} - V_{\text{réel}} = (m_{\text{mat}} / \rho_{\text{absolu}}) - (m_{\text{mat}} / \rho_{\text{réelle}})$. Un ratio permettrait de connaître rapidement le volume des pores à partir du volume apparent, le plus facile à calculer. Ce ratio est de 0,5 en moyenne.

Enfin, un ratio qui permet de calculer rapidement le volume réel à partir du volume apparent pourrait s'avérer utile. Ce ratio est de 0,67 en moyenne.

Tableau 2 Mesures expérimentales des masses volumiques de quatre échantillons de drêches de brasserie

		Échantillon I		Échantillon II		Échantillon III.a		Échantillon III.b	
Brasserie		En Stoemelings		En Stoemelings		WOLF		WOLF	
Date de prélèvement		10.05.22		02.12.22		09.08.24		09.08.24	
Type de grains		Orge ($\pm 90\%$), Froment ($\pm 10\%$)		Orge ($\pm 90\%$), Froment ($\pm 10\%$)		Orge ($\pm 88\%$) Seigle ($\pm 12\%$)		Orge ($\pm 88\%$) Seigle ($\pm 12\%$)	
		Mesures	$\pm I.R.$	Mesures	$\pm I.R.$	Mesures	$\pm I.R.$	Mesures	$\pm I.R.$
Masse matière [kg]	m_{mat}	8,95	$\pm 0,05\%$	$3,54 \cdot 10^{-1}$	$\pm 0,3\%$	0,435	$\pm 0,2\%$	0,362	$\pm 0,3\%$
Volume apparent [m^3]	V_{app}					$8,18 \cdot 10^{-4}$	$\pm 0,1\%$	$7,21 \cdot 10^{-4}$	$\pm 0,2\%$
(1) Masse volumique apparente $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	ρ_{app}					532	$\pm 0,3\%$	502	$\pm 0,5\%$
Volume réel* [m^3]	$V_{\text{réel}}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	$\pm 4,2\%$	$4,90 \cdot 10^{-4}$	$\pm 2,0 \cdot 10^{-4}\%$	$5,89 \cdot 10^{-4}$	$\pm 0,2\%$	$4,51 \cdot 10^{-4}$	$\pm 0,2\%$
(2) Masse volumique réelle* $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\rho_{\text{réelle}}$	746	$\pm 4,3\%$	722	$\pm 0,3\%$	739	$\pm 0,4\%$	803	$\pm 0,5\%$
Volume absolu [m^3]	V_{absolu}	0,020	$\pm 9\%$	$8,05 \cdot 10^{-4}$	$\pm 8,5\%$	$9,89 \cdot 10^{-4}$	$\pm 8,4\%$	$8,23 \cdot 10^{-4}$	$\pm 8,5\%$
(3) Masse volumique absolue $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	ρ_{absolu}								
(Naibaho et Korzeniowska, 2021, p.5)		440	$\pm 8,2\%$	440	$\pm 8,2\%$	440	$\pm 8,2\%$	440	$\pm 8,2\%$
Volume occupé par les pores	V_{pores}	$8,00 \cdot 10^{-3}$	$\pm 14\%$	$3,15 \cdot 10^{-4}$	$\pm 8,6\%$	$4,00 \cdot 10^{-4}$	$\pm 8,6\%$	$3,72 \cdot 10^{-4}$	$\pm 8,7\%$
Ratio $V_{\text{pores}} / V_{\text{app}}$	$\frac{V_{\text{pores}}}{V_{\text{app}}}$					0,489	$\pm 8,7\%$	0,516	$\pm 8,9\%$
Ratio $V_{\text{réel}} / V_{\text{app}}$	$\frac{V_{\text{réel}}}{V_{\text{app}}}$					0,720	$\pm 0,3\%$	0,626	$\pm 0,5\%$

* **Imprécision** : le volume n'est pas vraiment réel, la pression a été appliquée avec la force de la main. Il y a de grandes probabilités que du volume non occupé par le solide soit encore coincé entre les particules.

Il conviendrait de continuer ces mesures expérimentales avec des drêches issues d'autres brasseries bruxelloises pour avoir une idée de la variabilité des drêches et de la variabilité des critères physico-chimiques qui sera induite.

Dans la littérature scientifique, les mesures de masses volumiques sont réalisées à partir de drêches sèches. Naibaho et Korzeniowska (2021) étudient la variabilité de huit échantillons. Les mesures seront agrégées en moyenne (\pm écart type) et converties dans l'unité du S.I.. Avant d'être moulues, les drêches sèches ont une masse volumique moyenne de $148 \text{ kg/m}^3 \pm 12,6$. Lors des mesures expérimentales menées pour calculer la teneur en humidité, le volume des drêches séchées au four a été mesuré et la masse volumique obtenue était de $153 \text{ kg/m}^3 \pm 1,4$. La valeur expérimentale de la mesure est relativement proche des résultats de Naibaho et Korzeniowska (2021). La masse volumique des drêches moulues, dont les particules ont une taille supérieure à $385 \mu\text{m}$, a une valeur moyenne de $375 \text{ kg/m}^3 \pm 36$, alors que la masse volumique moyenne des drêches dont les particules sont inférieures à $385 \mu\text{m}$ a une valeur moyenne de $440 \text{ kg/m}^3 \pm 36$. La taille des particules semble avoir une corrélation négative avec la masse volumique. En effet, les particules sont d'autant plus fines qu'elles s'agencent efficacement, laissant peu de volume disponible entre elles. En outre, comme les drêches sont essentiellement composées des pellicules du grain vides, les porosités sont très nombreuses. Ce critère sera étudié plus précisément dans la suite de l'étude et renseigne sur la qualité, due à la quantité d'air présente entre les particules (cf. *infra p.*). D'autre part, les masses volumiques auront un impact sur la faisabilité quantitative et économique, car le coût du transport et du stockage y sont étroitement liés.

4.8 La densité réelle

La densité réelle est calculée avec un densimètre en laboratoire et consiste en le ratio de la masse de l'échantillon avec le volume réel (les pores fermés sont inclus mais le volume des pores ouverts est soustrait, et calculé grâce aux variations de pression de l'air à travers le matériau et sans matériau).

La densité réelle mesurée par Naibaho et Korzeniowska (2021) en laboratoire à une valeur moyenne de $1\,355 \pm 1,5 \text{ kg/m}^3$ ou de $1,355 \pm 0,0015 \text{ g/ml}$. Cette valeur est d'un ordre de grandeur dix fois plus élevé que les masses volumiques mesurées. La formule est la même que celle utilisée pour calculer la masse volumique réelle, pourtant le résultat de la densité réelle est deux fois plus important. En effet, la mesure du volume réel a été effectuée avec précision par un densimètre, et à partir d'un matériau sec. La densité réelle est trois fois plus grande que la masse volumique absolue posée dans le raisonnement et calculée à partir d'une très fine mouture. Ce rapport peut s'expliquer notamment par la différence entre le volume réel et le volume absolu, qui correspond au volume des pores et témoigne de la grande porosité des drêches.

La densité réelle présente une relation inversement proportionnelle au volume nécessaire pour le stockage. De la même manière, la densité sera d'autant plus élevée que la mouture sera fine. Les échantillons récoltés dans la littérature montrent une relation directement

proportionnelle entre la quantité de glucose et la densité réelle (Naibaho & Korzeniowska, 2021). Enfin, la variabilité des mesures pour la densité réelle est bien inférieure à celle observée lors des mesures des autres propriétés physicochimiques.

La masse volumique d'un matériau organisé en particules de tailles différentes se caractérise par trois masses volumiques différentes : la masse volumique apparente, réelle, absolue. La densité réelle, mesurée de manière rigoureuse en laboratoire, corrige certaines imprécisions liées à la porosité des drêches. La différence entre les masses volumiques et la densité réelle a également une grande importance sur les propriétés mécaniques des matériaux et sur la texture, car il existe une corrélation avec la composition en fibre (Naibaho & Korzeniowska, 2021). La taille des particules participe aussi à la composition en fibre. Si les particules sont trop fines, la composition en fibre est altérée, et les propriétés mécaniques et de texture qui lui sont associées. Dans les applications alimentaires, la taille des particules, et donc la densité a une grande influence sur le volume et la texture, du pain par exemple. Des particules de petite taille participent à un plus grand volume et améliorent la texture, alors que des particules plus grossières ont tendance à diminuer le volume et à durcir la texture (Naibaho & Korzeniowska, 2021).

En fonction de l'état des drêches, fraîches ou sèches, moulues ou entières, il s'agira de consulter la grandeur cohérente, tout en gardant à l'esprit que la drêche fraîche contient entre 75-80% d'eau à l'état liquide, une substance qui a elle-même une masse volumique de 1 000 kg/m³ (à 20°C).

4.9 Le potentiel hydrogène pH

Le potentiel hydrogène, pH, est un paramètre déterminant pour le développement microbien (Sganzerla et al., 2023).

Le pH des drêches est un critère de qualité indispensable. Lors de l'empâtage, le pH est surveillé afin de mener à bien l'hydrolyse enzymatique, car sa valeur permet de travailler avec des enzymes spécifiques. Par exemple, les enzymes α -amylase et β -amylase ont respectivement des fourchettes de pH optimal de 5,6-5,8 et 5,4-5,6. La fourchette de pH optimal lors du brassage est comprise entre 5.1 et 6.0. En revanche, lors de l'empâtage, la maïsche se comporte comme un acide faible et libère plus d'ions hydrogènes H⁺ quand la température augmente (Univers Bière, 2024). Le pH sera donc dépendant de la température, ou mesuré à partir d'une solution à température ambiante.

Suite à ces données, il semblerait qu'au moment, $t_{\text{filtration}}$, où la drêche sort de la cuve-matière, le pH correspond à celui de la maïsche en fin d'empâtage : $\text{pH}(t_{\text{filtration}}) = \pm 5,1-6,0$. En revanche, si la drêche reste en milieu aérobie, en présence d'oxygène, elle va s'acidifier sous l'action des micro-organismes qui vont digérer la matière organique. Cette valeur de pH, en milieu aérobie, est susceptible de changer plus ou moins rapidement.

Dans la littérature scientifique, le pH de la drêche varie de 3,8 à 6,9 (Assandri et al., 2020). Assandri et les co-auteurs de l'article (2021), ont passé en revue les valeurs de pH rapportées dans sept références bibliographiques. Le pH moyen est de $4,9 \pm 2,1$ (\pm écart-type), avec une

valeur de pH médiane de 4,4 et une intervalle interquartile allant d'un pH de 4,2 à 5,8 (Q1 à Q3).

L'évolution du pH en fonction du temps et du milieu (aérobie, anaérobie) est un critère qualitatif primordial dans le cas des drêches de brasserie, qui sera développé lors de l'étude de faisabilité qualitative (cf.infra p.) et lors de l'étude de faisabilité légale et réglementaire (cf. infra p.).

4.10 Le rapport carbone/azote (rapport C/N)

Les drêches sont un matériau organique et biodégradable. La matière organique (MO) est notamment caractérisée par le rapport massique carbone/azote (rapport C/N), qui compare les teneurs en carbone et en azote de la matière. Si le rapport carbone/azote est inférieur à 25 ($C/N < 25$), la matière organique est considérée comme étant riche en azote. Le carbone compose en majorité la matière organique.

Les valeurs du rapport C/N des drêches de brasserie décrites dans la littérature scientifique varient de 7,1 à 26,5 (Assandri et al., 2020, p. 6) . Sans étonnement, la haute variabilité de la composition des drêches se répercutent sur ce rapport C/N. La valeur médiane de l'échantillon constitué des quinze données issues de la littérature scientifique, donne un rapport C/N de 11,4 et l'intervalle interquartile (Q1-Q3) varie d'un rapport C/N de 9,5 à 13,9. Bien que l'utilisation de la moyenne soit discutable au vue de la dispersion des données, nous avons l'avons calculé ainsi que l'écart-type et nous obtenons un rapport C/N moyen de $13,3 \pm 2,7$. En effet, l'échantillon comporte des valeurs extrêmes, et il serait raisonnable d'avancer qu'abstraction faite de ces valeurs, la majorité des rapports C/N des drêches se trouvent entre 9,5 et 13,9.

Bien que les données présentes une haute variabilité, les drêches de brasserie sont considérées comme des matières riche en azote à l'aune du rapport C/N. À titre d'exemple, voici les valeurs du rapport C/N de différentes matières organiques : urine 0,7 ; jus de fumier 2-3 ; humus (terre noire), compost de fumier, tontes, fientes de poules 10 ; algues 17, fumier frais peu pailleux, reste de légumes 20 ; marc de café 25 ; fumier frais pailleux 30-35 ; feuilles d'arbres 20-60 ; paille de seigle 65 ; paille céréales 50-150 ; BRF (Bois Raméal Fragmenté) 60-150 ; paille de blé 150 ; papier 150 ; sciure 200-500 (Terra Potager, 2022).

La drêche de brasserie est une matière organique dont la composition et les propriétés varient en fonction de la source qui l'émet. Le rapport C/N n'échappe à cette variabilité et à cette complexité, propre au vivant. En revanche, la majorité des rapports C/N des drêches de brasserie est comprise entre 9,5 et 13,9 et incitent à l'identifier comme une matière organique riche en azote. Ces aspects seront approfondis lors de l'étude de faisabilité (cf. infra p.).

4.11 Le pouvoir énergétique

Le pouvoir énergétique des drêches sera abordé à l'aune de deux critères, le pouvoir calorifique et le pouvoir méthanogène.

4.11.1 Le pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique, aussi appelé chaleur de combustion, correspond à la quantité d'énergie libérée sous forme de chaleur par la combustion complète d'une unité de quantité d'un combustible à pression constante. Il existe deux types de pouvoir calorifique, le pouvoir calorifique supérieur (PCS), et le pouvoir calorifique inférieur (PCI), qui soustrait à la valeur du PCS la valeur de la chaleur latente de condensation ou vaporisation de l'eau à 0°C, qui est égale à ± 2500 J/kg.

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) des drêches est de 20,14 MJ/kg, alors que le pouvoir calorifique inférieur (PCI) des drêches est de 18,64 MJ/kg, en masse sèche (Mussatto et al., 2006, p. 4).

Selon le rapport du CITEPA en France, qui se charge des inventaires nationaux et à titre d'exemples, les ordures ménagères (qui sont aussi composées principalement de matière organique) ont un PCI de 9,3 MJ/kg, le bois anhydre et les déchets de bois secs ont un PCI de 18 MJ/kg, alors que des combustibles liquides d'origine fossile comme le pétrole brut a un PCI de 42,8 MJ/kg et que le gaz naturel a un PCI de 47,4 MJ/kg (CITEPA, 2022). Le PCI de la drêche séchée serait donc comparable avec celui du bois, ce qui n'est pas étonnant au vu de la composition de ce matériau lignocellulosique.

4.11.2 Le pouvoir méthanogène et le rendement méthane

Le pouvoir méthanogène de la biomasse se mesure en BMP, l'acronyme pour *Biochemical Methane Potential*. Le BMP est fonction de la biodégradabilité de la matière organique. Cette mesure définit le volume maximal de méthane que peut produire une unité de matière organique d'un substrat lors de sa digestion anaérobie. Le BMP se mesure en ml CH₄ / g MO. La teneur en matière organique (MO) et la teneur en matière sèche (MS), que l'on préfère ici à taux d'humidité, sont des paramètres importants qui auront une influence sur le pouvoir énergétique d'un substrat. Enfin, le « rendement méthane » mesure le volume de méthane qui peut être produit par tonne de matière fraîche et s'exprime en m³ CH₄/tonne de produit brut (Projet ValorMap, 2018, p. 6). Ce paramètre a une importance fondamentale pour l'étude de faisabilité quantitative, économique et environnementale.

Selon le Projet ValorMap, cofinancé par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie), le pouvoir méthanogène des drêches de brasserie est de 370 ml CH₄ / g MO et offre un rendement de 86 m³ CH₄/t pour une matière organique MO de 0,232 g MO/g et une teneur en matière sèche de 0,272 g MS / g (Projet ValorMap, 2018, p. 19).

Malgré la faible teneur en matière sèche et en matière organique, le rendement méthane (RM) des drêches se trouve à la limite entre rendement moyen et élevé. En effet, selon les

industriels interrogés, la classification suivante peut être retenue : RM « faible » < 40 ; 40 < RM « moyen » < 80 ; 80 < RM « élevé » < 120 ; 120 > RM « très élevé » (en m³ CH₄/t de résidu) (Projet ValorMap, 2018, p. 6).

À titre de comparaison et d'exemple, voici des rendements méthanes de différents résidus ou substrats, en m³ CH₄/t de produit brut : les pulpes de betterave 61 ; drêches de pomme 67 ; fruits et légumes (avocat) 159 ; drêches de blé 212 (il s'agit ici de matière sèche 0,763 g MS / g) ; marcs de raisins rouges – Bourgogne 58 ; et dans les valeurs extrêmes minimales, les eaux blanches liées à la production de lait et fromage 2, la Cidrasse – Normandie 7, les salades 8 ; et parmi les valeurs extrêmes les plus élevées les distillats d'acide gras (palme) 504, les déchets de la filière viande 501, les graisses issues de la production de margarine 395, les graisses de station de prétraitement de sites agro-alimentaires 589 (Projet ValorMap, 2018, p. 19-22).

La drêche est une biomasse lignocellulosique humide. Alors que l'aspect lignocellulosique de ce matériau est intéressant d'un point de vue énergétique, le taux d'humidité élevé de ce résidu du brassage altère son rendement énergétique. En revanche, cette étude de faisabilité s'intéresse aux drêches produites dans la Région de Bruxelles-Capitale, un milieu urbain qui produit d'autres résidus dont le mélange avec des drêches pourrait constituer un substrat avec un rendement très élevé. Ces aspects seront abordés dans l'étude de faisabilité quantitative (cf. infra p.).

5. Des critères de faisabilité mis en évidence par le cadre juridique, le processus de brassage, la composition chimique et les propriétés physicochimiques des drêches de brasserie

Les recherches réalisées permettent de changer d'échelle, d'accéder au plus profond de la matière afin de comprendre certaines des propriétés physicochimiques des drêches de brasserie, et d'envisager des synergies de valorisation matière ou énergie de ce matériau lignocellulosique.

Les critères propres aux drêches de brasserie mis en évidence jusqu'ici sont regroupés dans des tableaux, selon leur utilité dans l'une ou l'autre étape de l'étude de faisabilité. Les valeurs des critères connus sont renseignées lorsque cela est cohérent.

5.1 Des critères qualitatifs propres aux drêches de brasserie

L'étude de faisabilité qualitative est le premier facteur à influencer la faisabilité d'une synergie éco-industrielle si l'on reprend la méthodologie mise au point par Adoue (2007). Après son analyse, l'étude de faisabilité peut s'arrêter là si le flux n'est pas de qualité suffisante et que la technique ne peut rien arranger.

Adoue (2017) identifie deux sources d'inadéquations qualitatives, d'une part la pureté des flux et d'autre part les caractéristiques physiques des flux.

