

MISE EN VALEUR DES RÉSIDUS D'ALGUES SARGASSUM EN CONTEXTE D'ÉCHOUAGE MASSIF
DANS LES ANTILLES

Par
Evelyne Bouvier

Essai présenté au Centre universitaire de formation
en environnement et développement durable en vue
de l'obtention du grade de maîtrise en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Marc Olivier

MAITRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Janvier 2020

SOMMAIRE

Mots-clés : Sargassum, algue, échouage, biomasse, Antilles, Martinique, Guadeloupe, Barbade, Trinité-et-Tobago, valorisation, compostage, biométhanisation

L'objectif de cet essai est d'évaluer les formes applicables de mise en valeur pour les échouages massifs de Sargassum dans un contexte antillais. En effet, depuis 2011, plusieurs pays antillais voient s'échouer quotidiennement plusieurs centimètres d'algues sur leurs plages. Cette situation présente un défi autant pour la gestion des volumes échoués que pour le désagrément olfactif qu'elle produit sur les touristes et les habitants locaux. Les autorités rapportent que le phénomène a des impacts sur l'économie touristique et sur la survie des écosystèmes.

À ce jour, quelques options de valorisation pour les résidus de sargasses existent, bien que certaines s'avèrent moins traditionnelles pour un contexte antillais. Afin d'obtenir une représentation claire du contexte antillais, quatre pays représentatifs ont été identifiés, notamment les deux départements français soit la Martinique et la Guadeloupe ainsi que deux pays insulaires soit la Barbade et la République de Trinité-et-Tobago.

Parmi les principales recommandations présentées, la valorisation dans la filière agricole, notamment par l'épandage agricole, le compostage ou l'utilisation dans l'alimentation animale, s'avère la voie à privilégier dans le contexte des Antilles. De plus, l'implantation d'une filière jumelée de compostage-biométhanisation s'avère représenter une voie prometteuse autant pour les résidus verts locaux que pour la gestion de la problématique, permettant un retour sur investissement.

De façon plus spécifique pour les pays où la production d'électricité provient de centrales thermiques à cogénération par brulage du charbon et de la bagasse, comme la Barbade ou la Guadeloupe, il existe un potentiel de valorisation consistant à remplacer la bagasse par des résidus de sargasses sèches. D'autre part, dans le contexte de la République de Trinité-et-Tobago qui présente actuellement des installations permettant le raffinage des hydrocarbures, l'ajout d'installations jumelées pour le raffinage du biodiésel représenterait un nouveau potentiel de retombée économique dans ce marché en croissance.

En perspective, bien que l'avenir de la problématique comporte des incertitudes selon le milieu scientifique, les autorités antillaises doivent envisager que le phénomène progresse encore. Chacun des pays antillais doit s'y préparer et mettre en place des mécanismes de valorisation des résidus de sargasses. Cet essai présente les options envisageables dans leur contexte, ce qui pourra les guider dans cette voie d'optimisation.

REMERCIEMENTS

La rédaction de cet essai n'aurait sans doute pas été possible sans le soutien, la curiosité et la contribution de mon directeur d'essai, Monsieur Marc Olivier.

Je remercie également mes parents, Carole et André, de m'avoir encouragée à poursuivre mes études universitaires dans un domaine qui me motive et me permet de m'épanouir sur les plans personnel et professionnel.

Finalement, j'aimerais également remercier tous les enseignants qui ont su enrichir et influencer mon parcours lors de ma maîtrise en gestion de l'environnement.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1. MISE EN CONTEXTE DE LA PROBLÉMATIQUE	3
1.1 L'algue <i>Sargassum</i>	3
1.2 La problématique	4
1.2.1 Le cycle migratoire et la grande ceinture atlantique des sargasses	5
1.2.2. Les causes de la prolifération	7
1.3 Les impacts pour les populations	8
1.3.1 Les effets sur la santé humaine.....	9
1.3.2 Les effets environnementaux	11
1.3.3 Les effets économiques.....	12
1.4 La gestion actuelle de la problématique	14
2. PORTRAIT SOCIOÉCONOMIQUE DES ANTILLES	15
2.1 Martinique	15
2.2 Guadeloupe	17
2.3 Barbade	18
2.4 Trinité-et-Tobago	19
3. SITUATIONS D'ÉCHOUAGES SIMILAIRES OU COMPARABLES	21
3.1 La péninsule bretonne	21
3.2 Qingdao en Chine.....	24
3.2.1 Les ulves.....	25
3.2.2 Les sargasses.....	26
3.2.3 Gestion de la problématique chinoise	27
4. OPTIONS DE VALORISATION POUR LES PUTRESCIBLES SIMILAIRES	28
4.1 Valorisation agricole	29
4.1.1 Épandage en agriculture	30
4.1.2 Compostage	30

4.1.3	Alimentation animale	32
4.2	Valorisation énergétique	32
4.2.1	Biométhanisation	33
4.2.2	Raffinage du biodiésel	35
4.2.3	Combustible pour centrale thermique en Martinique et en Guadeloupe.....	36
4.3	Valorisation industrielle.....	37
4.3.1	Alginate de sodium	38
4.3.2	Plastique biosourcé	39
4.4	Élimination comme résidus non valorisable	40
5.	ANALYSE MULTICRITÈRE	41
5.1	Critères d'analyse	41
5.1.1	État des algues	41
5.1.2	Prétraitement de la matière brute	42
5.1.3	Possibilité de traitement des volumes variables.....	42
5.1.4	Hiérarchie selon les 3RV-E	42
5.1.5	Présence d'extrait(s) nuisible(s) lors du procédé	43
5.1.6	Niveau de centralisation et de complexité des opérations	43
5.1.7	Coûts d'implantation et d'opération	44
5.1.8	Possibilité de retour sur le produit fini	44
5.1.9	Possibilité de combiner avec d'autres technologies.....	44
5.1.10	Pondération des critères.....	45
5.2	Analyse par option	45
5.2.1	Épandage en agriculture	45
5.2.2	Compostage	47
5.2.3	Alimentation animale	49
5.2.4	Biométhanisation	51
5.2.5	Raffinage du biodiésel	52

5.2.6	Combustible pour centrale thermique.....	54
5.2.7	Alginate de sodium	56
5.2.8	Plastique biosourcé	57
5.2.9	Élimination comme résidus non valorisable	59
5.3	Analyse par pays	60
5.3.1	Martinique	60
5.3.2	Guadeloupe	61
5.3.3	Barbade	62
5.3.4	République de Trinité-et-Tobago.....	63
6.	RECOMMANDATIONS.....	65
6.1	Recommandation 1	65
6.2	Recommandation 2	65
6.3	Recommandation 3	66
6.4	Recommandation 4	66
6.5	Recommandation 5	67
6.6	Recommandation 6	67
	CONCLUSION.....	68
	RÉFÉRENCES	70
	BIBLIOGRAPHIE	76
	ANNEXE 1 - TABLEAU RÉSUMÉ POUR LA MARTINIQUE	78
	ANNEXE 2 - TABLEAU RÉSUMÉ POUR LA GUADELOUPE.....	79
	ANNEXE 3 - TABLEAU RÉSUMÉ POUR LA BARBADE	80
	ANNEXE 4 - TABLEAU RÉSUMÉ POUR LA RÉPUBLIQUE DE TRINITÉ-ET-TOBAGO.....	81

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1	Physionomie comparée entre le <i>Sargassum natans</i> et le <i>Sargassum fluitans</i>	4
Figure 1.2	Évolution des surfaces dérivantes de sargasses entre 2000 et 2018	5
Figure 1.3	Carte des mouvements de sargasses	5
Figure 1.4	Évolution de la GASB entre 2000 et 2018	7
Figure 1.5	Carte des îles affectées par des échouages massifs de <i>Sargassum</i>	8
Figure 1.6	Étapes dans la dégradation de la végétation aquatique à la suite d'un épisode de <i>Sargassum</i>	12
Figure 2.1	Gestion des matières résiduelles en Martinique	15
Figure 2.2	Répartition des méthodes d'élimination des déchets en Martinique	16
Figure 2.3	Répartition des types d'énergie en Martinique	17
Figure 2.4	Répartition des méthodes d'élimination des déchets en Guadeloupe	17
Figure 2.5	Répartition des types d'énergie en Guadeloupe	18
Figure 2.6	Répartition des types d'énergie à la Barbade (2006 à 2015)	19
Figure 2.7	Répartition des types de résidus dans les sites d'enfouissement en 2010	19
Figure 3.1	Plage de Bretagne lors d'un épisode d'échouage estival	21
Figure 3.2	Total des surfaces couvertes par les ulves en Bretagne lors de la saison 2017	22
Figure 3.3	Morphologie d'algues du genre <i>Ulva</i>	23
Figure 3.4	Migration des ulves vers les plages de Qingdao	25
Figure 3.5	Côte de la ville de Qingdao lors d'un épisode d'échouage	25
Figure 3.6	Échouage de sargasses sur les plages de Qingdao	26
Figure 4.1	Composition comparée entre les standards américains pour le compost (USCC), un compost de sargasses lavées et de sargasses non lavées	31
Figure 4.2	Rendement méthanogène de divers résidus végétaux	33
Figure 4.3	Potentiels méthanogènes de différents substrats agricoles et agroalimentaires	34
Figure 4.4	Usine d'incinération des ordures ménagères (UIOM) de Fort-de-France	37
Figure 4.5	Protocole de référence pour l'extraction d'alginate à partir d'algues	38
Figure 4.6	Structure chimique de l'alginate	38

Figure 4.7	Étapes de transformation des algues en bioplastique.....	39
Figure 5.1	Sommaire de l'évaluation pour la Martinique	61
Figure 5.2	Sommaire de l'évaluation pour la Guadeloupe par option de valorisation	62
Figure 5.3	Sommaire de l'évaluation des critères pour la Barbade par option de valorisation	63
Figure 5.4	Sommaire de l'évaluation des critères pour la République de Trinité-et-Tobago par option de valorisation.....	64
Tableau 1.1	Signes cliniques du H ₂ S en fonction du niveau d'exposition	10
Tableau 1.2	Signes cliniques du NH ₃ en fonction du niveau d'exposition.....	10
Tableau 4.1	Couts estimés d'un projet de méthanisation.....	35
Tableau 4.2	Rendement en biodiésel pour des algues de type <i>Sargassum</i> selon les méthodes de la pyrolyse et la liquéfaction hydrothermale	36
Tableau 5.1	Sommaire de l'évaluation des critères pour l'épandage en agriculture.....	47
Tableau 5.2	Sommaire de l'évaluation des critères pour le compostage industriel	49
Tableau 5.3	Sommaire de l'évaluation des critères pour l'utilisation dans l'alimentation animale	50
Tableau 5.4	Sommaire de l'évaluation des critères pour la biométhanisation	52
Tableau 5.5	Sommaire de l'évaluation des critères pour le raffinage du biodiésel	54
Tableau 5.6	Sommaire de l'évaluation des critères pour l'utilisation comme combustible dans une centrale thermique	56
Tableau 5.7	Sommaire de l'évaluation des critères pour la production d'alginate de sodium	57
Tableau 5.8	Sommaire de l'évaluation des critères pour la production de plastique biosourcé	58
Tableau 5.9	Sommaire de l'évaluation des critères pour l'élimination ultime.....	60

LISTE DES ACRONYMES

\$ CAN	Dollar canadien
\$ US	Dollar américain
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
BAPE	Bureau d'audience publique sur l'environnement
CACEM	Communauté d'agglomération du centre de la Martinique
CEVA	Centre d'étude et de valorisation des algues
FAO	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
GASB	<i>Great Atlantic Sargassum Belt</i>
GRDF	Gaz réseau distribution France
H ₂ S	Sulfure d'hydrogène
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
IEDOM	Institut d'émissions des départements d'outre-mer
INRS	Institut national de recherche scientifique
INSPQ	Institut national de santé publique du Québec
ISO	Organisation internationale de normalisation
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
nd	Non disponible
NH ₃	Ammoniac
NISWMP	<i>National Integrated Waste Management Policy</i>
OCDE	Organisation de coopération et de développement économique

ppm	Parties par millions
SBRC	<i>Sustainable Barbados Recycling Centre</i>
Spp	<i>Species plurimae</i>
SWMCOL	<i>Trinidad and Tobago solid waste management compagny limited</i>
SWMP	<i>Solid Waste Management program</i>
T&TEC	<i>Trinidad and Tobago Electricity Commission</i>
UE	Union européenne

INTRODUCTION

Pour des milliers de touristes, la région des Antilles est une destination de vacances rêvée, grâce à ses plages paradisiaques et aux îlots coralliens dans une mer cristalline permettant la plongée sous-marine. Or, depuis quelques années, dès leur arrivée les voyageurs découvrent une situation moins paradisiaque. En effet, des algues brunes ont pris possession du paysage. Les plages sont couvertes de plusieurs centimètres d'algues échouées qui, si elles tardent à être ramassées, émettent une odeur très désagréable. Au large, on remarque de nouveaux radeaux flottants qui rejoindront la plage dans quelques heures.

Afin de permettre aux touristes l'accès à la mer et d'éviter les nuisances olfactives qui font fuir les clients, les propriétaires engagent des employés pour faire le ramassage chaque jour. En considérant le nombre d'hôtels dans les Antilles et l'arrivée permanente de radeaux, il est aisé d'imaginer l'énorme volume quotidien d'algues ramassées qui rejoignent les sites de dépôt et la nuisance publique produite par la putréfaction de milliers de tonnes d'algues.

À la lumière de cette problématique grandissante, il devient pertinent d'aborder, dans le cadre d'un essai, les options disponibles pour la gestion des résidus d'algues. L'objectif général de cet essai évaluera les formes applicables de mise en valeur pour les échouages massifs de *Sargassum* dans un contexte antillais. Pour atteindre cet objectif, quatre jalons permettent la progression. Initialement, le premier objectif, un survol du phénomène, de son origine ainsi que les impacts sur les populations et le milieu est effectué. Par la suite, une cueillette d'information sur les méthodes de gestion résiduelles employées lors d'autres situations d'échouages à travers le monde permet d'identifier des solutions envisageables. Ensuite, l'acquisition de connaissances sur les techniques de gestion de putrescibles similaires et les techniques actuellement disponibles pour les *Sargassum* permet d'obtenir de l'information en vue de la prochaine étape. Finalement, le quatrième jalon, une analyse multicritère évalue l'applicabilité selon la hiérarchie des 3RV-E des techniques précédemment identifiées dans un contexte antillais.

Dans le but d'obtenir l'information nécessaire à l'atteinte de ces objectifs, une méthodologie de recherche est utilisée. Initialement, une consultation de la littérature large public (journaux, site web) permet d'obtenir un aperçu préliminaire de la problématique. Par la suite, la recherche est approfondie par la consultation d'articles scientifiques et de monographies spécialisés. Afin d'assurer la qualité et la validité de l'information consultée, une sélection rigoureuse des sources est effectuée. En effet, une attention particulière est portée à la provenance et la crédibilité de la source, à la date de publication de celle-ci et à la concordance avec d'autres sources reconnues. De plus, dans un souci de rigueur scientifique, l'utilisation de littérature révisée par les pairs est préconisée.

Pour bien couvrir les aspects soulevés, cet essai est donc divisé en cinq chapitres. Le premier est une mise en contexte de la problématique de l'échouage antillais des algues de type *Sargassum* en s'attardant sur l'ampleur du phénomène et les impacts en découlant. Le second chapitre présente la situation économique de certains pays des Antilles et leur capacité de gestion des matières résiduelles autant technologiquement que techniquement. Le troisième chapitre présente des situations d'échouages ailleurs dans le monde pour d'autres types d'algues ainsi que les moyens mis en place pour la gestion des nuisances de celles-ci. Le quatrième chapitre aborde les options de valorisation pour des putrescibles similaires et les options actuellement existantes pour les *Sargassum*. Le cinquième chapitre analyse la possibilité de mise en place des options de valorisation identifiées en tenant compte de la situation des Antilles, de la hiérarchisation des 3RV-E et de l'efficacité relative. Finalement, le sixième chapitre présente des recommandations et des méthodes à privilégier, selon les contextes.

1. MISE EN CONTEXTE DE LA PROBLÉMATIQUE

Afin de bien comprendre l'étendue de la problématique d'échouage d'algues sur les plages des Antilles, une identification de l'espèce en cause, de l'étendue du phénomène et son origine, des facteurs qui ont provoqué la prolifération et des impacts sur les populations et l'économie des régions touchées sont nécessaires.

1.1 L'algue *Sargassum*

Les études scientifiques sur les types d'algues présentes dans les échouages sur les plages identifient celles-ci comme étant de la famille des *Sargassum*. Le nom de cette famille provient de la mer des Sargasses, un nom donné par Christophe Colomb lors de son premier voyage du 1492. En effet, avant son arrivée en Amérique, il rapporte dans son journal de bord la traversée d'un énorme radeau d'algues qu'il décrit comme du varech (*sargazo* en espagnol) (Borde, 2018; Gower et King, 2019; Prosek, 2019).

Cette famille d'algues pélagiques est caractérisée par la présence d'aérocystes sur les tiges. Ces petites vésicules sphériques orientent leur feuillage vers le haut lorsqu'elles sont fixées sur les fonds marins et permettent de flotter lorsqu'elles se détachent de ces fonds. De plus, la présence d'épines sur les tiges ou les feuilles permettent l'accrochage avec d'autres individus et l'assemblage en radeaux flottants (Camacho, Mattio, Draisma, Fredericq et Diaz-Pulido, 2015; Florenne, Guerber et Colas-Belcour, 2016; Schell, Goodwin et Siuda, 2015). L'espèce est connue comme se reproduisant par fragmentation des tiges (Huffard, von Thun, Sherman, Sealey et Smith, 2014).

La littérature rapporte l'existence de 336 sous-espèces, variant de formes et de tailles, et peuplant la plupart des océans de la planète, dont 21 uniquement dans le bassin caraïbéen. Selon plusieurs spécialistes, dont Camacho (2015) et Schell (2015), leur identification peut s'avérer compliquée, car leur physionomie varie grandement au sein d'une même sous-espèce, comme indiqué à la figure 1.1.

Traditionnellement, la taxinomie se base sur des critères physionomiques, mais des études plus récentes optent pour une approche basée sur la génétique. Ainsi, plusieurs sous-espèces sont regroupées sous un même nom. Dans le cas des Antilles, deux sous-espèces principales sont identifiées soit *Sargassum natans* et *Sargassum fluitans*. Ces deux variétés sont naturellement présentes dans le sud-ouest de l'océan Atlantique Nord (Gower et King, 2019; Huffard et al., 2014; Schell et al., 2015; M. Wang et al., 2019).

Lorsque plusieurs sous-espèces entremêlées conduisent à des expérimentations, elles peuvent porter l'appellation *Sargassum spp.*, cette dernière abréviation du latin *species plurimae* désigne plusieurs espèces non identifiées lors des mesures.



Figure 1.1 Physionomie comparée entre le *Sargassum natans* et le *Sargassum fluitans*

(tiré de : Schell et al., 2015, p. 8)

De façon générale, les deux sous-espèces identifiées présentent des branches lisses de 11,5 mm à 11,8 mm de diamètre, avec quelques épines et ramifiées plusieurs fois présentant des vésicules sphériques (5 mm de diamètre). Leurs feuilles sont plates et linéaires avec un rebord en dents de scie, ainsi que légèrement plus longues pour le *Sargassum natans* (100 mm par 14 mm) que pour le *Sargassum fluitans* (60 mm par 38 mm) (Camacho et al., 2015; Schell et al., 2015).

1.2 La problématique

L'histoire rapporte quelques épisodes de forte présence de sargasses dans les eaux caraïbéennes, bien que l'ampleur et la durée ont été limitées dans ces cas (Huffard et al., 2014). Généralement, ces épisodes ne durent que quelques mois. Cependant depuis 2011, une constante progression des volumes d'échouages mène à des situations intolérables, sauf durant la pause de 2013 (figure 1.2).

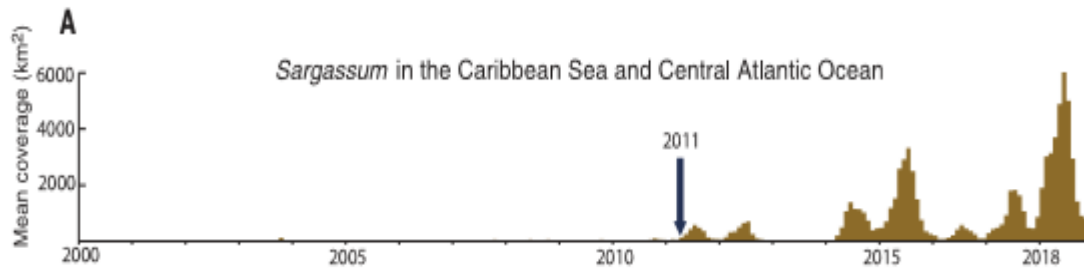


Figure 1.2 Évolution des surfaces dérivantes de sargasses entre 2000 et 2018

(tiré de : M. Wang et al., 2019, p. 2)

La période d'échouage s'étend de mai à septembre (Florenne et al., 2016; Gower et King, 2019; M. Wang et al., 2019). Cependant, l'ampleur des échouages dépend de plusieurs facteurs qui jouent un rôle dans la dispersion et l'amplification de du phénomène.

1.2.1 Le cycle migratoire et la grande ceinture atlantique des sargasses

Il existe, au sein même de l'océan Atlantique, une multitude de courants jouant un rôle de vecteur dans la migration de plusieurs espèces et influençant les milieux qu'ils croisent. Les sargasses sont une des espèces qui profitent naturellement de ces courants lors de son développement et qui les utilisent pour sa migration, des eaux chaudes de l'Atlantique Sud vers les Bermudes lors de la saison estivale et des îles Canaries vers les îles du Cap-Vert en hiver (Huffard et al., 2014).

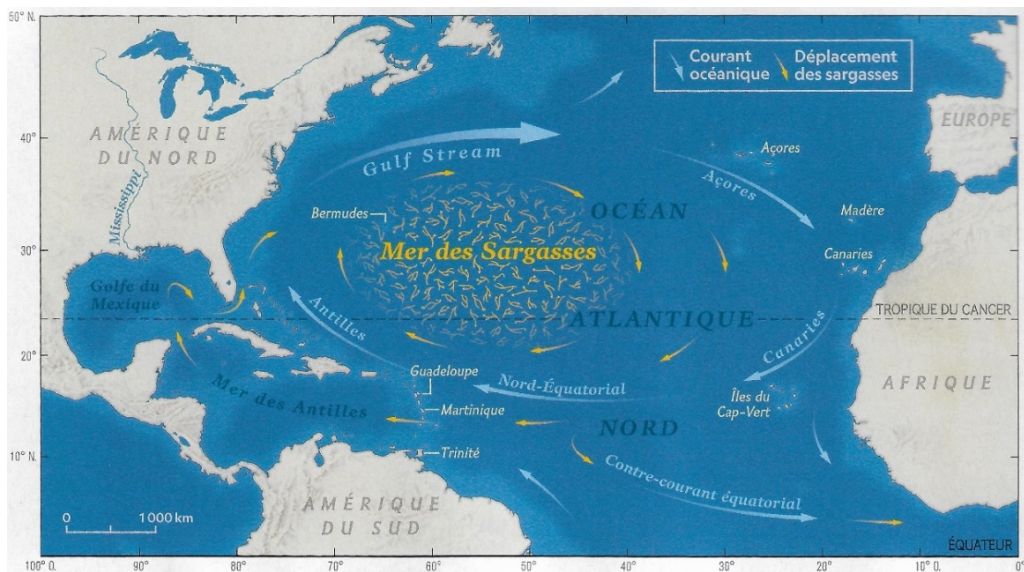


Figure 1.3 Carte des mouvements de sargasses (tiré de : Prosek, 2019, p. 140)

Ce trajet annuel est la combinaison d'une migration au sein du Gulf Stream, du courant des Açores, du courant des Canaries, du courant Nord-Équatorial et du courant des Antilles (Putman et al., 2018). Ce grand circuit, illustré à la figure 1.3, est désigné comme la grande ceinture atlantique des sargasses (*Great Atlantic Sargassum Belt* (GASB)) qui emprunte la partie inférieure de la gyre de l'Atlantique vers l'ouest (Huffard et al., 2014; Prosek, 2019).

Depuis les premières arrivées massives en 2011, plusieurs groupes de recherches entreprennent des études afin de mieux comprendre les facteurs qui influencent la prolifération massive et de mieux comprendre les trajets de migration afin de prévoir les arrivées sur les plages et les pays qui en subiront les impacts (Borde, 2018; Gower et King, 2019; Huffard et al., 2014; Maréchal, Hellio et Hu, 2017; Putman et al., 2018; M. Wang et al., 2019; M. Wang et Hu, 2017).

Une équipe de l'*University of South Florida* a mis au point une technique d'observation de la migration des radeaux par imagerie satellite grâce au capteur MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) (M. Wang et Hu, 2017). En effet, les sargasses comme d'autres résidus végétaux contiennent de la chlorophylle qui réfléchit les rayons infrarouges de la lumière (Gower et King, 2019).

Basée sur cette caractéristique, l'équipe a développé des logiciels d'analyse des données d'images satellite, se basant sur le taux de couverture et la réfraction lumineuse détectée, permettant de localiser les grands radeaux et de suivre la progression de la migration. De plus, ce système permet, dès le mois de février, de prévoir les quantités attendues entre mai et août avec une précision de près de 80 % et ainsi permettre aux communautés de préparer les ressources (M. Wang et al., 2019; M. Wang et Hu, 2017).

Les images satellites mettent en lumière que la migration débute près des côtes africaines, puis traverse l'Atlantique grâce au courant Nord-Équatorial. Or, à l'approche des côtes de la Martinique et de la Guadeloupe, le courant Nord-Équatorial se divise et pénètre dans la mer des Antilles en cheminant vers le golfe du Mexique et les côtes de la Floride. Cette longue migration provoque la présence d'une enfilade de radeaux de sargasses qui s'étend sur plusieurs milliers de kilomètres que les scientifiques nomment la GASB (M. Wang et al., 2019).

En s'attardant annuellement sur un mois de référence, comme illustré à la figure 1.4, il apparaît une franche augmentation des volumes détectés par satellite (M. Wang et al., 2019). En effet, le mois de juin 2018 a connu un pic historique de présence avec un volume détecté avoisinant les 20 millions de tonnes pour une surface de 8 850 kilomètres carrés (M. Wang et al., 2019). Les images satellites montrent aussi que les côtes du Brésil et de l'Afrique subissent des échouages, bien que de moins importance (Gower et King, 2019; Huffard et al., 2014; M. Wang et al., 2019).

