



2018/2019

Diplôme Eau et Génie Civil

Spécialité Traitement de l'Eau et des Nuisances

Rapport du Projet de fin d'études « Les sargasses »



Encadrante :

Mme EDDHIF Balkis

Représentant ASTEE :

Mme IZAMBART Géraldine

Élèves :

M'CHICHI Kenza

DEMBELE Sidy

Résumé

Les sargasses sont des algues brunes pélagiques ayant fait l'objet de plusieurs études scientifiques ces dernières années. Si leur nom est si populaire, c'est à cause de leur migration et leur échouage récurrent sur les côtes antillaises engendrant plusieurs problématiques. L'origine de ces macroalgues serait « la petite mer des sargasses » située au large du golfe du Mexique, qui ayant bénéficiée d'un apport important de nutriments principalement de potassium et de nitrate provenant des rivières Congo et de l'Amazone et associé aux conditions climatiques (élévation de température, baisses de la pression de l'air) favorisait la croissance et développement de celles-ci.

L'impact sanitaire de la décomposition des algues sargasses après leurs échouages constitue l'une des problématiques majeures. Au-delà d'un délai de 72 h après l'échouage des sargasses sur les côtes et sans ramassage, on assiste à un dégagement de gaz, notamment de l'hydrogène sulfuré (H_2S) par fermentation, qui à faibles doses, répand une odeur particulièrement nauséabonde et, à doses plus importantes, peut devenir toxique voire mortel. La capacité des sargasses à piéger et accumuler les cations, notamment des métaux lourds tels que l'arsenic et le cadmium constitue un danger potentiel pour les opérations de traitement et de valorisation de ces algues et cela pourrait conduire à une problématique environnementale non négligeable. L'obstruction des berges et des plages par ces algues constitue un ralentissement de l'activité économique car le tourisme et la pêche sont directement affectés.

En réponse à ses différentes problématiques, plusieurs mesures ont été adoptées sur le plan local notamment des mesures préventives visant à mettre en place un programme de ramassage des sargasses fraîches en mer avec des bateaux et des engins mécaniques spécialisés pour le ramassage terrestre et le transport. Des mesures curatives visant à développer des unités de traitements et de valorisation ont également été adoptées. Le potentiel de valorisation des sargasses est très large et varié, c'est une ressource pour l'agriculture en tant que fertilisant à travers l'épandage et le compostage jusqu'à une certaine limite, pour l'élevage, ainsi que pour la production de biogaz pour une valorisation énergétique via le procédé de méthanisation. Des voies de valorisation plus innovantes sont également testées comme la fabrication de biocarburant ou de bioplastique avec les sargasses comme matière première. Mais la possibilité de présence de polluants comme les métaux lourds, les rendent souvent impropres à la consommation, ou à une utilisation directe. Ainsi un contrôle de la qualité des sargasses et souvent un prétraitement s'imposent avant leur utilisation pour chaque voie de valorisation.

Liste des figures

Figure 1: Echouage des algues sargasses sur les berges et plages (<i>Extrait de Outremernews</i>).....	10
Figure 2: Présence de <i>S. natans</i> et <i>S. fluitans</i> à l'échelle mondiale. (<i>Extrait de Impact Mer 2011</i>).....	11
Figure 3: Origine de la prolifération des sargasses : la mer des sargasses (<i>Illustration de Mark Garrison</i>)	12
Figure 4: Identification détaillée des sargasses (Illustrations de Oyesiku et A. Egunyomi, 2014).....	14
Figure 5: Historique d'échouage des sargasses (<i>Extrait de la note de DEAL</i>).	17
Figure 6: Les plages infectées par les sargasses (<i>Ouest-France, Publié le 04/05/2018</i>)	20
Figure 7: Opération de ramassage par les agents de la brigade verte (<i>ADEME, février 2018</i>).....	21
Figure 8: Opération de ramassage effectuée par une pelleteuse (<i>Site web, expertise Cedre</i>).	22
Figure 9: Un ratisseur en activité (<i>Fiche de synthèse, SAFEGE ingénierie conseil</i>).....	22
Figure 10: Un sargator en opération de ramassage des sargasses en mer (<i>Photo d'Éric Stimpfling</i>)	23
Figure 11: Les sargasses et la protection de la biodiversité (<i>Photo de Cali Turner</i>).....	25
Figure 12: Schématisation des étapes de choix de la filière de valorisation.	26
Figure 13: Composition moyenne des sargasses (Teneurs en %MS).....	27
Figure 14: Schéma récapitulatif du processus de compostage.	28
Figure 15: Schéma de synthèse des modalités de valorisation agronomique.	29
Figure 16: Schéma synthétique du fonctionnement d'une installation de méthanisation et ses débouchés (D'après le cours "Gestion et valorisation des Déchets" de Mme Leloup Maud). 30	
Figure 17: Le procédé de transformation Algues / Bioplastique.	35
Figure 18: Schématisations du processus de production de biocarburant.	36