La pureté des flux de drêches peut être appréhendée depuis des points de vue différents. Dans son sens premier, la pureté d'un flux renvoie à la présence de flux polluants qui présenteraient un risque sanitaire. La bière est une denrée alimentaire qui répond aux obligations légales et réglementaires de l'AFSCA, dans le cadre de la sécurité alimentaire pour l'homme et le bétail (Brasseurs Belges, C.B.B., 2007). Ces aspects sont abordés dans l'étude de faisabilité légale/réglementaire. A priori, la pureté des drêches, produit secondaire de la fabrication de bière, répond aux mêmes exigences que celles d'application pour la bière, au moins jusqu'à ce qu'elles soient filtrées. En revanche, une fois filtrées et séparées, des règles d'hygiène sont obligatoires en fonction du statut légal revêtu par les drêches, qui dépend lui-même de la synergie. On peut déjà imaginer que le stockage des drêches devra être fermé pour limiter la présence de potentiels contaminants extérieurs et d'agents pathogènes (tels que la salmonelle). Le guide des Brasseurs Belges, référencé par l'AFSCA comme le guide G-004, d'autocontrôle pour le secteur brassicole (cf. ANNEXE 2), stipule que « dans le cadre de la sécurité alimentaire pour l'homme et le bétail, aucun danger potentiel n'a été identifié pour ces produits sur base d'une analyse de risques (...). Néanmoins, aucun détergent ne peut subsister après le nettoyage des installations » (Brasseurs Belges, C.B.B., 2007, p. 35-36). Compte tenu de l'obligation des brasseries de respecter ces règles d'hygiène, de bonnes pratiques et de normes, et au vu des contrôles réguliers de l'AFSCA, on ne retiendra pas cela comme critère de qualité dans cette étude de faisabilité. De ce point de vue, les drêches sont considérées comme saines, sans danger pour la chaîne alimentaire (de l'homme au bétail) et exemptes d'agents pathogènes. En revanche, ces hypothèses n'empêchent pas le risque et il serait primordial de mettre en place une analyse de risque et de maîtrise des points critiques (HACCP) pour chacune des synergies lors de leur mise en œuvre. Quelques points critiques seraient :

- (1) le stockage des drêches dans un contenant fermé ;
- (2) la présence de détergent après le nettoyage des installations ;
- (3) la présence d'agents pathogènes ;
- (4) le pH maximal.

Les flux sortants d'un procédé de fabrication peuvent contenir différents types de matières. Dans le cas du brassage de la bière, les flux sortants sont facilement séparables et sont traités de manière distincte. Les flux résiduels sont constitués : des eaux résiduelles, des levures, du houblon et des drêches. Les flux sortants qui ne sont pas traités dans cette étude de faisabilité, peuvent eux aussi créer des synergies. Marilys Tran The Tri, diplômée en Design Industriel à la Cambre et spécialisée dans la recherche et le développement de matériaux géobiologiques, a réalisé des emballages alimentaires à partir des eaux usées de brasserie et des bactéries, afin de promouvoir une production de cellulose bactérienne (Fondations pour les générations futures, 2021). Quant aux levures de bières, des entreprises comme Duynie feed, spécialisées dans l'alimentation d'animaux à partir de coproduits, les valorisent en aliment liquide pour porcs notamment (Duynie Feed, 2024).

Si les drêches sont considérées à part entière, la question de la pureté se pose encore face à ce matériau humide qui contient entre 75-80% de taux d'humidité. La séparation de ce mélange hétérogène composé des drêches solides et d'eau liquide est possible à l'aide de technique qui seront abordés lors de l'étude de faisabilité technique (cf. infra p.). Le taux d'humidité peut changer en fonction des recettes et du type de grain utilisés, mais aussi en

fonction de l'installation de brassage et notamment de la technique de filtration. Ce critère sera retenu.

La variabilité causée par la diversité des installations de brasserie est rendue nulle lorsque chaque brasserie est considérée séparément. En revanche, une même brasserie brasse (a priori) des bières différentes avec des grains, des recettes ou techniques de brassages différents. En revanche, un minimum de 60% de malt d'orge ou de froment doit être respecté (AFSCA, 2023)

Pour essayer de diminuer les facteurs de variabilité, un seul type de grain pourrait être considéré, mais même à cette échelle, la composition chimique peut varier en fonction de l'origine, du terroir, du moment de la récolte, du maltage, du concassage et des conditions d'empâtage, entre autres. En effet, comme cela a été précisé (cf. supra p.), la longueur des chaînes de cellulose varie en fonction de leur source, les arabinoxylanes varient également en fonction de leur source et les lignines en fonction des espèces. Ces variations de la composition chimique sont entre autres à l'origine de la variabilité des caractéristiques physicochimiques qui en découlent. Le critère qualitatif retenu sera la description des matières premières (types de céréales) et leur teneur en pourcentage massique par brassin. Si jamais des brassins de recettes différentes devaient être amenés à être mélangés dans le même contenant à drêches, la teneur massique permettrait d'identifier la composition (en % massique de type de grains) du mélange.

Une variabilité, liée à la complexité du monde vivant, est incompressible. Cette étude essaiera de faire avec cette variabilité plutôt que de lutter contre, et de l'utiliser comme une aide à la décision. Cependant, pouvoir quantifier cette variabilité est important. Les critères physicochimiques retenus pour l'étude de faisabilité reflètent une partie de cette variabilité. Les mesures des incertitudes (relatives, absolues ou des écarts-types) quantifieront également cette variabilité.

Selon Adoue (2017), les caractéristiques physiques des flux sont la deuxième source d'inadéquations qualitatives rencontrées lors de l'étude de faisabilité de synergies éco-industrielles. Les critères qualitatifs développés plus haut et retenus pour l'étude de faisabilité sont rapportés dans le Tableau 3 (cf. infra p.32).

La taille des particules, par exemple, qui varie entre $1-10\text{mm} \pm 5\%$, mais qui ne varie pas d'une brasserie à une autre n'est pas retenue car elle n'est pas caractéristique. La taille des particules et l'hétérogénéité de celles-ci sera gardée à l'esprit lors du choix des synergies potentielles.

Certains de ces critères sont facilement mesurables *in situ* par les opérateurs de la brasserie ou de l'unité de valorisation. D'autres critères méritent d'être mesurés en laboratoire. Si mesurer en laboratoire les critères pour chaque flux sortant et par brassin semble peu réalisable, des mesures sur base d'un certain nombre d'échantillons devront être faites avant de mettre en place une synergie, pour chaque recette. Des mesures de contrôle pourrait être aussi mises en place pour tester, contrôler, et améliorer les synergies. L'Institut Meurice, et l'association Meurice R&D, spécialisés entre autres dans le secteur brassicole, pourraient être des parties prenantes clés. En étroite collaboration, un protocole expérimental rigoureux pourrait être défini afin d'obtenir des résultats expérimentaux plus précis et des méthodes de

calcul des critères plus efficaces. Ce travail, inspiré du Design Thinking, suit un processus itératif qui, au fur et à mesure de son avancement et des recherches, perfectionne et précise sa méthode.

Tableau 3 Des critères qualitatifs propres aux drêches de brasserie

Résidu du brassage				
Code faisabilité.n° critère	1.1	1.2	1.3	
Critère	Matières premières (% massique)	Extrait résiduels (degré Plato)	Technique de filtration	
Abréviation				
Unité de mesure	Céréales (% m/m)	° P		
Mesure				
Taux d'humidité & propriétés mécaniques				
Code faisabilité.n° critère	1.4	1.5	1.6	
Critère	Taux d'humidité	Capacité de rétention H ₂ O	Capacité de rétention d'huile	
Abréviation	MC (<i>Moisture content</i>)	WHC	OHC	
Unité de mesure	%	g/g	g/g	
Valeur théorique	75-80 %	3,845 (± σ 0,356)	2,107 (± σ 0,222)	
Mesure				
Masses volumiques & densité				
Code faisabilité.n° critère	1.7	1.8	1.9	
Critère	Masse volumique apparente	Masse volumique réelle	Densité réelle (base sèche)	
Abréviation	ρ app	ρ réelle	ρ réelle (base sèche)	
Unité de mesure	kg.m ⁻³	kg.m ⁻³	kg.m ⁻³	
Valeur théorique	517 (± σ 15)	753 (± σ 55)	1355 (± σ 1,5)	
Mesure				
Matière organique				
Code faisabilité.n° critère	1.10	1.11	1.12	1.13
Critère	Potentiel hydrogène	Matière sèche	Matière organique	Rapport carbone / azote
Abréviation	pH	MS	MO	Rapport C/N
Unité de mesure		g MS.g ⁻¹	g MO.g ⁻¹	
Valeur théorique	4,9 (± σ 2,1)	Formule : MS = 1 - MC (%)	0,232	9,5 - 13,9
Mesure				
Pouvoir énergétique				
Code faisabilité.n° critère	1.14	1.15	1.16	1.17
Critère	Pouvoir Calorifique Inférieur	Pouvoir Calorifique Supérieur	Pouvoir méthanogène	Rendement méthane
Abréviation	PCI	PCS	BMP	η CH ₄
Unité de mesure	MJ . kg ⁻¹	MJ . kg ⁻¹	ml CH ₄ / g MO	m ³ CH ₄ /t
Valeur théorique	18,64	20,14	370	86
Mesure				

Lorsque les critères n'ont pas encore été mesurées expérimentalement, les valeurs théoriques issues de la littérature scientifique font autorité. En revanche, il serait intéressant de mettre au point une méthode afin de calculer la teneur en matière organique (MO) d'une part et une méthode afin de calculer les teneurs en carbone totale, en azote totale et le rapport C/N

d'autre part, car leur variabilité aura une influence directe sur certaines synergies. Si cela n'est pas facilement réalisable, il conviendra de se contenter des valeurs théoriques et de prendre en compte l'imprécision que ces critères charrient dans les calculs ultérieurs.

La faisabilité qualitative permet de caractériser les flux de drêches sortant et de caractériser la variabilité des drêches. En effet, cette grille d'analyse qualitative permet dans une certaine mesure de caractériser la spécificité du flux de drêches propre à chaque brasserie, à l'instar de certains critères variables d'une source à une autre. La variabilité intrinsèque à la matière ne pourra pas être prédite. Il s'agit de trouver des synergies qui supportent une certaine variabilité, quantifiable pour la plupart des critères.

Pour Adoue, « l'utilisation directe d'un flux sortant d'une entreprise ou d'un mélange de flux mutualisés dans un procédé précis aux exigences particulières est rarement possible » (2007, p.56). L'étude de faisabilité qualitative fait ressortir des inadéquations d'exigences de qualité qui pourraient être corrigées à l'aide de techniques adaptées.

5.2 Des critères techniques propres aux drêches de brasserie

Des critères sont propres à la faisabilité technique des synergies éco-industrielles. Cette dernière vise à résoudre les inadéquations qualitatives entre flux sortant et exigences de la synergie, lorsque cela est possible (Adoue, 2007).

Les critères d'ordre techniques propres aux drêches sont repris dans le Tableau 4 (cf. infra, p.). La température des drêches, qui est de l'ordre de 60°C mais qui est variable, n'est pas retenue comme un critère technique (cf. supra p. 15-16). En revanche, dans l'hypothèse où la technique impose un séchage thermique des drêches, l'évolution de la température des drêches en fonction du temps aura un impact économique et environnemental intéressant.

Le taux d'humidité (critère n°4) est retenu et sera important, d'autant plus dans le cas d'une mise en place de technique de pressage ou de séchage.

L'activité hydrique (critère n°18), quant à elle, aura son importance après le séchage par exemple, et mesure la facilité avec laquelle l'eau s'évapore d'un produit et migre potentiellement vers d'autres produits (cf. supra p. 20-21).

Le pH (critère n°10) est un paramètre déterminant pour le développement microbien (Sganzerla et al., 2023). Si le pH est trop élevé, la conservation saine et sans danger des drêches est compromise. Dans ce cas, ou pour prévenir cet événement, des traitements d'acidification sont réalisés à partir d'acides organiques ou inorganiques (Brasseurs Belges, C.B.B., 2007).

Enfin, la taille des particules (critère n°19) est un critère essentielle lorsque la drêche est transformée.

D'autres critères techniques seront identifiés à partir de chaque synergie et des techniques proposées pour aligner la qualité du flux de drêches aux exigences de la synergie.

Tableau 4 Des critères techniques propres aux drêches de brasserie

Code faisabilité.n° critère	2.4	2.10	2.18	2.19
Critère	Taux d'humidité	Potentiel hydrogène	Activity hydrique (<i>water activity</i>)	Tailles des particules
Abréviation	MC (<i>Moisture content</i>)	pH	aw	
Unité de mesure	%			mm, µm
Valeur théorique	75-80 %	4,9 (± σ 2,1)	0,110 (± σ 0,37)	
Mesure				

5.3 Des critères quantitatifs propres aux drêches de brasserie

Lorsque la qualité du flux de matière a été transformée pour répondre aux exigences du procédé récepteur, Adoue (2017) met en garde face à la potentielle inadéquation entre offre et demande. L'analyse quantitative vise à identifier l'offre en termes de flux (critère n°20 et de gisement de matière, et la demande de ce même flux, gisement. Un critère important se trouve à la croisée de ces deux critères quantitatifs, l'ajustement offre-demande (critère n°24). Il s'agira d'imaginer des synergies qui optimisent cet ajustement, tout en prenant en compte les critères qualitatifs et techniques.

La question de la continuité de l'offre et de la demande (critère n°25) vient ajouter un nouveau curseur de variabilité dans cette étude.

Les critères quantitatifs identifiés jusque-là sont reportés dans le Tableau 5 (cf. infra p.35).

Tableau 5 Des critères quantitatifs propres aux drêches de brasserie

Masses volumiques & densité				
Code faisabilité.n° critère	3.7	3.8	3.9	
Critère	Masse volumique apparente	Masse volumique réelle	Densité réelle (base sèche)	
Abréviation	ρ app	ρ réelle	ρ réelle (base sèche)	
Unité de mesure	$kg.m^{-3}$	$kg.m^{-3}$	$kg.m^{-3}$	
Valeur théorique	517 ($\pm \sigma$ 15)	753 ($\pm \sigma$ 55)	1355 ($\pm \sigma$ 1,5)	
Mesure				
Estimation de l'offre & de la demande				
Code faisabilité.n° critère	3.20	3.21	3.22	3.23
Critère	Volume du flux (offre)	Masse du gisement (offre)	Volume du flux (demande)	Masse du gisement (demande)
Abréviation	V offre	m offre	V demande	m demande
Unité de mesure	m^3	kg ou t	m^3	kg ou t
Valeur				
Estimation de l'offre & de la demande				
Code faisabilité.n° critère	3.24	3.25	3.26	3.27
Critère	Ajustement offre-demande	Continuité offre	Continuité demande	Continuité offre-demande
Abréviation	O/D	ΔO	ΔD	$\Delta O / \Delta D$
Unité de mesure				
Valeur				
Matière organique				
Code faisabilité.n° critère		3.11	3.12	3.13
Critère		Teneur en matière sèche	Teneur en matière organique	Rapport carbone / azote
Abréviation		MS	MO	Rapport C/N
Unité de mesure		$g MS.g^{-1}$	$g MO.g^{-1}$	
Valeur théorique		Formule : $MS = 1 - MC (\%)$	0,232	9,5 - 13,9
Mesure				
Pouvoir énergétique				
Code faisabilité.n° critère	3.14	3.15	3.16	3.17
Critère	Pouvoir Calorifique Inférieur	Pouvoir Calorifique Supérieur	Pouvoir méthanogène	Rendement méthane
Abréviation	PCI	PCS	BMP	ηCH_4
Unité de mesure	$MJ.kg^{-1}$	$MJ.kg^{-1}$	ml CH_4 / g MO	$m^3 CH_4/t$
Valeur théorique	18,64	20,14	370	86
Mesure				

5.4 Des critères légaux/réglementaires propres aux drêches de brasserie

L'aspect réglementaire est un facteur essentiel à étudier lors de l'étude de faisabilité de synergies éco-industrielles, tant pour son aspect contraignant que performatif. En effet, le droit évolue et s'adapte à son environnement autant qu'il le façonne.

Adoue (2007) insiste particulièrement sur l'aspect primordial du statut administratif du flux et notamment sur le statut de déchet, qu'il qualifie de « point crucial » et qui implique une « marge de manœuvre réduite » (Adoue, 2007, p. 63). Les drêches se retrouvent parfois dans ce que le chercheur qualifie de « d'engrenage réglementaire complexe » (Adoue, 2007, p. 63). Ce tissu légal complexe a été en partie démêlé plus tôt dans ce travail (cf. supra p.4-6). Cinq statuts

administratifs (critère n°28) ont été identifiés : (1) déchets ; (2) déchets alimentaires, (3) biodéchets ; ou (4) matières premières pour l'alimentation des animaux ; ou (5) denrées alimentaires. Les « ou » expriment le caractère exclusif de ces trois classes de statuts juridiques. Ces statuts déclenchent une chaîne d'obligations légales et de recommandations sanitaires. Ces aspects seront détaillés dans l'étude de faisabilité légale en fonction des synergies concernées (cf. infra p.).

Les critères légaux identifiés jusqu'ici sont repris dans le Tableau 6 (cf. infra p.). À ces critères s'ajoute également celui de la certification biologique. En effet, en vertu du règlement (UE) 2018/848 relatif à la production biologique, et de l'Article 3, « on entend par : 1) « production biologique » : l'utilisation, y compris durant la période de conversion visée à l'article 10, de méthodes de production conformes au présent règlement à toutes les étapes de la production, de la préparation et de la distribution ; 2) « produit biologique » : un produit issu de la production biologique » (Règlement (UE) 2018/848 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques, et abrogeant le règlement (CE) no 834/2007 du Conseil, 2018, Article 3). Ainsi, les drêches issues de matières premières biologiques et qui répondent aux obligations du règlement (UE) 2018/848 de production biologique et de méthodes de production conformes, sont considérées comme telles. En outre, certaines synergies imposeront ce critère légal si les drêches participent à la production d'un produit biologique. Ces aspects sont développés dans l'étude de faisabilité légale et réglementaire (cf. infra p.)

Tableau 6 Des critères réglementaires propres aux drêches de brasserie

Code faisabilité.n° critère	4.28	4.29	4.10	2.18
Critère	Statuts administratifs	Biologique	Potentiel hydrogène	Activity hydrique (<i>water activity</i>)
Abréviation		Bio	pH	aw
Unité de mesure	(1) déchets ; (2) déchets alimentaires, (3) biodéchets ; ou (4) matières premières pour l'alimentation des animaux ; ou (5) denrées alimentaires	(1) biologique (0) conventionnel		Valeur théorique : 0,110 ($\pm \sigma$ 0,37)
Mesure				

5.5 Des critères économiques propres aux drêches de brasserie

Pour Adoue (2007), la faisabilité économique d'une synergie est une analyse qui doit être menée après avoir caractérisé la qualité du flux, identifié les potentielles inadéquations de qualité, défini les transformations techniques visant à aligner la qualité du flux aux exigences, quantifié le flux et étudié les potentiels changements de statuts légaux. En effet, « l'analyse

coûts/bénéfices n'est opportune qu'après celles des autres critères de faisabilité, car elle résulte en partie de leur évaluation » (Adoue, 2007, p. 67). Ainsi, les critères économiques retenus dans l'analyse coûts/bénéfices seront identifiés en fonction de l'étude de faisabilité qualitative, technique, quantitative et légale de chacune des synergies.