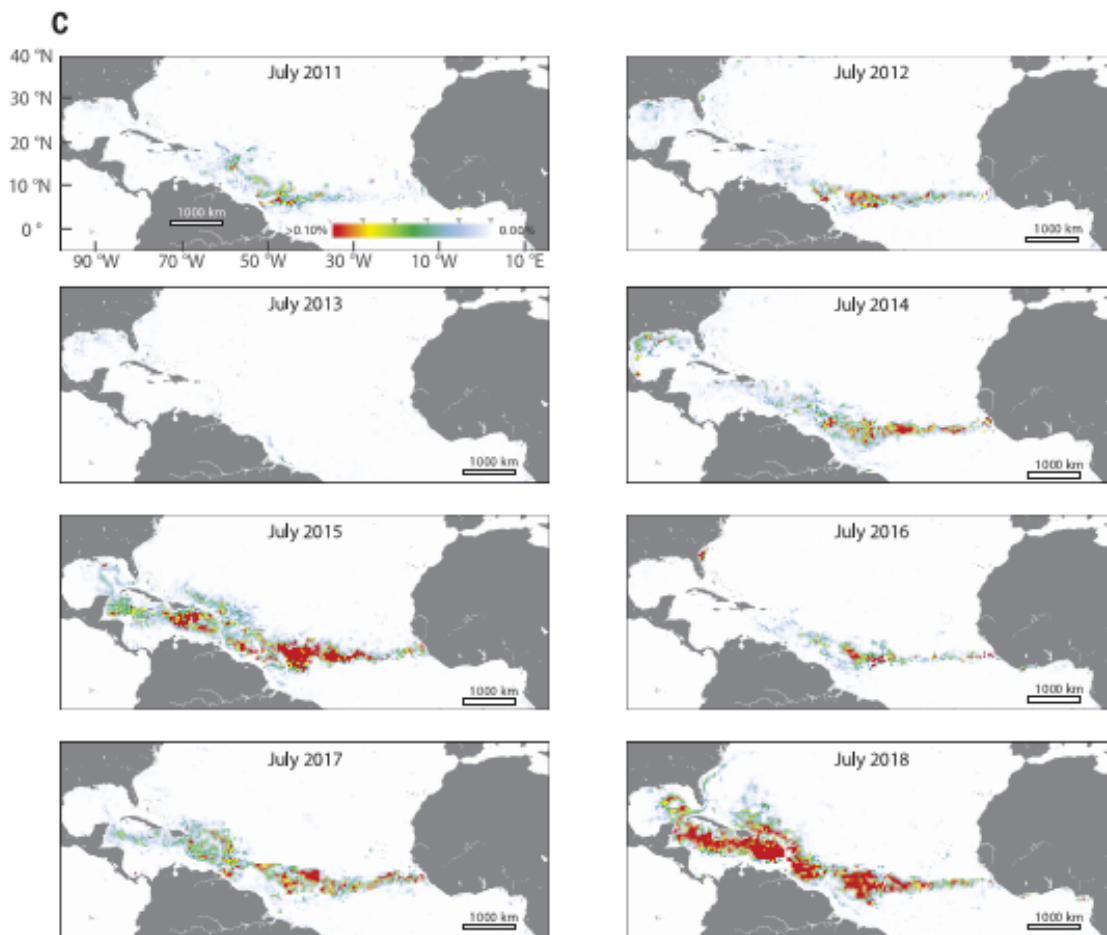


Figure 1.4 Évolution de la GASB entre 2000 et 2018 (tiré de : M. Wang et al., 2019, p. 2)

1.2.2. Les causes de la prolifération

L'approche par imagerie satellite met en lumière que la phase de prolifération s'accélère après la traversée transocéanique entre le golfe de Guinée et les côtes du Brésil (Putman et al., 2018). À cette étape, les sargasses croisent les eaux de la décharge du fleuve Amazone (Gower et King, 2019; M. Wang et al., 2019). Le fleuve apporte des eaux douces enrichies de nutriments par le ruissèlement des terres agricoles traversées par les affluents du fleuve. De plus, ce point de contact entre les eaux terrestres et océaniques est soumis à de forts courants de surface et à des tempêtes, favorisant la fragmentation des plants et leur dispersion vers les Antilles et le golfe du Mexique.

Bien que l'hypothèse de la contribution des eaux amazonienne est clairement reconnue, certains soulèvent qu'une cause secondaire, comme la migration aérienne des poussières de sable du Sahara, pourrait contribuer à la prolifération massive. D'autres groupes de chercheurs et des groupes environnementaux soulèvent aussi qu'en présence du réchauffement climatique et de l'acidification des océans, la prolifération est amplifiée (Huffard et al., 2014). Ces hypothèses laissent donc place à des questionnements sur la part réelle des différentes causes de prolifération massive et sur la possibilité de facteurs concomitants (M. Wang et al., 2019).

1.3 Les impacts pour les populations

Afin de bien comprendre les impacts de la problématique d'échouage à l'échelle des populations côtières, l'évaluation des effets sur la santé humaine et animale, sur l'environnement et les espèces côtières ainsi que sur les activités économiques et les couts de la gestion locale, est essentielle.



Figure 1.5 Carte des îles affectées par des échouages massifs de *Sargassum*

(tiré de : Florenne et al., 2016, p. 47)

La figure 1.5 présente les îles touchées par la problématique d'échouage. Plusieurs pays antillais sont des possessions hors territoires de pays riches comme les États-Unis, la France, le Venezuela ou le Royaume-Uni. Ces dernières profitent donc de l'expertise et des ressources de ces pays. Cependant, dans le cas des petits états insulaires, comme Trinité-et-Tobago ou la Barbade, les ressources économiques et technologiques sont limitées puisque le pays ne possède pas une forte économie.

1.3.1 Les effets sur la santé humaine

Un des premiers effets appréciables pour les populations est l'effet sur la santé. En effet, lorsqu'elles quittent l'eau et sont entassées, comme dans le cas d'un échouage ou du dépôt dans un site d'enfouissement, les sargasses amorcent un processus de putréfaction anaérobie émettant du sulfure d'hydrogène (H_2S) et de l'ammoniac (NH_3) (Préfecture de la Martinique, 2018). Dans le cas des deux gaz, l'exposition de quelques jours à plusieurs semaines ainsi que le risque de forte concentration provenant d'un échouage ou d'une décharge d'algues déterminent l'ampleur des risques d'effets sur la santé.

Dans le cas des touristes, l'exposition est faible puisque la durée est courte et la concentration plutôt faible. Pour les habitants côtiers ou les employés ramasseurs, l'exposition est plus forte due au contact à répétition, mais à de faibles concentrations. La véritable problématique apparaît pour les habitants situés à proximité des zones de dépôts puisqu'ils sont exposés sur une longue période et à de fortes concentrations.

L'intoxication aiguë par le sulfure d'hydrogène provoque des irritations des muqueuses oculaires et respiratoires, des effets au système nerveux central dont les nausées et des céphalées, des troubles respiratoires jusqu'à l'œdème pulmonaire et l'arythmie cardiaque. Le tableau 1.1 présente les principaux effets rapportés à la suite d'une exposition unique au H_2S (Institut national de recherche scientifique (INRS), 2013; Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), 1997; Sevndsen, 2001).

Tableau 1.1 Signes cliniques du H₂S selon le niveau d'exposition

(compilation d'après : Institut national de recherche scientifique (INRS), 2013; Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), 1997; Sevndsen, 2001)

Dose (ppm)	Effets
0,001 à 0,13	Seuil olfactif (inconfort olfactif)
5	Faible irritation oculaire
50 à 100	Paralysie réversible du nerf olfactif (perte de la détection par l'odeur)
100	Irritation des muqueuses oculaire (conjonctivite) et respiratoire (rhinite et possible œdème pulmonaire retardé, toux), céphalée, nausée
300	Œdème pulmonaire
500	Perte de conscience avec cyanose et fibrillation cardiaque
1000	Décès en quelques minutes

Lorsque l'exposition se poursuit sur une période plus longue, les effets sont amplifiés par l'apparition de céphalées chroniques, de la fatigue, de l'insomnie, de fortes irritations oculaires, des lésions de la cornée, des troubles digestifs et des troubles respiratoires comme des bronchites irritatives (INRS, 2013; Sevndsen, 2001).

L'intoxication aiguë par l'ammoniac se traduit principalement par des effets pulmonaires (bronchite, irritation) s'intensifiant en présence de concentrations plus fortes. De plus, l'exposition chronique provoque une amplification des effets respiratoires aigus, pouvant causer des lésions permanentes (Goldfrank et Flomenbaum, 2006; Klaassen, Casarett et Doull, 2013).

Tableau 1.2 Signes cliniques du NH₃ en fonction du niveau d'exposition

(compilation d'après : Goldfrank et Flomenbaum, 2006; Klaassen et al., 2013)

Dose (ppm)	Effets
17	Seuil olfactif (inconfort olfactif)
32 à 50	Faible irritation nasale et de la gorge
135	Irritation des yeux avec larmoiement, du nez et de la gorge
500	Effet pulmonaire (œdème)

Afin de suivre l'évolution des niveaux des deux types de gaz, les autorités martiniquaises et guadeloupéennes ont mis en place un système de veille évaluant les niveaux grâce à plusieurs détecteurs répartis sur l'île (Préfecture de la Guadeloupe, 2018; Préfecture de la Martinique, 2018). À ce jour, en Martinique, des niveaux côtiers entre 0 et 13 ppm de H₂S ont été rapportés, bien que normalement, les niveaux ne dépassent pas les 1 ppm (Préfecture de la Martinique, 2018). La situation est similaire en Guadeloupe, où les niveaux de NH₃ et H₂S sont généralement situés sous les 1 ppm (Préfecture de la Guadeloupe, 2018).

1.3.2 Les effets environnementaux

Le deuxième effet appréciable pour les populations est l'effet sur les écosystèmes et l'environnement.

Dans un contexte normal, la présence de sargasse a des effets positifs pour les écosystèmes. En effet, naturellement, les radeaux de sargasses sont l'habitat de plusieurs espèces marines de poissons et de petits crustacés ainsi que des tortues qui les fréquentent pour se nourrir (Gower et King, 2019; Huffard et al., 2014). La prolifération massive des sargasses ouvre la porte à une augmentation des habitats disponibles, une situation encourageante en contexte de disparition des écosystèmes marins. Dans un contexte normal, les échouages d'algues permettent d'enrichir les sols des dunes et d'alimenter les écosystèmes côtiers en nutriments (Borde, 2018).

Cependant, en raison de la quantité, les échouages massifs représentent maintenant un danger pour ces mêmes écosystèmes côtiers, risquant de limiter l'accès aux plages pour les espèces pondueuses comme les tortues. En effet, les tortues n'étant pas capables d'enjamber les talus d'algues pour rejoindre les sites de nidification et y déposer leurs œufs, la reproduction de l'espèce devient menacée. De plus, le retrait des algues sur les plages s'effectue souvent avec des engins motorisés comme des tracteurs et des camions, ce qui ajoute un risque de compactage des sols et la destruction de sites de nidification de certaines espèces, dont les tortues (Maréchal et al., 2017).

Les effets de la prolifération massive ne se limitent pas aux rivages, ils provoquent aussi des effets sur les espèces qui peuplent les eaux côtières. Les études ont démontré, qu'en présence d'une arrivée massive de sargasse, les eaux côtières subissent une diminution de la luminosité en profondeur, une anoxie et une variation des paramètres chimiques de la qualité de l'eau notamment un changement dans le pH, une hausse de la concentration en azote et en phosphate (Maréchal et al., 2017; van Tussenbroek et al., 2017). Ces modifications provoquent souvent une zone eutrophiée. La figure 1.6 présente les principaux effets sur les espèces qui peuplent les côtes.

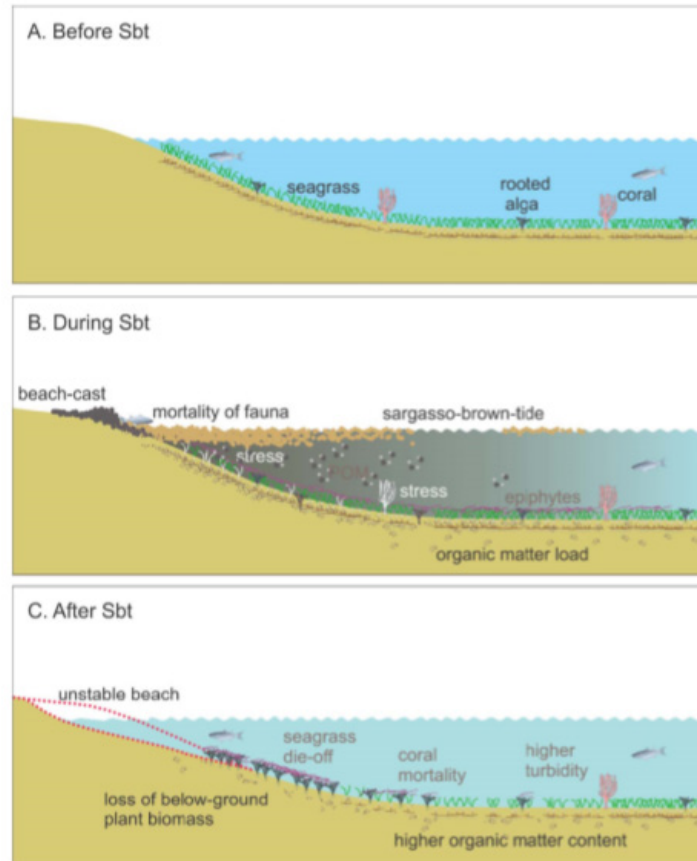


Figure 1.6 Étapes dans la dégradation de la végétation aquatique à la suite d'un épisode de *Sargassum*
 (tiré de : van Tussenbroek et al., 2017, p. 280)

Selon van Tussenbroek (2017), cette eutrophisation est très apparente dans les colonies de *Thalassia testudinum*, une algue rhizomique peuplant les berges de baies caraïbéennes et constituant une zone pour le frai des poissons. En effet, depuis le début des échouages massifs, il dénote une perte de 62 à 99,5 % de la biomasse souvent accompagnée par une forte mortalité des coraux côtiers. La présence des algues côtières joue aussi un rôle dans la filtration des eaux par la capture des nutriments et la stabilisation des sols par le réseau racinaire. Cette perte de biodiversité pourrait prendre plusieurs années à se régénérer ou disparaître, si les échouages se poursuivent (Maréchal et al., 2017; van Tussenbroek et al., 2017).

1.3.3 Les effets économiques

Le troisième effet appréciable pour les populations est l'effet économique et les dépenses occasionnées par les échouages (Putman et al., 2018). En effet, le premier constat est que le ramassage implique des coûts nouveaux pour les communautés locales ou les gouvernements centraux. Du matériel comme de l'équipement mécanique ainsi que du personnel est nécessaire au ramassage, au transport et à la gestion résiduelle supplémentaire. Dans son analyse de 2017, van Tussenbroek évalue la situation du Mexique en 2015. En présence de grands volumes et d'arrivée rapide dans la période de mai à août, les autorités mexicaines ont fait le choix de prioriser les zones d'activités touristiques, soit 10 % de la côte atlantique, car il s'agit d'un moteur économique important. Pour cette seule année 2015, en période maximale, les autorités rapportent un taux d'échouage moyen mensuel de 9 726 m² par kilomètre de côte. L'embauche de 4 400 employés a été nécessaire pour pallier la demande.

D'autre part, les coûts pour le ramassage varient énormément selon la configuration de la côte et les méthodes employées. Les coûts oscillent entre de 10 euros (€) par m³ pour le ramassage par ratisseur sur une plage jusqu'à 40 €/m³ pour le ramassage en zone infralittorale et les coûts pour le transport se situent entre 5 à 10 €/m³ selon les distances jusqu'à la zone de dépôt. Selon une estimation dans cette étude, les coûts totaux en 2015 pour un volume de 700 000 m³ de sargasses à ramasser pour l'ensemble des îles des Antilles françaises, sont de 3 à 16 M€/an. (Florenne, 2016)

Comme second constat, la présence d'échouage sur les plages provoque une diminution du tourisme et des activités touristiques parallèles comme la plongée sous-marine et les activités aquatiques. L'analyse de 2016 par Florenne évalue la situation des Antilles françaises notamment la Martinique et la Guadeloupe. Il soulève comme premier impact une augmentation des coûts directs pour les entreprises, les hôtels et les restaurants choisissant de faire le ramassage par eux-mêmes dû à un retard des autorités dans leur secteur ou qu'ils ne sont pas dans les zones prioritaires. Il soulève aussi comme impact la diminution des chiffres d'affaires due à la diminution du volume de clientèle.

L'étude souligne aussi que ces impacts financiers sont cependant difficiles à chiffrer, car ils dépendent de plusieurs facteurs et qu'ils sont plus subjectifs dans des milieux moins urbains. L'étude avance une diminution de 40 % du chiffre d'affaires pour le secteur de la restauration et l'hébergement (hôtels, gîtes et résidences) évaluable en une perte de 4,6 M€ pour un groupe de 148 entreprises uniquement pour le premier semestre de 2015 (Florenne, 2016).

Finalement, le troisième constat est que les activités de subsistance locale liées à la mer comme la pêche ou le transport maritime sont aussi affectés en période d'échouage massif et par les conséquences subséquentes aux écosystèmes. Dans son analyse de 2016, Florenne souligne que les pêcheurs locaux doivent faire face à une migration des bancs de poissons loin des zones affectées, à l'empêchement de sortie en mer en présence de grandes quantités de radeaux et à de la détérioration du matériel dû à des blocages par les algues. L'étude avance une diminution de 50 % du chiffre d'affaires pour le premier semestre de 2015 et la perte de 22 journées de pêche (Florenne, 2016).

1.4 La gestion actuelle de la problématique

En présence de l'arrivée inattendue des premiers radeaux en 2011, les pays antillais ont dû entreprendre rapidement des mesures pour la gestion de grands volumes d'algues échouées. Les méthodes n'ayant pas évolué depuis, les volumes récupérés sont déposés en bordure des plages dans les zones moins touristiques, ou dans des sites dédiés en attente que les volumes sèchent ou se dégradent pour les autres zones. Malgré quelques efforts, les communautés n'ont pas optimisé leur gestion.

Dans son analyse de 2016, Florenne souligne que les seules options de valorisation considérées actuellement sont l'épandage agricole et le compostage. En effet, pour plusieurs autres pays, il s'agit aussi des méthodes employées (Caribbean alliance for sustainable tourism, 2015; Sembera, Meier et Waliczek, 2018).

2. PORTRAIT SOCIOÉCONOMIQUE DES ANTILLES

Dans l'optique de l'évaluation future des options de valorisation, il est nécessaire de connaître le contexte socioéconomique des régions affectées et d'identifier les moyens déjà présents dans la gestion des matières résiduelles locales afin de pouvoir juger de la possibilité d'utilisation des options de valorisation.

Quelques pays représentatifs ont été identifiés, notamment les deux départements français Martinique et Guadeloupe ainsi que deux pays insulaires soit la Barbade et la République de Trinité-et-Tobago. Le choix de ces pays est basé sur la présence d'échouages massifs rapportés dans les médias et dans la littérature.

Selon une étude de Maréchal (2017), la majorité des îles ne détiennent pas la capacité technique ou les installations pour pouvoir gérer les grands volumes d'algues échouées. Il rapporte aussi que les échouages successifs entre 2011 et 2016 ont déjà surchargé les installations existantes de gestion des résidus.

Ce choix de deux pays sous protectorat français et deux pays indépendants permet de bien observer les différences dans les ressources techniques et financières disponibles. De plus, dans le cas de la République de Trinité-et-Tobago, le pays est connu comme produisant des hydrocarbures et les employant dans sa production électrique.

2.1 Martinique

La Martinique est un département français hors territoire d'une superficie totale de 1 128 km². Selon les statistiques de 2018, la population est de 368 600 habitants pour un produit intérieur brut (PIB) annuel de 8,6 milliards d'euros (G €) (Institut d'émissions des départements d'outre-mer [IEDOM], 2019b).

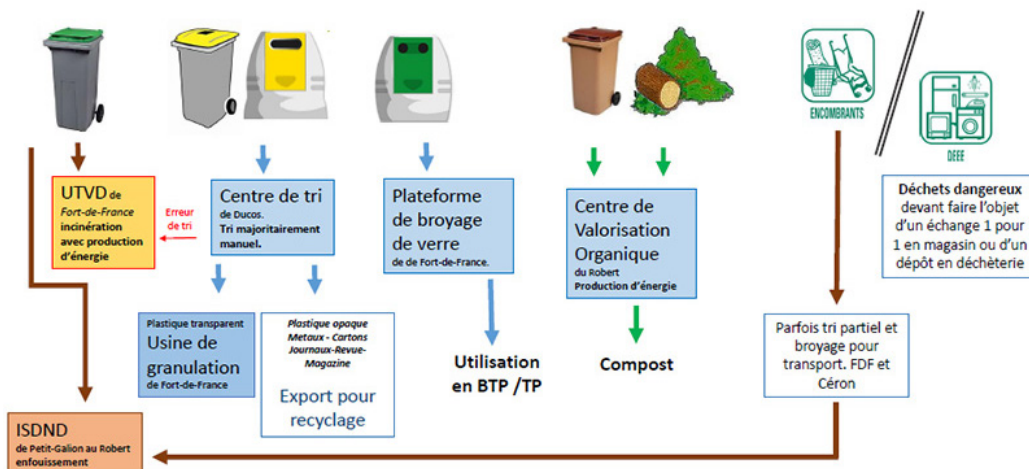


Figure 2.1 Gestion des matières résiduelles en Martinique (tiré de : ADEME, 2018)

La gestion des déchets en Martinique est assurée dans chacune des zones de l'île par les trois communautés d'agglomération responsables des collectes au porte-à-porte. Cinq types de collectes sont en place : les ordures ménagères, le regroupement de carton et de verre, les biodéchets orientés vers le compostage, les déchets encombrants et les déchets verts, tel que présenté à la figure 2.1 (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie [ADEME], 2018).

Selon le site de l'ADEME (2018), la Martinique produit annuellement 280 000 tonnes de déchets, excluant les résidus issus du secteur bâtiments et travaux publics. Cela représente près de 650 kg par habitant, dont 325 kg uniquement en ordures ménagères. La figure 2.2 montre que 40 % des déchets (112 000 tonnes) sont incinérés à l'usine de traitement et de valorisation des déchets (UTVD) de Fort-de-France et 31 % des déchets (86 800 tonnes) rejoignent le site d'enfouissement de Petit-Galion. Selon l'entreprise qui gère l'UTVD de Fort-de-France, l'incinération des déchets permet une production de 400 kWh par tonne incinérée et il s'agit de l'unique incinérateur de l'île (Communauté d'agglomération du centre de la Martinique [CACEM], 2013).

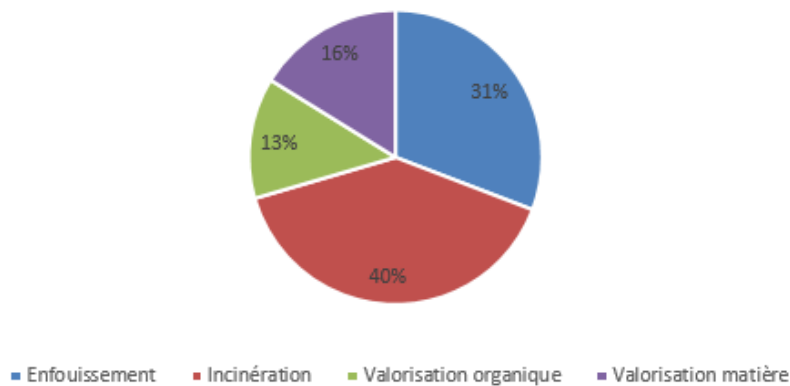


Figure 2.2 Répartition des méthodes d'élimination des déchets en Martinique (tiré de : ADEME, 2018)

La compagnie Énergie de France à travers sa division martiniquaise est responsable de la gestion de l'énergie électrique en Martinique. Elle rapporte que 94,7 % de la production électrique de la Martinique provient de l'énergie thermique par combustion, comme le présente la figure 2.3 (Énergie de France-Martinique, 2016).

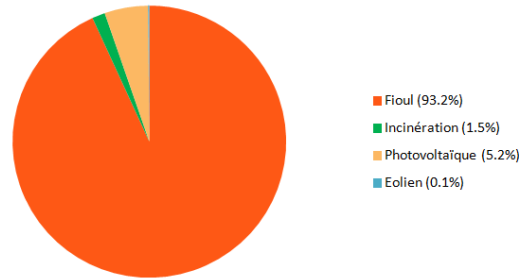


Figure 2.3 Répartition des types d'énergie en Martinique (tiré de : Énergie de France-Martinique, 2016)

2.2 Guadeloupe

La Guadeloupe est un département français hors territoire d'une superficie totale de 1 628 km². Selon les statistiques de 2018, la population est de 391 000 habitants pour un PIB annuel de 9,1 milliards d'euros (IEDOM, 2019a).

La gestion des déchets en Guadeloupe est assurée par plusieurs petites entreprises qui opèrent le site d'enfouissement, des compagnies de recyclage et de compostage, l'entreprise de valorisation. La vision d'ensemble est chapeautée par l'Observatoire des déchets de la Guadeloupe (Observatoire des déchets de la Guadeloupe, 2016). Selon cet organisme, en 2016, 367 868 tonnes de déchets ont été traitées sur le territoire guadeloupéen dont 247 043 tonnes par les sites d'enfouissement, tel que présenté à la figure 2.4 (Observatoire des déchets de la Guadeloupe, 2019).

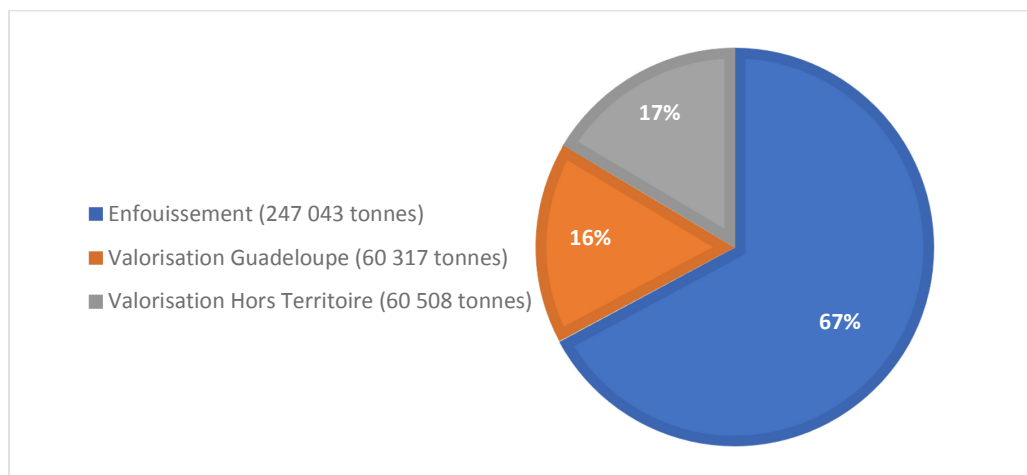


Figure 2.4 Répartition des méthodes d'élimination des déchets en Guadeloupe
(tiré de : Observatoire des déchets de la Guadeloupe, 2016)

La gestion énergétique sur le territoire de la Guadeloupe est assurée par Énergie de France à travers sa division guadeloupéenne. Selon les données de cette entreprise, la majorité de la demande énergétique de l'île est assurée par l'énergie thermique. L'île possède trois centrales au diesel pour une puissance totale de 288,5 MW et des turbines à combustion de bagasse/charbon pour une puissance totale de 100 MW (Énergie de France-Guadeloupe, 2016).

L'énergie solaire, l'hydraulique et l'éolien complètent la demande, mais en faible proportion. La figure 2.5 présente les proportions occupées par chacune des énergies dans la production électrique guadeloupéenne.

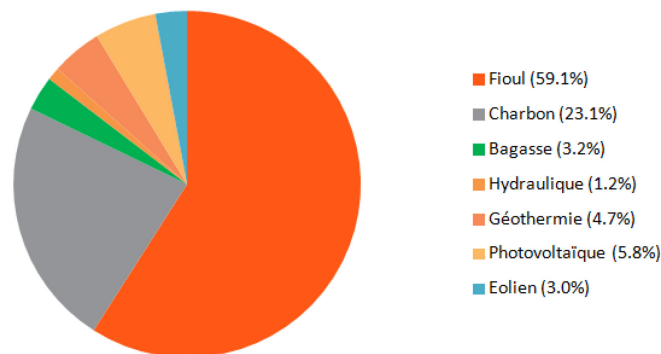


Figure 2.5 Répartition des types d'énergie en Guadeloupe (tiré de : Énergie de France-Guadeloupe, 2016)

2.3 Barbade

La Barbade est un pays d'une superficie totale de 430 km². Selon les statistiques de 2018, la population est de 286 641 habitants pour un PIB annuel de 4,67 milliards de dollar américain (La Banque Mondiale, 2019a).

La gestion des déchets à la Barbade est menée par l'état à travers le programme gouvernemental *Solid Waste Management program* (SWMP). L'ensemble des déchets collectés par les collectes municipales est dirigé vers le *Sustainable Barbados Recycling Centre* (SBRC) qui effectue un tri pour extraire les résidus valorisables de ceux destinés à l'enfouissement au site de *Mangrove Sanitary landfill*. Selon les données de cet organisme, les Barbadiens rejettent entre 900 et 1 200 tonnes/jour de déchets. À la suite du tri au SBRC, ce volume est réduit de 670 tonnes pour n'enfouir que 300 tonnes quotidiennement (Solid Waste Management program [SWMP], 2015). Les résidus organiques sont habituellement destinés à des fins de compostage pour l'agriculture locale.

La gestion énergétique à la Barbade est gérée par une compagnie unique, la *Barbados Light and Power company*, qui exploite des centrales thermiques (Gouvernement of Barbados, 2017). Selon un rapport du ministère de l'Énergie de la Barbade, l'énergie thermique représente 99,4 % de la fabrication électrique du pays entre 2006 et 2015, tel que présenté à la figure 2.6.

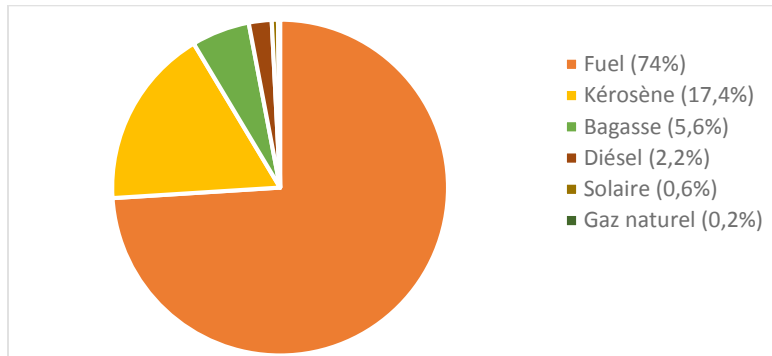


Figure 2.6 Répartition des types d'énergie à la Barbade (2006 à 2015) (tiré de : Gouvernement of Barbados, 2017)

2.4 Trinité-et-Tobago

La République de Trinité-et-Tobago est un pays constitué de deux îles pour une superficie totale de 5 128 km². Selon les statistiques de 2018, la population est de 1 389 858 habitants pour un PIB annuel de 23,41 milliards de dollar américain (La Banque Mondiale, 2019b).

La gestion des déchets est assurée par deux compagnies privées qui exploitent les quatre sites d'enfouissement et le centre de recyclage. Selon les autorités, les sites d'enfouissement acceptent quotidiennement 2 000 tonnes de résidus pour les quatre sites réunis, tel que présenté à la figure 2.7.

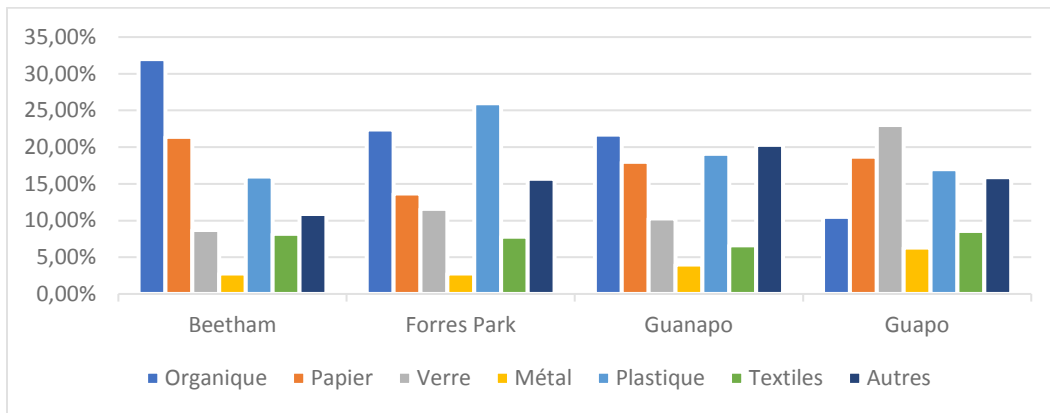


Figure 2.7 Répartition des types de résidus dans les sites d'enfouissement en 2010

(inspiré de : Government of the Republic of Trinidad and Tobago, 2015, p. 1)

À la suite d'une analyse des types de résidus acceptés par les sites d'enfouissement en 2010, le gouvernement central de la république a constaté des lacunes dans la gestion. Ainsi, en 2014, il a décrété le *National Integrated Waste Management Policy* (NISWMP) visant à limiter l'enfouissement dans les sites et à promouvoir la réutilisation et le recyclage (Riquelme, Mendez et Smith, 2016).

À ce titre, un centre de collecte des résidus recyclables est mis en activité, bien qu'actuellement les résidus soient ensuite vendus à l'étranger par manque d'installation de traitement (Riquelme et al., 2016; Trinidad and Tobago solid waste management compagny limited [SWMCOL], 2019). À ce jour, les autorités et la compagnie responsables de la gestion des installations n'ont pas fourni un bilan statistique actualisé de la gestion des résidus suite de la mise en place du programme.

L'économie locale est principalement liée à la production d'hydrocarbures comme le pétrole et le gaz naturel. À ce titre, la *Trinidad and Tobago Electricity Commission* (T&TEC) produit et fournit l'électricité aux habitants des deux îles grâce à des turbines à gaz alimenté par la production locale et pouvant produire une puissance de 1 181MW (Trinidad and Tobago Electricity Commission, 2009).

3. SITUATIONS D'ÉCHOUAGES SIMILAIRES OU COMPARABLES

L'actuelle marée de sargasses dans les Antilles n'est pas un phénomène unique. En effet, la littérature recense d'autres échouages envahissant des plages à travers le monde. Souvent désignées par leur couleur rouge, jaune, brune ou verte, ces marées ont deux origines, soit les unicellulaires comme les dinoflagellés et les cyanobactéries ou les macroalgues comme les ulves et les sargasses.

Deux grands épisodes d'échouages massifs d'algues souillent annuellement les plages en Bretagne et en Chine. Une revue de la littérature disponible permet de décrire le phénomène et d'identifier les solutions appliquées pour la gestion des volumes traités.

3.1 La péninsule bretonne

Depuis les années 1960, les plages de la péninsule armoricaine en France se couvrent chaque année d'un immense tapis vert. Ce phénomène subit une nette amplification après les années 1970 et se poursuit encore aujourd'hui (Centre d'étude et de valorisation des algues [CEVA], 2019; Smetacek et Zingone, 2013).



Figure 3.1 Plage de Bretagne lors d'un épisode d'échouage estival (tiré de : Smetacek et Zingone, 2013, p. 85)

Selon l'Observatoire en environnement de la Bretagne, plusieurs sites, répartis dans quatre départements, subissent des échouages entre mai et aout tels qu'illustrés à la figure 3.1.

Près de 100 000 tonnes/an d'algues sont récupérées par les administrations communales (Smetacek et Zingone, 2013). En 2017, les autorités précisent que certaines plages du département de Côtes-d'Armor connaissent des échouages correspondant à une surface de 500 hectares, tel que présenté à la figure 3.2 (Observatoire de l'environnement en Bretagne, 2017).

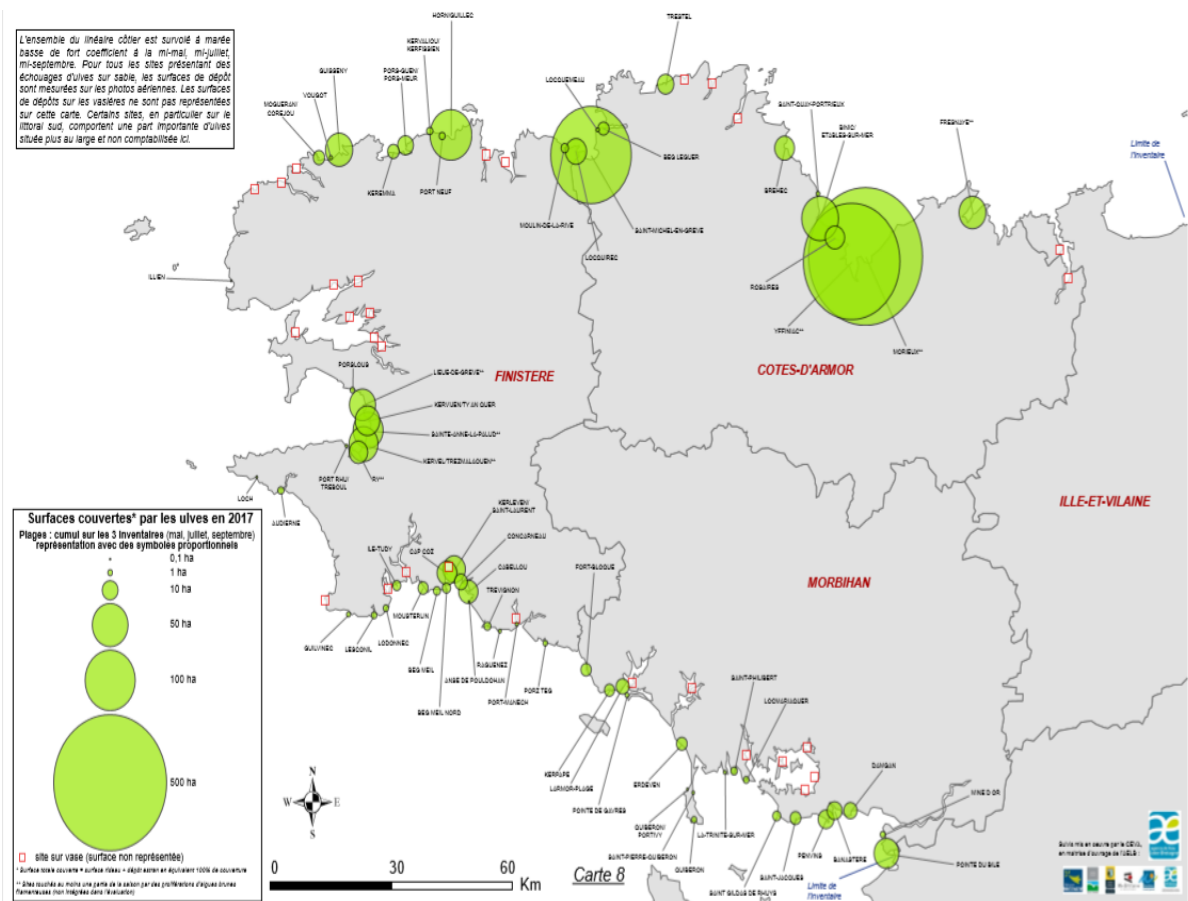


Figure 3.2 Total des surfaces couvertes par les ulves en Bretagne lors de la saison 2017

(tiré de : Observatoire de l'environnement en Bretagne, 2017)

Les scientifiques identifient *Ulva armoricana* comme l'espèce principale dans les échouages et la présence secondaire d'*Ulva rotundata* (figure 3.3). Ces espèces nitrophiles prolifèrent fortement en présence d'apport excessif de nutriments azotés (CEVA, 2019).

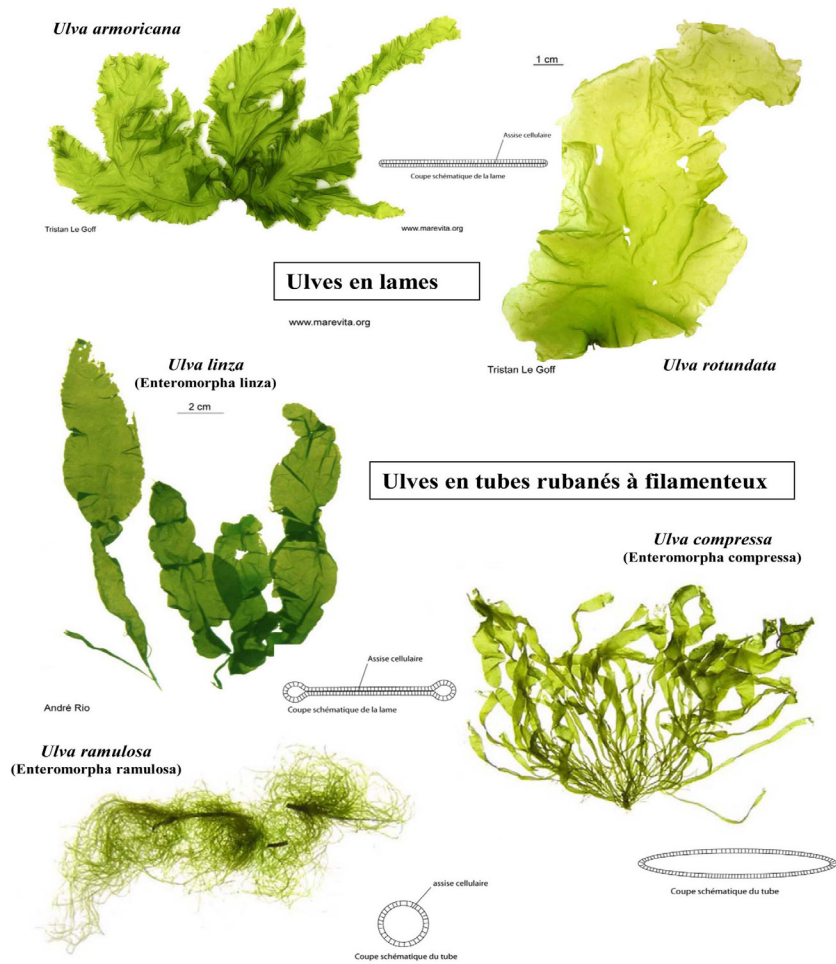


Figure 3.3 Morphologie d'algues du genre *Ulva* (tiré de : CEVA, 2019)

La région bretonne qui longe les côtes est largement investie par le secteur agricole, notamment pour de l'élevage animalier et la culture industrielle où les épandages massifs d'engrais azotés sont courants (Ministère des Solidarités et de la Santé, 2018). Les pertes d'engrais qui rejoignent les rivières puis la mer entretiennent une contamination de l'eau dénoncée auprès de l'Union européenne (UE) depuis 1991. Des teneurs en nitrates dépassant les 100 mg/L dans les rivières résultent des quantités d'azote épandues sur les sols, largement supérieures à leurs capacités d'absorption. Les rivières chargées en nitrates contribuent à l'eutrophisation des eaux côtières et empêchent la France de respecter la directive-cadre européenne sur le milieu marin (Valo, 2014).

Pour limiter cette contamination, les autorités françaises entreprennent, avec les agriculteurs de la région, de limiter l'usage d'engrais azoté et de contrôler les périodes d'application pour réduire l'impact sur les eaux du littoral (CEVA et Agrocampus Rennes, 2006; Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement en Bretagne, 2016; Smetacek et Zingone, 2013).

Simultanément, les enquêtes et menaces de condamnation par l'UE se succèdent, assorties d'amendes de plusieurs millions d'euros. Finalement, l'adoption de plans de réduction des pertes porte fruit, d'où l'abaissement en nitrates dans les eaux de surface des bassins versants en infraction sous les 50 mg/L constatés en 2010, suivi de la levée des poursuites en 2015 (Déplaudé, 2019). Malgré ces mesures et les efforts pour éradiquer l'eutrophisation, les échouages annuels perdurent.

Les échouages bretons, comme les échouages antillais, génèrent plusieurs impacts négatifs pour la population notamment une diminution du tourisme, de mauvaises odeurs, une dégradation des plages, des coûts supplémentaires pour le ramassage et des cas d'intoxications (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement en Bretagne, 2016). Les riverains rapportent aussi que l'observation d'espèces migratrices diminue en lien avec la présence d'algues décomposées dans les eaux du littoral soumises à l'eutrophisation (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement en Bretagne, 2016).

En 2010, les autorités françaises ont annoncé une enveloppe budgétaire de 134 millions d'euros sur 5 ans pour aider les communes dans la gestion de la problématique (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement en Bretagne, 2016; L'Express et Reuters, 2010).

En Bretagne, plusieurs options de valorisations ont été entreprises à travers les années, mais les principales consistent à dégager les plages et à réaliser des épandages sur les terres agricoles à titre d'engrais ou à réaliser du compostage (Florenne et al., 2016; Mairie de Sarzeau, 2019; Smetacek et Zingone, 2013). Les usages industriels, comme la production de biogaz ou de suppléments alimentaires destinés aux animaux, sont peu utilisés, car les volumes mensuels s'avèrent irréguliers et les algues partiellement décomposées sont de piètre qualité alimentaire après les échouages (Florenne et al., 2016; Smetacek et Zingone, 2013).

3.2 Qingdao en Chine

Depuis quelques années, la région de Qingdao est particulièrement affectée par l'arrivée massive de radeaux d'algues. En effet, la région reçoit des ulves depuis 2007; s'y ajoutent des sargasses depuis 2016 (Xing et al., 2017). Bien que ces types d'algues soient des espèces naturellement présentes dans les eaux de la mer Jaune, leur présence n'est habituellement pas envahissante.

La prolifération massive de ces deux types d'algues est liée à la forte présence de nutriments dans la région côtière du Jiangsu (Xing et al., 2017). Historiquement, la côte du Jiangsu exploite des fermes de culture d'algues de type *Porphyra yezoensis* pour la production de feuilles de nori ainsi que de larges élevages de crevettes et de crabes destinés à l'alimentation humaine. La migration des deux espèces envahissantes débute aux abords de la côte du Jiangsu où elles prolifèrent grandement et migrent ensuite vers la péninsule de Shangdong pour décliner à la fin de l'été, tel que présenté à la figure 3.4 (Zhang et al., 2019).

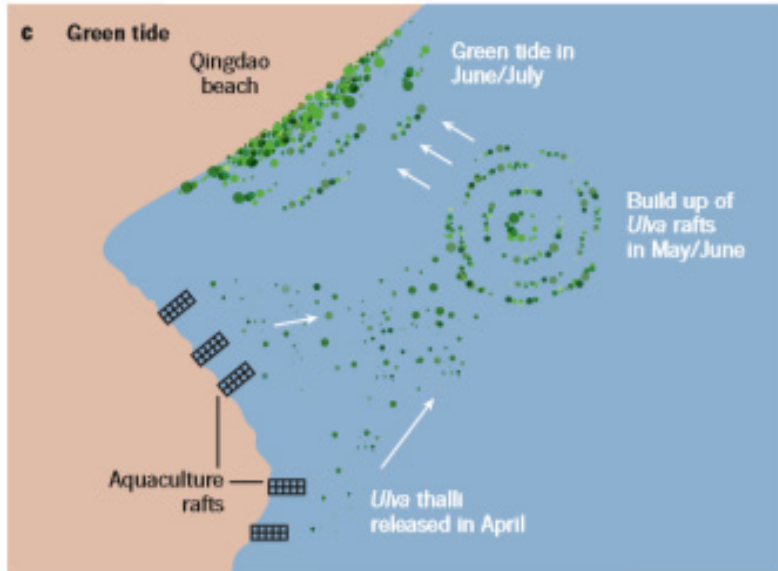


Figure 3.4 Migration des ulves vers les plages de Qingdao (tiré de : Smetacek et Zingone, 2013, p. 86)

3.2.1 Les ulves

Depuis 2007, les habitants de la côte de la mer Jaune près de Qingdao connaissent l'arrivée massive de radeaux d'algues *Ulva prolifera*, tel que présenté à la figure 3.5. Lors de ces proliférations, ces algues indigènes de la mer Jaune couvrent annuellement l'équivalent de 3 500 à 20 000 km² (Smetacek et Zingone, 2013; Zhang et al., 2019). Selon l'étude de Smetacek (2013), le taux de prolifération des ulves, entre la côte Jiangsu et la côte de Qingdao, serait de 2 000 fois le volume initial en six semaines de migration.



Figure 3.5 Côte de la ville de Qingdao lors d'un épisode d'échouage (tiré de : Smetacek et Zingone, 2013, p. 85)

Lors de Jeux olympiques de 2008, les organisateurs avaient prévu que la compétition de voiliers aurait lieu dans la baie de Qingdao. À quelques jours de celle-ci, un épisode de prolifération massive est apparu et les autorités locales ont déployé 10 000 personnes pour ramasser près de 1 million de tonnes en quelques heures. Le cout de l'opération avoisine les 30 millions de dollar américain (Jacobs, 2013; D. Liu, Keesing, Xing et Shi, 2009; Smetacek et Zingone, 2013; X. H. Wang, Li, Bao et Zhao, 2009).

Les scientifiques rapportent qu'à la suite de ces arrivées massives, les écosystèmes marins et terrestres sont perturbés notamment par la décomposition des algues qui modifie la qualité de l'eau, l'odeur, le pH avoisinant ainsi que par la diminution de l'oxygénation de l'eau de la baie, provoquant la mort d'organismes marins comme les concombres de mer et les oursins (Zhang et al., 2019). Tout comme dans les Antilles et les côtes bretonnes, des signes d'eutrophisation sont visibles (Smetacek et Zingone, 2013).

Selon l'étude de Zhang (2019), les *Ulva prolifera* sont comestibles et fréquemment vendues dans les marchés des provinces du Zhejiang et Fujian, bien que majoritairement, elles soient destinées à un usage comme fertilisant organique pour les champs ailleurs en Chine.

3.2.2 Les sargasses

Depuis décembre 2016, les riverains de Qingdao doivent aussi faire face à l'arrivée massive de *Sargassum horneri* qui s'ajoute à la présence d'ulves dans les eaux côtières, tel que présenté à la figure 3.6 (Byeon et al., 2019; Xing et al., 2017).



Figure 3.6 Échouage de sargasses sur les plages de Qingdao (tiré de : Byeon et al., 2019, p. 2)

Comme pour les radeaux antillais, les autorités chinoises et sud-coréennes ont mis en place une surveillance par satellite afin d'anticiper et préparer les ressources pour les arrivées massives (Byeon et al., 2019; Xing et al., 2017). Les images montrent qu'en date du 31 décembre 2016, les sargasses couvraient une surface de 8,8 km².

Selon l'article de Byeon (2019), les sargasses de type *Horneri* auraient un potentiel de valorisation comme nourriture, médicament et fertilisant agricole.

3.2.3 Gestion de la problématique chinoise

Actuellement, la littérature ne rapporte pas une réponse claire sur la gestion des résidus d'*Ulva prolifera* et de *Sargassum horneri* par les autorités locales. Selon toute vraisemblance, les résidus sont traités comme des déchets ultimes et envoyés vers les sites d'enfouissement. Dans le cadre de la marée de 2008, certaines sources internationales mentionnent aussi que les algues sont utilisées comme aliment pour les porcs (Yardley, 2008).

En 2009, le ministère des Sciences et Technologies de Chine met en place un projet, le *Succession of Harmful Algal Blooms in the Coastal Waters of China and the Impacts on Marine Ecosystems (CEOHAB II)*, afin d'étudier les causes de la prolifération de ces deux espèces indigènes et les méthodes pouvant limiter les marées d'algues.

Le groupe de travail confirme que la prolifération des deux espèces est liée à la culture d'algues de type *Porphyra yezoensis*, comme mentionné par plusieurs scientifiques précédemment (Byeon et al., 2019; X. Liu, Wang et Zhang, 2016; Zhou, Liu, Anderson et Valiela, 2015). Malgré cette conclusion, les autorités peinent à mettre en place des mesures pour limiter et contrôler les émissions des fermes d'algues. Cette réticence s'explique par la rentabilité des installations par rapport aux coûts du ramassage (Jing, 2013).

4. OPTIONS DE VALORISATION POUR LES PUTRESCIBLES SIMILAIRES

Les options de valorisation pour les putrescibles végétaux sont multiples et certaines options permettent de traiter de grands volumes à des coûts peu élevés et sans grandes difficultés techniques. Tout comme dans l'industrie, l'implantation d'installations et la pérennité des activités dépendent de la possibilité de bénéficier de matières premières et d'assurer une production constante.

Dans le cas des sargasses, cette constance est compromise. En effet, le phénomène d'échouage est très aléatoire et imprévisible. D'importantes variations dans les volumes disponibles pour la valorisation et dans la disponibilité de la ressource existent au cours de l'année. De plus, considérant le caractère imprévu du phénomène, une augmentation ou une diminution rapide des volumes, voire un arrêt du phénomène sur une période plus ou moins longue, peuvent advenir, nuisant à l'installation et aux activités. Ces facteurs rendent les investissements, humains ou financiers, plus risqués que dans le cas d'autres ressources.

Un autre facteur peut influencer le choix de l'option de valorisation, soit l'état lors du ramassage. En effet, les algues échouées se retrouvent en tout état, allant d'entièrement sèches à humides et de fraîches à putréfiées. Or, certaines options de valorisation nécessitent un état particulier qui requiert un ramassage à l'état frais en mer ou près des berges, un séchage ou un rinçage préutilisation. Le projet Net Caraïbes a évalué que l'opération de lavage augmente les coûts de la valorisation de 15 €/m³. Ces nécessités opérationnelles augmentent les coûts ou modifient les méthodes de récupération à mettre en place (Florenne et al., 2016).

De plus, les radeaux d'algues capturent des déchets flottants en surface, notamment des objets de plastique et des canettes d'aluminium, s'y entremêlent et les transportent vers les plages où l'ensemble échoue. Le ramassage mécanique n'effectuant pas de tri, les résidus restent partie intégrante de la masse végétale. Afin de pouvoir valoriser les algues recueillies, un tri devient nécessaire pour retirer les corps étrangers, entraînant des coûts supplémentaires.

Finalement, en considérant que les échouages se produisent en des lieux multiples, le service de transport s'ajoute vers l'installation de valorisation, par exemple l'usine, le site d'épandage, le port pour l'exportation vers un site extérieur. Les coûts de transport varient de 30 €/tonne pour un transport par camion sur 20 km à 125 €/tonne pour un transport par bateau sur 50 km (Florenne et al., 2016). Cette étude souligne aussi que l'implantation de sites de valorisation le plus près des sites d'échouages permet de limiter les coûts et que l'implantation de plusieurs petits sites de valorisation présente un avantage par rapport à un site centralisé.

De plus, contrairement à la Bretagne où les collectivités ont établi le contact avec le milieu agricole pour planifier la valorisation agricole, les communautés antillaises n'ont pas de solide structure pour les échanges avec les entreprises de valorisation ou pour entamer un processus de gestion. Cette responsabilité est souvent déléguée au gouvernement central.

4.1 Valorisation agricole

La première avenue de valorisation est l'utilisation agricole, sous la forme d'épandage ou de compost. Cette avenue semble la plus prometteuse en ce qui concerne les volumes et les coûts, car une matière résiduelle fertilisante nécessite peu de manipulations et d'équipements techniques en plus de fournir un apport de matières organiques et de minéraux aux sols à faibles coûts.