Néanmoins, Adoue (2007) distingue plusieurs types de coûts en fonction de leurs origines. En réponse à l'étude de faisabilité qualitative, des techniques de transformation ou d'adaptation de la qualité des flux sont mises en œuvre. Ces techniques impliquent des investissements en équipements (contenant de stockage, silo, presse, séchoir, unité de méthanisation...) qui seront parfois amortis sur des temps longs.

Ces équipements et installations, même s'ils n'ont pas donné lieu à des investissements, engendrent des coûts d'exploitation (ressources humaines, énergie, matières premières, consommables...) et de maintenance (Adoue, 2007).

Les changements de statuts, l'enregistrement de nouvelles activités, l'introduction de demandes et de permis impliquent également des coûts (humain, administratif, organe de contrôle...) qui seront pris en compte.

Enfin, le transport des flux représente une classe de coût importante, corrélée positivement à la densité du flux et aux distances à parcourir. En effet, Adoue (2007) ne développe pas d'étude de faisabilité géographique car ce critère se traduit de manière économique par le biais du transport.

Toutefois, une synergie qui n'impliquerait que des coûts supplémentaires ne serait pas mise en œuvre. D'après Adoue, « une synergie doit présenter un intérêt économique pour l'ensemble des protagonistes d'un échange ou d'une mutualisation » (Adoue, 2007, p. 67).

Le chercheur met en évidence deux types de bénéfices liés à des synergies éco-industrielles, selon que l'on se place du côté du producteur de flux ou du valorisateur. Le premier avantage correspond à la diminution du coût de traitement actuel du flux sortant pour le producteur, auquel peut même s'ajouter les gains liés à la synergie (vente, troc...). Depuis le point de vue du valorisateur, un bénéfice réside dans la diminution des coûts d'approvisionnement réalisée grâce à la valorisation du flux, auquel peut s'ajouter « le paiement d'une prestation de « traitement de déchet » par le producteur du flux » (Adoue, 2007, p. 68).

Le facteur économique semble encore être un facteur déterminant dans la poursuite de l'étude de faisabilité d'une synergie, et encore plus de sa mise en œuvre. Les brasseries en milieu urbain sont la plupart du temps des petites et moyennes entreprises qui se trouvent pour beaucoup sur un équilibre financier mince, d'autant plus depuis la crise du covid-19, qui a heurté de plein fouet le secteur de l'HORECA. Pour cette raison, l'étude de faisabilité de telles synergies est primordiale et pourrait contribuer à la diminution des charges liées au traitement actuel du flux de drêche.

Enfin, prendre part à des synergies éco-industrielles, même si elles assurent un avantage économique, témoigne d'un engagement éthique pour une économie circulaire, voire régénérative, durable pour les écosystèmes et les humains qui en font partie. Les consommateurs sont de plus en plus à la recherche de produits issus d'entreprises locales qui

ont un impact environnemental positif sur leurs territoires. Cela semble d'autant plus vrai auprès de la cible de consommateurs des brasseries artisanales à Bruxelles, qui n'hésitent pas à dépenser dans ces bières locales le double du prix d'une bière, certes belge, mais plus industrielle. Pour ces raisons, la mise en œuvre de synergies éco-industrielles peut se traduire pour les brasseries dans leur proposition de valeur ajoutée, et dans leur image, ce qui est loin d'être négligeable dans un marché concentré et hautement concurrentiel. De la sorte, les synergies éco-industrielles peuvent avoir des impacts économiques sur l'ensemble des activités des producteurs et des récepteurs/valorisateurs du flux.

5.6 Des critères de faisabilité culturelle

La faisabilité économique d'une synergie n'est pas contingente à sa réalisation. En effet, pour Adoue, « la difficulté de communiquer des informations sur ces procédés, la capacité des dirigeants, formés à une compétition économique féroce, à croire à ce type de solution, à s'impliquer et surtout à collaborer entre eux sont un faisceau de facteurs extrêmement importants. Ils ne relèvent pas exclusivement de faits ou de données concrètes, mais sont étroitement liés à la culture des entrepreneurs » (Adoue, 2007, p. 68).

En outre, des critères propres aux drêches, comme leur couleur, leur haut taux d'humidité, leur instabilité, auront tendance à renforcer l'un ou l'autre facteur culturel en fonction de la synergie concernée.

Les critères de faisabilité culturelle sont propres à chaque partie prenante et à chaque synergie. Pour cette raison, ils sont abordés dans l'étude de faisabilité culturelle.

5.7 Des critères de faisabilité environnementale

Si la synergie éco-industrielle est économique viable et culturellement acceptée par les parties prenantes qui doivent les mettre en place, il est très probable qu'elle soit mise en œuvre. En outre, Adoue (2007) souligne un dernier facteur primordial : la faisabilité environnementale.

Le bon sens voudrait qu'une synergie soit mise en place seulement si son impact environnemental est bénéfique, mais la réalité est bien plus complexe. Les impacts sur l'environnement sont nombreux, parfois contre-intuitifs et difficiles à calculer dans le cadre d'une étude de faisabilité, à moins de faire appel à un bureau d'études, ce qui peut engendrer des coûts conséquents.

Des parties prenantes pourraient décider de mettre en place une synergie éco-industrielle économiquement viable, même si elle impliquerait des impacts environnementaux délétères. En revanche, cette étude de faisabilité, certainement pas objective, mais indépendante de tout conflit d'intérêt, tend à être très prudente sur ce point et à placer ce critère environnemental comme un facteur contingent à la mise en œuvre d'une synergie éco-industrielle.

Adoue (2007) n'emploie pas le terme éthique, mais il semble pourtant être radicalement, dans le sens premier du terme, nécessaire à la mise en œuvre d'une synergie éco-industrielle à impact environnemental positif ou neutre.

Conclusion du Chapitre 1

Les drêches de brasserie sont un résidu solide issu du brassage. Ce flux de matière présente une certaine variabilité, dans sa composition chimique, ses propriétés physico-chimiques et même dans les statuts juridiques qui les encadrent.

Ce matériau lignocellulosique peut être à la fois un déchet, un déchet alimentaire et un biodéchet, ou alors il sera une matière première pour l'alimentation des animaux, ou, toujours de manière exclusive, une denrée alimentaire.

Ce chapitre a approché ce matériau avec plusieurs échelles et niveaux de lecture afin de comprendre les interactions complexes qu'elle abrite, et qu'elle nouera avec l'écosystème industriel dans lequel elle prendra place. Face à la complexité de ce matériau, et à sa variabilité, l'écologie industrielle et son approche systémique et biomimétique semblent faire à elles trois une méthodologie ad hoc.

Chapitre 2 Un projet d'écologie industrielle pour la valorisation des flux de drêches issues des brasseries de la Région de Bruxelles-Capitale

Les drêches sont des résidus lignocellulosiques inhérents à la fabrication de la bière. Lorsque la brasserie En Stoemelings a proposé d'étudier les solutions de valorisation de ce qu'elle traitait comme un déchet, l'objectif d'une gestion de projet venait d'être formulé. Dès le début, la nécessité d'adopter une démarche systémique, cohérente avec la notion de gestion de déchets, a été formulé. La dimension du projet s'est ainsi rapidement élargie de la brasserie En Stoemelings à toutes les brasseries du territoire de la Région de Bruxelles-Capitale, qui produisent en effet toutes des drêches. Il a été ensuite question d'identifier une méthodologie qui puisse proposer un cadre d'analyse pour cette gestion de projet. Face à ces enjeux territoriaux de bouclage de flux de matières, l'écologie industrielle s'est imposée comme une méthodologie ad hoc.

Dans ce chapitre, le champ de l'écologie industrielle et territoriale sera défini. Plus précisément, le bouclage de flux de matière sera développé. Il s'agit d'un des leviers proposés par l'écologie industrielle pour décarboner l'économie. Ces apports méthodologiques, consolidés par des connaissances acquises lors des études à l'ICHEC et plus particulièrement lors de l'option Nouveaux Business Modèles Durables de Master, permettent de définir la méthodologie qui soutient la gestion de projet et l'étude de faisabilité.

À partir de ce cadre théorique, une approche systémique sera mise en place pour identifier les brasseries bruxelloises et les parties prenantes de cette gestion de projet. Ensuite, le gisement de drêches sera tout d'abord estimé à l'échelle de la brasserie En Stoemelings. La méthodologie, qui fait se confronter littérature scientifique et mesures expérimentales, sera ensuite appliquée aux brasseries de la Région. Une cartographie du gisement de drêches en Région de Bruxelles-Capitale et une estimation de celui-ci seront obtenus.

Enfin, les synergies existantes entre des brasseries et d'autres acteurs, dont certains ont pu être interviewés, seront détaillées. Il s'agira ensuite de lister à la lueur de la littérature scientifique, et de nos recherches, les synergies potentielles qui impliquent des drêches. Pour finir, et pour rester cohérent avec les besoins du territoire dans lesquels les flux de drêches sont produits, les synergies potentielles propres à la Région seront identifiées et certaines d'entre elles seront sélectionnées afin d'étudier leur faisabilité.

1. L'écologie industrielle, bouclage de flux de matière au sein de territoire

L'écologie industrielle et territoriale propose d'appréhender nos territoires avec les approches qui permettent d'étudier la biosphère et ses écosystèmes. L'ensemble des activités qui occupent un milieu donné, seraient en interaction les unes avec les autres et avec ce milieu. La biocénose industrielle, formerait avec son territoire, en guise de biotope, un écosystème. La métaphore initiée par Adoue (2007) exhorte les parties prenantes de cette société industrielle à analyser leur environnement en s'inspirant de la nature, de son rythme de création et de dégradation de la matière, de ses 3,8 milliards d'années de recherches, de sa complexité et de ses interconnexions.

L'écologie industrielle et territoriale sera contextualisée et définie. Le bouclage de flux de matières, qui est un des nombreux outils proposés par l'écologie industrielle sera développé avant que ces apports méthodologiques ne soient appliqués à la gestion de projet qui a précédé ce travail.

1.1 L'écologie industrielle et territoriale

L'écologie industrielle et territoriale est un des sept piliers de l'économie circulaire qui a été conceptualisée dans les années 1990 comme un domaine scientifique capable de répondre aux objectifs de développement durable.

1.1.1 *L'économie circulaire et l'écologie industrielle et territoriale*

L'ADEME, l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, en d'autres termes, l'Agence de la transition écologique, en France, définit l'économie circulaire comme un « système économique d'échange et de production qui, à tous les stades du cycle de vie des produits (biens et services), vise à augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources et à diminuer l'impact sur l'environnement tout en permettant le bien-être des individus (ADEME & IN NUMERI, 2023, p. 13). L'économie circulaire vise à maintenir les produits et services le plus longtemps possible à l'intérieur d'un même système (Service Public Fédéral Belge, 2024). L'économie circulaire s'oppose en cela à une économie linéaire qui extrait des ressources et les rejette lorsque leur fin de vie économique est atteinte. Cette circularité implique ainsi « un modèle de production et de consommation qui consiste à partager, réutiliser, réparer, rénover et recycler les produits et les matériaux existants le plus longtemps possible afin qu'ils conservent leur valeur », de telle sorte à ce que « le cycle de vie des produits [soit] étendu afin de réduire l'utilisation de matières premières et la production de déchets » (Parlement européen, 2023, paragr. 3).

Ainsi, l'économie circulaire participe à découpler la consommation des ressources et la croissance du PIB, pour assurer une réduction des impacts environnementaux, tout en restant dans une logique de croissance économique. L'écologie industrielle et territoriale est un des sept piliers de l'économie circulaire comme le montre la Figure 8.



Figure 8 L'économie circulaire, sept piliers et trois domaines

Source : ADEME, & IN NUMERI. (2023). *Déchets chiffres-clés. Édition Juin 2023* (p. 1-84). <https://librairie.ademe.fr/ged/7700/DechetsChiffresCles2023.pdf>

En effet, le terme écologie industrielle et territoriale (EIT) semble plus complet, bien que la notion de territoire soit sous-jacente à l'idée d'écologie industrielle. L'ADEME définit ainsi ce pilier de l'économie circulaire : « L'écologie industrielle et territoriale, dénommée aussi symbiose industrielle, constitue un mode d'organisation interentreprises par des échanges de flux ou une mutualisation de besoins » (ADEME & IN NUMERI, 2023, p. 14). L'écologie industrielle et territoriale, comme l'économie circulaire, réduit la pression sur les ressources en prônant une optimisation de celles-ci. Ces ressources ne sont pas forcément matérielles et incluent l'eau, l'énergie, les matières premières, les déchets, mais aussi les équipements et les compétences (ADEME, 2024).

1.1.2 L'écologie industrielle, inspirée des écosystèmes naturels, conceptualisée dans les années 1990

L'écologie industrielle a été évoquée dans les années 1950 mais a été conceptualisée dans les années 1990, notamment par Robert A. Forsch et Nicholas E. Gallopoulos, deux ingénieurs du constructeur automobile américain General Motors (Celnik, 2023). Quelques années auparavant, en 1987, le rapport Brundtland s'est mis d'accord sur une définition du

développement durable, et les chercheurs s'affairent à trouver des solutions à ce problème global.

Le terme écologie renvoie à l'écologie scientifique et à l'étude des écosystèmes, alors que l'adjectif industriel est utilisé dans le sens anglo-saxon du terme, comme la société industrielle dans son ensemble, c'est-à-dire, l'activité de production de consommation des biens et services.

Forsch et Gallopoulos décrivent une méthodologie selon laquelle l'analyse des flux d'un territoire permet de dimensionner un « métabolisme industriel » et de déterminer les flux de matière et d'énergie que l'on peut y prélever sans épuiser le métabolisme de cet écosystème (Celnik, 2023, paragr. 4).

Pour Adoue, l'écologie industrielle propose « d'appréhender la société industrielle comme un système, un « écosystème particulier de la Biosphère » composé par des éléments et leurs interactions » (Adoue, 2007, p. 15).

Cette approche globale est innovante dans le sens où elle rompt avec une conception hermétique des entités. Selon l'approche « *end of pipe* », les activités humaines et en particulier l'activité économique ont des impacts sur leur environnement « externe » ou « extérieur ». Comme si la société industrielle ne faisait pas partie de la biosphère, comme si elle était à part, ou plutôt même au-dessus, tant elle l'extrait et ignore son fonctionnement et ses cycles bio-géochimiques. Les interactions n'ont pas lieu aux interfaces d'entités déconnectées de leur environnement.

L'écologie industrielle rompt avec cette approche linéaire de nos sociétés industrielles qui n'intègre ni la finitude des ressources, ni l'incapacité de la planète à absorber la totalité des déchets produits. Avec l'écologie industrielle, la société industrielle fait même intégralement partie de la biosphère, et les écosystèmes industriels et économiques qu'elle héberge sont dépendants de cette couche superficielle très mince qui rend possible la vie.

L'écologie industrielle biomimétise les écosystèmes naturels et exhorte à créer des interactions entre biocènes et biotopes, où plusieurs espèces se côtoient, sont parfois en compétition pour des ressources, ou en mutualisent de manière inter-espèces et même intra-espèces. L'écologie industrielle implique donc la recherche de ces ressources, l'étude des flux et des stocks de matières et d'énergie au sein d'écosystèmes définis.

Avec du recul, cela semble invraisemblable d'avoir pu croire que l'industrie et l'économie de croissance exponentielle allaient échapper aux règles de la Nature, à la conservation dans un espace fini, aux réserves limitées et à la capacité de régénération limitées. Une croissance exponentielle dans un système fermé, « mène inévitablement à une augmentation des ponctions des ressources naturelles jusqu'à l'épuisement et des rejets dans la Biosphère jusqu'à la saturation de sa capacité de traitement » (Adoue, 2007, p. 16). Face à cela, Adoue propose deux solutions :

- 1) mettre en place une société radicalement différente, qui respecte les capacités de charge de la Terre et les limites planétaires liés à ses cycles bio-géochimiques comme celui du carbone,
- 2) découpler la croissance économique de la croissance de l'extraction des ressources naturelles et des émissions dans la Biosphère.

L'écologie industrielle participe à cette deuxième solution en considérant la complexité des activités humaines et industrielles, qui altèrent des écosystèmes naturels, eux-mêmes très complexes.

Il est difficile de parler d'approche systémique sans citer *The limits to growths*, (Club of Rome, 1972). En effet, le rapport Meadows est un des premiers à modéliser les systèmes interconnectés de la planète. Cinquante ans plus tard, il ne s'agit plus d'une nécessité, mais d'une urgence à utiliser des approches systémiques pour mettre en place les actions collectives qui pourraient nous permettre d'atteindre les objectifs de développement durable : « *Only collective action that reflects the interconnectedness and interdependence of the web of life, a holistic viewpoint and systems approach, will adequately address the issues we face as part of the planetary emergency. Both transformative thinking and action is needed* » (The Club of Rome, 2022, p. 2).

1.1.3 Un nouveau domaine scientifique pour répondre aux objectifs de développement durable

Pour Adoue, « l'écologie industrielle se positionne comme la « science de la durabilité » » (Adoue, 2007, p. 18). Ce nouveau domaine scientifique a en effet connu dès les années 1990 un certain engouement.

En 1996, le « Conseil Présidentiel pour le Développement Durable » (PCSD) propose à Bill Clinton la création de « parcs éco-industriels » (Adoue, 2007, p. 17). L'année d'après, les presses du MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) publient le *Journal of Industrial Ecology*. En France, le premier congrès international d'écologie industrielle a lieu à Troyes (Adoue, 2007). Dans les années 2000, l'IS4IE (*International Society for Industrial Ecology*) est créée pour promouvoir ce nouveau domaine scientifique prometteur. Des revues scientifiques sont fondées, des programmes de recherche sont créés. Pourtant, l'écologie industrielle n'a pas encore infusé le langage usuel comme l'a déjà fait l'économie circulaire. Il s'agit peut être seulement d'une histoire de temps, ou de terminologie.

L'écologie industrielle, qui a le grand avantage de saisir le caractère systémique des écosystèmes et de la biosphère, s'impose comme un outil cohérent pour adresser les défis d'un développement durable parmi cette biosphère. Ce domaine scientifique et industriel permet de répondre à cinq des dix-sept Objectifs de Développement Durables (ODD) fixés par les Nations Unies en 2015 (Club d'écologie industrielle de l'Aube - CEIA, 2022) :

ODD 8 « Travail décent et croissance économique »

ODD 9 « Industrie, innovation et infrastructure »

ODD 11 « Villes et communautés durables »

ODD 12 « Consommation et production responsables »

ODD 13 « Mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques ».

Bien que ces objectifs ne soient pas exempts de critiques, ils permettent au moins de confirmer la cohérence de l'écologie industrielle et territoriale, dans la poursuite des objectifs mondiaux. Le développement durable est objectif global qui doit se traduire à des échelles locales.

Pour Adoue, « les écosystèmes naturels sont des icônes de durabilité et d'équilibre : l'usage de la matière est optimal, chaque déchet aussitôt utilisé par un autre organisme et les besoins énergétiques sont satisfaits par un apport externe d'énergie renouvelable : l'énergie solaire » (Adoue, 2007, p. 27). L'écologie industrielle tend à orienter la société industrielle vers ce modèle et cette étude de faisabilité essaiera, à son échelle, de boucler le flux de drêches. Dans la Nature, les déchets n'existent pas, « comme le dit bien l'indispensable dictionnaire critique de l'Anthropocène (édition CNRS), « le déchet est l'empreinte d'un anthroposystème qui ne ferme pas le cycle de la matière » » (Lafay, 2021).