Les analyses en laboratoire révèlent que les sargasses antillaises présentent des taux intéressants pour l'agriculture en potassium, en magnésium et en calcium, en plus d'être localement reconnues comme ayant des vertus antiparasitaires (Florenne et al., 2016; Sembera et al., 2018).

Cependant, cette avenue de valorisation comporte un inconvénient majeur soit l'apport de contaminants comme le sable, le sel de mer (sodium et chlore) et parfois les pesticides. La présence de sable dans la matière première est liée à la méthode de ramassage et à l'arrivée sur les plages. En effet, le ramassage est souvent mécanisé pour le rendre plus rapide et efficace, augmentant le ramassage secondaire de sable. L'apport de sable dans la valorisation agronomique est variable, tout comme son impact. Dans le cas du compostage et de l'épandage, le sable apporte une valeur ajoutée au substrat s'il est de calcaire, mais une forte présence influence l'équilibre et la qualité des sols.

La contamination par le sodium et le chlore est fortement liée à l'absorption de ces minéraux par l'algue durant sa vie utile et par la retenue d'eau de mer entre les algues lors des échouages et du ramassage. Bien que les sols nécessitent un apport en ces minéraux, une forte présence peut nuire à la qualité des sols ou à la croissance de certaines espèces végétales. Selon l'étude de Florenne (2016), les instituts techniques en agriculture antillaise ont statué, en considérant la teneur en sodium des sargasses fraîches, que l'apport de 20 tonnes/hectare durant la saison des pluies n'occasionne pas de surcharge des milieux.

L'agriculture industrielle est principalement responsable de la présence de pesticides et d'engrais dans les eaux à l'approche des îles. En effet, les algues, comme certains végétaux terrestres, bioaccumulent des contaminants comme les pesticides et les métaux lourds tel l'arsenic. Lors du processus de dégradation, elles rejettent ces contaminants.

Dans le cas des sargasses, les études montrent que le chlordécone est bioaccumulé, mais à de faibles niveaux. Les études montrent qu'un apport maximal de 5 000 tonnes/hectare d'algues permet d'atteindre le seuil de 0,1 mg/kg de sol, soit le seuil français d'interdiction de la culture des racines et tubercules sensibles. Or, actuellement, l'apport réel observé en agriculture est de 20 à 40 tonnes/hectare d'algues (ADEME, 2019; Florenne et al., 2016).

4.1.1 Épandage en agriculture

Cette option de valorisation est celle qui représente l'effort technologique le moins élevé, en plus de présenter une accessibilité pour les communautés les plus pauvres. L'épandage agricole consiste à appliquer une couche de résidus verts pour enrichir les sols par la dégradation de ceux-ci.

L'utilisation de cette option de valorisation est liée à trois facteurs soit un besoin d'enrichissement des sols dans la région, une capacité des sols à accepter le substrat et un contexte agricole favorable. Dans la région des Antilles, la culture de la banane et de la canne à sucre est très répandue et, selon les îles, administrée par des coopératives ou de grands producteurs. Un fort apport de nutriments pour les sols est nécessaire pour conserver un bon rendement de production.

À ce titre, une étude rapporte que le secteur agricole de la Martinique valorise 110 000 tonnes/an de résidus verts grâce à l'épandage (Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, 2018). Les coûts pour l'épandage se situent entre 2 et 25 €/m³, selon la taille de la parcelle et le degré de mécanisation de l'épandage (Florenne et al., 2016).

Une étude de l'Institut Technique Tropical, concernant les effets de l'épandage de sargasses sur des cultures tropicales, montre que l'apport agronomique est faible en plus de présenter un potentiel de contamination des sols par la salinisation, l'arsenic et la présence de chlordécone (Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, 2018).

4.1.2 Compostage

Le compostage des sargasses consiste à mélanger les résidus d'algues à d'autres résidus verts et d'entamer une dégradation aérobie, en vue d'obtenir un substrat fertilisant enrichi par les nutriments des constituants (Recyc-Québec, 2016b). Le processus prend quelques semaines pour être complété et le résultat peut être utilisé localement ou être emballé pour un usage ultérieur.

Cette option présente un niveau technique plus complexe que l'épandage et un besoin d'installations pour faire du compostage industriel. Cependant, le compost présente un avantage par rapport à l'épandage en diminuant le volume de matières organiques, un apport plus élevé en nutriments pour un volume équivalent, ainsi que la possibilité de différer son utilisation au moment opportun pour chaque culture. La vente commerciale est conditionnelle au respect de normes de commercialisation concernant les concentrations de certains métaux et nutriments. Ces normes varient selon le pays qui utilise le compost.

Selon Florenne (2016), les installations antillaises, bien qu'existantes, sont incapables de prendre en charge l'ensemble des volumes des échouages, sauf si elles bénéficient rapidement d'améliorations pour augmenter leurs capacités. En Martinique, la société Holdex Environnement, spécialisée dans le compostage de résidus verts, prend en charge gratuitement les volumes de sargasses apportés par les collectivités et produit ensuite du compost qu'elle revend à l'intérieur et à l'extérieur du pays. Leur installation permet d'accepter entre 3 000 et 6 000 m³/mois, selon le processus de traitement employé (Florenne et al., 2016; Martinique 2030, 2018).

Une étude américaine rapporte que le compost à base de sargasses et de résidus verts, notamment des produits alimentaires et des copeaux de bois, correspond aux standards établis pour les composts commercialisés aux États-Unis (figure 4.1).

Variable (units) ^a	Washed sargassum (as is basis) ^b	Washed sargassum (dry wt basis) ^b	Unwashed sargassum (as is basis)	Unwashed sargassum (dry wt basis)	Normal range (USCC) ^c	t	df	P
pH	8.4	—	8.1	—	5.0–8.5	55.000	1	0.012*
Soluble salts (mmho/cm)	1.14	—	1.59	—	1–10	6.067	1	0.104
Solids (%)	57.8	—	74.7	—	50–60	7.840	1	0.081
Moisture (%)	42.2	—	25.3	—	40–50	3.994	1	0.156
Organic matter (%)	21	36.3	23	30.8	30–70 (dry weight)	22.000	1	0.029*
Total nitrogen (%)	0.8	1.4	1.0	1.3	0.5–2.5 (dry weight)	9.000	1	0.700
Carbon (%)	10.8	18.7	13.4	18	<54 (dry weight)	9.308	1	0.068
Carbon:nitrogen (ratio)	13.5	13.5	13.4	13.4	<20 (dry weight)	269.00	1	0.002*
Phosphorus (%)	0.36	0.61	0.36	0.48	—	—	0	—
Potassium (%)	0.41	0.71	0.45	0.60	—	21.500	1	0.030*
Calcium (%)	3.5	6.06	4.83	6.46	—	6.263	1	0.101
Magnesium (%)	0.24	0.41	0.28	0.37	—	13.000	1	0.049*
Arsenic (mg·kg ⁻¹)	4.2	7.2	4.4	5.9	<75	43.000	1	0.015*
Cadmium (mg·kg ⁻¹)	<0.3	<0.5	<0.3	<0.5	<85	—	0	—
Copper (mg·kg ⁻¹)	10.7	18.6	10.3	13.7	<4,300	52.500	1	0.012*
Lead (mg·kg ⁻¹)	3.8	6.5	4.9	6.5	<420	7.909	1	0.080
Mercury (mg·kg ⁻¹)	0.009	0.016	0.012	0.015	<840	7.000	1	0.090
Molybdenum (mg·kg ⁻¹)	<0.8	<1.5	<1.0	<1.4	<57	9.000	1	0.070
Nickel (mg·kg ⁻¹)	5.4	9.3	4.9	6.5	<75	20.600	1	0.031*
Selenium (mg·kg ⁻¹)	<0.8	<1.5	<1.0	<1.4	<100	9.000	1	0.070
Zinc (mg·kg ⁻¹)	35.2	60.9	38.5	51.5	<7,500	22.333	1	0.028*
Respirometry [carbon dioxide-carbon (mg·g ⁻¹ solids per day)]	0.8	—	0.6	—	<2 (very stable) 2–8 (stable)	7.000	1	0.900
Respirometry [carbon dioxide (mg·g ⁻¹ organic matter per day)]	2.3	—	2.1	—	<2 (very stable) 2–8 (stable)	22.000	1	0.029*
Bioassay: emergence (% of control)	100	—	100	—	>90 (very mature)	—	—	—
Bioassay: seedling vigor (%)	100	—	100	—	>95 (very mature)	—	—	—

^a 1 mmho/cm = 1 dS·m⁻¹, 1 mg·kg⁻¹ = 1 ppm, 1 mg·g⁻¹ = 1,000 ppm.

^b Sargassum was manually washed with tap water and screened through a charcoal fiberglass screen wire to remove as much tar, salt, and sand as possible before composting.

^c U.S. Composting Council (USCC) 2002.

Figure 4.1 Composition comparée entre les standards américains pour le compost (USCC), un compost de sargasses lavées et de sargasses non lavées
(tiré de : Sembera et al., 2018, p. 82).

Certains paramètres, près des limites lors de cette étude, pourraient être modulés en choisissant le type de résidus verts employés. Par exemple, le pH peut être diminué en réduisant la proportion de résidus de bois dans les résidus verts, puisqu'ils augmentent l'alcalinité du compost. Selon cette étude encore, un mélange équivalant à 9,18 m³ de résidus de sargasses combinés avec 55,05 m³ de déchets verts, composé de 50 % de résidus de produits alimentaires et de 50 % de copeaux de bois, produit à terme 19,12 m³ de compost stabilisé et représente un prix de 900 \$ US sur le marché local (Sembera et al., 2018).

Plusieurs facteurs influencent les coûts d'implantation et de gestion d'une usine de compostage notamment le type d'installation soit ouverte ou fermée, les équipements employés, le climat et le type de résidus à traiter. À titre d'exemple, la ville de Montréal investit 175 M\$ CAN dans le centre de compostage de l'arrondissement Saint-Laurent soit 146 millions pour bâtir les installations et 29 millions pour un contrat de gestion sur 5 ans par une firme privée. Les installations peuvent accueillir 50 000 tonnes/an de matières organiques (Radio-Canada, 2019). Une étude de la Chaire Éco-Conseil de l'Université du Québec à Chicoutimi établit les frais d'exploitation d'une usine de compostage entre 50 et 200 \$ CAN/tonne traitée pour un système ouvert et entre 200 et 500 \$ CAN/tonne pour un système fermé (Villeneuve, Villeneuve et Dessureault, 2008).

4.1.3 Alimentation animale

Une autre voie de valorisation est l'utilisation dans l'alimentation animale comme supplément alimentaire. Cette option de valorisation pour les sargasses est cependant limitée par la présence de métaux lourds bioaccumulés et autres composés nocifs durant leur vie marine ainsi que par la nécessité d'un prélavage et d'un prétri permettant l'élimination du sable, du sel et autres résidus avant la valorisation. De plus, les études agroalimentaires démontrent que la sargasse antillaise présente un intérêt moindre pour la nutrition animale par rapport à d'autres algues puisqu'elle est moins riche en protéines (ADEME, 2019; Florenne et al., 2016; Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, 2018)

4.2 Valorisation énergétique

La deuxième avenue de valorisation est l'utilisation des sargasses comme source d'énergie. Cette voie peut remplacer une partie de combustible fossile et réduire le bilan carbone de certaines régions. Dans ce but, la France a décrété en 2015 une loi visant les départements et les collectivités outre-mer afin que celles-ci diminuent de 50 % la consommation de combustible fossile, convergeant vers des énergies vertes d'ici 2020 puis atteignant l'autonomie énergétique d'ici 2030 (Florenne et al., 2016; Ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales, 2019).

4.2.1 Biométhanisation

Naturellement, lors des échouages sur les plages, les sargasses s'entassent et se compactent en amas étanches. Une fermentation anaérobie se met en place par les microorganismes qui digèrent la matière organique et la transforment en un biogaz riche en méthane (Florenne et al., 2016; McHugh, 2003). Ce processus existe aussi pour d'autres résidus organiques comme les boues d'épuration, les déchets agroalimentaires et les résidus verts. Depuis quelques années, des entreprises mettent en valeur cette production de biogaz par les résidus verts dans un réacteur fermé et, grâce à des épurateurs, commercialisent du méthane d'origine végétale (Recyc-Québec, 2016a). Ce méthane provient d'une biomasse actuelle, donc est essentiellement carboneutre au sens de la comptabilité de Kyoto.

Considérant la disponibilité variable selon les échouages, une méthanisation combinée des résidus de sargasses et d'autres résidus verts s'avère intéressante afin d'assurer une production industrielle constante de méthane et de rentabiliser les installations. Cette production permettra aux autorités de disposer d'une alternative aux combustibles fossiles importés.

Cette technologie présente un défi technique et requiert des investissements pour implanter de nouvelles installations. Elle dispose cependant d'un bon potentiel de retour sur investissement puisque le méthane carboneutre est en forte demande internationale sous forme gazeuse ou liquéfiée.

Feedstock ^a	Biomethane yield (m ³ CH ₄ /kg VS)	References
Brown algae		
<i>Sargassum</i> spp.	0.260–0.380	[1]
<i>Saccharina japonica</i>	0.204–0.214	[46,91]
<i>Saccharina digitata</i>	0.219	[92]
<i>Saccharina latissima</i>	0.210–0.284	[93,94]
<i>Saccharina hyperborea</i>	0.260	[95]
Sugar crops		
Corn stover	0.107–0.241	[96,97]
Lignocellulosic biomass		
Rice straw	0.281	[96]
Wheat straw	0.245–0.258	[98]
Cassava stalks	0.101	[99]
Organic wastes		
Sewage sludge	0.273	[100]
Animal waste	0.247–0.293	[101]
Food waste	0.410–0.435	[70,102]
Co-digestion		
<i>Saccharina</i> spp. + <i>Ulva</i> spp. + Milk	0.299	[103]
<i>S. latissima</i> + Wheat straw	0.310	[104]
<i>S. latissima</i> + Shrimp residues + sewage sludge	0.261	[105]

^a No pretreatment.

Figure 4.2 Rendement méthanogène de divers résidus végétaux

(tiré de : Song, Duc Pham, Seon et Chul Woo, 2015, p. 786)

Des études confirment que le processus de méthanisation industrialisée permet un rendement en méthane de 260 à 380 m³/tonne de sargasse (figure 4.2). À titre de comparatif, d'autres résidus agricoles et agroalimentaires permettent un rendement de production méthanogène entre 10 et 380 m³/tonne de matières solides (figure 4.3).

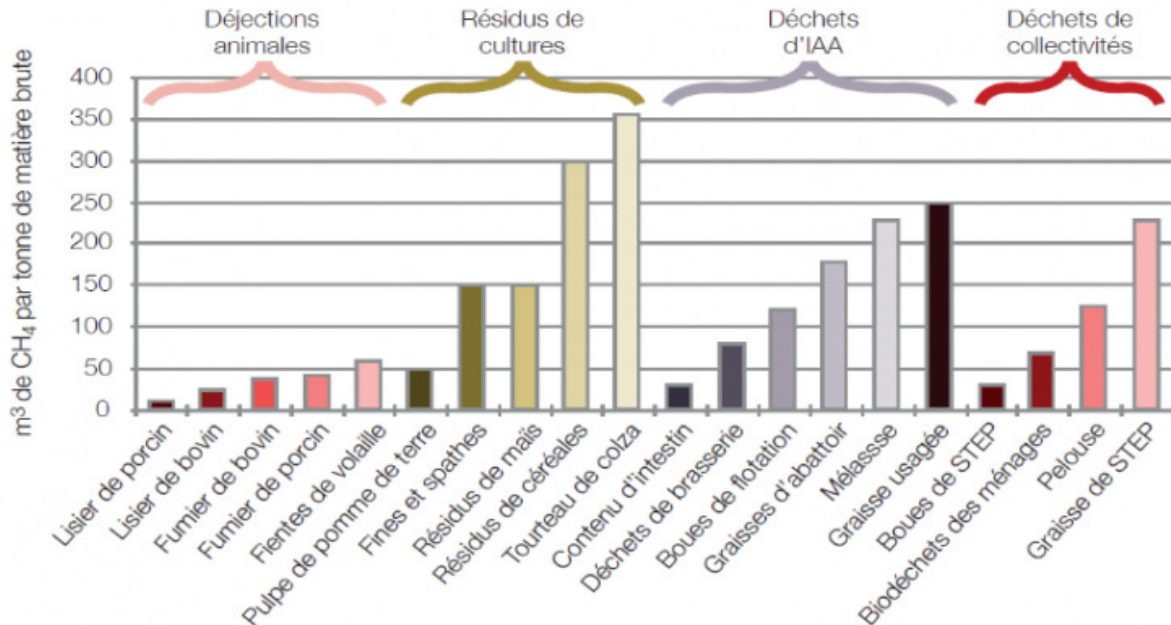


Figure 4.3 Potentiels méthanogènes de différents substrats agricoles et agroalimentaires

(tiré de : Gaz réseau distribution France [GRDF], 2019)

Une étude visant à déterminer le potentiel méthanogène des sargasses rapporte qu'une installation pouvant traiter 7 000 tonnes/an produit un potentiel électrique de 1 MkwH sous réserve d'un investissement initial de 1,5 M€. L'étude soulève qu'en présence d'arrivées irrégulières, l'installation doit aussi reposer sur un apport constant en résidus verts et un stockage de volumes de sargasses pour uniformiser la production annuelle (Florenne et al., 2016). La combinaison d'installations de compostage et de méthanisation permet d'optimiser les investissements et d'obtenir un double retour sur la matière brute sous la forme de digestat et de méthane.

L'organisme Gaz Réseau Distribution France (GRDF), ayant gestion du réseau de distribution de gaz naturel en France, présente un résumé des coûts liés à l'implantation d'un projet de méthanisation en fonction du débit au tableau 4.1.

Tableau 4.1 Coûts estimés d'un projet de méthanisation

(inspiré de : GRDF, 2019)

Aspects critiques	Taille du projet		
	100	150	500
Débit (Nm ³ /h)	100	150	500
Puissance (MWh/an)	8 000	12 000	40 000
Capacité (tonnes/an)	15	20-25	40-50
Investissements initiaux sur les équipements (méthanisateur et épurateur)	2,5 M€	4 M€	6 M€
Coûts de fonctionnement (k€/an)	320	nd	830
Bénéfice basé sur un tarif de 45 à 125 €/MWh	0,36 à 1 M€	0,54 à 1,5 M€	1,80 à 5 M€

nd : Non disponible

4.2.2 Raffinage du biodiésel

Actuellement, deux technologies permettent de convertir les résidus d'algues en combustible de type biodiésel soit la liquéfaction hydrothermale et la pyrolyse. Le biodiésel s'avère une alternative à l'utilisation de composés de pétrole dans les centrales thermiques (Song et al., 2015). Bien que le contenu énergétique du biodiésel soit considéré comme légèrement inférieur à son équivalent traditionnel, le biodiésel représente un marché florissant et en croissance (Ressources naturelles Canada, 2018).

La méthode de la liquéfaction hydrothermale consiste à mettre un contenu chauffé (280 à 370 °C) sous haute pression (10 à 25 mégapascal) et sous une atmosphère azotée (Diaz-Vazquez et al., 2015). Cette méthode nécessite de la biomasse humide en vue d'obtenir des rendements optimaux (López Barreiro et al., 2015). Dans le cas des sargasses, ce besoin de biomasse fraîche nécessite que le ramassage soit fait en haute mer et non sur les plages, ajoutant une contrainte au processus.

La pyrolyse consiste à chauffer les résidus verts à haute température sous une atmosphère inerte en vue de le transformer en un résidu charbonneux semi-liquide (Biswas, Singh, Krishna, Kumar et Bhaskar, 2017; Li, Chen, Yi, Zhang et Ye, 2010; S. Wang, Wang, Jiang, Han et Ji, 2013). Il en résulte des huiles pyrolytiques et un char, soit un charbon artificiel. Moins exigeante en pureté, cette méthode peut être utilisée avec des résidus humides ou secs, convenant avec la situation actuelle des échouages.

Le tableau 4.1 présente les rendements obtenus pour des sargasses grâce aux deux méthodes. En général, la méthode de la pyrolyse permet d'atteindre un rendement entre 34 et 37 % et la méthode de liquéfaction hydrothermale permet d'atteindre un rendement variant entre 32,1 et 87,7 %.

Tableau 4.2 Rendement en biodiésel des algues de type *Sargassum* selon les méthodes de la pyrolyse et la liquéfaction hydrothermale

(inspiré de : Diaz-Vazquez et al., 2015; Li et al., 2012; Song et al., 2015; S. Wang et al., 2013)

Technologie	Pyrolyse		Liquéfaction hydrothermale		
Type d'algues	<i>Sargassum spp</i>	<i>S. natans</i>	<i>S. patens</i>	<i>S. patens</i>	<i>Sargassum spp</i>
Température (°C)	380	500	340	170	350
Temps (minutes)	4	nd	15	15	60
Catalyseur	Aucun	Aucun	Aucun	Éthylène glycol (9,6 %)	Aucun
Rendement en biodiésel (% masse/masse)	36,6	33,7	32,1	87,7	61
Pouvoir calorifique (MJ/kg)	nd	nd	27,1	nd	11,4 à 11,6

Sargassum spp : mélange de *S. natans* et de *S. flutans*

En considérant un rendement de 35 %, possible avec les deux méthodes, une tonne d'algues permet la production de 350 kg de biodiésel soit 417 L sur la base d'une masse volumique du biodiésel de 840 kg/m³ à 15 °C (Gouvernement du Canada, 2013). En considérant un prix de vente d'environ 100 \$ US/hL, le volume produit se détaille à 417 \$ US (Organisation de coopération et de développement économique [OCDE] et Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture [FAO], 2018).

La mise en place d'installation de production coute 1,5 M\$ US auxquels s'ajoutent des frais d'exploitation de 4,50 à 9 \$ US/L (Tampier, 2009). Le *US Department of Energy* estime que les couts de fonctionnement se situent entre 0,75 et 1,13 \$ US/L produit dans des installations de raffinage existantes (U.S. Department of Energy, 2012).

4.2.3 Combustible pour centrale thermique en Martinique et en Guadeloupe

En Martinique, une partie des déchets est traitée par l'incinérateur qui produit un retour énergétique sous forme de kilowattheures, tel que présenté à la figure 4.4. L'utilisation de l'incinération en vue de retour sous forme électrique peut permettre une valorisation. Selon l'entreprise qui gère l'incinérateur, l'incinération des déchets permet une production de 400 kWh/tonne incinérée (CACEM, 2013). Les autorités rapportent que le cout de la construction de cette infrastructure a été de 53 M€ en 2002.



Figure 4.4 Usine d'incinération des ordures ménagères (UIOM) de Fort-de-France (tiré de : CACEM, 2013)

Dans le cadre d'un mémoire, une estimation des coûts liés à la mise en place d'une installation pouvant traiter 2,5 tonnes/heure a été produite. La construction coûterait entre 6,4 et 6,8 M\$ CAN pour un coût de fonctionnement de 1,78 M\$ CAN/an (Gosselin, 2018).

En Guadeloupe, une partie de l'énergie électrique provient de turbines à combustion de bagasse/charbon. La bagasse est le résidu de l'extraction du sucre de la canne à sucre.

4.3 Valorisation industrielle

La troisième avenue de valorisation est l'utilisation dans des procédés industriels ou l'extraction de composés en vue de la commercialisation. Naturellement, les sargasses contiennent plusieurs composés organiques, comme l'alginate, qui présente un potentiel commercial pharmaceutique, cosmétique et agroalimentaire.

Bien que cette avenue de valorisation présente un bon potentiel de retour sur le produit final, elle présente des difficultés techniques appréciables et des investissements dans la création d'installations pour le traitement. De plus, la valeur de retour sur la valorisation augmente en présence d'une algue plus fraîche et moins contaminée.

Cette réalité s'oppose avec les méthodes de récolte actuelle, soit la collecte des algues échouées uniquement dans les zones nuisibles peu de jours après les échouages, et la réalité économique qui implique peu de ressources pour faire des ramassages en mer ou un tri des contaminants.

4.3.1 Alginate de sodium

L'alginate de sodium est un sel de la famille de l'acide alginique (figure 4.6), extrait de plusieurs sortes d'algues et employé dans l'industrie biochimique, selon le processus décrit à la figure 4.5. Un défi de cette voie de valorisation est la demande constante de l'industrie et le besoin de volumes constants pour garantir une production.

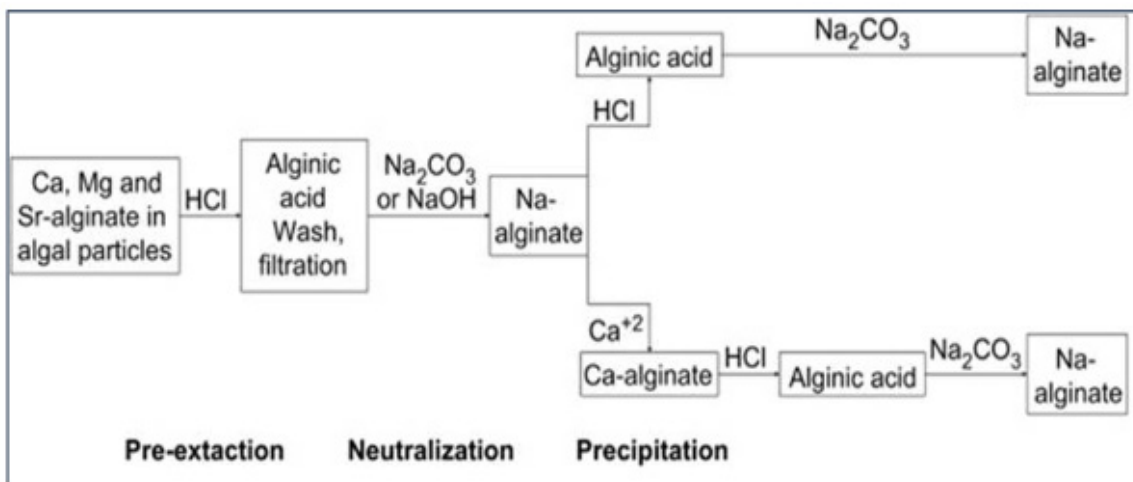


Figure 4.5 Protocole de référence pour l'extraction d'alginate à partir d'algues

(tiré de : Pawar et Edgar, 2012, p. 3281)

Une étude de faisabilité franco-antillaise établit un possible rendement annuel de 9 000 tonnes d'alginate pour un volume de 30 000 tonnes de sargasses sous réserve d'un investissement initial de 5 M€ dans l'établissement d'installations. À titre comparatif, l'extraction de l'alginate issue des cultures asiatiques coûte 450 \$ US/tonne d'algues. Une autre étude rapporte un rendement possible d'alginate d'environ 353 g/kilogramme d'algues valorisées (Pérez-López et al., 2014).

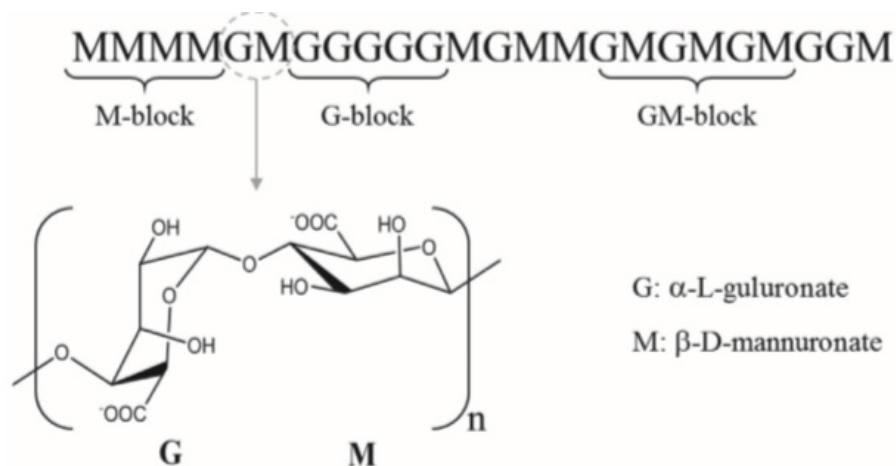


Figure 4.6 Structure chimique de l'alginate (tiré de : Song et al., 2015, p. 785)

Sur le marché, l'alginate de sodium se vend environ 150 \$ CAN/kg (Sigma-Aldrich, 2019).