1.2 Le bouclage de flux de matières

L'écologie industrielle consiste entre autres à boucler des flux de matières, d'eau et d'énergie au sein d'écosystèmes et aux travers des synergies éco-industrielles qu'elle favorise. Pour s'inscrire véritablement dans une démarche systémique propre à l'écologie industrielle, il aurait été de rigueur d'étudier les flux de matières, d'eau et d'énergie sortants des brasseries. Dans cette étude de faisabilité, il sera uniquement question des flux de matières.

1.2.1 *Dématérialiser la croissance et décarboner notre économie grâce au bouclage de flux*

Selon Adoue (2007), plusieurs types de leviers existent pour disjoindre la courbe de croissance économique de celle d'extraction des ressources et des émissions de gaz à effets de serre (GES). L'écologie industrielle propose plusieurs leviers pour atteindre cet objectif de dématérialisation ou décarbonation de notre économie :

- 1) l'économie de fonctionnalité, qui est centrée sur la vente de services plutôt que sur la propriété privée des utilisateurs, dans le but de changer la logique de production des industriels, qui, dans ce système, ont tout intérêt à produire des objets avec une durée de vie plus longue, ce qui participe à la diminution de la quantité de ressources utilisées et de rejets dans la biosphère ;
- 2) l'écoconception, qui relève de l'action individuelle de l'entreprise et leur propension à utiliser moins de ressources fossiles, plus de matières recyclées, d'améliorer la « recyclabilité » en fin de vie (Adoue, 2007, p. 26) ;
- 3) le bouclage de flux de matières et d'énergie.

Il est intéressant de remarquer que les terminologies et la classification de ces concepts ne trouvent pas forcément de consensus. En effet, Adoue considère que l'écologie industrielle englobe l'économie de fonctionnalité et l'écoconception, alors que des organisations publiques comme l'ADEME, font la distinction entre ces trois notions (cf. supra Figure 8).

Boucler complètement les flux de telle sorte à ce que seule de l'énergie rentre dans un écosystème, et qu'aucun autre flux n'en ressorte, ne semble pas (encore) réaliste dans un

écosystème où l'humain, ce « pensionnaire problématique » développe des activités (Adoue, 2007, p. 1).

En revanche, une étape intermédiaire entre ce cercle vertueux et l'extraction et les émissions illimitées. Elle consiste à prélever des flux d'énergie et des ressources, et à émettre des déchets, mais de manière limitée. Pour ce faire, deux actions sont nécessaires selon Adoue (2007) :

- 1) diminuer les consommations individuelles de chaque entité et de leurs procédés : dans les synergies formulées qui suivront, cela pourrait être le cas lorsque les drêches sont utilisées pour remplacer d'autres matières premières, ou comme énergie à la place de ressources fossiles ;
- 2) mettre en œuvre une nouvelle organisation dans laquelle les « flux résiduels sont bouclés » (Adoue, 2007, p. 27). Les résidus ne sont plus stockés en décharge ou incinérés mais deviennent des matières premières pour d'autres entités, et les surplus d'énergie sont aussi utilisés par d'autres entités dans la mesure du possible.

Les synergies éco-industrielles impliquant les drêches qui seront développées dans la suite de ce travail tombent parfaitement dans le champ d'action de ces deux leviers, respectivement au niveau des unités valorisatrices et des brasseries, qui produisent ce résidu.

L'augmentation du coût de traitement des déchets, ou l'obligation, comme en Région de Bruxelles-Capitale, pour les professionnels de traiter les déchets organiques vont dans ce sens en exhortant les industries à trouver des solutions pour leurs flux résiduels. Ce travail, à son échelle, s'inscrit tout à fait dans cette volonté de changement.

Néanmoins, l'idée de boucler les flux est loin d'être nouvelle, tout comme la valorisation matières. L'agriculture et le monde rural, concernant les drêches, mais pas uniquement, en sont des bons exemples. Dans ces écosystèmes d'activités, parfois plus proches de la Nature, les drêches n'ont jamais été considérées comme des déchets, ces résidus de céréales étaient donnés comme aliments aux animaux. Ces synergies vernaculaires sont d'ailleurs toujours à l'œuvre, mais sont moins facilitées par nos sociétés industrielles et par une délocalisation des brasseries, vers des territoires urbains où la bière est consommée, (un peu plus) loin des animaux qui en consomme les résidus.

Le bouclage des flux est souvent réduit à un échange de flux de déchets. D'ailleurs, d'un point de vue légal et administratif, ce travail a montré qu'un même flux peut d'ailleurs, sans modification, revêtir des statuts différents en fonction de sa valorisation future (cf. supra p.). En outre, le bouclage de flux va bien plus loin que cela et s'intéresse aussi aux effluents liquides, gazeux ou aux excédents énergétiques (Adoue, 2007).

La symbiose de Kalundborg, au Danemark, est l'exemple le plus connu d'écologie industrielle, formé en une trentaine d'années autour de cinq entreprises de manière spontanée. L'usine Novo Nordisk de production d'enzymes et de produits pharmaceutiques (insuline), une centrale thermique au charbon, l'usine de production de panneaux de placoplâtre Gyproc, la raffinerie Statoil, et l'entreprise de dépollution des sols Bioteknik Jordens échangent des matières comme des boues, du gypse, des cendres volantes, de l'engrais liquide, de l'eau, de

l'énergie sous forme de vapeur, de gaz, ou d'eau chaude, et forment aujourd'hui des synergies avec d'autres entreprises qui se sont greffées à cette symbiose.

1.2.2 Les boucles de flux, des synergies éco-industrielles

L'originalité de l'approche de l'écologie industrielle réside dans le fait de systématiser les boucles de flux de matière et d'énergie à l'échelle d'un écosystème (Adoue, 2007). Puisque les solutions proposées dépassent le cadre individuel, les effets positifs le sont à l'échelle du système tout entier et se renforcent.

Si l'on reprend l'exemple de la synergie des drêches en aliment pour animaux, les brasseries ne doivent pas traiter les drêches comme un déchet, c'est-à-dire qu'elles ne seront pas incinérées, ce qui conduit à une diminution des émissions de GES. Ensuite les drêches seront digérées par des animaux, qui produisent certes quelques émissions de GES et qui occupent des terres mais qui auraient mangé à la place des drêches, des céréales cultivées, transportées, ce qui correspond aussi à des émissions de GES qui sont évitées. Pour les éleveurs, l'utilisation des drêches se traduit en une réduction des coûts liées à l'alimentation du bétail. Les impacts de cette synergie ne se réduisent pas à ces deux entités. Le sol et les ressources naturelles en céréales sont préservées dans une certaine mesure, et les émissions de GES, qui sont un problème global peu importe leur localisation d'émissions, sont diminuées. Enfin, les consommateurs finaux de lait ou de viande sont concernés par cette synergie, le consommateurs de bière également, les producteurs d'aliments pour animaux, et au moins toutes les autres parties prenantes de ces écosystèmes qui respirent.

Une synergie est « un type de phénomène par lequel plusieurs facteurs agissant en commun créent un effet global ; un effet synergique distinct de tout ce qui aurait pu se produire s'ils avaient opéré isolément, que ce soit chacun de son côté ou tous réunis mais œuvrant indépendamment » (Club d'écologie industrielle de l'Aube - CEIA, 2022, paragr. 5). Adoue (2007), distingue deux types de synergies :

- 1) les synergies éco-industrielles de substitution, c'est-à-dire, « les échanges de flux de matières et d'énergie entre deux ou plusieurs industriels pour lesquels des flux de déchets, sous-produits ou d'énergie non valorisée se substituent aux flux habituellement utilisés » (Adoue, 2007, p. 29) ;
- 2) les synergies de mutualisation, qui impliquent « des regroupements d'industriels pour produire par exemple l'air comprimé ou la vapeur nécessaire, collecter et traiter certains types de déchets peuvent permettre de réaliser ces opérations plus efficacement sur le plan environnemental et plus économiquement » (Adoue, 2007, p. 30).

Les synergies éco-industrielles ne sont pas fixes, elles sont en perpétuel mouvement, comme dans la Nature, des entités apparaissent et d'autres disparaissent.

Les résultats des synergies éco-industrielles sont étonnants. À Kalundborg, au Danemark, les émissions de CO₂ sont réduites de 130 000 tonnes par an, et la symbiose permet le recyclage

de 97 000 m³ de biomasse solide, alors que les revenus annuels de ces relations symbiotiques pour l'ensemble du système sont évalués à 10 millions de dollars (Adoue, 2007, p. 30).

En effet, les synergies éco-industrielles présentent de nombreux avantages qui dépassent une utilisation optimale des ressources et une empreinte environnementale réduite, comme la réalisation d'économies conséquentes pour les entités qui en bénéficient et la création d'emploi locaux. En multipliant les flux, l'écologie industrielle tisse également un écosystème de flux d'informations entre les acteurs et tend de cette manière vers une économie collaborative.

En France, un réseau national pour l'écologie industrielle et territorial s'organise sous le nom de SYNAPSE. Il s'agit d'une plateforme numérique, de ressources, et de retours d'expérience pour fédérer les acteurs autour de ce domaine scientifique et industriel. Malgré des recherches, une plateforme similaire belge ou bruxelloise n'a pas été trouvée.

Pourtant, l'écologie industrielle a le grand avantage d'être pluridisciplinaire et applicable à des territoires très variés, puisque sa méthodologie prend en compte la complexité et la singularité de chaque territoire.

L'écologie industrielle va au-delà d'un bouclage de flux de matière ou d'énergie. C'est une nouvelle organisation de nos sociétés industrielles, des flux d'informations, de ressources humaines, naturelles et fossiles. L'écologie industrielle propose un développement local qui intègre une approche globale.

1.3 Une gestion de projet et une étude de faisabilité inspirées de l'écologie industrielle

L'écologie industrielle propose une approche puissante et disruptive. En revanche, bien qu'Adoue propose de réaliser une étude de faisabilité selon une séquence logique, il n'y a pas de formule magique et chaque écosystème éco-industriel doit être abordé de manière différente, et peut d'ailleurs être abordé de plusieurs manières.

Dans cette partie, la gestion de projet, son objectif, et sa division en sous-objectifs seront développés. La méthodologie a été grandement inspirée de l'écologie industrielle, mais également des cours de l'option « Nouveaux Business Modèles Durables » du Master en Ingénieur Commercial dispensé à l'ICHEC, et enseignés par Madame Brigitte Hudlot, Monsieur Pascal Verhasselt, et Monsieur Philippe Drouillon, lors de l'année scolaire 2021-2022.

Le Tableau 7 met en avant la planification de la gestion de projet telle qu'elle a été conçue lors du stage en gestion de projet.

Tableau 7 Planification de la gestion de projet en sous-objectifs

Objectif : Étudier la faisabilité de potentielles synergies éco-industrielles impliquant les drèches de brasseries au sein du territoire bruxellois		
Sous-objectifs	Méthodologie	Livrable
Phase I : Identification du contexte théorique, méthodologique, étude des flux de matière et d'énergie du territoire et identification des synergies potentielles		

Définition du contexte théorique lié aux drèches	√ Littérature scientifique √ Données internes à l'organisation	· Livable . Contexte théorique. Les drèches de brasseries
Estimer la quantité de drèches produite à l'échelle d'En Stoemelings	√ Données internes √ Prélèvements d'échantillon, mesures	√ Tableau . Estimation du gisement de drèches à l'échelle de la brasserie En Stoemelings
Estimer la quantité de drèches produite à l'échelle de la Région	→ Entretiens avec les acteurs producteurs de drèches	√ Tableau Estimation chiffrée du gisement de drèches à l'échelle de la Région bruxelloise
Définition du contexte théorique et méthodologique	→ Littérature scientifique √ Méthodologie vue à l'ICHEC	√ Cahier des charges √ Rapport de suivi v.2 √ Logiciel de GP (Monday/Toggl)
Identification des potentielles solutions de valorisation des drèches	√ Littérature scientifique, rapports → Entretiens avec acteurs, experts...	√ Organigramme des solutions de valorisation → Identification des enjeux/impacts/problèmes/risques de chacune des solutions
Analyse systémique des flux (entrants/sortants) des activités du territoire, des industries avec qui des synergies pourraient exister	→ Entretiens avec acteurs, experts → Littérature, rapports	→ Organigramme des flux (entrants/sortants) des activités du territoire avec une potentielle solution de valorisation énergétique / valorisation matière → Tableau 1.3 Identification des parties prenantes → Compte-rendu des entretiens avec les PP
Identification des synergies éco-industrielles potentielles	→ Entretiens et échanges d'informations sur la nature des flux et des potentielles synergies → Partage d'informations concernant l'écologie industrielle, l'intelligence collective, la coopération inter-entreprises (but d'adhésion au projet)	→ Organigramme actualisé et détaillé des flux et des entités/acteurs du territoire (PP) → Organigramme des synergies potentielles
Sous-objectifs	Méthodologie	Délivvable
Phase II : Étude de faisabilité		
Étude de la faisabilité qualitative	→ Littérature scientifique, rapports, experts	→ Scoring Model : critères qualitatifs (caractéristiques physiques, température, stabilité)

	→ Mesures empiriques	avant fermentation, % matière sèche...)
Étude de la faisabilité technique	→ Recherches sur les procédés de séchage, d'agglomération, pré-traitement, de séparation des composants d'un point de vue technique et économique X Étude de la logistique inhérente à chaque solution technologique et de la mutualisation	→ Scoring Model : pour chaque besoin technologique il y a des critères de faisabilité techniques, économiques (investissement) et logistique (mutualisation, transports...)
Étude de la faisabilité quantitative	→ Estimations chiffrées du volume de flux sortants (drèches à l'échelle du territoire) → Estimations chiffrées des volumes de flux entrants des matières qui seront substituées, ou du volume équivalent en drèches → Étude de la continuité et variabilité de l'offre et de la demande	→ Scoring Model : ordre de grandeur offre/demande, continuité et variabilité de l'offre et de la demande
Étude de la faisabilité légale / réglementaire	✓ Recherches sur les réglementations des déchets alimentaires → Recherches sur les réglementations/normes qui encadrent la matière une fois transformée (en tant que flux entrant) → Recherches sur les réglementations liées à la valorisation de cette matières (normes, ...)	→ Scoring Model : faisabilité légale et point de vue économique (dépôt de brevet, normalisation, tests...)
Étude de la faisabilité économique	→ Analyse des coûts / bénéfices	→ Scoring Model : analyse coûts bénéfices pour chaque synergie potentielle
Étude de la faisabilité culturelle	→ Littérature scientifique → Entretiens avec les entités de l'écosystème	→ Scoring model : critères qualitatifs : confiance, coopération, culture d'entreprise, risques/gains liés à l'image et la notoriété

	(projet en phase plus mûre)	
Étude de la faisabilité environnementale	X Outil quantitatif et non-monétarisé (Adoue, 2007) pour la situation sans synergie et pour la situation avec synergie → Échelle de Lansink	→ Scoring Model : comparaison de l'impact avec / sans synergies ; score sur l'échelle de Lansink
Phase III : Prototyper le business modèles de la synergie potentielle		
Estimer la désirabilité	X Value Proposition Canvas, Problem Solution Fit, RAT	
Assurer la viabilité économique	X Stratégie de monétisation	
Gestion des risques et la résilience territoriale	X Grille d'analyse des risques X 7 Principes de la résilience X Résilience organisationnelle	X Tableau : Chocs potentiels, indicateurs de veille, atténuation, adaptation
Prototyper le business modèles	X Societal Impact Canvas, archétypes	X Societal Impact Canvas

Cette gestion de projet n'a malheureusement pas pu être menée dans son ensemble dans le temps imparti. En revanche, la méthodologie étant posée, il s'agit dorénavant de continuer à la mettre en œuvre et de la perfectionner de manière itérative au fil des recherches et des résultats. La phase III de prototypage mériterait d'ailleurs une méthodologie bien plus précise et détaillée.

La méthodologie de la gestion de projet et de l'étude de faisabilité sera discutée plus tard dans ce travail. Il est dorénavant question d'étudier les potentielles synergies éco-industrielles impliquant les drêches de brasserie au sein d'un territoire, celui de la Région de Bruxelles-Capitale.

2. Un écosystème de brasseries dans un territoire urbain, de la nécessité d'adopter une démarche systémique

L'écologie industrielle et territoriale, comme son nom l'indique, est un domaine scientifique et économique situé. Cette partie s'intéresse à l'écosystème sous-territorial de brasseries qui forment le point de départ de la réflexion de cette étude de faisabilité. Ensuite, à défaut des bilans de flux (de matières et d'énergie) entrants et sortants de cet écosystème industriel, le flux de drêches sera estimé. Enfin, ce gisement de matière organique lignocellulosique sera cartographié.

2.1 La résilience territoriale, une approche systémique au sein de Bruxelles-Capitale

Le bouclage de flux de matières, d'eau et d'énergie implique évidemment d'identifier ces flux. À partir de ces derniers, et de recherches des synergies potentielles pourraient être envisagées en fonction de la présence d'acteurs, d'activités ou de demandes dans cet écosystème, ou à proximité. Une approche systémique s'impose.

En effet, l'approche systémique est plus adaptée aux sujets complexes qu'une approche analytique qui isole les éléments d'un système pour les analyser séparément et les additionne pour créer un système. Or, l'addition au sens mathématique du terme ne traduit pas toujours la complexité du vivant et des interactions entre les écosystèmes. Pour Adoue, l'approche systémique « (...) considère d'abord la globalité de ce système dans toute sa complexité et sa dynamique », aussi, « les interactions entre les éléments deviennent essentielles » (Adoue, 2007, p. 44).

L'échelle des écosystèmes varie d'une zone industrielle à tout un pays, mais Adoue, souligne une constante qu'il identifie comme « l'ancrage territorial » (Adoue, 2007, p. 45). En effet, les échanges de flux sont précédés d'échanges d'informations entre les entités, et nécessitent une implication d'acteurs locaux qui est facilitée dans un territoire déjà existant et cohérent.

Pour ces raisons, et bien que la gestion de projet soit née lors d'un stage dans une brasserie bruxelloise, il a été tout de suite question d'approcher le résidu dans la globalité de sa production, à l'échelle d'un territoire : la Région de Bruxelles-Capitale. Ce choix sera d'ailleurs questionné plus tard dans ce travail (cf. infra p.).

Plusieurs degrés de lecture se superposent pour justifier ce choix et définir ce territoire. Une approche géographique renvoie à la dimension spatiale de la Région de Bruxelles-Capitale, aux frontières connues et tracées. À cet espace s'ajoute une approche politique du territoire, qui s'appuie d'ailleurs sur une approche géographique pour définir des autorités et des compétences. En Belgique, le traitement des déchets (à part quelques cas particuliers) est une compétence régionale. De ce fait, le choix du territoire bruxellois comme délimitation de notre étude est apparu comme cohérent. En outre, une approche culturelle, qui regroupe un sentiment d'appartenance à un territoire, des enjeux et des défis communs, dépasse les frontières géographiques et les compétences politiques, ou légales qui s'appliquent à un territoire.

Dans un territoire défini, il s'agit ensuite d'identifier des sous-systèmes territoriaux. Les brasseries de la Région de Bruxelles-Capitale forment un sous-système territorial, qui pourrait interagir avec d'autres sous-systèmes par le biais de synergies de substitution ou de mutualisation.

Dans cette étude de faisabilité, le sous-système territorial composé des brasseries, qui sera parfois qualifié d'écosystème dans ce travail a été étudié de façon satisfaisante. En revanche, les sous-systèmes territoriaux qui pourraient valoriser ces drêches, car ils sont

nombreux, n'ont pas pu être tous approchés dans leur globalité. Si ce travail doit être poursuivi, il sera de rigueur d'adopter une approche résolument systémique à l'échelle du territoire.

En juillet 2024, la brasserie En Stoemelings a officialisé la cession de ses outils de production à un nouvel exploitant, « la seule solution pour éviter la faillite » (Belga, 2024). L'approche territoriale et systémique des synergies éco-industrielles prend encore plus de sens face à ce risque de voir des entités disparaître. Dans un système entre deux entités, ce genre de disparition peut avoir des conséquences importantes pour l'entité qui valorise ce flux et finit par en dépendre. Toutefois, dans un écosystème constitué d'une vingtaine de brasserie, la résilience territoriale étant plus forte, l'onde de choc sera moins forte, plus diffuse et répartie entre plusieurs entités de l'écosystème.

L'écologie industrielle, en créant des liens forts entre des entités d'un territoire, et en exhortant ces dernières à respecter les limites planétaires de la biosphère, participe à augmenter la résilience du territoire.

2.2 Le gisement de drêches en Région de Bruxelles-Capitale

Le territoire étant défini, il faut désormais identifier le flux de drêches sortant de l'écosystème formé par les brasseries en Région de Bruxelles-Capitale.

Lors de l'estimation du gisement de drêches, plusieurs écueils se sont présentés :

- 1) écueil n°1 : la masse de drêches à mesurer pour un brassin, souvent de 18-20 hl est trop importante pour être mesurée,
- 2) écueil n°2 : le volume de drêches obtenu à l'issue d'un brassin peut être mesuré de manière approximative à l'aide des BioBox Vanheede d'un volume connu de 680l,
- 3) écueil n°3 : les drêches sont un matériau granulaire, constituées de particules, et présentent ainsi trois masses volumiques (apparente, réelle et absolue) (*cf. supra* p.),
- 4) écueil n°3 : chaque recette de bière implique une masse de grains différente.

Du côté des brasseurs, l'information la plus facile à obtenir et la plus certaine, est le volume de bière produit.

Face à ces écueils, il était d'abord nécessaire de calculer un ratio permettant d'obtenir la masse de drêches humides produites par rapport au volume de production, afin de pouvoir estimer facilement le gisement de drêches à l'échelle régionale.

En revanche, l'écueil n°3 pose encore problème, et si une approche systémique se satisfait d'une approche globale, la quantité de grains peut varier de 550 kg à 315 kg pour 18hl d'une brasserie à une autre, selon Alexis Boisseau, brasseur et fondateur d'Osma, qui a également été chef de production pour la brasserie En Stoemelings, et qui multiplie les collaborations avec des brasseries bruxelloises (A. Boisseau, entretien, 12 juillet 2024). Chez la brasserie Cantillon, 1300kg de matières sèches sont utilisées par brassin de 100 hl de moût (J. Van Roy, entretien, 12 juillet 2024). La brasserie de la Mule, à Schaerbeek, utilise 200 kg de matière sèche par brassin de 10hl (J. Galy, entretien, 4 juillet 2024).

La quantité de drêches produite est directement proportionnelle à la quantité de grains utilisés lors de l'empâtage. Ainsi, cette variation de quantité de grains, qui présente un taux de variation de l'ordre de 74% n'est pas négligeable. Il serait de rigueur de calculer le ratio pour chaque brasserie et chaque recette, mais dans une première approche systémique, ce niveau de détail ne peut être conservé.

Deux typologies de brasserie sont retenues, celles qui brassent des bières fortes, comme En Stoemelings, Osmia, Brasserie de la Senne, ainsi que Odyssée Distillerie, et celles qui brassent des bières légères, comme la Brasserie de la Mule, ou Cantillon, citées plus haut. En effet, le territoire choisi héberge deux distilleries, Odyssée Distillerie, qui produit également de la bière sous le nom de Drogenbos Beer et Topsy Tribe. Les distilleries produisent des drêches qui sont légèrement différentes de celles produites par les brasseries. Par souci de simplicité, cette différence ne sera pas abordée dans le cadre de cette étude de faisabilité.

Le Tableau 8 détaille l'obtention des ratios de masse de drêches humides produits par rapport au volume de bière produit, à l'aune des deux typologies de brasseries retenues. Le volume de drêches moyen produit a été calculé pendant le stage chez En Stoemelings, lors de deux brassins de leur bière Curieuse Neus (7% vol.) à partir d'un ratio de remplissage des BioBox de 680l. Cette valeur est très approximative, mais permet d'obtenir une bonne estimation du volume. Les valeurs obtenues expérimentalement seront de toute façon confrontées aux apports de la littérature scientifique. Pour cette raison le calcul du taux de variation entre le ratio de la masse de grains par rapport au volume de moût produit sera intéressant, car le volume de drêches moyen obtenu pour une bière légère n'a pas été mesuré expérimentalement. La masse volumique réelle moyenne obtenue expérimentalement est utilisée. En effet, par souci logistique et économique, les brasseurs tassent au maximum les drêches dans les BioBox.

Tableau 8 Estimations des ratios m drêches / hl en fonction des deux typologies de bières brassées

		Typologie 1	Typologie 2
		Bière forte ± 7% vol.	Bière légère ± 5% vol.
Volume du brassin	V_{brassin}	18	18
Masse moyenne de grains kg / 18 hl	m_{grains}	550	315
Ratio $m_{\text{grains}} / V_{\text{prod}}$		30,56	17,5
Taux de variation (Typologie 1-Typologie 2) (%)		-42,7	
Taux de variation (Typologie 2-Typologie 1) (%)		74,6	
Volume moyen de drêches $[m^3]$	$V_{\text{drêches}}$	0,879	
Masse volumique réelle moyenne $\frac{kg}{m^3}$	$\rho_{\text{réelle}}$	753	
Masse moyenne de drêches/18 hl	$m_{\text{drêches}}$	662	
Ratio $m_{\text{drêches}} / V_{\text{moût}}$ $\frac{kg}{hl}$	$\frac{m_{\text{drêches}}}{hl}$	37	21
Ratio $m_{\text{drêches}} / V_{\text{moût}}$ $\frac{t}{hl}$	$\frac{m_{\text{drêches}}}{hl}$	0,037	0,021

Dans la littérature scientifique, la valeur avancée est de 20 kg pour 100l ou 1 hl de bières (Mussatto et al., 2006, p. 1). Cette valeur, reprise également par Sganzerla (2023), correspond en bonne estimation avec la typologie de bière légère. En effet, en volume, les bières brassées dans le monde se rapprochent certainement plus de cette typologie. Néanmoins, les bières fortes, typiques de la Belgique, continuent d’être brassées en Région de Bruxelles-Capitale. Ces deux ratios permettent d’estimer le gisement régional en conservant la typicité de certaines bières du territoire. En outre, les brasseries produisent parfois quelques bières fortes. Si ce pourcentage en volume est connu, le gisement de drêches pourrait être calculé avec plus de précisions.

Ramené à un volume de bière qui fait échos non pas à l’industriel, mais au consommateur, cela revient à une production de 70 g de drêches pour 33 cl d’une bière légère, par exemple, d’une Zenne Pils, et 123 g de drêches pour 33 cl d’une Jambe de Bois de la Brasserie de la Senne, ou d’une autre bière forte ($\pm 7\%$).

Le Tableau 9 détaille le gisement de drêches produit par les brasseries bruxelloises dont le volume de production de bières (ou de moût) est connu. Les sources proviennent la majorité du temps d’entretiens avec les brasseurs. Les brasseries sont classées par n° de légende. Ces numéros permettent de localiser les brasseries sur la cartographie (*cf. infra* Figure 9).

Tableau 9 Estimation du gisement de drêches à l’échelle de la Région de Bruxelles-Capitale

N° légende	Brasserie	Volume de production de bières/an (hL)			Masse de drêches produites / an (t)			Typ.
		2022	2023	2024	2022	2023	2024	
1	La Source Beer Co	500	500	500	10,5	10,5	10,5	2
2	En Stoemelings	1600	1250	0	59,2	46,25	0	1
3	L' Amère en fût	0	0	550	0	0	11,55	2
4	Brasserie de la Senne	18000	18000	18000	666	666	666	1
5	Oskare Bruxelles Canal	500	500	500	10,5	10,5	10,5	2
6	Brasserie de la Mule	1100	1600	1600	23,1	33,6	33,6	2
7	Tipsy Tribe							
8	Osma	0	36	36	1,332	1,332	1,332	1
9	BBP Dansaert							
10	Brasserie Surréaliste							
11	Wolf	350	700	700	7,35	14,7	14,7	2
12	Brasserie Cantillon	4000	4000	4000	84	84	84	2
13	Brasserie de l'Ermitage	1600	1600	1800	33,6	33,6	37,8	2
14	Mazette	250	250	250	9,25	9,25	9,25	1
15	L'Annexe							
16	Co Hop	1200	1200	1200	25,2	25,2	25,2	2
17	BBP Port Sud	35000	35000	35000	735	735	735	2
18	Brasserie de la Jungle	140	0	0	5,18	0	0	1
19	Drink drink							
20	Brasserie Illegaal	1340	3000	3000	28,14	63	63	2
21	Odyssée Distillerie (Drogenbos Beer)	4480	4480	4480	165,76	165,76	165,76	1
	TOTAL	70060	72116	71616	1864	1899	1868	

Le gisement de drêches de brasseries est estimé à près de 2000 tonnes pour l’année 2023. Ce flux est accompagné d’une production de plus de 72 000 hl de bières dans la Région de Bruxelles-Capitale, ce qui représente seulement 1% de la quantité de bière consommée en Belgique en 2023.

A priori, l'année 2024 devrait connaître un léger recul face à une tendance de production à la baisse. En effet, le secteur brassicole connaît des difficultés suites à l'inflation des matières premières, peu de temps après la crise du covid-19, et l'augmentation des prix de l'énergie, qui ont impactés l'industrie de manière directe et indirecte avec des matières première comme le verre. Ainsi, des brasseries comme En Stoemelings n'ont pas résisté à cette pression et ont cédé leurs installations (cf. supra p.), et d'autres se sont tournées vers le brassage à façon, ou achète du moût aux autres brasseries, comme nous l'a confié Félix Damien de la brasserie de la Jungle, et reprenne le travail à partir de la fermentation. Cette tendance mériterait d'être analysée avec plus d'attention. D'ailleurs, il s'agit d'une sorte de mutualisation des moyens de production, et de traitement des flux (de matières premières, de flux de drêches, entre autres), cohérente avec l'écologie industrielle.

La variabilité de la production en fonction du temps est un critère important de l'étude de faisabilité quantitative. En effet, une différence d'ordre de grandeur entre offre du flux de drêches et besoin dans ce flux ou dans le produit qui en découle peut mettre en péril la synergie sur le long terme (Adoue, 2007). Si la variation de la production de drêches est forte en fonction du temps, la synergie devra a priori prendre en compte ces variations et la demande du flux au niveau de l'entité réceptrice devra s'adapter. Dans le cas des drêches, seule la brasserie Cantillon connaît une forte variabilité de production au cours du temps. En effet, le brassage du lambic est une technique à part qui requiert des températures fraîches afin que le moût soitensemencé par les levures présentes dans l'air de la vallée de la Senne. Le moût qui arrive dans le bac refroidissoir après ébullition doit atteindre une température de 18-20°C. Pour ces raisons, le brassage du lambic est possible que pendant cinq mois de l'année, de fin octobre à début avril, en fonction des années (J. Van Roy, entretien, 12 juillet 2024). Toutefois, cela n'empêche pas la brasserie Cantillon de prendre part à une synergie pendant ces cinq mois de production.

La variabilité de la production des autres brasseries est négligeable, au moins à ce stade. En revanche, la séquence de brassage est propre à chaque brasserie et sera importante afin d'aligner l'offre et la demande du flux.

2.3 La cartographie du gisement de drêches en Région de Bruxelles-Capitale

Le gisement de drêches à l'échelle de la Région de Bruxelles-Capitale est relativement faible pour un déchet industriel. En revanche, cela n'implique pas que son impact sur le territoire n'est pas problématique. En effet, gérer un gisement de 2000 t de drêches par an dans un environnement urbain très dense n'est pas aisé. En volume réel, cela correspond à 2 656 m³ de drêches.

En outre, le territoire de la Région de Bruxelles-Capitale ne comptait en 2014 qu'une seule brasserie historique, la brasserie Cantillon. Dix ans plus tard, le nombre de brasseries (et de distilleries) est de vingt et une entités et le gisement de drêches est passé de 84 tonnes / an à 2000 tonnes / an. Un écosystème s'est développé et nécessite de mettre en place une forte résilience territoriale pour gérer le flux de drêches que ces activités industrielles impliquent.

Ces activités brassicoles ont de nombreux impacts sur leur environnement. Bien que cela ne puisse pas remplacer un bilan de flux de matière, de manière globale, le sous-système territorial, constitué des brasseries citées dans le Tableau 9, a extrait et utilisé 1900 tonnes de grains en 2023 pour sa production. Le calcul a été fait grâce au Tableau 9 et en reprenant les deux ratios calculés pour les typologies 1 et 2 de bières. La différence entre le flux de drêches sortant et le flux de grains entrant dans le sous-système est notamment due au caractère humide des drêches. Le développement du secteur brassicole a évidemment un impact sur le flux d'eau consommée et rejetée, sur la consommation d'énergie, la création d'emploi, des émissions lors du transport des matières premières, de l'acheminement des marchandises, du traitement des flux de déchets, dont les drêches dans certains cas.

La Figure 9 cartographie le sous-système territorial constitué par les brasseries. Le lit de la Senne se dessine.

En effet, il est intéressant de voir que la vallée de la Senne, connue pour contenir les microorganismes favorables à la production de lambic, dont la *Brettanomyces Bruxellensis*, héberge un écosystème de brasseries qui semble profiter de ce biotope favorable.

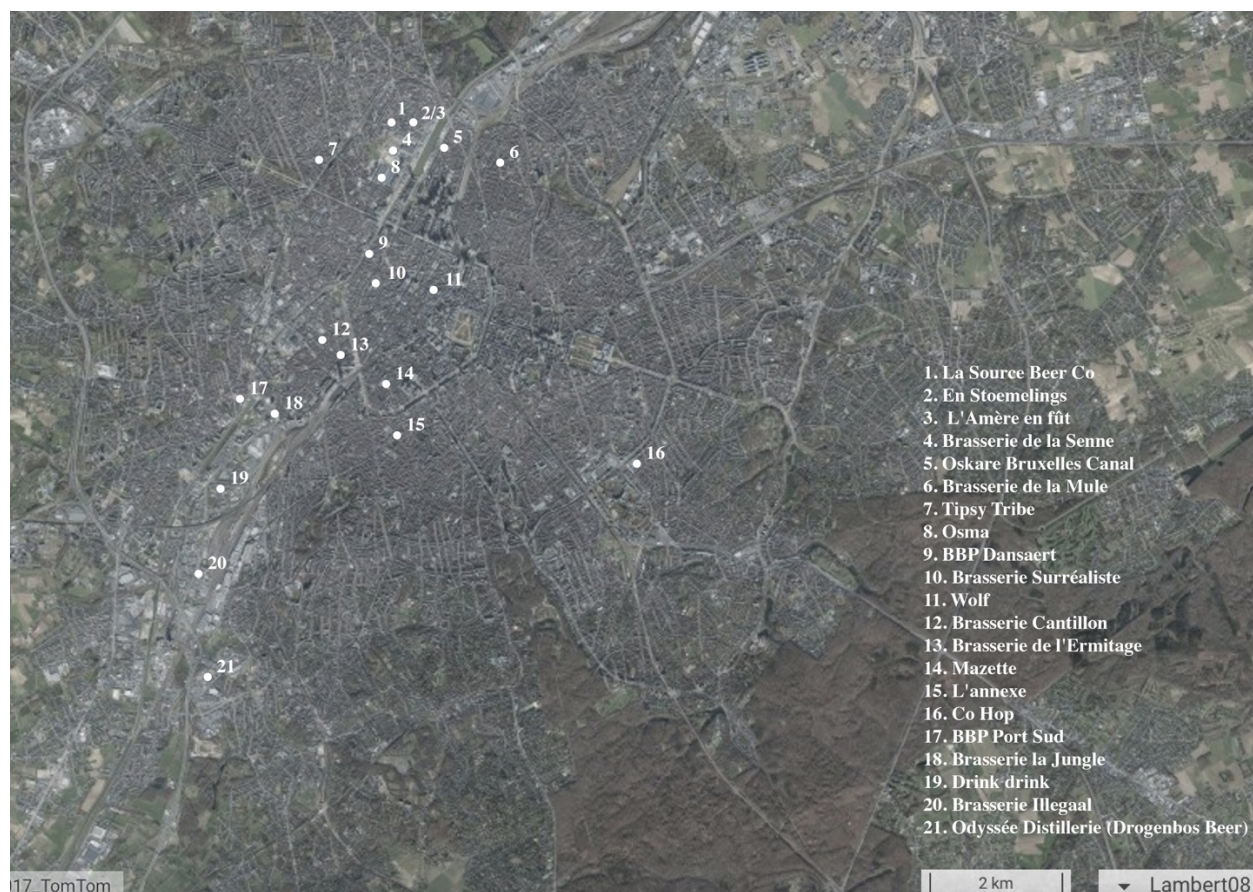


Figure 9 Cartographie du sous-système territorial constitué par les brasseries en Région de Bruxelles-Capitale

Le gisement de près de 2000 tonnes de drêches par an se répartit dans le territoire bruxellois de manière proportionnelle tout au long de l'année et organisé dans la Vallée de la

Senne. Malgré une localisation extrême, un axe Nord, sud-ouest se dessine, qui s'étend de laeken et de Tour et Taxis jusqu'à Drogenbos, en passant par Anderlecht, la Ville de Bruxelles et en longeant le canal. Un axe semble s'imposer à cette étude.

Le territoire de l'étude étant défini, le sous-système territorial localisé et le gisement de flux de drêches estimé, il convient dorénavant d'identifier les pistes de synergies qui pourraient être mise en œuvre dans ce territoire de la Région de Bruxelles-Capitale.

3. Des synergies éco-industrielles impliquant les drêches de brasseries au sein de la Région bruxelloise

Les drêches des brasseries bruxelloises qui ont le statut administratif de biodéchets ont l'obligation d'être triées depuis le 1^{er} mai 2023, selon le Brudalex 2.0, l'Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 23 juin 2022 modifiant l'arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 1^{er} décembre 2016 relatif à la gestion des déchets et des dispositions connexes.

Cet Arrêté en faveur d'une transition vers une économie circulaire oblige les brasseries qui ne valorisent pas leurs flux de drêches à faire appel des sociétés spécialisées. En revanche, bon nombre de brasseries faisaient déjà appel à ce type de sociétés avant l'adoption de l'Arrêté, face à la difficulté de travailler avec Bruxelles-Propreté. Effectivement, lors des entretiens menés dans le cadre de cette étude de faisabilité, de nombreux brasseurs ont évoqués des difficultés, notamment dans la rigueur de l'enlèvement des drêches par l'organisme public. Or, les drêches sont un résidu volumineux et instable. Pour des raisons de logistique, et d'hygiène, l'activité d'une brasserie dépend d'une certaine manière de l'enlèvement en temps et en heure de ce résidu. Cet aspect a toute son importance dans la suite de cette étude.