4.3.2 Plastique biosourcé

L'industrie des plastiques est constamment à la recherche d'alternative aux sources fossiles dans la fabrication. Depuis quelques années, un nouveau procédé est en application, soit le plastique biosourcé biodégradable à base d'algues brunes, tel que présenté à la figure 4.7. Selon la norme ISO 16929, peut être considéré comme biodégradable un objet plastique qui se fragmente à 90 % en 12 semaines lors d'un séjour dans un andain en compostage actif (Organisation internationale de normalisation [ISO], 2013). Le matériel est commercialisé sous forme de microbilles colorées de plastique à mouler thermiquement par un plasturgiste (Algopack, 2019).

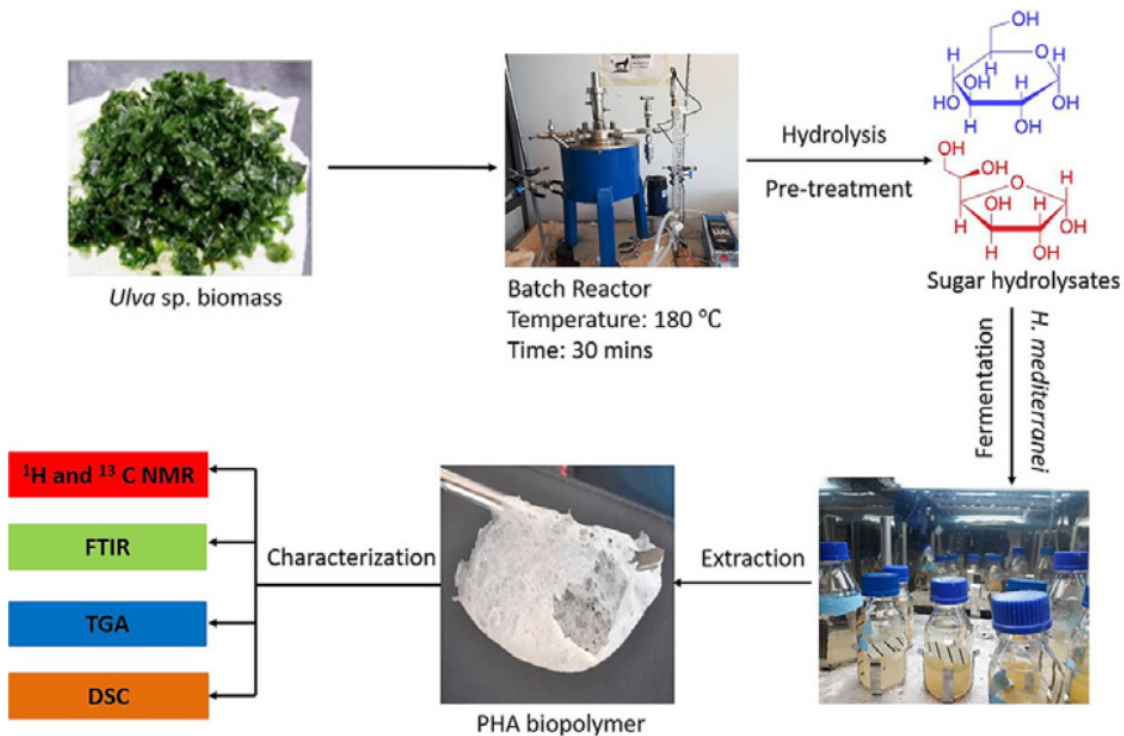


Figure 4.7 Étapes de transformation des algues en bioplastique (tiré de : Ghosh et al., 2019, p. 166)

Puisque le procédé utilise des algues fraîches, un changement dans l'approvisionnement est nécessaire, impliquant une collecte directement avant l'échouage. Florenne (2016) rapporte une étude de faisabilité pour l'implantation d'une installation traitant 10 000 tonnes/an sous réserve d'investissements initiaux de 1 M€.

Le rendement de production n'est pas disponible. Selon un brevet déposé, le procédé permet d'obtenir un rendement de 10 à 60 % de la masse des résidus d'algues fraîches (Organisation mondiale de la propriété intellectuelle, 2016).

4.4 Élimination comme résidus non valorisable

La dernière alternative n'est pas à proprement parler une option de valorisation. Son évaluation reste cependant nécessaire afin de compléter la méthodologie scientifique.

Dans les débuts des échouages, les communautés ont fait face à d'importants volumes de résidus et une forte nuisance olfactive et visuelle. Dans l'urgence de la situation, elles ont donc dirigé les volumes vers leurs sites d'enfouissement, sans évaluer les impacts ou les alternatives immédiats. Avec la progression du phénomène, le tonnage a atteint 60 000 tonnes/an dans les Antilles françaises, qui s'ajoutent aux tonnages réguliers de 700 000 tonnes en déchets domestiques et industriels. Dans un contexte de saturation des décharges, l'aménagement de nouveaux sites est bientôt nécessaire (Florenne et al., 2016).

À titre comparatif, l'implantation d'un site d'enfouissement à Bécancour au Québec est estimée à 65,6 M\$ CAN pour une capacité d'enfouissement de 960 000 m³ sur 40 ans (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement [BAPE], 2019). Les coûts de fonctionnement sont estimés à 750 000 \$ CAN/an, notamment parce qu'ils incluent la récupération et le traitement du biogaz, des lixiviats et autres nuisances à l'environnement (Simard, 2010). Ces coûts de fonctionnement peuvent grandement varier selon les normes et les règlements du pays où le site d'enfouissement est implanté.

5. ANALYSE MULTICRITÈRE

La précédente section a permis d'identifier plusieurs options de valorisation pour les sargasses échouées sur les plages antillaises. Certaines options présentent un faible cout, mais d'autres, plus onéreuses, offrent tout de même un retour sur investissement.

Bien que certaines options semblent prometteuses, la possibilité de mise en place varie selon les îles. En effet, comme présenté au chapitre 2, la capacité économique est très différente d'un pays à l'autre et, pour certaines îles, les technologies sont déjà disponibles. L'évaluation de chaque technologie doit être modulée pour une analyse appropriée à chacun des quatre pays à l'étude.

5.1 Critères d'analyse

Afin de bien identifier les options qui peuvent convenir selon les situations, des critères d'analyse sont définis visant à évaluer la faisabilité économique et technologique, la hiérarchisation des moyens selon les 3RV-E et l'efficacité relative.

Pour simplifier la comparaison entre les options de valorisation, la valeur la plus élevée pour un critère est attribuée à la meilleure situation ou au meilleur scénario. À l'opposé, certains critères attribuent une valeur de zéro à une situation non désirable. De plus, une pondération est appliquée pour marquer l'importance relative d'un critère par rapport à un autre.

5.1.1 État des algues

Le premier critère est l'état dans lequel les algues doivent être intégrées au processus. Certains processus nécessitent une algue totalement sèche, à l'état frais ou les deux états sont possibles. Dans le contexte actuel, les algues de fraîcheur variable sont récoltées en mélange de sèches et d'humides. De plus, afin de limiter les volumes à gérer, les communautés évitent de récolter les volumes qui restent en mer, se limitant aux volumes échoués sur les plages.

Pour tenir compte de ces limitations, une valeur de 2 pour le critère est attribuée pour une utilisation sans égard à l'état. Une valeur de 1 est établie pour l'utilisation à l'état sec, puisque le séchage peut être fait sur de la matière semi-humide, mais nécessite des efforts supplémentaires. Finalement, une valeur de 0 est mise pour la nécessité d'employer des algues fraîches et humides, puisque cet emploi provoque des frais supplémentaires et ne répond pas au besoin de la problématique.

5.1.2 Prétraitement de la matière brute

Le deuxième critère est le besoin d'un prétraitement des algues à la suite de la collecte. En effet, les radeaux de sargasses retiennent des résidus flottants et les méthodes de collecte mécanisées ajoutent du sable à la matière brute.

Pour tenir compte de ces aspects, une valeur de 3 pour le critère est attribuée si l'option de valorisation ne nécessite pas de prétri ou de prélavage. Une valeur de 2 est attribuée si le procédé nécessite un prétri et aucun prélavage, puisque le tri peut être aisément effectué sur la matière brute, mais nécessite des efforts supplémentaires et des couts additionnels. Finalement, la valeur de 1 est attribuée si le processus nécessite un prélavage et un prétri, car ces prétraitements nécessitent des efforts supplémentaires et des couts additionnels.

5.1.3 Possibilité de traitement des volumes variables

Le troisième critère est la possibilité d'adaptation afin de traiter des volumes variant en taille et en disponibilité au cours de l'année. Ce critère est évalué de façon qualitative puisqu'il s'agit de capacité d'adaptation. Ainsi, une valeur de 1 est attribuée pour les procédés qui s'adaptent aux variations soit par l'utilisation d'autres matières premières ou par l'utilisation de matières stockées. À l'opposé, une option étant très dépendante de la matière première et ne pouvant être effectuée qu'avec celle-ci, obtient une valeur de 0.

5.1.4 Hiérarchie selon les 3RV-E

Le quatrième critère est le niveau dans la hiérarchie selon les 3RV-E soit la réduction à la source, le réemploi, le recyclage, la valorisation matérielle et énergétique et l'élimination (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MELCC], 2019). En effet, les premiers niveaux sont les plus avantageux en termes de développement durable et doivent être privilégiés par rapport aux niveaux inférieurs.

Afin de respecter cette hiérarchisation, une valeur de 5 est attribuée aux options qui présentent une réduction à la source, soit la prévention ou la réduction des résidus à la source. Dans le contexte évalué, l'option permet de limiter les volumes d'échouage en limitant la prolifération des sargasses, par exemple.

Le réemploi consiste à réutiliser le produit sans y apporter de modification importante. Dans le contexte évalué, cette option est peu envisageable, car les algues meurent à la suite de l'échouage, constituant alors une modification importante des propriétés physiques. Une valeur de 4 est attribuée pour une option qui respecte les conditions du réemploi.

Le recyclage consiste à modifier, grâce à des opérations mécaniques ou chimiques, le produit pour le rendre réutilisable dans un produit de même nature. Une valeur de 3 est attribuée pour les options qui respectent la définition du recyclage. Dans le contexte de la valorisation des sargasses, l'emploi comme engrais organique est considéré comme du recyclage (MELCC, 2019).

La valorisation est l'utilisation d'un produit ou d'une matière en remplacement d'une autre dans un procédé ou une méthode en vue de produire une matière différente. La valorisation peut être séparée en deux soit la valorisation matérielle et la valorisation énergétique. Le premier type consiste en un échange produit pour produit. À l'opposé, la valorisation énergétique consiste à employer la matière comme combustible dans un processus thermique comme l'incinération. Cette option de valorisation permet de profiter du potentiel calorifique de la dégradation de la matière. Une valeur de 2 est attribuée à la valorisation matérielle, car elle offre une alternative à la fin ultime du produit. Une valeur de 1 est attribuée à la valorisation énergétique puisqu'elle consiste une fin ultime du produit avec une faible valorisation.

Finalement, l'élimination dans un site d'enfouissement est l'option ultime lorsqu'il n'existe plus d'option de valorisation possible. En considérant qu'il s'agit de l'option la pire, une valeur de 0 est attribuée.

5.1.5 Présence d'extrait(s) nuisible(s) lors du procédé

Le cinquième critère est la génération d'extrants nuisibles à la suite du procédé qui nécessite une gestion particulière, incluant des coûts. Pour ce critère, l'évaluation attribue une valeur de 2 pour l'absence d'extrants nuisibles et une valeur de 1 pour la présence d'extrants nuisibles. Le choix de ces valeurs est gouverné par la difficulté à clairement établir une gradation des niveaux de nuisance qui peuvent être olfactifs ou de nature chimique.

5.1.6 Niveau de centralisation et de complexité des opérations

Le sixième critère est le niveau de centralisation et de complexité des opérations. Ce critère consiste à évaluer tous les aspects qui complexifient la mise en place de l'option notamment le besoin de transporter la matière vers un site éloigné ou le besoin d'équipements spécialisés et de main-d'œuvre qualifiée.

L'évaluation de ce critère est répartie en trois niveaux qualitatifs soit un procédé simple, un procédé faiblement complexe et un procédé très complexe. Le procédé simple ayant une valeur de 3 consiste à une option de valorisation applicable localement ou à faible distance et ne nécessitant pas de machinerie ou de main-d'œuvre spécialisée. Le procédé faiblement complexe, ayant une valeur de 2, inclut une production centralisée à une installation, le besoin d'équipements spécialisés et d'une main d'œuvre légèrement qualifiée ou formée par l'entreprise.

Finalement, le procédé très complexe, ayant une valeur de 1, inclut une production centralisée à une installation éloignée, le besoin d'équipements spécialisé et très technique, ainsi qu'une main-d'œuvre qualifiée ayant une formation scolaire technique ou professionnelle.

5.1.7 Coûts d'implantation et d'opération

Le septième critère est le coût d'implantation du procédé de valorisation. L'évaluation de ce critère peut varier grandement, car certaines options nécessitent la construction d'installation de traitement, ce qui augmente le coût par rapport à un moyen qui n'en nécessite pas. Similairement, une installation ayant un procédé plus technique présente des frais d'exploitation plus élevés qu'un procédé moins technique.

Pour assurer une évaluation objective, ce critère doit être qualitatif. Une option nécessitant la construction d'un bâtiment, l'acquisition de machinerie onéreuse ou l'emploi de produits chimiques de façon récurrente obtient une valeur de 1.

Une option de valorisation ayant déjà des installations existantes, mais nécessitant des ajustements pour convenir au procédé ou augmenter l'approvisionnement en ressources matérielles obtient une valeur de 2.

Une option de valorisation ayant déjà des installations existantes sans besoin d'adaptation obtient une valeur de 3. Une option de valorisation présentant des coûts limités, ne nécessitant pas d'installation spécifique ou de procédé complexe obtient une valeur de 4.

5.1.8 Possibilité de retour sur le produit fini

Le huitième critère est la possibilité d'un retour sur investissement grâce au produit fini. En effet, certaines options permettent la mise en vente du produit fini, permettant de rentabiliser les coûts de production et de ramassage.

La valeur de 2 est attribuée pour une option qui permet un retour significatif, soit une valeur marchande qui permet une commercialisation internationale. La valeur de 1 est attribuée pour une option qui permet un retour limité, soit une valeur marchande qui permet une commercialisation locale. Finalement, la valeur de 0 est attribuée pour une option qui ne permet pas une commercialisation.

5.1.9 Possibilité de combiner avec d'autres technologies

Le neuvième critère est la possibilité de combiner l'option avec une autre technologie afin d'optimiser la valorisation. La valeur de 2 est attribuée pour une technologie combinable et une valeur de 1 est attribuée dans le cas contraire.

5.1.10 Pondération des critères

En fonction de l'actuelle problématique, certains critères sont jugés plus importants que d'autres en raison de la situation économique, des limitations technologiques ou des choix politiques visant la réduction de l'impact financier pour l'état. Le choix d'opter pour des niveaux de 1, de 3 et de 5 fois le résultat du critère permet de produire une nette démarcation entre les critères de moindre importance et ceux de plus forts.

Une pondération de 5 est attribuée aux critères concernant l'état des algues, la possibilité de traiter des volumes variables, la hiérarchie des 3RV-E ainsi que pour les coûts d'implantation et d'opération. Ces aspects présentent des risques de coûts supplémentaires ainsi qu'un impact sur la rentabilité du moyen en cas d'augmentation ou d'arrêt du phénomène.

Une pondération de 3 est attribuée aux critères concernant la présence d'extrants nuisibles, le niveau de centralisation et de complexité ainsi qu'à la possibilité de retour sur le produit. Ces aspects présentent souvent des risques envisageables sous réserve de retour financier plus avantageux. La pondération permet de les mettre en lumière sans nuire fortement.

Finalement, une pondération de 1 est attribuée pour le prétraitement de la matière brute, la possibilité de combiner avec une autre option, puisque ces aspects ne représentent pas un fort coût ou un empêchement notable à la mise en place.

En considérant que l'évaluation des critères varie grandement notamment en offrant une valeur de zéro pour certains critères ou offrant en amplitude différente, un facteur correctif est nécessaire. Ainsi, la somme des résultats pour les critères est divisée par le score maximal possible, soit 86, pour produire un score corrigé allant de 0 à 1.

5.2 Analyse par option

Pour chacune des options identifiées dans le chapitre précédent, une analyse par les critères sélectionnés est effectuée afin de pouvoir bien identifier les forces et les faiblesses du procédé.

5.2.1 Épandage en agriculture

Dans le cadre de l'épandage en agriculture, l'état des algues n'est pas considéré comme important puisqu'en définitive, l'algue se dégrade pour enrichir le sol. Cependant, un tri pour éliminer les résidus non biodégradables comme les plastiques et l'aluminium est essentiel pour éviter de contaminer les champs. À l'opposé, les résidus ne nécessitent pas d'être rincés pour éliminer le sable et le sel en surface. Le sable en faible quantité est un intrant positif en agriculture, alors que le sel en faible quantité est tolérable.

L'évaluation du premier critère obtient un résultat de 2 pour la possibilité d'utiliser des algues humides ou sèches sans égard à l'état et le deuxième critère obtient un résultat de 2 pour l'absence de nécessité de lavage.

Concernant la capacité d'adaptation du procédé, comme traité au troisième critère, un résultat de 1 est attribué. En effet, le climat tropical des Antilles permet l'agriculture tout au long de l'année et la possibilité d'employer des algues comme engrais en remplacement des versions commerciales.

Selon la hiérarchie des 3RV-E, le procédé est une forme de recyclage, ce qui lui permet d'obtenir un résultat de 3 pour le quatrième critère. De plus, l'épandage agricole de résidus de sargasses est reconnu par plusieurs organismes agronomiques comme n'affectant pas la qualité des sols par la diffusion de composés en quantité nocive. Il est donc possible d'attribuer un résultat de 2 pour cette absence de nuisance, comme évalué par le cinquième critère.

Cette option de valorisation est applicable localement ou à faible distance et ne nécessite pas de machinerie ou de main-d'œuvre spécialisée. Selon l'évaluation du sixième critère, un résultat de 3 est attribué pour cette définition. De plus, cette option ne nécessite pas la construction d'installations ou de procédés complexes onéreux, ce qui se reflète par l'obtention d'un résultat de 4 au septième critère.

Le produit fini est généralement vendu localement aux agriculteurs pour se substituer aux engrais traditionnels à un faible coût. À la lumière de cette analyse, un résultat de 1 est attribué en raison d'un possible faible retour sur investissement et d'une commercialisation locale, comme évaluée par le huitième critère.

Par définition, ce procédé implique la dégradation totale de la matière brute et donc l'impossibilité de le jumeler avec un autre procédé. Ainsi, l'évaluation du neuvième critère fournit un résultat de 1.

Tableau 5.1 Sommaire de l'évaluation des critères pour l'épandage en agriculture

Critère	Résultat obtenu
État des algues	2
Prétraitement de la matière brute	2
Possibilité de traitement des volumes variables	1
Hiérarchie selon les 3RV-E	3
Présence d'extrait(s) nuisible(s) lors du procédé	2
Niveau de centralisation et de complexité des opérations	3
Coûts d'implantation et d'opération	4
Possibilité de retour sur le produit fini	1
Possibilité de combiner avec d'autres technologies	1

5.2.2 Compostage

Dans le cadre du compostage, l'état des algues n'est pas considéré comme important puisqu'en définitive, l'algue est destinée à se dégrader pour enrichir le substrat. Ainsi, pour le premier critère, un résultat de 2 pour la possibilité d'utiliser des algues humides ou sèches sans égard à l'état est attribué.

La qualité d'un compost commercial dépend de la composition chimique et physique de celui-ci. La présence de sable ou d'une salinité trop élevée nuit à la capacité de commercialisation. Il devient donc nécessaire de procéder à un prétri pour éliminer les résidus non biodégradables et à un lavage pour éliminer le sable accumulé lors du ramassage sur les plages. Pour le second critère, la nécessité d'un tri et d'un pré-lavage donne un résultat de 1.

Le procédé de compostage est considéré comme versatile, car il peut être effectué avec plusieurs types de résidus verts frais ou sec, entreposés ou issus d'une collecte locale. Cette particularité permet l'attribution d'un résultat de 1 au troisième critère.

Selon la hiérarchie des 3RV-E, le compostage est classifié comme un procédé visant le recyclage de la matière. Ainsi, le compostage récolte un résultat de 3 au quatrième critère. En considérant que le compostage ne produit pas d'extrait nuisible, un résultat de 2 est attribué au cinquième critère.

Selon l'évaluation du sixième critère, le compostage industriel est un procédé faiblement complexe, nécessitant une production centralisée à une installation, le besoin d'équipements spécialisés et d'une main d'œuvre légèrement qualifiée ou formée par l'entreprise, ce qui se traduit par un résultat de 2.

Certains pays des Antilles, comme la Martinique, la Guadeloupe et la Barbade, disposent actuellement d'installations de compostage pour le traitement, ce qui n'est actuellement pas le cas de la République de Trinité-et-Tobago. Pour le septième critère concernant les coûts d'implantation et d'opération, la présence d'installation existante permet d'attribuer un résultat de 3 pour la Martinique, la Guadeloupe et la Barbade. À l'opposé, la République de Trinité-et-Tobago qui nécessite une nouvelle construction et l'établissement d'une collecte de résidus verts pour assurer la mise en place et la viabilité de l'option obtient un résultat de 1 pour ce critère.

Dans le cadre du huitième critère visant la possibilité de retour sur investissement, l'évaluation indique que le produit est vendu localement ou internationalement aux agriculteurs en vue de substituer aux engrais traditionnels. Le prix de vente sur le marché international se situe à environ 185 \$ US/tonne (Sembera et al., 2018). À la lumière de cette analyse, un résultat de 2 est attribué en raison d'une possible commercialisation extraterritoriale ou de proximité et d'un retour sur investissement potentiel.

Naturellement, la décomposition anaérobie de la matière organique produit du biogaz contenant du biométhane. Plusieurs entreprises profitent de cet aspect dans un réacteur fermé de biométhanisation pour rentabiliser les opérations et obtenir un retour sur investissement plus avantageux. Le solide produit dans ce réacteur est un digestat semblable au compost. Il est destiné au retour à la terre, tout comme le compost. Ce possible jumelage permet l'attribution d'un résultat de 2 au neuvième critère.

Tableau 5.2 Sommaire de l'évaluation des critères pour le compostage industriel

Critère	Résultat obtenu
État des algues	2
Prétraitement de la matière brute	1
Possibilité de traitement des volumes variables	1
Hiérarchie selon les 3RV-E	3
Présence d'extrait(s) nuisible(s) lors du procédé	2
Niveau de centralisation et complexité des opérations	2
Coûts d'implantation et d'opération	Martinique, Guadeloupe, Barbade : 3 Trinité-et-Tobago : 1
Possibilité de retour sur le produit fini	2
Possibilité de combiner avec d'autres technologies	2

5.2.3 Alimentation animale

Dans le cadre de l'utilisation des sargasses comme aliment pour les animaux, l'état sec et propre sans sable, plastique ou autres résidus non comestibles est essentiel pour permettre l'intégration à la moulée régulière. Ce besoin se reflète par l'attribution d'un résultat de 1 au premier critère pour un état sec et d'un résultat de 1 au second critère pour le besoin d'un prétri et d'un lavage avant utilisation.

Cette utilisation permet une adaptabilité aux variations des volumes annuels puisque l'alimentation animale n'est pas exclusivement constituée d'algues et que le stockage est possible à l'état sec. Cette adaptabilité est soulignée par un résultat de 1 dans le troisième critère.

Selon la hiérarchie des 3RV-E, l'utilisation comme aliment est classifiée comme un procédé visant une valorisation matérielle. Ainsi, cette option de valorisation récolte un résultat de 2 au quatrième critère. En considérant que l'utilisation comme aliment ne produit pas d'extrait nuisible, un résultat de 2 est attribué au cinquième critère.

Selon l'évaluation du sixième critère, l'utilisation des sargasses comme intrant dans la moulée pour les animaux consiste en une option de valorisation applicable dans une installation centralisée, nécessitant des équipements spécialisés et une main d'œuvre légèrement qualifiée ou formée par l'entreprise. Cette option de valorisation obtient donc un résultat de 2. De plus, en absence d'installations existantes, il sera nécessaire d'en construire. Un résultat de 1 est donc attribué au septième critère.

Dans le cadre du huitième critère visant la possibilité de retour sur investissement, l'évaluation rapporte que le produit est vendu localement aux agriculteurs en vue de substituer partiellement aux aliments commerciaux traditionnels et à un faible coût. À la lumière de cette analyse, un résultat de 1 est attribué en raison d'un possible faible retour sur investissement et d'une commercialisation locale.

Selon les barèmes établis au neuvième critère, un résultat de 1 est attribué puisque l'utilisation comme aliment ne permet pas une autre utilisation jumelée.

Tableau 5.3 Sommaire de l'évaluation des critères pour l'utilisation en alimentation animale

Critère	Résultat obtenu
État des algues	1
Prétraitement de la matière brute	1
Possibilité de traitement des volumes variables	1
Hiérarchie selon les 3RV-E	2
Présence d'extrait(s) nuisible(s) lors du procédé	2
Niveau de centralisation et de complexité des opérations	2
Coûts d'implantation et d'opération	1
Possibilité de retour sur le produit fini	1
Possibilité de combiner avec d'autres technologies	1

5.2.4 Biométhanisation

Dans le cadre de la biométhanisation des résidus des sargasses, l'état des algues n'est pas considéré comme important puisqu'en définitive, la matière organique de l'algue est dégradée par des microorganismes qui génèrent du biogaz. Ainsi, pour le premier critère, un résultat de 2 pour l'adaptabilité à l'état des algues et la possibilité de les conserver sous l'état sec avant utilisation.

À l'opposé, le procédé chimique permettant la conversion de la matière organique en biométhane est très sensible à la présence de contaminants ou de résidus non organiques, ce qui entraîne la nécessité d'un prétri et d'un lavage avant l'utilisation dans le procédé. Pour cette raison, le résultat du second critère est de 1.

Le rendement du processus de biométhanisation du procédé est lié au type de résidus organiques utilisé. Normalement, l'industrie établit sa production en employant une seule source de matière première comme le maïs ou le lisier animal afin d'uniformiser sa production. En présence d'un approvisionnement variable, l'installation doit dépendre d'une seconde source pour être rentable. Dans la situation des Antilles, cette seconde source peut être d'origine agricole comme du lisier ou des résidus verts. Un résultat de 1, définissant une certaine adaptabilité du procédé, est donc attribué au troisième critère.

Selon la hiérarchie des 3RV-E, la biométhanisation est considérée comme une combinaison de recyclage et de valorisation énergétique, ce qui représente un résultat de 3 au quatrième critère. Le procédé industriel de biométhanisation génère un solide, le digestat, qui doit être éliminé ou valorisé en fin de processus.

Plusieurs entreprises de biométhanisation exploitent aussi des entreprises de compostage industriel pour valoriser les extrants. Un résultat de 1, dû à la présence d'extrants jugés nuisibles issus du procédé chimique, est attribué pour le cinquième critère. Grâce à la possibilité de jumeler le procédé avec une autre option de valorisation soit le compostage, un résultat de 2 est attribué au neuvième critère. En effet, le solide produit dans le réacteur est un digestat semblable au compost qui est destiné au retour à la terre.

Selon l'évaluation du sixième critère, la biométhanisation est un procédé très complexe nécessitant une production centralisée à une installation éloignée, le besoin d'équipements spécialisé et très technique, ainsi qu'une main-d'œuvre qualifiée ayant une formation scolaire technique ou professionnelle, ce qui permet l'obtention d'un résultat de 1.

Dans le cadre de l'évaluation du septième critère visant les besoins d'investissement pour implanter et maintenir le procédé, celui-ci obtient un résultat de 3 pour la Martinique qui détient des installations jumelées de compostage et de biométhanisation; un résultat de 2 en présence d'un site de compostage sans jumelage pour la Guadeloupe et la Barbade, et un résultat de 1 pour la République de Trinité-et-Tobago en absence d'installations de compostage et de biométhanisation.

Dans le cadre du huitième critère visant la possibilité de retour sur investissement, l'évaluation rapporte que le produit est vendu localement, sous forme gazeuse, en vue de la production électrique par des centrales thermiques. À la lumière de cette analyse, un résultat de 1 est attribué en raison d'une possible commercialisation locale et d'un retour limité sur investissement.

Tableau 5.4 Sommaire de l'évaluation des critères pour la biométhanisation

Critère	Résultat obtenu
État des algues	2
Prétraitement de la matière brute	1
Possibilité de traitement des volumes variables	1
Hiérarchie selon les 3RV-E	3
Présence d'extrait(s) nuisible(s) lors du procédé	1
Niveau de centralisation et de complexité des opérations	1
Coûts d'implantation et d'opération	Martinique : 3 Guadeloupe, Barbade : 2 Trinité-et-Tobago : 1
Possibilité de retour sur le produit fini	1
Possibilité de combiner avec d'autres technologies	2

5.2.5 Raffinage du biodiésel

Dans le cadre du raffinage du biodiésel, l'état frais des algues est considéré comme essentiel puisqu'en définitive, le procédé convertit des composés organiques en hydrocarbures. Ainsi, pour le premier critère, un résultat de 0 est attribué pour la nécessité d'utiliser des algues fraîches et humides.

De plus, ce procédé de conversion s'avère très sensible à la présence de contaminants ou de résidus non organiques, entraînant la nécessité d'un prétri et d'un lavage. Cette spécificité induit un résultat de 1 à l'évaluation du second critère.

En considérant que le rendement du procédé est lié au type de résidus organiques utilisé et à la méthode employée, chaque entreprise établit actuellement sa production en employant une seule source comme des graisses animales ou des huiles végétales. En présence de volumes variables de matière brute, cette spécificité du milieu peut être compensée par une seconde source complémentaire prévue. L'évaluation du troisième critère reflète cette possible adaptabilité par un résultat de 1.

Selon la hiérarchie des 3RV-E, la finalité du raffinage du biodiésel est considérée comme une valorisation énergétique, ce qui représente un résultat de 1 au quatrième critère.

Actuellement, le procédé de raffinage du biodiésel est réalisé dans les mêmes installations que le raffinage des hydrocarbures traditionnels puisque les procédés sont similaires et les produits combinables lors de la vente. Cette production est issue d'un procédé très complexe nécessitant une production centralisée à une installation éloignée, le besoin d'équipements spécialisés et très techniques, ainsi qu'une main-d'œuvre qualifiée ayant une formation scolaire technique ou professionnelle, cela assigne le résultat de 1 au sixième critère.

Parmi les pays identifiés, la République de Trinité-et-Tobago dispose d'installations de raffinage puisqu'elle exploite des hydrocarbures sur son territoire. Dans le cadre de l'évaluation du septième critère visant les besoins d'investissement pour implanter et maintenir le procédé, le raffinage du biodiésel produit un résultat de 1 pour les pays n'ayant pas d'installations et un résultat de 2 pour la République de Trinité-et-Tobago puisque les installations existantes nécessitent des ajustements pour effectuer la production.

De plus, le procédé nécessite un apport régulier en réactifs chimiques notamment lors de l'étape de la transestérification où l'usage d'un alcool et d'un catalyseur est nécessaire. Ces étapes entraînent des coûts réguliers proportionnels à la production. De plus, le procédé industriel de raffinage génère des extrants chimiques comme de la glycérine qui nécessitent d'être éliminés ou valorisés dans une autre industrie. Un résultat de 1, dû à la présence d'extrants jugés nuisibles, est attribué pour le cinquième critère.

Par définition, le raffinage du biodiésel est un procédé final qui mène à la digestion des algues et donc qui empêche la combinaison avec un autre procédé. Selon les barèmes établis au neuvième critère, un résultat de 1 est attribué.

Dans le cadre du huitième critère visant la possibilité de retour sur investissement, l'évaluation rapporte que le produit est vendu localement ou internationalement en vue de la production électrique par des centrales thermiques. Le prix de vente sur le marché international est en constante croissance (OCDE et FAO, 2018; Tampier, 2009). À la lumière de cette analyse, un résultat de 2 est attribué en raison d'une possible commercialisation internationale et d'un retour sur investissement potentiel

Tableau 5.5 Sommaire de l'évaluation des critères pour le raffinage du biodiésel

Critère	Résultat obtenu
État des algues	0
Prétraitement de la matière brute	1
Possibilité de traitement des volumes variables	1
Hiérarchie selon les 3RV-E	1
Présence d'extrait(s) nuisible(s) lors du procédé	1
Niveau de centralisation et de complexité des opérations	1
Coûts d'implantation et d'opération	Martinique, Guadeloupe et Barbade : 1 Trinité-et-Tobago : 2
Possibilité de retour sur le produit fini	2
Possibilité de combiner avec d'autres technologies	1

5.2.6 Combustible pour centrale thermique

Parmi les pays identifiés, trois pays détiennent des installations pour cette valorisation, soit la Martinique avec une centrale thermique par incinération de déchets ainsi que la Guadeloupe et la Barbade par l'utilisation de turbines à combustion bagasse/charbon.

Dans le cas de la Guadeloupe et la Barbade, l'évaluation est basée sur un remplacement des bagasses sèches par des sargasses sèches. L'évaluation pour le dernier pays implique la construction de nouvelles installations. Cet aspect est soulevé lors de l'évaluation du septième critère qui produit les résultats suivants.

Pour la Martinique, un résultat de 3 est attribué en raison de l'existence d'installations ne nécessitant pas d'ajustement. Pour la Guadeloupe et la Barbade, un résultat de 2 est attribué puisque le procédé doit être adapté, mais qu'il existe des installations. Pour la République de Trinité-et-Tobago, cette option de valorisation nécessite de nouvelles installations, ce qui attribue un résultat de 1 au septième critère.

Dans le cadre des procédés thermiques comme l'incinération ou l'utilisation de turbines à combustion, le combustible est dégradé thermiquement, produisant un résidu issu de la carbonisation. Ce dernier est toujours présent et contient diverses substances nuisibles, dont des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et de la suie. Ainsi pour tous les procédés, le prétriage et le prélavage ne sont pas nécessaires, mais ils limitent la présence d'extrants nuisibles supplémentaires.

L'évaluation du troisième critère produit un résultat de 3 soit l'absence de nécessité d'un prétraitement. De plus, l'analyse permet d'attribuer un résultat de 1 au cinquième critère visant à déterminer la présence d'extrait nuisible et un résultat de 1 pour le neuvième critère en absence de possibilité de jumelage.

De plus, les deux procédés identifiés bénéficient d'une capacité d'adaptation aux variations de volumes puisqu'ils sont initialement liés à d'autres sources comme les déchets, le charbon et la bagasse. Cette adaptabilité permet d'obtenir un résultat de 1 au troisième critère.

Finalement, l'état des algues est considéré comme important puisqu'en définitive, l'algue est destinée à se dégrader thermiquement et que la présence de sargasses gorgées d'eau rendra le procédé de dégradation thermique moins efficace. Ainsi, pour le premier critère, un résultat de 1 pour la nécessité d'employer des algues sèches est attribué.

Selon l'évaluation du sixième critère, l'utilisation des résidus de sargasses comme combustible dans une centrale thermique est un procédé faiblement complexe, nécessitant une production centralisée à une installation, le besoin d'équipements spécialisés et d'une main d'œuvre légèrement qualifiée ou formée par l'entreprise. Un résultat de 2 est attribué. Selon la hiérarchie des 3RV-E, cette option est considérée comme une valorisation énergétique, ce qui représente un résultat de 1 au quatrième critère.

Dans le cadre du huitième critère visant la possibilité de retour sur investissement, l'évaluation rapporte que l'énergie électrique produite est vendue localement ou que les résidus peuvent être vendus comme combustible ailleurs. À la lumière de cette analyse, un résultat de 1 est attribué en raison d'une possible commercialisation locale ou de proximité dans les îles avoisinantes et d'un retour sur investissement potentiel.

Tableau 5.6 Sommaire de l'évaluation des critères pour l'utilisation comme combustible dans une centrale thermique

Critère	Résultat obtenu
État des algues	1
Prétraitement de la matière brute	3
Possibilité de traitement des volumes variables	1
Hiérarchie selon les 3RV-E	1
Présence d'extrait(s) nuisible(s) lors du procédé	1
Niveau de centralisation et de complexité des opérations	2
Coûts d'implantation et d'opération	Martinique : 3 Guadeloupe et Barbade : 2 Trinité-et-Tobago : 1
Possibilité de retour sur le produit fini	1
Possibilité de combiner avec d'autres technologies	1

5.2.7 Alginate de sodium

Dans le cadre du processus d'extraction de l'alginate de sodium, l'état des algues est considéré comme important puisque la substance est présente à l'état frais, mais dégradée à l'état putréfié. Ainsi, pour le premier critère, un résultat de 0 est attribué pour la nécessité de requérir à des algues humides et fraîches.

De plus, considérant la précision de la méthodologie, la matière brute doit être exempte de contaminant, ce qui requiert un lavage et un prétri. Cette nécessité signifie que l'évaluation du deuxième critère obtient un résultat de 1. Selon la hiérarchie des 3RV-E, l'extraction de l'alginate de sodium est considérée comme une valorisation matérielle, ce qui représente un résultat de 2 au quatrième critère.

Dans le cadre du processus d'extraction, des réactifs chimiques comme le chlorure d'hydrogène, le carbonate de sodium ou l'hydroxyde de sodium sont utilisés et les réactions produisent des extraits comme l'acide carbonique et du digestat. À ce titre, l'évaluation du cinquième critère attribue un résultat de 1 pour la production d'extrait nuisible qu'il faut gérer.

Concernant l'adaptabilité du procédé, comme évalué par le troisième critère, le procédé est dépendant de la matière brute et n'offre pas d'adaptabilité aux variations de volumes. À ce titre, un résultat de 0 est attribué. Selon les barèmes établis au neuvième critère et par définition, la digestion induite par le procédé exclut la possibilité de jumeler à une autre option de valorisation. À ce titre, un résultat de 1 est attribué.

Selon l'évaluation du sixième critère, le procédé est jugé très complexe, nécessitant une production centralisée à une installation éloignée, le besoin d'équipements spécialisés et très techniques, ainsi qu'une main-d'œuvre qualifiée ayant une formation scolaire technique ou professionnelle, ce qui induit un résultat de 1.

Dans le cadre du septième critère visant les besoins d'investissement pour implanter et maintenir le procédé, l'évaluation induit un résultat de 1 puisqu'actuellement il n'existe pas d'installation de production et que le procédé nécessite un apport régulier en produits chimiques, entraînant des coûts réguliers proportionnels à la production.

L'évaluation de la possibilité de retour sur investissement, visé par le huitième critère, rapporte que le produit fini est vendu localement ou internationalement en vue d'être intégré dans l'industrie alimentaire, cosmétique ou pharmaceutique. À la lumière de cette analyse, un résultat de 2 est attribué en raison d'une possible commercialisation internationale et d'un retour sur investissement potentiel.

Tableau 5.7 Sommaire de l'évaluation des critères pour la production d'alginate de sodium

Critère	Résultat obtenu
État des algues	0
Prétraitement de la matière brute	1
Possibilité de traitement des volumes variables	0
Hiérarchie selon les 3RV-E	2
Présence d'extrait(s) nuisible(s) lors du procédé	1
Niveau de centralisation et de complexité des opérations	1
Coûts d'implantation et d'opération	1
Possibilité de retour sur le produit fini	2
Possibilité de combiner avec d'autres technologies	1

5.2.8 Plastique biosourcé

Dans le cadre de la fabrication de plastique biosourcé, l'état des algues est considéré comme important puisque les réactions nécessitent la présence des sucres de l'algue. À ce titre, l'évaluation du premier critère attribue un résultat de 0 pour le besoin d'utiliser une algue fraîche et humide. De plus, considérant la précision de la méthodologie, la matière brute doit être exempte de contaminants, ce qui requiert un lavage et un prétri. Cette nécessité signifie que l'évaluation du deuxième critère obtient un résultat de 1.

Selon la hiérarchie des 3RV-E, le procédé est considéré comme une valorisation matérielle, ce qui représente un résultat de 2 au quatrième critère. Dans le cadre du procédé de fabrication, principalement lors de l'extraction, des réactifs chimiques sont employés et il y a la production d'extrants comme du digestat. À ce titre, l'évaluation du cinquième critère attribue un résultat de 1 pour la production d'extrants nuisibles qu'il faut gérer. Concernant l'adaptabilité du procédé, comme évalué par le troisième critère, la fabrication de plastique biosourcé est dépendante de la matière brute et n'offre pas d'adaptabilité aux variations dans les volumes, ce qui se traduit par un résultat de 0. Par définition, le procédé est décrit comme final et n'offrant pas de possibilité de jumelage, car la matière brute est dégradée dans le procédé, ce qui induit un résultat de 1 pour le neuvième critère.

Selon l'évaluation du sixième critère, ce procédé de fabrication est jugé très complexe, nécessitant une production centralisée à une installation éloignée, le besoin d'équipements spécialisés et très techniques, ainsi qu'une main-d'œuvre qualifiée ayant une formation scolaire technique ou professionnelle. Cette évaluation est rapportée sous la forme d'un résultat de 1 pour ce critère. Dans le cadre de l'évaluation des besoins d'investissement pour implanter et maintenir le procédé, un résultat de 1 est obtenu au septième critère puisqu'actuellement il n'existe pas d'installation de production et que le procédé nécessite un apport régulier en produits chimiques, entraînant des coûts réguliers proportionnels à la production

Selon l'évaluation du huitième critère visant la possibilité de retour sur investissement, le produit fini est vendu localement ou internationalement en vue d'être intégré dans l'industrie de la fabrication. À la lumière de cette analyse, un résultat de 2 est attribué en raison d'une possible commercialisation internationale et d'un retour sur investissement potentiel

Tableau 5.8 Sommaire de l'évaluation des critères pour la production de plastique biosourcé

Critère	Résultat obtenu
État des algues	0
Prétraitement de la matière brute	1
Possibilité de traitement des volumes variables	0
Hiérarchie selon les 3RV-E	2
Présence d'extrait(s) nuisible(s) lors du procédé	1
Niveau de centralisation et de complexité des opérations	1
Coûts d'implantation et d'opération	1
Possibilité de retour sur le produit fini	2
Possibilité de combiner avec d'autres technologies	1

5.2.9 Élimination comme résidus non valorisable

Dans le cadre de l'élimination ultime, l'état des algues et la présence de contaminants comme du plastique et du sable ne sont pas considérés comme importants puisqu'en définitive, l'algue n'est pas destinée à une valorisation. Ainsi, pour le premier critère, un résultat de 2 pour la possibilité d'utiliser des algues humides ou sèches sans égard à l'état est attribué, mais pour le second critère, un résultat de 3 convient, car aucun prétraitement n'est nécessaire.

Par définition, l'élimination finale écarte toute possibilité de jumelage à un autre procédé de valorisation ou retour sur investissement. À ce titre, le neuvième critère attribue une valeur de 1 pour cette absence de jumelage et un résultat de 0 pour le huitième critère pour l'absence de retour sur investissement.

Selon la hiérarchie des 3RV-E, cette option est définie comme de l'élimination ultime, ce qui lui vaut un résultat de 0 dans l'évaluation du quatrième critère. Selon l'évaluation du sixième critère, l'élimination ultime consiste à une option applicable localement ou à faible distance, mais nécessitant d'être centralisé à une installation avec l'utilisation d'équipements spécialisés et d'une main d'œuvre légèrement qualifiée ou formée par l'entreprise. Un résultat de 2 est attribué.

Actuellement, les autorités signalent que les sites d'enfouissement de la plupart des îles des Antilles sont surchargés et peinent à répondre à la demande (Florenne et al., 2016). Dans ce contexte, l'option de l'élimination dans les sites d'enfouissement induit le besoin d'ouvrir des sites d'enfouissement supplémentaires. À ce titre, l'évaluation du septième critère visant le besoin d'investissement pour l'implantation d'un nouveau site produit un résultat de 1.

Pour l'évaluation du cinquième critère visant la présence d'extrants nuisibles, une source de nature physique, soit l'encombrement, a été identifiée en plus de la présence d'une augmentation des concentrations de sel, de sable et de lixiviats lors de la décomposition des résidus. Dans un contexte où les sites d'enfouissement sont déjà surchargés, un encombrement supplémentaire produit une nuisance. Pour ce critère, un résultat de 1 est donc attribué.

De plus, cette option n'a pas vraiment de limitation pour s'adapter aux variations des volumes, car elle dépend de la disponibilité d'espaces dans les sites d'enfouissement. Un résultat de 1, qui implique une possibilité d'adaptation aux variations, est attribué.

Tableau 5.9 Sommaire de l'évaluation des critères pour l'élimination ultime

Critère	Résultat obtenu
État des algues	2
Prétraitement de la matière brute	3
Possibilité de traitement des volumes variables	1
Hiérarchie selon les 3RV-E	0
Présence d'extrait(s) nuisible(s) lors du procédé	1
Niveau de centralisation et de complexité des opérations	2
Coûts d'implantation et d'opération	1
Possibilité de retour sur le produit fini	0
Possibilité de combiner avec d'autres technologies	1

5.3 Analyse par pays

À la lumière de l'analyse par option de valorisation (voir tableau 5.1 à 5.9), une variation apparaît pour certains pays en fonction de la présence d'installation comme des centrales thermiques ou des ressources spécifiques au besoin. Cette variation permet d'identifier des options mieux adaptées au contexte spécifique du pays identifié ou des pays ayant des contextes similaires. Les annexes 1 à 4 présentent en détail l'évaluation effectuée.

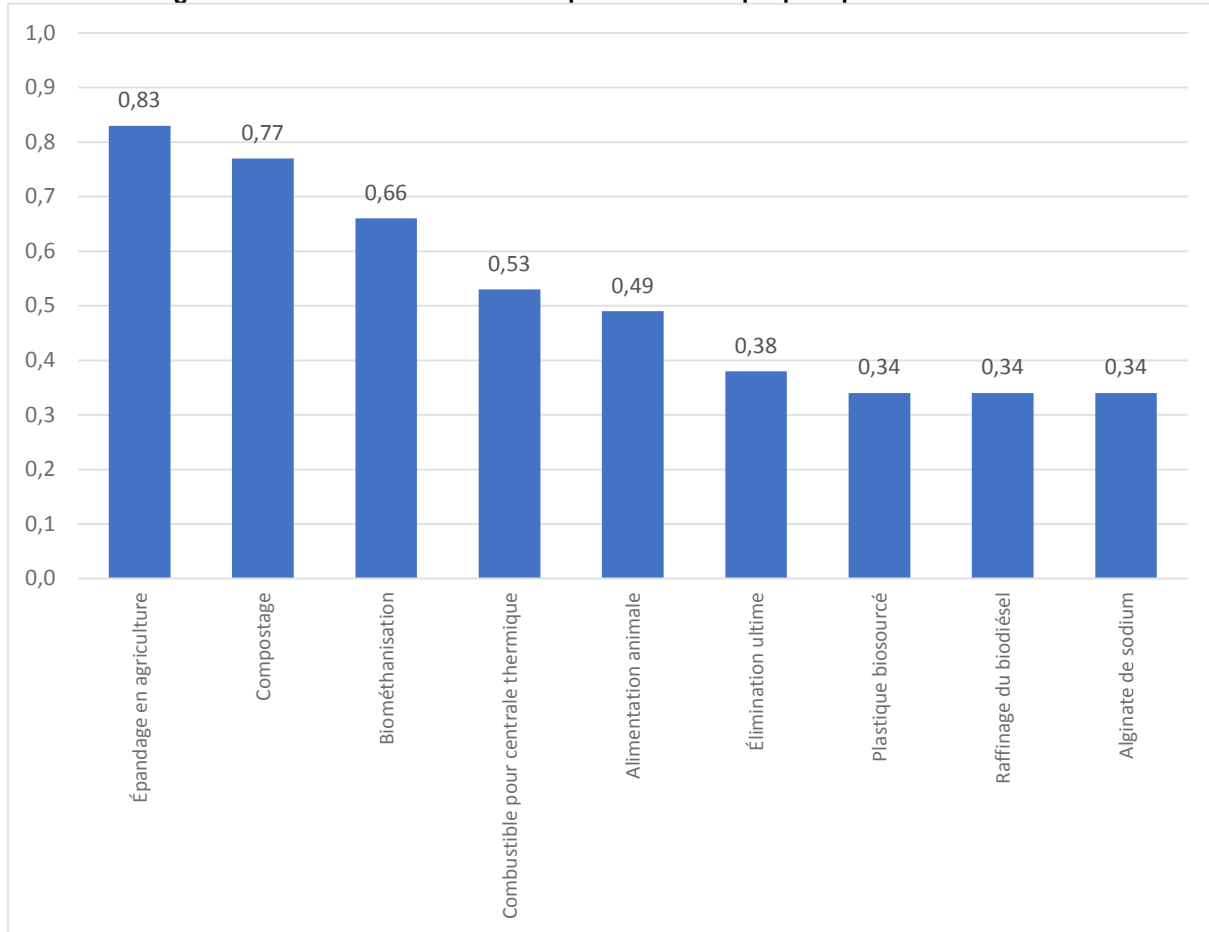
5.3.1 Martinique

La Martinique est le premier pays identifié en raison d'un contexte socioéconomique riche, principalement lié à une interdépendance avec la France, de la présence d'une structure de gestion des matières résiduelles ainsi que de la présence d'un incinérateur permettant la cogénération électrique.

Comme présenté à la figure 5.1, l'analyse des critères pondérés pour la Martinique permet de relever que l'épandage en agriculture, le compostage, la biométhanisation, l'utilisation comme combustible en centrale thermique et l'alimentation animale constituent les cinq meilleures options de valorisation.

Cet ordre s'avère logique si l'on considère que le pays est fortement agricole, dispose d'installations de compostage jumelé à de la biométhanisation et qu'une partie de l'électricité provient de l'incinération des matières résiduelles. De plus, les options moins traditionnelles comme les plastiques biosourcés, l'extraction d'alginate et le raffinage du biodiésel sont moins avantageuses que l'élimination ultime.

Figure 5.1 Sommaire de l'évaluation pour la Martinique par option de valorisation



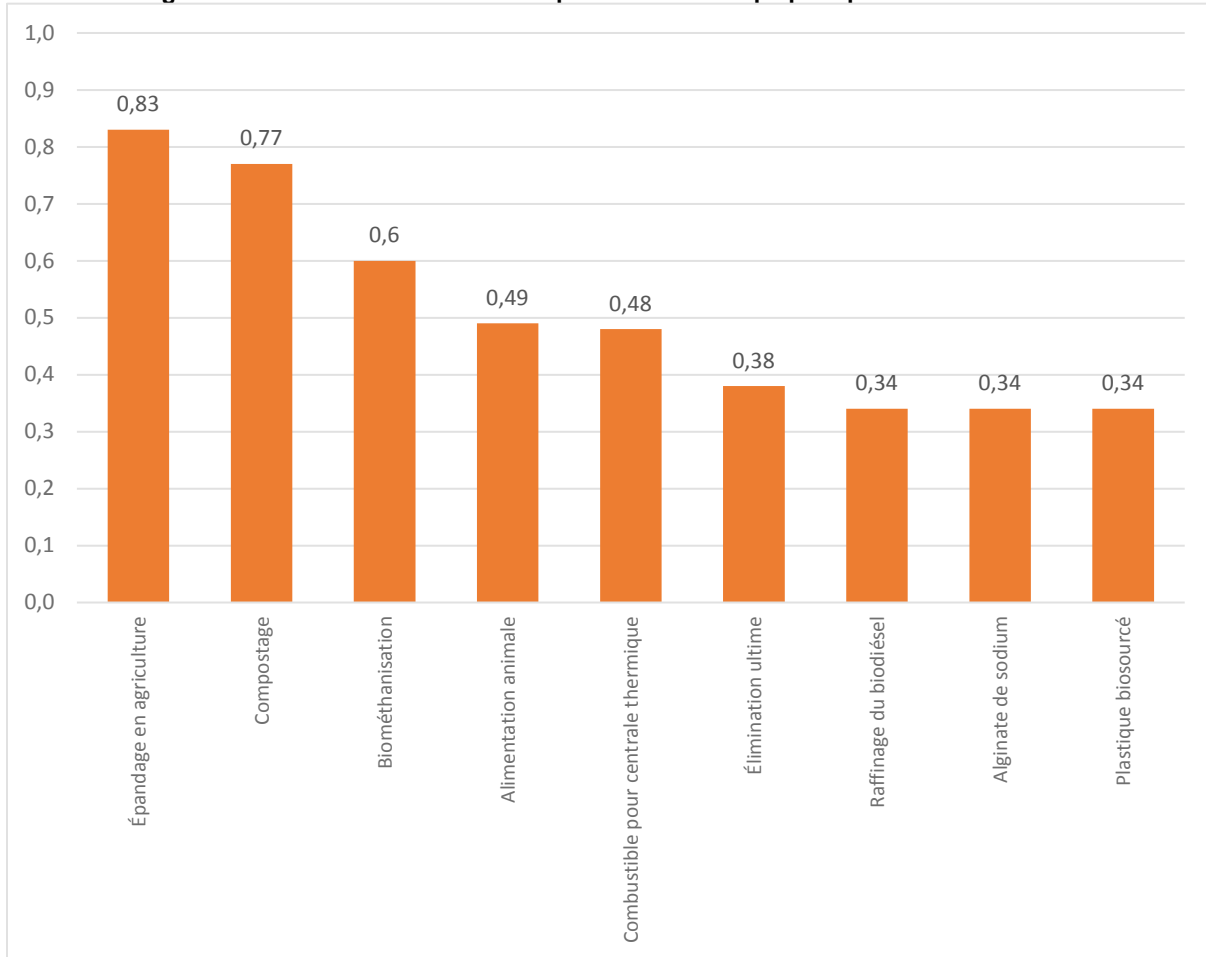
5.3.2 Guadeloupe

La Guadeloupe est le second pays identifié en raison d'un contexte socioéconomique riche, principalement lié à une interdépendance avec la France, la présence de structures de gestion des matières résiduelles ainsi que la présence de centrales thermiques à cogénération charbon/bagasse.