Les synergies existantes et les solutions de valorisation à l'œuvre seront identifiées. Ensuite, la littérature scientifique donnera un aperçu des pistes de synergies théoriques. Enfin, certaines de ces pistes de synergies seront identifiées lorsqu'elles semblent cohérentes avec le territoire spécifique de la Région de Bruxelles-Capitale.

3.1 Des synergies existantes

La brasserie Brussels Beer Project, certifiée B Corporation en 2022, innove dans de nombreux domaines. En 2015, alors qu'elle faisait partie de la nouvelle génération de brasseries à s'implanter à Bruxelles avec la Brasserie de la Senne et En Stoemelings, elle lance la première bière brassée avec du pain. Presque dix ans plus tard, le projet a relocalisé l'entièreté de sa production à Bruxelles et a diminué son empreinte carbone par hectolitre de bière produit de 12%. Parmi de nombreuses initiatives, leurs drêches sont valorisées au travers de l'alimentation animale et de la biométhanisation (Brussels Beer project, 2023). En outre, ils produisent également des biscuits (*Though cookies*) à base de drêches avec la Maison Dandoy, dont l'atelier de production est implanté à Woluwe-Saint-Lambert. Ils ont également produit des savons exfoliants à base de drêches avec la Savonnerie bruxelloise, à Laeken. La brasserie a été

contacté et a même répondu à notre mail de manière favorable pour participer à une rencontre entre parties prenantes concernées par les drêches de brasserie, mais n'a pas répondu aux questions concernant les synergies existantes.

La brasserie et boulangerie Janine, qui fait partie de la CoHop, utilise une partie de ses drêches dans le pain qu'elle produit. Néanmoins, les quantités de drêches utilisées dans le pain ne sont pas communiquées. Contactée, la brasserie a également répondu positivement à l'initiative de rencontre mais n'a pas accepté d'entretiens téléphoniques et n'a pas répondu à nos questions concernant les quantités de drêches utilisées au travers de cette synergie.

La brasserie de La Mule, rencontrée pour la première fois en 2023 dans le cadre de la gestion de projet, valorisée la moitié de ses drêches en matières premières d'aliments pour brebis auprès de la Ferme du Chant des Cailles et l'autre moitié était traitée par la société Vanheede (J. Galy, entretien, 31 janvier 2023). Recontacté cette année, Galy nous a indiqué que la synergie avec la Ferme du Chant des Cailles n'était plus mise en œuvre, mais que la société Next Grain, dans une phase de test, récupérait des petites quantités de drêches afin de faire de la farine. Les deux entités ont été contactés avec succès. John Stainier, de la Ferme du Chant des Cailles explique la fin de cette symbiose pour des raisons logistiques et une suspicion de listeria qui aurait causé la mort de deux brebis (J. Stainier, entretien, 18 juillet 2024). Malgré cela, Stainier serait partant de recommencer avec des conditions de logistiques différentes et un suivi plus régulier.

La synergie existante la plus pérenne a lieu entre d'une part la brasserie Cantillon, cinq mois de l'année, la brasserie de la Senne et d'autre part Rudy Draf, fermier dans la commune de Ternat. En effet, les trois acteurs de cette synergie ont été contactés. Les détails de cette synergie seront développés dans l'étude de faisabilité.

Enfin, la grande majorité des brasseries ont recours aux services de la société Vanheede. A priori, cette dernière possède une installation industrielle de fermentation agréée catégorie 3. Les biodéchets sont transformés en méthane, qui est ensuite converti en électricité grâce à une cogénération. Leur installation de Quévry, permettrait de fournir de l'électricité à 5000 foyers, grâce à une puissance installée de 2,45 MW (*(Déchets alimentaires, biométhanisation - Vanheede Environnement - Vanheede, 2024, paragr. 1)*). La chaleur serait également récupérée et le digestat de la biométhanisation serait valorisé comme amendement organique pour l'agriculture. La biométhanisation, et l'unité de traitement de Vanheede, sera étudiée lors de l'étude de faisabilité.

3.2 Des synergies potentielles

De manière vernaculaire, les drêches, trop nobles, étaient donné à manger aux animaux à une époque où les brasseries étaient moins industrielles et situées à proximité de fermes ou d'éleveurs. Il est intéressant de voir que cette synergie a traversé le temps et s'est adapté à une organisation plus urbaine de l'industrie brassicole. Cependant, cette synergie ne compte que

pour 40% du gisement régional de drêches, pour un volume de 750 tonnes/ an, alors que Rudy Draf, serait tout à fait intéressé de valoriser plus de flux de drêches.

Mussatto, Dragone et Roberto (2006) ont passé en revue et classifié les pistes de synergies potentielles impliquant les drêches de brasserie. La Figure 10 schématise ces pistes de synergies.

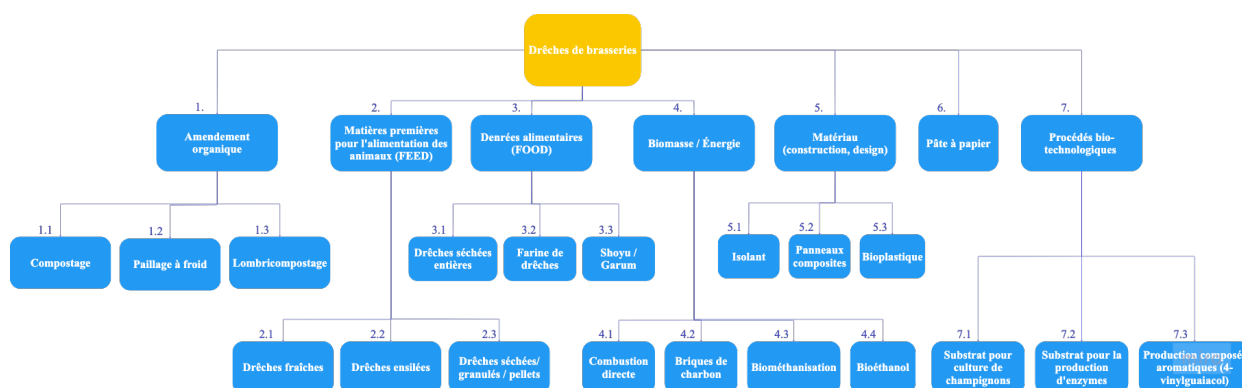


Figure 10 Schéma des principales synergies potentielles impliquant les drêches de brasserie

Les synergies développées dans cette partie seront celles qui ne seront pas traitées dans la suite de ce travail, par choix plus ou moins objectifs et par cohérence avec le territoire de Bruxelles-Capitale. En revanche, il faudrait s'intéresser plus en détail à ces synergies.

3.2.1 Les amendements organiques : le lombricompostage

Le lombricompost, quant à lui, a prouvé son efficacité et sa rentabilité industrielle à partir de résidus de drêches. En effet, la brasserie Brunehaut, certifiée B Corp et biologique, a mis en œuvre une synergie éco-industrielle avec l'entreprise PUR VER et l'Université de Gembloux Agro-Tech afin de créer un lombricompost composé à partir de matières végétales locales, les drêches de la brasserie Brunehaut, située à 30 km et du marc de café. Interrogé lors d'un entretien téléphonique, Marc-Antoine De Mees s'est félicité de cette belle synergie. En effet, si l'impact environnemental reste à appréhender, l'impact économique est très intéressant pour la brasserie qui ne paie plus pour traiter les drêches mais qui reçoit un gain économique de l'ordre de 25 € la tonne de drêche (M.-A. De Mees, entretien, 2 août 2024). L'impact environnemental devra être approché. En effet, si le lombricompost émet a priori moins que la biométhanisation, l'empreinte au sol des immenses hangars qui abritent les vers composteurs peuvent avoir un effet délétère. En outre, il est difficile de les imaginer dans un territoire aussi dense qu'à Bruxelles. Avant de penser à proposer des cultures verticales de lombricompost, il conviendra de mener l'étude de faisabilité des deux autres pistes d'amendements, le compost et le paillage à froid. En outre, ce dernier a des exigences assez similaires avec le lombricompost.

Pour Assandri et al. (2020), le lombricompost, grâce à la présence de la bactérie taxa, permet même de promouvoir les immobilisations d'azote dans le sol.

3.2.2 Les matières premières pour l'alimentation des animaux

L'utilisation des drêches comme matière première de l'alimentation des animaux (particulièrement des bovins et des ovins) a traversé le temps. La drêche, comme pour le compost, ne subit pas de transformation, sauf pour les drêches séchées en granulés ou en pellets. Bien que le transport des drêches sèches soit moins coûteux en énergie que le transport des drêches humides, cette synergie ne sera pas traitée dans ces études. En effet, les quantités de drêches produites à l'échelle de Bruxelles peuvent être ingérées par des animaux très rapidement. Ainsi, il n'y a pas lieu de consommer de l'énergie pour les sécher.

3.2.3 Les drêches entières utilisées dans l'alimentation humaine

L'utilisation des drêches entières dans l'alimentation humaine ne sera pas traitée dans cette étude. En effet, lorsqu'elle est utilisée entière, son utilisation est anecdotique, notamment en raison de sa grande teneur en fibres. Ces synergies, comme celles de Brussels Beer Project et Dandoy ont plutôt une valeur pédagogique et marketing, qui certes n'a pas d'impact environnemental positif à court terme, mais pourrait en avoir sur le long-terme.

3.2.4 La combustion des drêches pour produire de l'énergie

La combustion directe ne sera pas retenue dans cette étude. En effet, elle nécessite non seulement un pré-drainage pour atteindre moins de 55% d'humidité, mais elle émet également des NOx, des particules de poussières et de l'azote (1000-3000 mg/m³) et du dioxyde de soufre (480 mg/m³), qui sont considérés comme des gaz à effet de serre indirects (Mussatto et al., 2006, p. 6-7).

3.3.5 La pâte à papier à partir de la cellulose des drêches

Les drêches, composées à 20% de cellulose (± 4), peuvent être utilisées dans la production de pâte à papier. En revanche, comme il s'agit de procédés ayant un impact environnemental conséquent. Il est légitime de s'interroger sur la pertinence d'une telle synergie pour une teneur en cellulose de 20%.

3.3.6 Les procédés bio-technologiques

Dans le cadre de cette étude, les procédés bio-technologiques n'ont pas été abordés en détail, à l'exception du substrat pour champignons. En revanche, aussi bien Eclo, qui n'est dorénavant plus localisé en Région de Bruxelles-Capitale que PermaFungi, forte de dix années d'expérience ont décidé de ne plus travailler avec les drêches. Aller contre leur expertise semble compliqué.

Quant aux autres synergies bio-technologiques, auxquelles les bioraffineries pourraient s'ajouter, ainsi que l'utilisation des drêches comme absorbant, elles relèvent de niveau technologique, et donc d'intensité énergétique assez forte. Pour ces raisons, nous faisons le choix de ne pas les aborder pour le moment. La Région de Bruxelles-Capitale ne semble pas

forcément assez mûre pour accueillir ces industries. En revanche, en Wallonie, ValBiom s'intéresse à la biomasse lignocellulosique et aux molécules issues de la valorisation de la lignine. La Professeure Aurore Richel a d'ailleurs été contacté dans le cadre de cette étude.

3.3 Identification de quelques synergies potentielles impliquant les drêches de brasseries bruxelloises

3.3.1 *Les amendements organiques à Bruxelles : le compost et le paillage à froid*

Les synergies qui proposent d'utiliser les drêches comme amendements organiques sont retenues. En effet, bien que l'écosystème auquel nous nous intéressons se situe en milieu urbain et périurbain, les projets d'agriculture urbaine se multiplient, tout comme les projets de champs partagés ou de CSA (*Community Support Agriculture*) qui consistent à payer une cotisation annuelle en échange de récoltes saisonnières, et d'assurer aux agriculteurs des revenus, peu importe les conditions. Ces projets qui visent à nourrir une ville qui dépend des campagnes alentours ont des grands besoins en amendements de sol. La quantité des drêches ne serait même pas assez suffisante. En effet, John Stainier, du Chant des Cailles, indique qu'ils produisent avec l'élevage de brebis laitière 40 tonnes de fumier par an, mais que ce n'est pas assez pour les maraîchers du Chant des Cailles, qui achètent 10 tonnes supplémentaires par an. Il n'y a donc pas de problème de demande.

En outre, les synergies autour de la valorisation des drêches en amendements pour le sol ont l'autre grand avantage de ne pas devoir être transformées. Ces synergies engendrent ainsi un besoin en énergie pour le déplacement de la matière uniquement.

Le paillage à froid diffère du compostage. Le mélange de matières plus ou moins carbonés et azotés est réalisé et il est mis directement sur le sol des cultures. En effet, l'optimisation de la ressource est encore plus intéressante, car le paillage à froid ne nécessite pas de broyer la matière et n'implique pas de réaction exothermique. Il n'y a donc pas de perte d'énergie. Etienne Duquenne, responsable du pôle vert de la Ferme Nos Pilifs, intéressé par notre appel et le projet, a même proposé de mener un test avec des drêches mélangées à du BRF (Bois Raméal Fragmenté). La seule contrainte ici, en fonction des unités valorisatrices, sera la certification en bio, ou non, des drêches et de l'agriculture revalorisatrice.

Des parties prenantes impliquées dans l'agriculture urbaine ont été identifiées et contactées. Il s'agit notamment de la FEDEAU (la Fédération de l'Agriculture Urbaine à Bruxelles), de Groot Eiland, des Gastrosophes, de Skyfarms, de la Ferme du Chant des Cailles, de Cycle Farm et de la Ferme du Chaudron, pour ne citer qu'une petite partie infime des acteurs de l'agriculture urbaine en Région de Bruxelles-Capitale.

Les parties prenantes de ces synergies seraient également les entreprises collectrices de biodéchets en Région de Bruxelles-Capitale : Bruxelles-Propreté, MCCA Recycling, RENEWI, VEOLIA, Vanheede, DUFOUR et Recyclo. Néanmoins, certaines de ces entreprises ou organisations, sont très attachées aux matières organiques qu'elles traitent, puisqu'elles font partie intégrante de leur modèles d'affaires. Un conflit d'intérêt se dessine.

3.3.2 Les drêches fraîches ou ensilées comme matières premières d'alimentation pour animaux (FEED)

Les drêches peuvent être données aux animaux fraîches, comme le fait Rudy Draf, ou bien ensilées, afin de conserver les drêches jusqu'à 6 mois. Les deux solutions devront être envisagées.

Des parties prenantes sont identifiées sur le territoire de Bruxelles Capitale. Il s'agit notamment de la Ferme du Chant des Cailles, qui, malgré ses mésaventures liées à une mauvaise conservation des drêches et une mauvaise logistique, serait prêts à tenter à nouveau l'expérience, si la logistique était améliorée.

Les Moutons Bruxellois serait aussi une partie prenante intéressante. En revanche, les projets d'élevage d'animaux en Région de Bruxelles-Capitale sont limités, notamment à cause de la forte densité de population. Il s'agit là d'une des limites de cette étude. En effet, délimiter l'étude à la Région de Bruxelles-Capitale semble cohérente à l'aune de l'approche politique du territoire de la Région de Bruxelles-Capitale, mais, en termes d'activités, la Région peut devenir une limite.

3.3.3 Les drêches dans l'alimentation humaine

Des synergies impliquant les drêches de brasserie peuvent voir le jour dans l'alimentation humaine. En effet, à Bruxelles, des entreprises comme le Mad Lab utilisent des drêches dans la confection de leurs biscuits apéritifs, Draft Granola dans certaines de ces recettes de granola, et Dandoy dans un biscuit réalisé avec Brussels Beer Project.

En outre, une entreprise comme Next Grain propose de la farine de drêches, bio et non bio. Leur procédé, coûteux en énergie malgré leur investissement dans un séchoir à récupérateur de chaleur, consiste à presser manuellement pour le moment les drêches, à les sécher et à les mouliner à l'aide d'une pierre taillée sur mesure pour briser les fibres solides des parois primaires et secondaires du grain, qui constituent la drêche. Né de cette étude, un test est en cours dans la boulangerie Pinpin, pour évaluer la teneur en farine de drêches maximale pour ne pas perdre en propriétés mécaniques, sensorielles et apporter assez de sucres pour la fermentation.

Enfin, Fermentings a mis au point une recette de Shoyu à base de drêches qui retient également notre attention. L'avantage de cette synergie, malgré son temps long (entre 6 mois et un an), est de diminuer la quantité de matière de 80 % et de proposer une valorisation du résidu de pulpe de drêches en une poudre très relevée, proche d'un furikake. Avant cela, Yannick Schandené avait mis au point une limonade à base de drêches, mais a décidé d'abandonner le projet face à trois écueils : 1) le manque de stabilité du produit gazeux, 2) le manque d'upscaling, 3) la non-diminution de la quantité de résidus de drêches à l'issue du procédé.

3.3.4 La méthanisation des drêches de brasserie

L'étude de faisabilité de la méthanisation des drêches de brasserie retient l'attention de cette étude. En effet, la moitié du gisement des drêches de brasserie est traité par la société Vanheede et sont *a priori* biométhanisées. L'étude de faisabilité sera primordiale afin de savoir s'il s'agit d'une solution très intéressante, ou si elle peut facilement être substituée par une autre synergie qui aurait un impact plus bénéfique sur son environnement.

En outre, la Région de Bruxelles-Capitale a un projet d'unité de biométhanisation. La dimension de cette unité n'est pas encore connue, mais la question de savoir si elles peuvent accueillir le gisement de drêches de la Région de Bruxelles-Capitale se posera.

3.3.5 Les drêches comme matériau de construction composite, ou isolant

Les drêches ont une construction composite, à l'image du bois, faite de cellulose, d'hémicelluloses et de lignines.

À Anvers, la société Circular Matters, avec qui nous sommes en contact, produit des panneaux composites thermoformés à 180°C, à partir de drêches. En outre, le caractère très poreux des drêches ($V_{\text{pores}} / V_{\text{app}} = \pm 0,5$), en ferait théoriquement un bon isolant. Il conviendrait de s'intéresser à la porosité d'autres matériaux isolants et de les comparer.

En outre, Marilys Tran, collaboratrice Recherche & Développement chez BC Materials et lauréate de la Fondation pour les générations futures, que l'on a déjà mentionné dans ce travail pour le développement d'un emballage alimentaire conçu à partir de cellulose microbienne et d'eau résiduelle des drêches, a repris ses recherches sur les drêches utilisées notamment comme enduits ou comme matériaux composites après avoir été contactée dans le cadre de ce travail. Bien que l'orientation et l'avenir de ce travail ne soit pas encore défini, l'intérêt qu'il a suscité dans notre propre chef et auprès des acteurs rencontrés nous exhorte à vouloir le continuer.