Comme présenté à la figure 5.2, l'analyse des critères pondérés pour la Guadeloupe permet de relever que l'épandage en agriculture, le compostage, la biométhanisation, l'alimentation animale et l'utilisation comme combustible en centrale thermique constituent les cinq meilleures options de valorisation.

Cet ordre s'avère logique si l'on considère que le pays est fortement agricole, dispose d'installations de compostage qui pourraient aisément être jumelées à de la biométhanisation et qu'une partie de l'électricité provient de l'incinération des résidus de cannes à sucre. De plus, les options moins traditionnelles comme les plastiques biosourcés, l'extraction d'alginate et le raffinage du biodiésel sont moins avantageuses que l'élimination ultime.

Figure 5.2 Sommaire de l'évaluation pour la Guadeloupe par option de valorisation



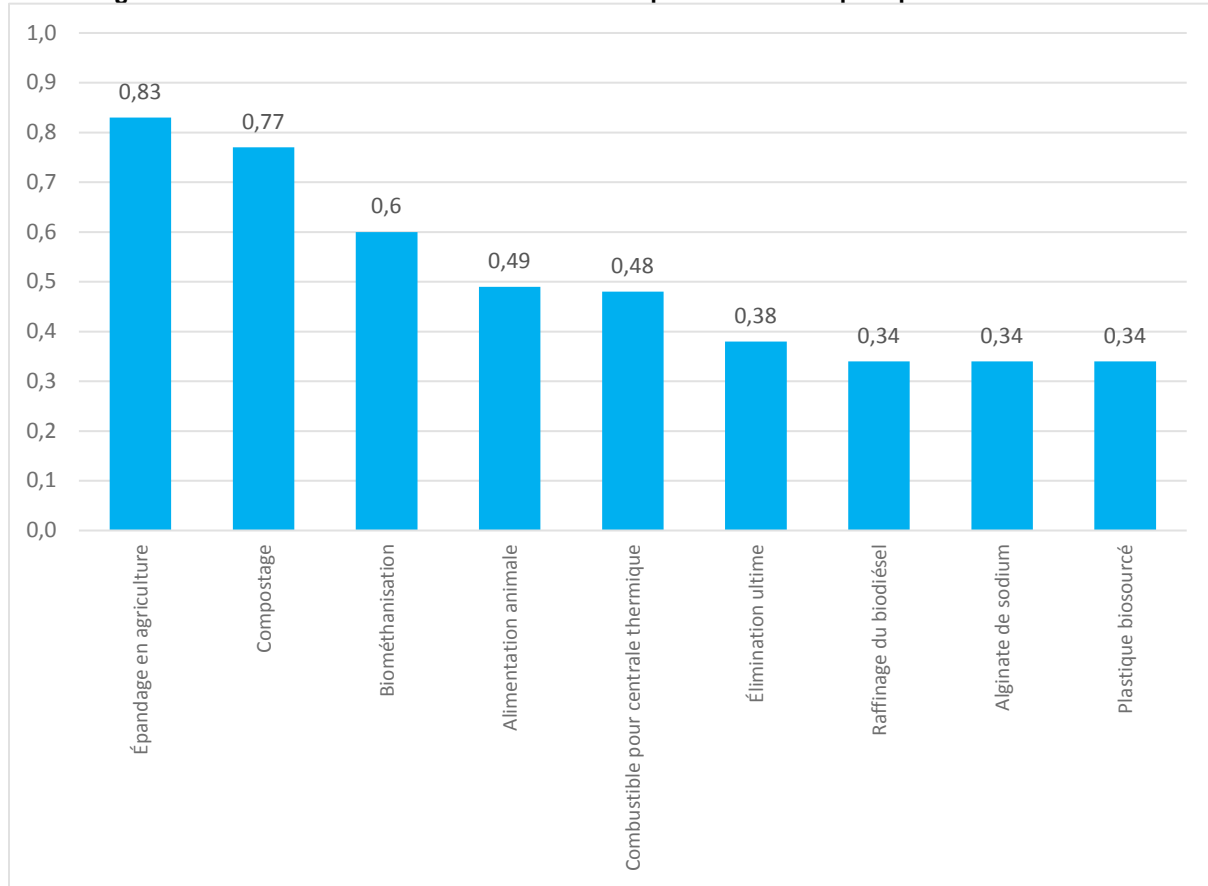
5.3.3 Barbade

La Barbade est le troisième pays identifié en raison d'un contexte socioéconomique moyennement riche, d'une indépendance politique, de la présence de structures de gestion des matières résiduelles ainsi que de la présence de centrales thermiques à cogénération charbon/bagasse.

Comme présenté à la figure 5.3, l'analyse des critères pondérés pour la Barbade permet de relever que l'épandage en agriculture, le compostage, la biométhanisation, l'alimentation animale et l'utilisation comme combustible en centrale thermique constituent les cinq meilleures options de valorisation.

Cet ordre s'avère logique si l'on considère que le pays est fortement agricole, dispose d'installations de compostage qui pourraient aisément être jumelées à de la biométhanisation et qu'une partie de l'électricité provient de l'incinération des résidus de cannes à sucre. De plus, les options moins traditionnelles comme les plastiques biosourcés, l'extraction d'alginate et le raffinage du biodiésel sont moins avantageuses que l'élimination ultime.

Figure 5.3 Sommaire de l'évaluation des critères pour la Barbade par option de valorisation



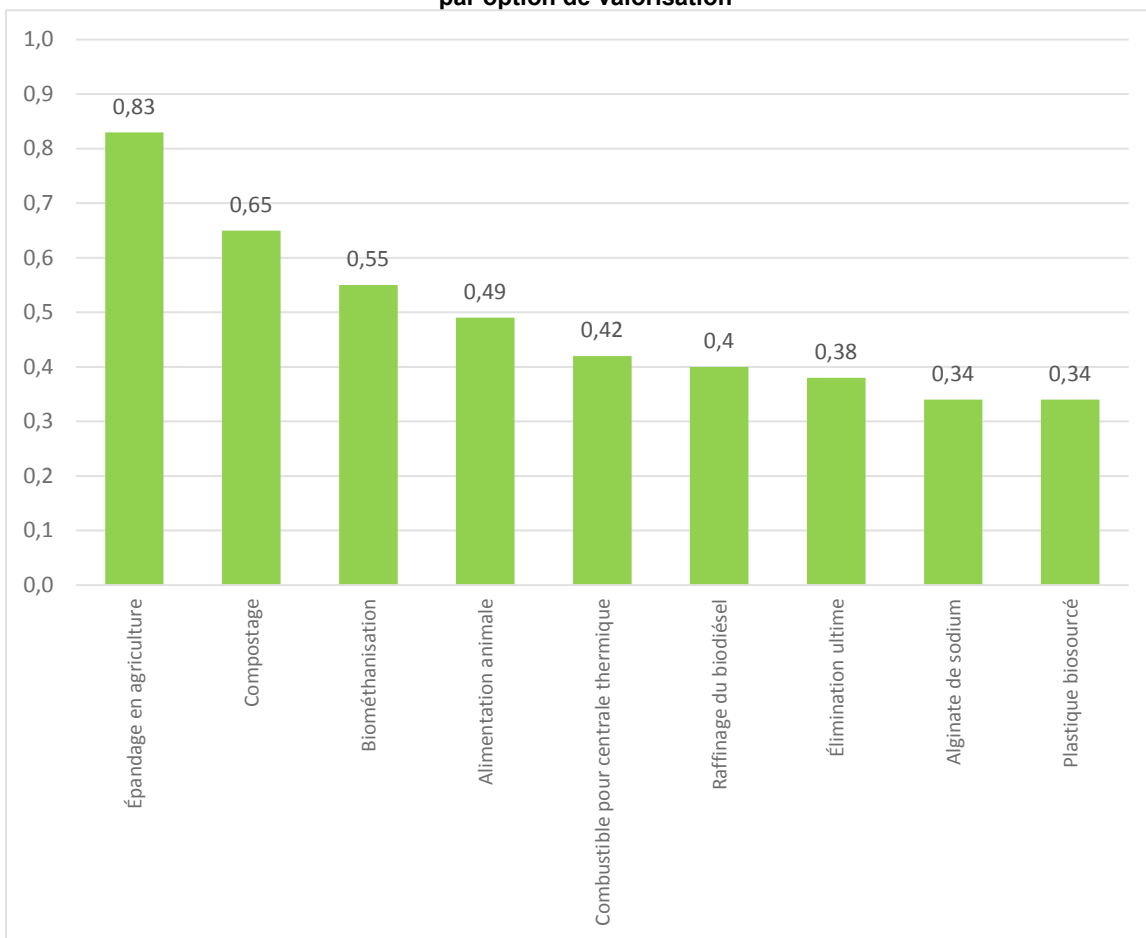
5.3.4 République de Trinité-et-Tobago

La République de Trinité-et-Tobago est le dernier pays identifié en raison d'un contexte socioéconomique moyennement riche, d'une indépendance politique, de la présence de structures de gestion des matières résiduelles ainsi que la présence des centrales thermiques au diesel et d'une industrie des hydrocarbures très développée.

Comme présenté à la figure 5.4, l'analyse des critères pondérés pour la République de Trinité-et-Tobago permet de relever que l'épandage en agriculture, le compostage, la biométhanisation, l'alimentation animale et l'utilisation comme combustible en centrale thermique constituent les cinq meilleures options de valorisation.

Cet ordre s'avère logique si l'on considère que le pays est fortement agricole. L'analyse présente aussi que la construction d'installations de compostage jumelées à de la biométhanisation pourrait représenter une alternative intéressante pour les résidus de sargasses. De plus, l'analyse indique que la construction d'une centrale thermique par cogénération s'avèrerait plus avantageuse que le raffinage de biodiésel en vue d'une utilisation dans les centrales au diesel existantes.

Figure 5.4 Sommaire de l'évaluation des critères pour la République de Trinité-et-Tobago par option de valorisation



6. RECOMMANDATIONS

À la suite de l'analyse multicritère de la section précédente, quelques recommandations ressortent concernant les options de valorisation et la gestion des résidus de sargasses. Comme l'indique Florenne dans son rapport de 2016, il n'existe pas de solution unique de valorisation dans le cas des sargasses.

En effet, pour choisir la meilleure valorisation, il s'agit souvent de savoir bien combiner les moyens en fonction de la réalité de la région ou des avantages désirés. Comme la section précédente l'a démontré, la grande variabilité dans le temps des volumes et l'incertitude de la progression du phénomène nuisent à la mise en place d'options de valorisation plus développées comme les plastiques biosourcés ou l'extraction des alginates.

6.1 Recommandation 1

La valorisation dans la filière agricole, comme l'épandage agricole, le compostage ou l'utilisation dans l'alimentation animale, s'avère la voie à privilégier dans le contexte des Antilles. Cette constatation résulte principalement de la présence d'une forte concentration de production agricole comme la banane et la canne à sucre. Les activités tout au long de l'année permettent une valorisation large à faible coût.

De façon similaire, l'intégration de sargasses dans l'alimentation animale permet une utilisation significative de volumes. En effet, le séchage permet d'incorporer quotidiennement des sargasses à l'alimentation, permettant un apport alimentaire de minéraux à faible coût tout au long de l'année. Toutefois, cette option de valorisation doit compléter l'alimentation traditionnelle puisqu'en raison du faible apport nutritif des algues, subsiste le besoin de compléter avec de la moulée traditionnelle.

6.2 Recommandation 2

La combinaison d'installations jumelées de compostage et de biométhanisation présente un bon potentiel de valorisation et de retour sur investissement en raison d'une hausse de la demande mondiale en méthane et en compost pour les grandes cultures.

Pour certains pays des Antilles, notamment la Martinique, la Guadeloupe et la Barbade, les autorités ont déjà mis en place des installations de compostage et des collectes régulières de résidus verts en vue d'une production de compost. Cette production est ensuite mise à la disposition des habitants ou commercialisée par l'entreprise de compostage. Pour certains centres de compostage, un jumelage avec des installations de biométhanisation est déjà mis en place et pour les autres, ce jumelage pourrait être un investissement payant à plus ou moins long terme.

De plus, la présence d'installations de compostage déjà viables permet d'ouvrir la porte à un élargissement de la production de compost et à sa commercialisation vers des acquéreurs extraterritoriaux de proximité.

Enfin, l'analyse à la section précédente démontre que, même en absence des bases nécessaires comme des installations et une collecte établie de résidus verts, l'implantation du duo compostage-biométhanisation s'avère avantageuse. Cette installation permet d'obtenir une base pour une collecte de résidus verts permettant de réduire les volumes d'ordures destinées à l'élimination.

6.3 Recommandation 3

Pour les pays où la production d'électricité provient de centrales thermiques à cogénération par brulage du charbon et de la bagasse, il existe un potentiel de valorisation consistant à remplacer la bagasse par des résidus de sargasses sèches.

Dans le contexte actuel, les territoires outre-mer français comme la Martinique et la Guadeloupe présentent quelques centrales thermiques employant un mélange bagasse et charbon ainsi que des centrales thermiques au diésel. Afin de satisfaire le décret central visant une autonomie énergétique d'ici 2030 pour les territoires outre-mer français, il devient pertinent d'amorcer une conversion des énergies fossiles issues de l'extérieur du pays vers des énergies renouvelables ou locales (Ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales, 2019). Dans cette optique, un transfert de technologie vers les centrales thermiques charbon/sargasses pourrait être pertinent afin d'entreprendre ce changement.

De plus, l'analyse de la section précédente démontre que même en absence des installations, l'implantation de cogénération présente plus d'avantages que le raffinage du biodiésel de sargasses, et ce même dans les pays disposant d'installations existantes de raffinage pétrolier comme la République de Trinité-et-Tobago.

6.4 Recommandation 4

Dans le contexte de la République de Trinité-et-Tobago qui présente actuellement des installations permettant le raffinage des hydrocarbures, l'ajout d'installations jumelées pour le raffinage du biodiésel représenterait un nouveau potentiel de retombées économiques dans ce marché en croissance.

En effet, comme l'indique le *U.S. Department of Energy* dans son rapport de 2012, les grandes économies mondiales tendent à augmenter le pourcentage de biocarburant dans les mélanges de diésel en vue de diminuer l'empreinte environnementale de ceux-ci. L'utilisation d'une biomasse actuelle plutôt que de ressources fossiles s'inscrit dans la recherche de carboneutralité.

Toutefois, cette option de valorisation reste dans le cadre des carburants traditionnels puisqu'elle demeure un carburant destiné à la combustion.

Dans un contexte où plusieurs îles des Antilles dépendent de centrales thermiques au diesel, la production de biodiesel jumelé au raffinage d'hydrocarbures traditionnels permet une commercialisation locale et plus verte que le diesel traditionnel. Bien que le contenu énergétique du biodiesel soit considéré comme légèrement inférieur à son équivalent traditionnel, le biodiesel représente un marché florissant et en croissance.

De plus, les biodésels actuellement disponibles sur le marché mondial proviennent principalement de sources alimentaires notamment le soya et le canola. À juste titre, les biodésels issus d'une source non alimentaire, comme les sargasses, représentent un avantage puisqu'il n'entame pas les réserves alimentaires mondiales.

6.5 Recommandation 5

Dans la majorité des options de valorisation envisageables pour les sargasses échouées, le retrait des intrants enchevêtrés indésirables s'avère essentiel. Deux étapes peuvent permettre ce tri soit directement sur du matériel frais lors de la collecte sur les plages ou soit par une méthode de séparation à la suite du transport et du séchage.

6.6 Recommandation 6

Selon l'analyse de la section précédente, les nouvelles voies de valorisation comme les plastiques biosourcés ou l'extraction de l'alginate de sodium s'avèrent peu envisageables dans les conditions actuelles de réalisation. En effet, puisque ces méthodes nécessitent de la matière fraîche, elles induisent des coûts supplémentaires pour une collecte en mer et ne permettent pas de résoudre la problématique des volumes échoués.

Cependant, il pourrait être prématuré de totalement écarter ces options pour le futur. Dans un contexte où ces options s'avèrent récentes, leur protocole et les conditions de réalisation peuvent encore évoluer, ouvrant la porte à des procédés qui pourraient utiliser de la matière moins fraîche ou sèche. Il est donc recommandé de procéder régulièrement à des évaluations de la faisabilité puisque ces options sont en expansion sur les marchés mondiaux.

CONCLUSION

Depuis 2011, les plages antillaises sont régulièrement envahies par une marée de sargasses aux proportions démesurées. Face à l'ampleur, les communautés affectées doivent prendre des décisions pour gérer la situation rapidement. Devant l'urgence, plusieurs optent pour l'envoi des résidus d'algues vers les sites d'enfouissement ou pour le stockage temporaire en bordure des plages. Ces options de gestion s'avèrent souvent coûteuses, en plus de nuire à la santé publique et au tourisme.

Dans un contexte où le phénomène semble s'amplifier et que les îles disposent de ressources financières et techniques différentes, la possibilité d'envisager des options de valorisation s'avère variable. À la lumière de cette problématique grandissante, il est pertinent d'aborder son origine et les options qui permettent de valoriser plus adéquatement ces résidus échoués en tenant compte du contexte antillais.

L'actuel essai a donc évalué les formes applicables de mise en valeur pour les échouages massifs de *Sargassum* dans le contexte antillais sous la perspective de quatre pays représentatifs. Pour y arriver, un cheminement en quatre étapes a été défini. Initialement, une présentation du phénomène, de son origine, de ses impacts et de quatre pays affectés a permis d'avoir une vue d'ensemble sur la situation antillaise et les ressources disponibles pour la gestion.

Par la suite, une cueillette d'information sur les méthodes de gestion employées lors d'échouages ailleurs dans le monde a permis d'obtenir un portrait des solutions mises en place par d'autres pays dans des situations similaires. Ensuite, l'acquisition de connaissances sur les techniques de gestion de putrescibles similaires et les techniques actuellement employées pour les *Sargassum* a permis de faire ressortir neuf options de valorisation envisageables.

Finalement, une analyse multicritère appliquée aux options de valorisation identifiées a ségrégué les options les plus avantageuses pour chacun des pays représentatifs. À la lumière de cette analyse, six recommandations ont émergé. Elles visaient les options les plus avantageuses selon le contexte du pays et les améliorations à effectuer dans le processus de gestion.

En somme, les recommandations font ressortir qu'en contexte économique très agricole, les options de valorisation comme l'épandage agricole, le compostage et l'utilisation comme aliment pour le bétail s'avèrent optimales dans le contexte antillais.

De plus, il apparaît que plusieurs pays disposent actuellement d'installations de compostage jumelées ou non avec des installations de biométhanisation. Cette combinaison présente, malgré le besoin d'agrandissement ou de construction d'installations, une voie de valorisation payante et efficace qui permettrait aux communautés d'éponger les frais liés au ramassage et aux coûts sociétaux des échouages.

En perspective, bien que l'avenir de la problématique comporte des incertitudes selon le milieu scientifique, les autorités antillaises doivent envisager que le phénomène progresse encore. Chacun des pays antillais doit s'y préparer et mettre en place des mécanismes de valorisation des résidus de sargasses. Cet essai présente les options envisageables dans leur contexte, ce qui pourra les guider dans cette voie d'optimisation.

D'autre part, les milieux scientifiques et industriels devront s'ouvrir à la mise en place de solutions pour valoriser les épisodes d'échouages massifs, donc répondre à la progression constatée depuis quelques années.

RÉFÉRENCES

- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie [ADEME]. (2018). Collecte, tri et traitement des déchets. *L'ADEME en Martinique*. Repéré à <https://martinique.ademe.fr/expertises/economie-circulaire/collectetri-et-traitement-des-dechets>
- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie [ADEME]. (2019). Algues sargasses : prévention des échouages et perspectives de valorisation. Repéré à <https://martinique.ademe.fr/sites/default/files/situation-perspectives-valorisation-sargasses.pdf>
- Algopack. (2019). Algopack. Repéré à <http://www.algopack.com/>
- Biswas, B., Singh, R., Krishna, B. B., Kumar, J. et Bhaskar, T. (2017). Pyrolysis of azolla, sargassum tenerrimum and water hyacinth for production of bio-oil. *Bioresource Technology*, 242, 139-145.
- Borde, V. (2018, 14 septembre). Faut-il avoir peur... des sargasses ? *L'Actualité*. Repéré à <https://lactualite.com/sante-et-science/faut-il-avoir-peur-des-sargasses/>
- Bureau d'audiences publiques sur l'environnement [BAPE]. (2019). Projet d'aménagement d'un lieu d'enfouissement et d'un centre de traitement de sols contaminés à Bécancour. *BAPE*. Repéré à <https://www.bape.gouv.qc.ca/fr/dossiers/amenagement-lieu-enfouissement-et-centre-traitement-sols-contamines-a-becancour/>
- Byeon, S. Y., Oh, H.-J., Kim, S., Yun, S. H., Kang, J. H., Park, S. R. et Lee, H. J. (2019). The origin and population genetic structure of the 'golden tide' seaweeds, *Sargassum horneri*, in Korean waters. *Scientific Reports*, 9(1), 7757.
- Camacho, O., Mattio, L., Draisma, S., Fredericq, S. et Diaz-Pulido, G. (2015). Morphological and molecular assessment of *Sargassum* (Fucales, Phaeophyceae) from Caribbean Colombia, including the proposal of *Sargassum giganteum* sp. nov., *Sargassum schnetteri* comb. nov. and *Sargassum* section *Cladophyllum* sect. nov. *Systematics and Biodiversity*, 13(2), 105-130.
- Caribbean alliance for sustainable tourism. (2015). *Sargassum : A Resource Guide for the Caribbean*. Repéré à <https://www.onecaribbean.org/wp-content/uploads/SargassumResourceGuideFinal.pdf>
- Centre d'étude et de valorisation des algues [CEVA]. (2019). Description du phénomène et différents types de marées vertes. *CEVA*. Repéré à <https://www.ceva-algues.com/document/description-du-phenomene-et-differents-types-de-marees-vertes/>
- Centre d'étude et de valorisation des algues [CEVA] et Agrocampus Rennes. (2006). Pratiques agricoles, fuites de nitrates et qualité de l'eau dans les bassins versants : Synthèse des références applicables au contexte breton. Repéré à <https://bretagne-environnement.fr/sites/all/libraries/pdf.js/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fbretagne-environnement.fr%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fdocumentation%2Fbiblio%2Ff2c2237d4ef7f9a7ceadb8d62fe45998.pdf>
- Communauté d'agglomération du centre de la Martinique [CACEM]. (2013). Unité de Traitement et de Valorisation des Déchets (UTVD). Repéré à <http://www.cacem.org/environnement/presentation/nos-metiers/utvd.html>
- Déplade, M.-O. (2019, 11 janvier). Les "nitrates bretons", cas d'école pour la haute fonction publique [Billet]. *Transhumances*. Repéré à <https://ritme.hypotheses.org/4190>
- Diaz-Vazquez, L. M., Rojas-Pérez, A., Fuentes-Caraballo, M., Robles, I. V., Jena, U. et Das, K. C. (2015). Demineralization of *Sargassum* spp. Macroalgae Biomass: Selective Hydrothermal Liquefaction Process for Bio-Oil Production. *Frontiers in Energy Research*, 3.
- Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement en Bretagne. (2016). Plan de lutte contre les algues vertes 2017 – 2021 : Cadre général. Repéré à http://www.pays-de-saintbrieuc.org/documents/FTP/214/000/007/730/7730215_1593_projet-document-cadre-PLAV2-v14nov16.pdf

- Énergie de France-Guadeloupe. (2016). Nos énergies. *EDF Guadeloupe*. Repéré à <https://www.edf.gp/edf-en-guadeloupe/les-engagements-edf-dans-l-archipel-guadeloupe/nos-energies>
- Énergie de France-Martinique. (2016). Nos énergies. *EDF Martinique*. Repéré à <https://www.edf.mq/edf-en-martinique/les-engagements-edf-en-martinique/nos-energies>
- Florenne, T., Guerber, F. et Colas-Belcour, F. (2016). *Le phénomène d'échouage des sargasses dans les Antilles et en Guyane* (p. 406). Paris, France : auteur. Repéré à <https://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/164000619/>
- Gaz réseau distribution France [GRDF]. (2019). Biométhane et injection sur le réseau de gaz naturel. *Cegibat.fr*. Repéré à <https://cegibat.grdf.fr/dossier-techniques/marche-energie/injection-biomethane-reseau-gaz-naturel>
- Ghosh, S., Gnaim, R., Greiserman, S., Fadeev, L., Gozin, M. et Golberg, A. (2019). Macroalgal biomass subcritical hydrolysates for the production of polyhydroxyalkanoate (PHA) by *Haloferax mediterranei*. *Bioresource Technology*, 271, 166-173.
- Goldfrank, L. R. et Flomenbaum, N. (dir.). (2006). *Goldfrank's toxicologic emergencies* (8th ed). New York, NY : McGraw-Hill, Medical Pub. Division.
- Gosselin, G. (2018). Mémoire technique : L'incinération des ordures ménagères au Québec comme source d'électricité et de vapeur dans le cadre de « "L'avis sur la sécurité énergétique des Québécois à l'égard des approvisionnements électriques et la contribution du projet du Suroit." »
- Gouvernement du Canada. (2013, 21 mars). V-18 — Sélection de la table des facteurs de correction du volume et des valeurs des masses volumiques normalisées pour certains produits courants. Repéré à <https://www.ic.gc.ca/eic/site/mc-mc.nsf/fra/lm00105.html>
- Gouvernement of Barbados. (2017). Barbados National Energy Policy 2017-2037. Repéré à www.energy.gov.bb
- Government of the Republic of Trinidad and Tobago. (2015). National waste recycling policy. Repéré à <https://www.planning.gov.tt/sites/default/files/WASTE%20RECYCLING%20POLICY%202015%20Final.pdf>
- Gower, J. et King, S. (2019). Seaweed, seaweed everywhere. *Science*, 365(6448), 27-27.
- Huffard, C. L., von Thun, S., Sherman, A. D., Sealey, K. et Smith, K. L. (2014). Pelagic Sargassum community change over a 40-year period: temporal and spatial variability. *Marine Biology*, 161(12), 2735-2751.
- Institut d'émissions des départements d'outre-mer [IEDOM]. (2019a). Rapport annuel : Guadeloupe 2018. Repéré à https://www.iedom.fr/IMG/pdf/ra2018_guadeloupe.pdf
- Institut d'émissions des départements d'outre-mer [IEDOM]. (2019b). Rapport annuel : Martinique 2018. Repéré à https://www.iedom.fr/IMG/pdf/rapport_iedom_martinique2018.pdf
- Institut national de recherche scientifique [INRS]. (2013). Sulfure d'hydrogène. *Fiche toxicologique*. Repéré à http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_32
- Institut national de santé publique du Québec [INSPQ]. (1997). Un poison violent, l'hydrogène sulfuré (H₂S), 13(3).
- Jacobs, A. (2013, 5 juillet). With Surf Like Turf, Huge Algae Bloom Befouls China Coast. *The New York Times*. Repéré à <https://www.nytimes.com/2013/07/06/world/asia/huge-algae-bloom-afflicts-qingdao-china.html>
- Jing, L. (2013). Seaweed farming linked to Qingdao's green tide of algae. *South China Morning Post*. Repéré à <https://www.scmp.com/news/china/article/1284156/cause-qingdaos-green-tide-algae-mystery>
- Klaassen, C. D., Casarett, L. J. et Doull, J. (dir.). (2013). *Casarett and Doull's toxicology: the basic science of poisons* (8th ed). New York, NY : McGraw-Hill Education.