À Bruxelles, BC Materials, qui se trouve d'ailleurs à quelque pas de la brasserie de la Senne, innove, ou exnove, dans les matériaux de construction et serait un acteur clé dans une démarche de test de matériaux faits à partir de drêches. Les parties prenantes citées dans cette partie le sont à titre d'exemple, mais aussi afin de dessiner cet écosystème dans lequel des synergies de substitution, mais aussi de mutualisation des moyens de production pourraient avoir lieu. Effectivement, se passer de l'investissement

Conclusion du Chapitre 2

L'écologie industrielle est un des piliers de l'économie circulaire. Conceptualisée dans les années 1990, ce domaine scientifique s'inspire des écosystèmes naturels et rompt avec une approche linéaire qui dissocie la société industrielle de la biosphère. Au travers de bouclage de flux et d'une nouvelle organisation, l'écologie industrielle tendrait à dématérialiser la croissance.

À l'échelle du territoire qui nous occupe, la Région de Bruxelles-Capitale, en 2023, près de 2000 tonnes de drêches ont été produites principalement dans la vallée de la Senne, une vallée historiquement liée avec la bière, qui pourrait voir un écosystème de synergies se créer.

Aujourd'hui, 40% du flux de drêches sortants de ce territoire est valorisé à Ternat, dans la ferme de Rudy Draf, et 50 % de ce flux est transporté jusqu'à Quevy afin d'être fermenté en biométhane et d'être cogénéré. Les 10% restant correspondent aux quantités utilisées pour des tests ou pour des synergies dans le domaine de l'alimentation humaine, comme avec les gâteaux de la Maison Dandoy, du Mad Lab, la farine de Next Grain.

Les pistes de synergies potentielles proposent de boucler les flux de drêches à l'aide de ces synergies et de deux nouvelles synergies : une synergie de substitution de déchets organiques par de la drêche dans du compost, et dans le mélange du paillage à froid, et l'utilisation de la drêche comme un matériau de construction composite, ou comme un isolant.

Le Chapitre suivant va permettre de mener l'étude de faisabilité, au moins en partie, de ces synergies, à l'aune des critères identifiés précédemment, et de nouveaux critères propres aux exigences des synergies et de leurs écosystèmes, qui, par le biais de ces synergies, seraient susceptibles de grandir.

Chapitre 3 Étude de faisabilité de potentielles synergies éco-industrielles impliquant les drêches de brasserie au sein du territoire bruxellois

Les drêches sont un résidu solide lignocellulosique issu de la fabrication de la bière, dont les propriétés physicochimiques varient. L'écologie industrielle a été définie et un territoire s'est dessiné avec le gisement. Des synergies ont été étudiées. Dorénavant, l'étude de faisabilité des synergies potentielles, préparée tout au long de ce travail, peut commencer.

Les critères propres aux drêches pour chaque étape de l'étude de faisabilité ont été sélectionnés et expliqués. Les grands enjeux de chaque synergie ont été abordés. Il ne reste plus qu'à identifier les critères de faisabilité propres à chaque synergie, les évaluer, et les comparer.

Ces études de faisabilité ne sont pas menées pour toutes les synergies sélectionnées mais la méthodologie appliquée sera similaire. Ces études de faisabilité seront développées de manière plus détaillée lors de la défense orale de ce travail.

1. Des synergies de substitution de la matière organique des amendements du sol par les drêches de brasserie

Si l'on prend très au pied de la lettre le biomimétisme auquel nous incite l'écologie industrielle et que l'on va puiser dans la nature des idées de bouclage de flux de grains, l'amendement naturel des sols par les céréales non récoltées, semble être tout à fait cohérent. Le principe est le même pour les drêches, à l'exception que les activités humaines ont complètement changé sa nature.

Une première synergie serait celle d'utiliser les drêches pour substituer tout ou une partie de la matière organique qui donnera du compost. Une deuxième synergie potentielle sera traitée en parallèle, car même si les procédés sont différents, le paillage à froid repose sur des critères de faisabilité similaires.

Le Tableau 10 est rempli grâce aux données mesurées empiriquement et aux données de référence pour le compostage, avancées par Assandrie et al. (2020, pp. 4-5). Ces données montrent en effet que les drêches ne sont pas toujours comprises dans les valeurs de référence pour un bon compostage ou un bon paillage à froid. Ainsi, on déduira de cette étude de faisabilité, une étude technique, et une étude quantitative. L'étude technique ne sera pas développée ici car ni le compost, ni le paillage à froid requiert une manipulation de la drêche autre que le transport jusqu'au lieu de valorisation.

Certaines des valeurs ne sont pas à notre disposition.

Tableau 10 Étude de faisabilité qualitative des synergies 1 & 2

	4.29	1.13	1.10	
	Biologique	Rapport carbone / azote	Potentiel hydrogène	Ratio V pores / V app
	Bio	Rapport C/N	pH	
	(1) biologique (0) conventionnel			
Synergie 1 : Compost	(1) ou (0)	20-30	5.5 - 7.5	35 - 50 %
Synergie 2 : Paillage à froid	(1) ou (0)	20-50	6-7,5	
Drêche		9,5 - 13,9	4,9 (± σ 2,1)	50,20%
		1.4		
	Teneur en O ₂	Taux d'humidité	T °C	
	O ₂ %	MC (<i>Moisture content</i>)	T °C	
Synergie 1 : Compost	15- 20%	60-65 %	40-65	
Synergie 2 : Paillage à froid			20 - 25°C	
Drêche		75-80 %		

À partir des valeurs références, à atteindre pour le compost et le paillage à froid, qui supporte une plus forte teneur en matière carbonée, et en fonction des valeurs d'autres composés organiques, et en fonction des quantités disponibles, selon la certification bio, par exemple, un mix de compostage ou de paillage verra le jour. Cela peut se modéliser comme un problème d'optimisation. Il semble que la demande en drêches bio, pour l'agriculture biologique soit plus élevée que la quantité de drêches bios offertes à Bruxelles.

Tableau 11 Extrait d'étude de faisabilité quantitative pour les synergies 1 & 2

	4.29	1.13	1.10
	Biologique	Rapport carbone / azote	Potentiel hydrogène
	Bio	Rapport C/N	pH
	(1) biologique (0) conventionnel		
Synergie 1 : Compost	(1) ou (0)	20-30	5.5 - 7.5
Synergie 2 : Paillage à froid	(1) ou (0)	20-50	6-7,5
Drêche		9,5 - 13,9	4,9 (± σ 2,1)
Drêche (0)	1128,65 (t/an)		
Drêches bios (1)	23,1 (t/an)		
Marc de café		25	6,2
BRF		60-150	7
Mix compost (synergie 1)	50% drêches, 50% marc de café	18,35	5,55
Mix paillage (synergie 2)	60% BRF, 40 % drêches	67,68	6,68

L'étude de faisabilité légale, réglementaire, qui aurait pu prendre en compte la certification bio, a déjà été prise en compte.

L'étude économique implique une analyse coût bénéfices. Pour le brasseur, qui faisait appel au service de Vanheede, le gain est de 50 € / 680 l (Volume d'une Bio Box), soit 0,07 centimes / l. Par exemple, Groot Eiland, indique pouvoir récupérer 0,3 m³ de drêches pour son compost, ce qui fait 300 l et une économie de 21€ / semaine, seulement à l'échelle d'une entité. Pour le maraîcher, qui ne doit par exemple pas acheter de la paille de chanvre et de miscanthus, l'économie est de 22€ / 20 kg, soit 1,10€ / kg. La drêche a une masse volumique réelle moyenne de 753 kg / m³. Ainsi, 300 l de drêches, correspondrait à 225,9 kg (matière humide) ou 132 kg (matière sèche, en utilisant la masse volumique absolue). Sans connaître la proportion avec laquelle la drêche remplace le chanvre et le miscanthus, cela est difficile de calculer combien le maraîcher pourrait gagner, mais il est quasiment certain qu'il réalise des économies. Enfin, Etienne Duquenne, de la Ferme Nos Pilifs, a expliqué qu'ils vendent des centaines de m³ de paillage par an, et que la demande des particuliers, qui jardinent de plus en plus en milieu urbain, est énorme.

Ensuite, la faisabilité culturelle pour les synergies 1 & 2 ne présente pas de grande complexité. La valorisation et la substitution d'une matière organique pour une autre matière organique résiduelle n'a pas d'impact culturel conséquent.

Enfin, il s'agira de mesurer la faisabilité environnementale de synergies 1 & 2. Il convient de mesurer les émissions liées à ces deux synergies et l'empreinte carbone de celles-ci. Pour les autres synergies, la base carbone empreinte de l'ADEME en France regorge d'informations essentielles. Le transport des drêches représente dans la plupart des cas une grande part des émissions de GES liées aux synergies. Dans le cas d'une synergie avec Groot Eiland, 300 l de drêches humides correspond à 225 kg. Les livreurs et collecteurs de biodéchets à vélo, Recyclo, peuvent charger jusqu'à 250 kg de biodéchets. De cette manière, les émissions de GES seront indirectes (liées au cycle de vie du vélo). Par contre, si un camion avait été utilisé, les émissions de GES auraient été en moyenne de 0,272 kg éq. CO₂/t*km en Belgique selon la Base Empreinte de l'ADEME (Base Empreinte, 2024).

L'étude de faisabilité pour chaque synergie sélectionnée sera présentée lors de l'oral de défense de ce travail.

Chapitre 4 L'écologie industrielle, oxymore naturel

1. Quelles sont les limites et les biais de cette étude de faisabilité ?

Cette étude de faisabilité comporte un grand nombre de limites et de biais. Certains d'entre eux sont inhérents à l'écologie industrielle, alors que d'autres auraient pu être évités.

L'écologie industrielle est un domaine d'étude scientifique qui a l'avantage de rompre avec une approche linéaire des écosystèmes industriels, déconnectés de la nature et des limites planétaires, et qui les place au sein de la biosphère, sur la partie charnue du doughnut de Kate Raworth, ou plutôt sur les parties qui débordent. L'écologie industrielle biomimétise l'organisation des cycles de la nature et des interactions entre les écosystèmes. En ce faisant, l'écologie industrielle artificialise la nature et de manière corollaire, naturalise nos sociétés industrielles (UVED, 2006). Le parallèle est plaisant, et conforte notre vision éthique de l'industrie, mais il convient de ne pas oublier que cette vision peut être problématique et faussée. L'exploitation des ressources de nos écosystèmes de manière illimitée et l'émissions de flux eux aussi illimités dans ces systèmes, n'a rien de naturel. Ils sont le fait d'un anthroposystème (Lafay, 2021).

Pensée par des ingénieurs, pour des industriels, l'écologie industrielle ne rompt pas vraiment avec une logique productiviste et extractiviste des ressources. Elle s'inscrit toujours dans une logique de croissance et cherche plus un équilibre avec les écosystèmes qu'à réparer les dommages causés par les activités humaines. Il serait ainsi légitime de se demander si l'écologie industrielle est suffisante et permet vraiment de dématérialiser l'économie sur le long terme. Face à l'urgence de la situation, son utilité pragmatique exhorte à passer à l'action, mais est-ce suffisant pour atteindre les objectifs fixés par les accords de Paris et par ?

En outre, l'étude de faisabilité comporte un grand nombre de limites qui auraient pu être évités.

La première, aurait été de pouvoir présenter des résultats d'une étude de faisabilité, et pas uniquement son squelette et un exemple. L'étude de faisabilité en elle-même ne demande plus d'effort méthodologique important, mais conclure une étude de faisabilité sans résultat quantitatifs ou semi-quantitatifs est un facteur très limitant.

En outre, l'approche, qui se centre autour du flux de matières des drêches, n'est pas vraiment systémique. Cette étude de faisabilité devrait prendre en compte les flux d'énergie et d'eau pour être satisfaisante.

Se limiter à la Région de Bruxelles-Capitale semblait être une bonne idée d'un point de vue politique puisque les déchets sont une compétence régionale, mais elle limite les facteurs d'activité et ne reflète pas la réalité, puisque la synergie existante la plus durable et importante en terme de volume est réalisée avec un fermier, Rudy Draf, localisé à Ternat.

L'étude de faisabilité comporte également des choix plutôt personnels et subjectifs de ne pas développer certaines synergies évoquées dans la littérature scientifique comme la production de papier.

A titre personnel, nous regrettons également que le facteur environnemental n'ait pas une place plus prégnante dans l'étude de faisabilité. Pour être rigoureux, il convient de réaliser des Analyses de Cycle de Vie, mais, cela n'était évidemment pas réalisable dans le cadre de cette gestion de projet et d'étude de faisabilité. Bien que la réalisation de l'étude de faisabilité environnementale en dernier lieu soit justifiée d'un point de vue méthodologique par Adoue (2007), car elle s'appuie sur les études de faisabilité précédentes, elle n'empêche pas que des synergies à impacts négatifs, entendus comme délétères pour leur environnement, aient lieu.

Enfin, les mesures expérimentales effectuées tout au long de cette étude ont souvent permis de confronter la théorie à l'empirisme, mais elles auraient pu être formulés de manière plus scientifiques et plus précises, notamment avec l'aide d'un laboratoire d'une université ou d'un.e autre étudiant.e de cette université, et de l'Institut Meurice par exemple.

2. Quels sont les freins aux synergies éco-industrielles impliquant les drêches de brasserie à Bruxelles ?

Les synergies éco-industrielles impliquant les drêches de brasserie à Bruxelles semblent être freinées par quatre critères.

L'aspect légal, comme souvent, est un grand frein. L'obligation d'enregistrement d'une nouvelle activité, mélangée avec une certaine méfiance de l'AFSCA, du côté des brasseries, mais aussi des unités valorisatrices semblent freiner un certain nombre de brasseries ou d'agriculteurs. Pour cette raison, l'aspect a été traité avec un certain niveau de détail, afin d'établir des recommandations claires auprès des parties prenantes concernées.

Le manque de temps, et de moyens, mis sous pression par un équilibre financier parfois juste et un contexte d'inflation ne permettent pas aux entrepreneurs et brasseurs de prendre le temps de réfléchir et de mettre en place des initiatives d'écologie industrielles et des synergies. Au téléphone, plusieurs d'entre eux ont avoué assez simplement ce manque de temps et d'espace mental.

Cette nécessité de disponibilité et d'implication est d'autant plus vraie que l'écologie industrielle est un champ scientifique interdisciplinaire et complexe, dans lequel il est facile de se perdre.

Enfin, Adoue (2007) parle de culture d'entreprises, mais il semble qu'une éthique forte soit de rigueur pour déployer l'énergie nécessaire pour trouver des solutions de valorisations des drêches qui respectent les limites planétaires et les cycles géo-biochimiques des écosystèmes.

3. Comment favoriser les synergies éco-industrielles impliquant les drêches à Bruxelles ?

Bien que l'étude de faisabilité n'ait pas pu être menée à sa fin, si une fin à ce genre d'étude existe, des recommandations opérationnelles ont pu être formulées tout au long de la réflexion autour de ce travail.

Afin de favoriser les synergies éco-industrielles, les exploitants des brasseries pourraient questionner le choix de leur implantation à la lueur des synergies qu'ils souhaitent entreprendre. Le but étant de se rapprocher de ces synergies et de diminuer le coût économique et environnemental du transport des drêches, qui aura un impact sur le critère économique et environnemental de la synergie. La clé de voûte des synergies impliquant les drêches repose là-dessus. Les brasseries pourraient aussi, dans une approche plus autonome, diversifier leurs activités, pourquoi pas dans des mutualisations entre brasseurs, ou même de manière inter-entreprises.

À l'échelle de l'installation de brassage, l'utilisation d'un filtre-pressé permet aux brasseries de produire des drêches moins humides, et donc plus facile à transporter, stocker, et valoriser.

À l'échelle des brasseries également, des presses pourraient être installées et mutualisées afin de presser la drêche avant de la déplacer, toujours dans l'idée d'optimiser son transport, coûteux.

Le manque de communication entre les brasseurs, pourtant tous concernés par le même déchet, s'est fait aussi ressentir, alors qu'Adoue (2007) insiste sur le fait que l'échange d'informations, est le point de départ des synergies éco-industrielles. Cet aspect rejoint également la notion de faisabilité culturelle. Certaines brasseries entretiennent de bonnes relations, mais ce marché qui a explosé en dix ans est également fort concentré et concurrentiel. Afin d'essayer de remédier à ce manque de flux d'informations, et en profitant du statut d'étudiant, qui ne revêt pas encore de conflit d'intérêt, nous organiserons une rencontre des acteurs rencontrés et interviewés lors de ces recherches.

Des tests ont également été initiés dans le cadre de ce travail et visent à insuffler un changement de vision culturelle des acteurs et une approche pragmatique, alors que beaucoup d'acteurs du secteur sont las de voir toujours autant de travaux rédigés sur le sujet des drêches, et si peu de synergies concrètes en sortir.

Des fiches outils seront aussi partagées aux acteurs lors de ces tests, reprenant les critères de faisabilité identifiés et les informations issues de la littérature scientifique et vulgarisées.

Enfin, à une échelle plus régionale ou nationale, des bases de données des flux entrants et sortants, de même que des cartographies des synergies existantes seraient d'une utilité publique et environnementale.

Conclusion

Ce travail, guidé par l'écologie industrielle, par une approche systémique et un processus itératif, a constamment joué avec les échelles afin de comprendre les liens qui sont à l'œuvre dans la matière, entre les chaînes de celluloses, avec les lignines, et puis au niveau d'écosystèmes industriels, de la décomposition de la matière carbonée dans les sols, de la porosité de ce qui pourrait être un nouvel isolant.

Des résultats de l'étude de faisabilité, opérationnels, ne peuvent malheureusement pas être présentés. En revanche, des pistes de synergies sont identifiées au sein du territoire de Bruxelles-Capitale dans l'amendement pour le sol, l'alimentation pour animaux, l'alimentation humaine et les matériaux de construction. Parmi ces quatre synergies, des tests sont mis en œuvre, à l'initiative de ce mémoire. Même sans résultat, l'effet de ce travail, sur son écosystème et les acteurs rencontrés est déjà satisfaisant.

L'écologie industrielle a été conceptualisée dans les années 1990. Depuis, nous avons émis plus de CO₂ qu'au cours du reste de l'histoire de l'humanité. Mettre en place des synergies éco-industrielles qui bouclerait le flux de près de 2000 tonnes de drêches produites par an dans la Région de Bruxelles-Capitale changera peu de choses au problème global que nous connaissons.

En revanche, ce projet et cette méthodologie essaient de répondre, à leur échelle, à l'urgence de la situation et place des acteurs de l'écosystème dans un champ d'action et de réflexion, pour une société industrielle en équilibre avec les écosystèmes naturels, bien que cela ne soit pas suffisant.

L'écologie industrielle, oxymore naturelle, permet de mettre à mal une fois de plus cette dualité néfaste que les humains ont construit entre nature et culture. Au contraire, l'écologie industrielle exhorte à transformer les écosystèmes les plus anthropisés, perturbés par l'Homme, pour qu'ils se rapprochent le plus possible d'écosystèmes naturels, qui respectent et réparent les limites des écosystèmes, de la biosphère, et donc de la planète Terre. Les drêches, matériau à la composition et aux propriétés variables, à l'image de la complexité et de la richesse que le monde vivant nous offre, sont l'occasion de s'intéresser à toute cette méthodologie.

L'écologie industrielle est-elle assez radicale pour s'aligner sur les objectifs de 2030 et 2050 ? Si elle ne s'attaque pas vraiment à la cause, à la racine du problème, c'est-à-dire, la croissance, comment s'y prendre ? À quoi sommes-nous prêt.es à renoncer ? Est-ce qu'un changement radical dans un système aussi complexe ne serait pas chaotique ? Est-ce que la résilience qui émane de ces écosystèmes interconnectés ne permettrait pas justement de contenir un effondrement, qui pourrait aussi emmener avec lui ce plancher social dont Kate Raworth parle ?

Bibliographie

- ADEME. (2024). *L'Écologie Industrielle et Territoriale au service des entreprises*. economie-circulaire.ademe.fr. <https://economie-circulaire.ademe.fr/ecologie-industrielle>
- ADEME, & IN NUMERI. (2023). *Déchets chiffres-clés. Édition Juin 2023* (p. 1-84). <https://librairie.ademe.fr/ged/7700/DechetsChiffresCles2023.pdf>
- Adoue, C. (2007). *Mettre en oeuvre l'écologie industrielle* (1^{re} éd.). Presses polytechniques et universitaires romandes.
- AFSCA. (2021, avril 16). *Fiche technique activité TRA-ACT 251 Version n°3*. https://favv-afsca.be/sites/default/files/2023-11/2021_04_16_TRA_ACT251_Fabricant_matières_premières_feed_R_V03_FR.pdf
- AFSCA. (2023, avril 6). *Fiche technique activité TRA-ACT 202 Version n°6*. https://favv-afsca.be/sites/default/files/2023-11/2023_04_06_TRA_ACT202_Brasserie_PL43AC39PR31_T1_2_V06_FR_EXTRA.pdf
- Allain, M. (2024, juillet 17). *Entretien téléphonique avec Matthieu Allain, coopérateur de CoHop, co-fondateur de drinkthatbeer [Entretien]* [Communication personnelle].
- Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 23 juin 2022 modifiant l'arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 1^{er} décembre 2016 relatif à la gestion des déchets et des dispositions connexes, Pub. L. No. C-2022/15098, 60039 1. Consulté 19 août 2024, à l'adresse <https://environnement.brussels/media/5656/download?inline>
- Assandri, D., Pampuro, N., Zara, G., Cavallo, E., & Budroni, M. (2020). Suitability of Composting Process for the Disposal and Valorization of Brewer's Spent Grain. *Agriculture*, 11, 2. <https://doi.org/10.3390/agriculture11010002>
- Base Empreinte. (2024). *Jeux de données | Base Empreinte®*. base-empreinte.ademe. <https://base-empreinte.ademe.fr/donnees/jeu-donnees>
- Belga. (2024, juillet 16). « La seule solution pour éviter la faillite » : Une célèbre brasserie bruxelloise forcée de vendre son matériel. Le Soir. <https://www.lesoir.be/609688/article/2024-07-16/la-seule-solution-pour-eviter-la-faillite-une-celebre-brasserie-bruxelloise>

- Boisseau, A. (2024, juillet 12). *Entretien avec Alexis Boisseau, brasseur et fondateur d'Oσμα, producteur de bières, cidres, poirés et hybrides dans les caves de Tour et Taxis [Entretien].Saint-Gilles* [Communication personnelle].
- Brasseurs Belges, C.B.B. (2007a). *Guide pour le secteur brassicole. Partie I: Hygiène* (1; p. 1-55). Brasseurs Belges.
- Brasseurs Belges, C.B.B. (2007b). *Guide pour le secteur brassicole. Partie II: HACCP* (1; p. 1-108).
- Brasseurs Belges, C.B.B. (2024, mars 7). *Accueil—Belgian Brewers*. Belgian Brewers. <https://belgianbrewers.be/?lang=fr/>
- Brussels Beer project. (2023). *What we do good What we do bad. 2023 Impact Report* (p. 1-12). https://cdn.shopify.com/s/files/1/0267/9403/3204/files/BBP_Carbon_Footprint_Sustainability_Report_2023.pdf?v=1709109930
- Bruxelles Environnement. (2020, avril 29). *Brudalex : Règles de gestion des déchets pour la transition vers une économie circulaire*. environnement.brussels. <https://environnement.brussels/pro/reglementation/obligations-et-autorisations/brudalex-regles-de-gestion-des-dechets-pour-la-transition-vers-une-economie-circulaire>
- Bruxelles Environnement. (2022, février 18). *Brasseries / Ateliers liés aux boissons*. Bruxelles Environnement. <https://environnement.brussels/pro/reglementation/obligations-et-autorisations/brasseries-ateliers-lies-aux-boissons>
- Celnik, N. (2023, mai 19). *Une industrie écologique est-elle possible?* Socialter. <https://www.socialter.fr/article/industrie-ecologique-verte-reindustrialisation>
- Circulaire relative aux flux valorisés en alimentation animale : interdiction d'utilisation des déchets, nouveaux statuts juridiques de ces produits, Pub. L. No. PCCB/S1/1653698, 1 (2021). https://favv-afsca.be/sites/default/files/2023-10/20210812_FR_clean_economiecirculaire_v1.1.pdf
- CITEPA. (2022). *Facteurs d'émissions CO2 et pouvoirs calorifiques inférieurs (PCI) nationaux (valeurs par défaut) par type de combustible* (p. 1). https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/ETS_Valeurs_nationales_Citepa%20_2022.pdf
- Claeys, T. (2024, juillet 15). *Entretien téléphonique avec Thomas Claeys, Responsable de production de la Brasserie de la Senne [Entretien]* [Communication personnelle].
- Club d'écologie industrielle de l'Aube - CEIA. (2022). *CEIA | L'écologie industrielle et territoriale*. ceiaube. <https://www.ceiaube.fr/presentation-ecologie-industrielle>

- COMET. (2022, septembre 16). *Soluble Dietary Fiber | Arabinoxylan Prebiotic Powder Ingredient*. COMET. <https://comet-bio.com/arrabina/>
- Damien, F. (2024, juillet 15). *Entretien avec Félix Damien, co-fondateur de la Brasserie de la Jungle [Entretien]* [Communication personnelle].
- De Mees, M.-A. (2024, août 2). *Entretien téléphonique avec Marc-Antoine De Mees, co-fondateur de la Brasserie de Brunehaut et co-fondateur de Regenerative Beer Alliance [Entretien]* [Communication personnelle].
- Déchets alimentaires, biométhanisation—Vanheede Environnement—Vanheede*. (2024). Vanheede Environment Group. <https://www.vanheede.com/fr/notre-traitement/fermentation/>
- Dias, D., & Andrade, T. (2024, juillet 17). *Entretien avec David Dias & Tomé Andrade, fondateurs de Next Grain dans leur atelier de protection à BeHere [Entretien]*. Laeken [Communication personnelle].
- Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives, 312 OJ L 3 (2008). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj/fra>
- Draf, R. (2024, août 1). *Entretien téléphonique avec Rudy Draf, fermier à Ternat [Entretien]* [Communication personnelle].
- Dubois, V., & Jannes, J. (2021). *Sciences et technologie des matériaux*.
- Duquenne, E. (2024, août 1). *Entretien téléphonique avec Etienne Duquenne, Responsable du pôle vert à la Ferme Nos Pilifs [Entretien]* [Communication personnelle].
- Duynie Feed. (2022). *Duynie Feed BE | L’histoire de Duynie Feed BE*. Duynie. <https://web.duynie.com/fr-be/a-propos-de-nous/l-histoire-de-duynie-feed-be/>
- Duynie Feed. (2024a, mars 20). *Drêche de brasserie : Ruminant*. <https://api.duynie.com/rest/product/DownloadPdf?productId=9804&livestock=2&lang=fr-be>
- Duynie Feed. (2024b, mars 21). *Levure de Bière 400 : Porcs*. <https://api.duynie.com/rest/product/DownloadPdf?productId=9749&livestock=&lang=fr-be>
- Entretien avec Sébastien, Laurent et Emre de la distillerie Odyssée et de la brasserie Drogenbos [Entretien]*. (2024, juillet 11). [Communication personnelle].
- Fastenakels, T. (2024, juillet 31). *Entretien téléphonique avec Thibault Fastenakels, Directeur technique d’Eclo (ex Champignon de Bruxelles) [Entretien]* [Communication personnelle].

- Fondations pour les générations futures. (2021). *Scobee | Lauréat Prototyping the Future 2021*. futuregenerations.be. <https://www.futuregenerations.be/fr/portal/initiatives/scobee>
- Fusiek, D. A. (2023, novembre 14). *Des boissons et aliments plus sains grâce à l'arabinoxylane*. European Investment Bank. <https://www.eib.org/fr/stories/arabinoxylan-diet-arrabina-health>
- Galy, J. (2023, janvier 31). *Entretien avec Joël Galy de la brasserie de la Mule [Entretien]* [Communication personnelle].
- Galy, J. (2024, juillet 4). *Entretien téléphonique avec Joël Galy, fondateur de la brasserie de la Mule à Schaerbeek [Entretien]* [Communication personnelle].
- Giroux, M., & Audesse, P. (2004). Comparaison de deux méthodes de détermination des teneurs en carbone organique, en azote total et du rapport C/N de divers amendements organiques et engrais de ferme. *Agrosol*, 15(2). https://irda.blob.core.windows.net/media/2174/giroux-audesse-2004_article_methodes_dosage_c_n_amend_org.pdf
- Heinze, T., Seoud, O. A. E., & Koschella, A. (2018). Production and characteristics of cellulose from different sources. In *Cellulose Derivatives : Synthesis, Structure, and Properties* (p. 1-38). Springer.
- Herman, J. (2024, juillet 29). *Entretien téléphonique avec Julien Herman, Directeur de production de la brasserie Wolf [Entretien]* [Communication personnelle].
- Hulot, N., Barbault, R., & Bourg, D. (1999). *Pour que la Terre reste humaine*. SEUIL.
- INRS. (2011). *Fibres de cellulose (FT 282). Généralités—Fiche toxicologique—INRS*. https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_282
- International Society for Industrial Ecology. (2024). *The Society—International Society for Industrial Ecology—ISIE*. Is4ie.Org. <https://is4ie.org/about/introduction>
- Lafay, Q. (Réalisateur). (2021, mars 18). *Le déchet est le (mal)propre de l'Homme [Émission]*. In *France Culture*. Radio France. <https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/la-transition/le-dechet-est-le-mal-propre-de-l-homme-2187356>
- Larousse, É. (s. d.). *Définitions : Biocénose, biocœnose - Dictionnaire de français Larousse*. Larousse. Consulté 16 août 2024, à l'adresse <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/bioc%C3%A9nose/9388>
- Levasseur, P., Barthelemy, M., Bioteau, T., Deloche, Y., Jolibert, F., Penavayre, S., Prasse, S., Thébault, J., & Torrijos, M. (2018). *VALORMAP : Création d'une base de données spatialisée relative à la valorisation énergétique par méthanisation des résidus organiques des agro-industries* (p. 1-7). <https://www.valormap.fr/wp->

- content/uploads/2018/07/Article-de-synth%C3%A8se-VALORMAP-version-finale.pdf
- Masse volumique. (2024). In *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Masse_volumique&oldid=216730075
- Moriamé, D. (2024, juillet 29). *Entretien téléphonique avec David Moriamé, Administrateur du Mad Lab [Entretien]* [Communication personnelle].
- Mussatto, S. I., Dragone, G., & Roberto, I. C. (2006). Brewers' spent grain : Generation, characteristics and potential applications. *Journal of Cereal Science*, 43, 1-14.
<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.06.001>
- Naibaho, J., & Korzeniowska, M. (2021). The variability of physico-chemical properties of brewery spent grain from 8 different breweries. *Heliyon*, 7(3), 1-9.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06583>
- Neiryneck, J. (2024, août 2). *Entretien Teams avec Jan Neiryneck, Procurement Manager de Benelux Feed, Duynie Group [Entretien]* [Communication personnelle].
- Parlement européen. (2023, mai 24). *Économie circulaire : Définition, importance et bénéfices*.
Thèmes | Parlement européen.
<https://www.europarl.europa.eu/topics/fr/article/20151201STO05603/economie-circulaire-definition-importance-et-benefices>
- Permaculture Design Bureau d'études, P. (2020, octobre 8). *Le BRF (Bois Raméal Fragmenté) en paillage de A à Z*. Permaculture Design. <https://www.permaculturedesign.fr/brf-paillage-bois-rameal-fragmente/>
- Piel, G. (2024, juillet 31). *Entretien téléphonique avec Grégoire Piel, Directeur de production de la Brasserie l'Amère en fût [Entretien]* [Communication personnelle].
- Process Sensing Technologies. (2024). *Mesure de l'activité de l'eau (aw) pour la qualité et la durée de conservation des produits*. processsensing.com.
<https://www.processsensing.com/fr-fr/blog/aw-mesure.htm>
- Projet ValorMap. (2018). *Projet ValorMap-livrables 2.2 & 2.3 Résultats des caractérisation physico-chimiques et des tests de potentiel méthane des coproduits et résidus organiques des agro-industries* (p. 1-32). ADEME. <https://www.valormap.fr>
- Proposition de Directive du parlement européen et du Conseil modifiant la directive 2008/98/CE relative aux déchets, 10820/24 (2024).
<https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-11300-2024-INIT/fr/pdf>

- PUR VER. (2024). *Qu'est-ce que le lombricompostage et le lombricompost ?* | PUR VER. purver.com. <https://www.purver.com/fr/quest-ce-que-le-lombricompostage-et-le-lombricompost>
- Rapport C/N. (2024). In *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Rapport_C/N&oldid=213149805
- Règlement (CE) n° 178/2002 du Parlement européen et du Conseil du 28 janvier 2002 établissant les principes généraux et les prescriptions générales de la législation alimentaire, instituant l'Autorité européenne de sécurité des aliments et fixant des procédures relatives à la sécurité des denrées alimentaires, Pub. L. No. 32002R0178, 031 OJ L 1 (2002). <http://data.europa.eu/eli/reg/2002/178/oj/fra>
- Règlement (CE) n° 767/2009 du Parlement européen et du Conseil du 13 juillet 2009 concernant la mise sur le marché et l'utilisation des aliments pour animaux, modifiant le règlement (CE) n° 1831/2003 du Parlement européen et du Conseil et abrogeant la directive 79/373/CEE du Conseil, la directive 80/511/CEE de la Commission, les directives 82/471/CEE, 83/228/CEE, 93/74/CEE, 93/113/CE et 96/25/CE du Conseil, ainsi que la décision 2004/217/CE de la Commission, Pub. L. No. 32009R0767, 229 OJ L 1 (2009). <http://data.europa.eu/eli/reg/2009/767/oj/fra>
- Règlement (UE) 2018/848 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques, et abrogeant le règlement (CE) n° 834/2007 du Conseil, 150 OJ L 1 (2018). <http://data.europa.eu/eli/reg/2018/848/oj/fra>
- Règlement (UE) 2022/1104 de la Commission du 1er juillet 2022 modifiant le règlement (UE) n° 68/2013 relatif au catalogue des matières premières pour aliments des animaux, Pub. L. No. 32022R1104, 177 OJ L 4 (2022). <http://data.europa.eu/eli/reg/2022/1104/oj/fra>
- Réseau Synapse. (s. d.). *Reseau-synapse.org, carte interactive des démarches nationales d'EIT*. reseau-synapse.org. Consulté 17 août 2024, à l'adresse <https://www.reseau-synapse.org/cartographie-des-demarches-d-eit-en-france.html>
- Schandené, Y. (2024, juillet 23). *Entretien avec Yannick Schandené, fondateur de Fermenthings [Entretien]* [Communication personnelle].
- Service Public Fédéral Belge. (2024). *Economie circulaire* | Belgium.be. [belgium.be. https://www.belgium.be/fr/economie/developpement_durable/economie_durable/economie_circulaire](https://www.belgium.be/fr/economie/developpement_durable/economie_durable/economie_circulaire)
- Sganzerla, W. G., Costa, J. M., Tena-Villares, M., Buller, L. S., Mussatto, S. I., & Forster-Carneiro, T. (2023). Dry Anaerobic Digestion of Brewer's Spent Grains toward a More

- Sustainable Brewery : Operational Performance, Kinetic Analysis, and Bioenergy Potential. *Fermentation*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/fermentation9010002>
- Simon, F. (2024, juillet 29). *Entretien téléphonique avec François Simon, co-fondateur de la Brasserie de l'Ermitage [Entretien]* [Communication personnelle].
- Sinha, A. K., Kumar, V., Makkar, H. P. S., De Boeck, G., & Becker, K. (2011). Non-starch polysaccharides and their role in fish nutrition – A review. *Food Chemistry*, 127(4), 1409-1426. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.02.042>
- Stainier, J. (2024, juillet 18). *Entretien téléphonique avec John Stainier, Responsable du bercail du Chant des Cailles [Entretien]* [Communication personnelle].
- Stittgen, B. (2024). *Studio Basse Stittgen*. Bassestittgen.Com. <https://bassestittgen.com/Info-2>
- Terra Potager. (2022, avril 1). *Comprendre le rapport C/N et la faim d'azote*. Terra Potager. <https://terra-potager.com/comprendre-le-rapport-carbone-azote-et-la-faim-d-azote/>
- The Club of Rome. (2022). *Understanding « The Limits to Growth »: A clear warning and a message of hope*. <https://www.clubofrome.org/wp-content/uploads/2022/02/CoR-TheMessageOfLtG.pdf>
- The Shift Project. (2022, janvier). *Décarboner l'industrie sans la saborder. Dans le cadre du Plan de transformation de l'économie française. Synthèse—Janvier 2022*. <https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2022/01/PTEF-Decarboner-lindustrie-SYNTHESE.pdf>
- Thunberg, G. (2022). *Le grand livre du climat*. Kero.
- Tran The Tri, M. (2024, juillet 29). *Entretien téléphonique avec Marilys Tran The Tri, Collaboratrice Recherche & Développement et lauréate de la Fondation pour les générations futures pour son projet Scobee [Entretien]* [Communication personnelle].
- Unisciel. (2023, novembre 9). *Cellulose [Polysaccharides]*. https://uel.unisciel.fr/biologie/biochimie1/biochimie1_ch03/co/apprendre_ch3_07.htm
- 1
- Univers Bière. (2024). *Biochimie bière—Brassage*. http://univers-biere.net/bio_brassage.php
- UVED. (2006). *Introduction à l'écologie industrielle*. direns.mines-paristech. <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/ISIGE/uved/ecologieIndustrielle/module6/introduction/html/2.html#>
- ValBiom. (2018a, juillet 21). *Chimie du bois : Une filière d'avenir ? (Partie 1/2) | Valbiom - Valorisation de la biomasse*. ValBiom. <https://www.valbiom.be/actualites/chimie-du-bois-une-filiere-davenir-partie-12>

- ValBiom. (2018b, juillet 21). *Chimie du bois : Une filière d'avenir ? (Partie 2/2) | Valbiom - Valorisation de la biomasse*. ValBiom. <https://www.valbiom.be/actualites/chimie-du-bois-une-filiere-davenir-partie-22>
- Van Roy, J. (2024, juillet 12). *Entretien téléphonique avec Jean Van Roy, 4ème génération de brasseurs de Lambic de la brasserie Cantillon [Entretien]* [Communication personnelle].
- Wertz, J.-L. (2015). *Molécules issues de la valorisation de la lignine* (1; p. 1-37). ValBiom. https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/182162/1/150331_ValBiom_Vvalorisation-de-la-lignine.pdf
- Wyss, U. (2002). Biertrebersilagen : Lagerdauer und Siliermitteleinsatz. *Agrarforschung*, 9(1), 14-19.