- La Banque Mondiale. (2019a). Barbade. Repéré à <https://donnees.banquemondiale.org/pays/barbade>
- La Banque Mondiale. (2019b). Trinité-et-Tobago. Repéré à <https://donnees.banquemondiale.org/pays/trinite-et-tobago>
- L'Express et Reuters. (2010, 3 février). 134 millions d'euros contre les algues vertes. *L'Express.fr*. Repéré à https://www.lexpress.fr/actualite/societe/environnement/134-millions-d-euros-contre-les-algues-vertes_846389.html
- Li, D., Chen, L., Xu, D., Zhang, X., Ye, N., Chen, F. et Chen, S. (2012). Preparation and characteristics of bio-oil from the marine brown alga *Sargassum patens* C. Agardh. *Bioresource Technology*, 104, 737-742.
- Li, D., Chen, L., Yi, X., Zhang, X. et Ye, N. (2010). Pyrolytic characteristics and kinetics of two brown algae and sodium alginate. *Bioresource Technology*, 101(18), 7131-7136.
- Liu, D., Keesing, J. K., Xing, Q. et Shi, P. (2009). World's largest macroalgal bloom caused by expansion of seaweed aquaculture in China. *Marine Pollution Bulletin*, 58(6), 888-895.
- Liu, X., Wang, Z. et Zhang, X. (2016). A review of the green tides in the Yellow Sea, China. *Marine Environmental Research*, 119, 189-196.
- López Barreiro, D., Beck, M., Hornung, U., Ronsse, F., Kruse, A. et Prins, W. (2015). Suitability of hydrothermal liquefaction as a conversion route to produce biofuels from macroalgae. *Algal Research*, 11, 234-241.
- Mairie de Sarzeau. (2019). Échouage des algues sur la Presqu'île de Rhuys. Repéré à <https://www.sarzeau.fr/echouage-des-algues/>
- Maréchal, J.-P., Hellio, C. et Hu, C. (2017). A simple, fast, and reliable method to predict *Sargassum* washing ashore in the Lesser Antilles. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 5, 54-63.
- Martinique 2030. (2018, 1 juin). Holdex Environnement, une solution de valorisation des sargasses 100 % martiniquaise ! *Martinique 2030*. Repéré à <https://www.martinique2030.com/non-classe/holdex-environnement-une-solution-de-valorisation-des-sargasses-100-martiniquaise>
- McHugh, D. J. (2003). *A guide to the seaweed industry*. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations. Repéré à <http://www.fao.org/3/a-y4765e.pdf>
- Ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales. (2019). Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (TEPCV). *Ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales*. Repéré à <https://www.cohesion-territoires.gouv.fr/loi-relative-la-transition-energetique-pour-la-croissance-verte-tepcv>
- Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation. (2018). Plan national de prévention et de lutte contre les sargasses. Repéré à http://www.outre-mer.gouv.fr/sites/default/files/plan_national_de_lutte_contre_les_sargasses_20181003_0.pdf
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MELCC]. (2019). Saine gestion des matières résiduelles. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/gestion.htm>
- Ministère des Solidarités et de la Santé. (2018). Questions/réponses sur les algues sargasses. Repéré à <http://www.guadeloupe.gouv.fr/content/download/14509/96101/file/QuestionReponses-Sargasses%20juillet%202018.pdf>
- Observatoire de l'environnement en Bretagne. (2017). Surfaces couvertes par les ulves cumulées lors des 3 inventaires de surveillance de la saison 2017. Repéré à <https://bretagne-environnement.fr/node/135813>
- Observatoire des déchets de la Guadeloupe. (2016). Données générales. Repéré à <http://dechets-guadeloupe.fr/donnees-generales/>

- Observatoire des déchets de la Guadeloupe. (2019). Valorisation locale. *Observatoire des déchets de la Guadeloupe*. Repéré à <http://dechets-guadeloupe.fr/valorisation-locale/>
- Organisation de coopération et de développement économique [OCDE] et Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture [FAO]. (2018). *Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2019-2028*. Repéré à http://www.fao.org/3/CA4076FR/CA4076FR_chapitre9_Biocarburants.pdf
- Organisation internationale de normalisation [ISO]. (2013). Plastiques — Détermination du degré de désintégration des matériaux plastiques dans des conditions de compostage définies lors d'un essai à échelle pilote. Norme internationale ISO 16929.
- Organisation mondiale de la propriété intellectuelle. (2016). Demande internationale publiée en vertu du traité de coopération en matière de brevets (Procédé de préparation d'une poudre d'algues à teneur réduite en protéines et composition bioplastique formulée à partir d'une telle poudre). *Google Patent*. Repéré à <https://patentimages.storage.googleapis.com/7c/88/42/e5c7d722e656fb/WO2017046356A1.pdf>
- Pawar, S. N. et Edgar, K. J. (2012). Alginate derivatization: A review of chemistry, properties and applications. *Biomaterials*, 33(11), 3279-3305.
- Pérez-López, P., Balboa, E. M., González-García, S., Domínguez, H., Feijoo, G. et Moreira, M. T. (2014). Comparative environmental assessment of valorization strategies of the invasive macroalgae *Sargassum muticum*. *Bioresource Technology*, 161, 137-148.
- Préfecture de la Guadeloupe. (2018). Sargasses : les mesures de surveillance et les préconisations de l'agence de santé. *Les services de l'État en Guadeloupe*. Repéré à <http://www.guadeloupe.gouv.fr/Politiques-publiques/Risques-naturels-technologiques-et-sanitaires/Dossier-Sargasses/Sargasses-les-mesures-de-surveillance-et-les-preconisations-de-l-agence-de-sante>
- Préfecture de la Martinique. (2018). Les algues sargasses en clair, le guide actualisé qui répond à toutes vos questions sur le phénomène. Repéré à <http://www.martinique.gouv.fr/Politiques-publiques/Environnement-sante-publique/Sargasses/Les-reponses-a-vos-questions/Les-algues-sargasses-en-clair-le-guide-actualise-qui-repond-a-toutes-vos-questions-sur-le-phenomene>
- Prosek, J. (2019). L'algue qui nourrit l'Atlantique Nord. *National Geographic France*, Juin 2019, 135-148.
- Putman, N. F., Goni, G. J., Gramer, L. J., Hu, C., Johns, E. M., Trinanes, J. et Wang, M. (2018). Simulating transport pathways of pelagic *Sargassum* from the Equatorial Atlantic into the Caribbean Sea. *Progress in Oceanography*, 165, 205-214.
- Radio-Canada. (2019, 19 février). Usine de compostage à Montréal : un premier contrat de 175 millions. *ici-Radio-Canada.ca*. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1153786/montreal-contrat-compost-administration-plante-arrondissement-saint-laurent>
- Recyc-Québec. (2016a). La digestion anaérobie. *Recyc-Québec*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-technique-digestion-anaerobie.pdf>
- Recyc-Québec. (2016b). Le compostage. *Recyc-Québec*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-technique-compostage.pdf>
- Ressources naturelles Canada. (2018). Biodiesel. Repéré à <https://www.rncan.gc.ca/energie/efficacite/efficacite-energetique-pour-les-transports-et-carburants-de-remplacement/carburants-de-remplacement/biocarburants/biodiesel/3510>
- Riquelme, R., Mendez, P. et Smith, I. (2016). Solid Waste Management in the Caribbean: Proceedings from the Caribbean Solid Waste Conference. Repéré à <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=13&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwizp6iH8aDIAhWkTN8KHROND2kQFjAMegQICRAC&url=https%3A%2F%2Fpublications.idb.org%2Fpublications%2Fenglish%2Fdocument%2FSolid-Waste-Management-in-the-Caribbean-Proceedings-from-the-Caribbean-Solid-Waste-Conference.pdf&usg=AOvVaw0RxLCwnDJpqKMq5YuPCkoo>

- Schell, J., Goodwin, D. et Siuda, A. (2015). Recent Sargassum Inundation Events in the Caribbean: Shipboard Observations Reveal Dominance of a Previously Rare Form. *Oceanography*, 28(3), 8-10.
- Sembera, J. A., Meier, E. J. et Waliczek, T. M. (2018). Composting as an Alternative Management Strategy for Sargassum Drifts on Coastlines. *HortTechnology*, 28(1), 80-84.
- Sevndsen, K. (2001). The Nordic Expert Group for Criteria Documentation of Health Risks from Chemicals and The Dutch Expert Committee on Occupational Standards : 127. Hydrogen sulphide (n° 2001:14). Stockholm, Suède : Arbetslivsinstitutet. Repéré à <https://gupea.ub.gu.se/handle/2077/4260>
- Sigma-Aldrich. (2019). Sodium alginate. *Sigma-Aldrich*. Repéré à <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/w201502>
- Simard, P. A. (2010). L'aménagement des sites d'enfouissement et leurs coûts. Repéré à https://www.aemq.qc.ca/documentation/conferences/2010/2010-05_Andre_Simard.pdf
- Smetacek, V. et Zingone, A. (2013). Green and golden seaweed tides on the rise. *Nature*, 504(7478), 84-88.
- Solid Waste Management program. (2015). Barbados solid waste management program. *Barbados solid waste management program*. Repéré à <https://solid.gov.bb/wp-content/uploads/2018/06/Barbados-solid-waste-management-programme-BROCHURE-9-RECYCLING.pdf>
- Song, M., Duc Pham, H., Seon, J. et Chul Woo, H. (2015). Marine brown algae: A conundrum answer for sustainable biofuels production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 782-792.
- Tampier, M. (2009). A sober look at biofuels from algae. *Biodiesel Magazine - The Latest News and Data About Biodiesel Production*. Repéré à <http://www.biodieselmagazine.com/articles/3313/a-sober-look-at-biofuels-from-algae/>
- Trinidad and Tobago Electricity Commission. (2009). The Nation's Sole Transmission and Distribution Utility. Repéré à <https://ttec.co.tt/default/ttecs-sole-transmission-and-distribution-utility>
- Trinidad and Tobago solid waste management compagny limited [SWMCOL]. (2019). The Trinidad and Tobago solid waste management compagny limited (SWMCOL). Repéré à <https://www.swmcoll.co.tt/>
- U.S. Department of Energy. (2012). *Biofuels Issues and Trends* (p. 48). Washington, DC : auteur. Repéré à <https://www.eia.gov/biofuels/issuestrends/pdf/bit.pdf>
- Valo, M. (2014, 4 septembre). Pollution aux nitrates : la France de nouveau condamnée par la justice européenne. *Le Monde.fr*. Repéré à https://www.lemonde.fr/planete/article/2014/09/04/pollution-aux-nitrates-la-france-de-nouveau-condamnee-par-la-justice-europeenne_4481614_3244.html
- van Tussenbroek, B. I., Hernández Arana, H. A., Rodríguez-Martínez, R. E., Espinoza-Avalos, J., Canizales-Flores, H. M., González-Godoy, C. E., ... Collado-Vides, L. (2017). Severe impacts of brown tides caused by Sargassum spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. *Marine Pollution Bulletin*, 122(1-2), 272-281.
- Villeneuve, C., Villeneuve, C. et Dessureault, P.-L. (2008). Guide d'application : Mise en œuvre d'un programme de collecte des matières compostables pour la production de compost. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Guide-application-collecte-compost-ici.pdf>
- Wang, M. et Hu, C. (2017). Predicting Sargassum blooms in the Caribbean Sea from MODIS observations. *Geophysical Research Letters*, 44(7), 3265-3273.
- Wang, M., Hu, C., Barnes, B. B., Mitchum, G., Lapointe, B. et Montoya, J. P. (2019). The great Atlantic Sargassum belt. *Science*, 365(6448), 83-87.

- Wang, S., Wang, Q., Jiang, X., Han, X. et Ji, H. (2013). Compositional analysis of bio-oil derived from pyrolysis of seaweed. *Energy Conversion and Management*, 68, 273-280.
- Wang, X. H., Li, L., Bao, X. et Zhao, L. D. (2009). Economic Cost of an Algae Bloom Cleanup in China's 2008 Olympic Sailing Venue. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 90(28), 238.
- Xing, Q., Guo, R., Wu, L., An, D., Cong, M., Qin, S. et Li, X. (2017). High-Resolution Satellite Observations of a New Hazard of Golden Tides Caused by Floating Sargassum in Winter in the Yellow Sea. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(10), 1815-1819.
- Yardley, J. (2008, 1 juillet). To Save Olympic Sailing Races, China Fights Algae. *The New York Times*. Repéré à <https://www.nytimes.com/2008/07/01/world/asia/01algae.html>
- Zhang, Y., He, P., Li, H., Li, G., Liu, J., Jiao, F., ... Jiao, N. (2019). Ulva prolifera green-tide outbreaks and their environmental impact in the Yellow Sea, China. *National Science Review*, nwz026.
- Zhou, M.-J., Liu, D.-Y., Anderson, D. M. et Valiela, I. (2015). Introduction to the Special Issue on green tides in the Yellow Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163, 3-8.

BIBLIOGRAPHIE

- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie [ADEME]. (2018). La méthanisation. ADEME. Repéré à <https://www.ademe.fr/expertises/dechets/passer-a-l'action/valorisation-organique/methanisation>
- Agence France Presse. (2019, 24 juin). Mexique : des navires spéciaux pour éliminer les algues sargasses des plages. *La Presse*. Repéré à <https://www.lapresse.ca/international/amerique-latine/201906/24/01-5231485-mexique-des-navires-speciaux-pour-eliminer-les-algues-sargasses-des-plages.php>
- Agence nationale de sécurité sanitaire, alimentation, environnement, travail [ANSES]. (2017). Expositions aux émanations d'algues sargasses en décomposition aux Antilles et en Guyane : Avis révisé de l'Anses (rapport d'expertise collective) ([Avis] n° 2015-SA-0225) (p. 162). Maisons-Alfort, France : auteur. Repéré à <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2015SA0225Ra.pdf>
- Ali, I. et Bahadar, A. (2017). Red Sea seaweed (*Sargassum* spp.) pyrolysis and its devolatilization kinetics. *Algal Research*, 21, 89-97.
- Alvarado-Morales, M., Boldrin, A., Karakashev, D. B., Holdt, S. L., Angelidaki, I. et Astrup, T. (2013). Life cycle assessment of biofuel production from brown seaweed in Nordic conditions. *Bioresource Technology*, 129, 92-99.
- Aresta, M., Dibenedetto, A. et Barberio, G. (2005). Utilization of macro-algae for enhanced CO₂ fixation and biofuels production: Development of a computing software for an LCA study. *Fuel Processing Technology*, 86(14-15), 1679-1693.
- Biswas, B., Fernandes, A. C., Kumar, J., Muraleedharan, U. D. et Bhaskar, T. (2018). Valorization of *Sargassum tenerrimum*: Value addition using hydrothermal liquefaction. *Fuel*, 222, 394-401.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. (2008). La production de biodiésel à partir de cultures oléagineuses. Repéré à <https://www.craaq.qc.ca/data/DOCUMENTS/EVC031.pdf>
- Centre d'étude et de valorisation des algues [CEVA]. (2019). Ramassage des algues : Informations scientifiques sur les stratégies et outils de ramassage. Repéré à <https://www.ceva-algues.com/document/ramassage-des-algues/>
- Chandra, R., Iqbal, H. M. N., Vishal, G., Lee, H.-S. et Nagra, S. (2019). Algal biorefinery: A sustainable approach to valorize algal-based biomass towards multiple product recovery. *Bioresource Technology*, 278, 346-359.
- Communauté d'agglomération du centre de la Martinique [CACEM] et La Martiniquaise de valorisation. (2010). L'unité de traitement et de valorisation des déchets.
- Conseil canadien des ministres de l'Environnement et Groupe de travail sur les lignes directrices pour la qualité du compost. (2005). *Lignes directrices pour la qualité du compost*. Winnipeg, Manitoba : Conseil canadien des ministres de l'Environnement. Repéré à https://www.ccme.ca/files/Resourcess/fr_waste/fr_organics/compostgdlns_1341_f.pdf
- Des échouages précoces d'algues vertes constatés en Bretagne. (2019, 29 avril). *L'Express.fr*. Repéré à https://www.lexpress.fr/actualite/societe/environnement/des-echouages-precoces-d-algues-vertes-constates-en-bretagne_2075555.html
- Énergie de France-Guadeloupe. (2019). Grille de prix : Tarif bleu résidentiel. *Tarif particulier*. Repéré à <https://www.edf.gp/sites/default/files/sei/pdf/bleu-residentiel-guadeloupe.pdf>
- Engelen, A. H., Åberg, P., Olsen, J. L., Stam, W. T. et Breeman, A. M. (2005). Effects of wave exposure and depth on biomass, density and fertility of the furoid seaweed *Sargassum polyceratum* (Phaeophyta, Sargassaceae). *European Journal of Phycology*, 40(2), 149-158.

- Gagnard, C., Gargouch, N., Dubessay, P., Delattre, C., Pierre, G., Laroche, C., ... Michaud, P. (2019). New horizons in culture and valorization of red microalgae. *Biotechnology Advances*, 37(1), 193-222.
- Gonzalez-Garcia, S., Gullón, B. et Moreira, M. T. (2018). Environmental assessment of biorefinery processes for the valorization of lignocellulosic wastes into oligosaccharides. *Journal of Cleaner Production*, 172, 4066-4073.
- Inter press service. (2017, juillet). Tobago Gears Up to Fight Sargassum Invasion | Inter Press Service. *Caribbean Climate Wire*. Repéré à <http://www.ipsnews.net/2017/07/tobago-gears-fight-sargassum-invasion/>
- Kadam, S. U., Tiwari, B. K. et O'Donnell, C. P. (2013). Application of novel extraction technologies for bioactives from marine algae. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(20), 4467-4675.
- Li, D., Chen, L., Zhang, X., Ye, N. et Xing, F. (2011). Pyrolytic characteristics and kinetic studies of three kinds of red algae. *Biomass and Bioenergy*, 35(5), 1765-1772.
- Milledge, J. J., Nielsen, B. V. et Bailey, D. (2016). High-value products from macroalgae: the potential uses of the invasive brown seaweed, *Sargassum muticum*. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 15(1), 67-88.
- Moison, J. (2019, 24 avril). Algues vertes : la baie de Saint-Brieuc touchée par des échouages précoces. *France Bleu*. Repéré à <https://www.francebleu.fr/infos/climat-environnement/photos-algues-vertes-la-baie-de-saint-brieuc-touchee-par-des-echouages-precoces-1556099851>
- Morissette, N. (2019, 12 juillet). Mexique : la mer d'algues fait fuir les touristes. *La Presse*. Repéré à <https://www.lapresse.ca/voyage/destinations/amerique-latine/mexique/201907/11/01-5233649-mexique-la-mer-dalgues-fait-fuir-les-touristes.php>
- Perreault, M. (2017, 22 octobre). Le mystère des sargasses. *La Presse +*. Repéré à http://plus.lapresse.ca/screens/ce99358b-be72-4a1b-a00f-8f896cfd41cb__7C__0.html
- Préfecture de la Guadeloupe. (2016). Valorisation agronomique des algues sargasses. *Les services de l'État en Guadeloupe*. Repéré à <http://www.guadeloupe.gouv.fr/Politiques-publiques/Risques-naturels-technologiques-et-sanitaires/Dossier-Sargasses/Des-projets-innovants-pour-collecter-et-valoriser-les-sargasses>
- Resilify Inc. (2019). Sargassum preparedness plan. Repéré à https://uwaterloo.ca/planning/sites/ca.planning/files/uploads/files/strategic_sargassum_preparedness_plan.pdf
- Ressources naturelles Canada. (2011, 24 février). Les projets canadiens de GNL. Repéré à <https://www.rncan.gc.ca/energie/sources-denergie-et-reseau-de-distribution/gaz-naturel/les-projets-canadiens-de-gnl/5684>
- Sergent, D. (2018). Un projet pour valoriser les sargasses des Antilles. *Journal La Croix*. Repéré à <https://www.la-croix.com/Sciences-et-ethique/Environnement/projet-valoriser-sargasses-Antilles-2018-10-03-1200973384>
- Service d'assistance technique à la gestion des épandages [SATEGE]. (2016). Seuils réglementaires des normes. Repéré à https://nord-pas-de-calais.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Hauts-de-France/028_Inst-Nord-Pas-de-Calais/Telechargements/Recyclage/fiche2-seuils-reglementaires-fixes-par-les-normes.pdf
- Sita Verde. (2019). Rapport annuel d'activité et dossier d'information 2018.
- Technique de l'ingénieur. (2010). « Les bioplastiques représentent une vraie alternative ». *Techniques de l'ingénieur*. Repéré à <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/les-bioplastiques-representent-une-vraie-alternative-25264/>
- Wong, C.-L. et Phang, S.-M. (2004). Biomass production of two *Sargassum* species at Cape Rachado, Malaysia. *Hydrobiologia*, 512, 79-88.

ANNEXE 1 - TABLEAU RÉSUMÉ POUR LA MARTINIQUE

Critère	Évaluation	Pondération	Épandage en agriculture		Compostage		Alimentation animale		Biométhanisation		Raffinage du biodiésel		Combustible pour centrale thermique		Alginate de sodium		Plastique biosourcé		Élimination ultime	
			R	RP	R	RP	R	RP	R	RP	R	RP	R	RP	R	RP	R	RP	R	RP
État des algues	0 à 2	5	2	10	2	10	1	5	2	10	0	0	1	5	0	0	0	0	2	10
Prétraitement de la matière brute	1 à 3	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1	1	1	1	3	3
Possibilité de traitement des volumes variables	0 à 1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	0	0	0	0	1	5
Hierarchie selon les 3RV-E	0 à 5	5	3	15	3	15	2	10	3	15	1	5	1	5	2	10	2	10	0	0
Présence d'extrait(s) nuisible(s) lors du procédé	1 à 2	3	2	6	2	6	2	6	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3
Niveau de centralisation des opérations	1 à 3	3	3	9	2	6	2	6	1	3	1	3	2	6	1	3	1	3	2	6
Coûts d'implantation et d'opération	1 à 4	5	4	20	3	15	1	5	3	15	1	5	3	15	1	5	1	5	1	5
Possibilité de retour sur le produit	1 à 2	3	1	3	2	6	1	3	1	3	2	6	1	3	2	6	2	6	0	0
Possibilité de combiner avec d'autres technologies	1 à 2	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Total			71		66		42		57		29		46		29		29		33	
Total corrigé			0,83		0,77		0,49		0,66		0,34		0,53		0,34		0,34		0,38	

R : Résultat du critère

RP : Résultat pondéré

ANNEXE 2 - TABLEAU RÉSUMÉ POUR LA GUADELOUPE

Critère	Évaluation	Pondération	Épandage en agriculture		Compostage		Alimentation animale		Biométhanisation		Raffinage du biodiésel		Combustible pour centrale thermique		Alginate de sodium		Plastique biosourcé		Élimination ultime	
			R	RP	R	RP	R	RP	R	RP	R	RP	R	RP	R	RP	R	RP	R	RP
État des algues	0 à 2	5	2	10	2	10	1	5	2	10	0	0	1	5	0	0	0	0	2	10
Prétraitement de la matière brute	1 à 3	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1	1	1	1	3	3
Possibilité de traitement des volumes variables	0 à 1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	0	0	0	0	1	5
Hiérarchie selon les 3RV-E	0 à 5	5	3	15	3	15	2	10	3	15	1	5	1	5	2	10	2	10	0	0
Présence d'extrait(s) nuisible(s) lors du procédé	1 à 2	3	2	6	2	6	2	6	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3
Niveau de centralisation des opérations	1 à 3	3	3	9	2	6	2	6	1	3	1	3	2	6	1	3	1	3	2	6
Coûts d'implantation et d'opération	1 à 4	5	4	20	3	15	1	5	2	10	1	5	2	10	1	5	1	5	1	5
Possibilité de retour sur le produit	1 à 2	3	1	3	2	6	1	3	1	3	2	6	1	3	2	6	2	6	0	0
Possibilité de combiner avec d'autres technologies	1 à 2	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Total			71		66		42		52		29		41		29		29		33	
Total corrigé			0,83		0,77		0,49		0,60		0,34		0,48		0,34		0,34		0,38	

R : Résultat du critère

RP : Résultat pondéré

ANNEXE 3 - TABLEAU RÉSUMÉ POUR LA BARBADE

Critère	Évaluation	Pondération	Épandage en agriculture		Compostage		Alimentation animale		Biométhanisation		Raffinage du biodiésel		Combustible pour centrale thermique		Algate de sodium		Plastique biosourcé		Élimination ultime	
			R	RP	R	RP	R	RP	R	RP	R	RP	R	RP	R	RP	R	RP	R	RP
État des algues	0 à 2	5	2	10	2	10	1	5	2	10	0	0	1	5	0	0	0	0	2	10
Prétraitement de la matière brute	1 à 3	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1	1	1	1	3	3
Possibilité de traitement des volumes variables	0 à 1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	0	0	0	0	1	5
Hiérarchie selon les 3RV-E	0 à 5	5	3	15	3	15	2	10	3	15	1	5	1	5	2	10	2	10	0	0
Présence d'extrait(s) nuisible(s) lors du procédé	1 à 2	3	2	6	2	6	2	6	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3
Niveau de centralisation des opérations	1 à 3	3	3	9	2	6	2	6	1	3	1	3	2	6	1	3	1	3	2	6
Coûts d'implantation et d'opération	1 à 4	5	4	20	3	15	1	5	2	10	1	5	2	10	1	5	1	5	1	5
Possibilité de retour sur le produit	1 à 2	3	1	3	2	6	1	3	1	3	2	6	1	3	2	6	2	6	0	0
Possibilité de combiner avec d'autres technologies	1 à 2	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Total			71		66		42		52		29		41		29		29		33	
Total corrigé			0,83		0,77		0,49		0,60		0,34		0,48		0,34		0,34		0,38	

R : Résultat du critère

RP : Résultat pondéré

ANNEXE 4 - TABLEAU RÉSUMÉ POUR LA RÉPUBLIQUE DE TRINITÉ-ET-TOBAGO

Critère	Évaluation	Pondération	Épandage en agriculture		Compostage		Alimentation animale		Biométhanisation		Raffinage du biodiésel		Combustible pour centrale thermique		Alginate de sodium		Plastique biosourcé		Élimination ultime	
			R	RP	R	RP	R	RP	R	RP	R	RP	R	RP	R	RP	R	RP	R	RP
État des algues	0 à 2	5	2	10	2	10	1	5	2	10	0	0	1	5	0	0	0	0	2	10
Prétraitement de la matière brute	1 à 3	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1	1	1	1	3	3
Possibilité de traitement des volumes variables	0 à 1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	0	0	0	0	1	5
Hierarchie selon les 3RV-E	0 à 5	5	3	15	3	15	2	10	3	15	1	5	1	5	2	10	2	10	0	0
Présence d'extrait(s) nuisible(s) lors du procédé	1 à 2	3	2	6	2	6	2	6	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3
Niveau de centralisation des opérations	1 à 3	3	3	9	2	6	2	6	1	3	1	3	2	6	1	3	1	3	2	6
Coûts d'implantation et d'opération	1 à 4	5	4	20	1	5	1	5	1	5	2	10	1	5	1	5	1	5	1	5
Possibilité de retour sur le produit	1 à 2	3	1	3			1	3	1	3	2	6	1	3	2	6	2	6	0	0
Possibilité de combiner avec d'autres technologies	1 à 2	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Total			71		56		42		47		34		36		29		29		33	
Total corrigé			0,83		0,65		0,49		0,55		0,40		0,42		0,34		0,34		0,38	

R : Résultat du critère RP : Résultat pondéré