Liste des tableaux

Tableau 1: Identification des sargasses (<i>Illustrations de Julia S. Child Schneider et Searles, 1991</i>).....	13
Tableau 2: Analyse finale de <i>S. muticum</i> et de <i>S. natans</i> (<i>D'après Milledge et Harvey, 2016</i>).	15
Tableau 3: Effets sanitaires chez l'Homme pour des expositions aiguës à l'H ₂ S (<i>Extrait du rapport de l'ANSES</i>).....	18
Tableau 4: Rendements et coûts des méthodes de collecte (<i>Extrait du rapport N° 15132-15092-02 du Ministère des outre-Mer</i>).....	24
Tableau 5: Les aspects positifs et négatifs de l'épandage.....	27

Liste des annexes

Annexe 1: Voies de métabolisation de l'H ₂ S (<i>ATSDR 2014</i>)	42
Annexe 2: Propriétés physico-chimiques du sulfure d'hydrogène	42
Annexe 3: Tableau récapitulatif des conditions optimales de méthanisation	43
Annexe 4: Pouvoir de méthanisation	44
Annexe 5: Etude de faisabilité de la filière de valorisation bioplastique des sargasses (<i>Algopack, Novundi</i>)	44

Glossaire

ANSES : L'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail.

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

DEAL : Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

H₂S: Sulfure dihydrogène

NH₃: Ammoniac

NERR: North Equatorial Recirculation Region

ARS : Agence régionale de santé

PCI : Pouvoir calorifique Inférieur

MO : Matière organique

MS : Matière sèche

SYNGAS: Synthetic gas

K: Potassium

Mg: Magnesium

CO₂ : dioxyde de carbone

CH₄ : méthane

Cl : Chlore

Na : Sodium

Table des matières

Résumé	1
Liste des figures	2
Liste des tableaux	3
Liste des annexes	4
Glossaire	5
Introduction	8
Partie I : Présentation	9
I.1. Description du problème	9
I.2. Présentation de la zone d'étude	10
I.3. Origine des algues sargasses	11
I.4. Identification des sargasses : Natans et Fluitans	12
I.5. Composition chimique des algues sargasses	14
a. Protéines	15
b. Polysaccharides	15
c. Lipides	16
d. Composés inorganiques	16
I.6. Historique d'échouage des algues sargasses	16
Partie II : Etat des lieux sur la gestion du phénomène	18
II. 1. Etude des impacts	18
a. Impacts sanitaires	18
b. Impacts environnementaux	19
c. Impacts économiques	19
II.2. La politique de ramassage des algues	20
II.3. Les avantages liés aux sargasses	24

a. Elimination de la pollution.....	24
b. Protection de la biodiversité marine.....	25
Partie III : Les voies de valorisation des sargasses.....	26
Quelle filière choisir.....	26
III.1. Valorisation en agriculture et en élevage.....	27
a. Le potentiel agronomique des sargasses	27
b. Le compostage.....	28
III.2. La méthanisation.....	30
a. Définition et intérêts :.....	30
b. Le potentiel méthanogène des sargasses :	32
c. Précautions	33
III.3. Des valorisations innovantes.....	34
a. Bioplastiques.....	34
b. Biocarburants ou algocarburants :.....	35
Conclusion.....	38
Références bibliographiques	39
Annexes	42

Introduction

Les algues sont des organismes photosynthétiques et vivants majoritairement dans un milieu aquatique (marin ou dulcicole). Elles sont réparties en plusieurs taxons dont les plus importants sont : les algues bleues ; les algues brunes ; les algues rouges ; les algues vertes.

Ces algues brunes regroupant les sargasses ont fait l'objet de plusieurs études scientifiques ces dernières années, et ce à cause de leurs échouages récurrents sur les côtes antillaises, engendrant notamment de graves problématiques sanitaires, environnementales et économiques. Compte tenu des quantités non négligeables et imprévisibles et leur nuisibilité.

Des recherches sont en cours et sont vivement appuyées par les régions françaises atteintes, pour optimiser le ramassage de ces algues (en mer ou en bord de mer) mais aussi pour tenter de valoriser cette ressource naturelle gratuite en abondance par moments, et qui jusqu'à maintenant a été considérée comme un déchet ultime et était enfouie ou incinérée. Les chercheurs doivent faire face à plusieurs difficultés comme la qualité des sargasses et l'irrégularité des échouages, pour trouver des voies de valorisation optimales.

Ce manuscrit est composé de trois parties, dont une partie bibliographique pour la présentation du phénomène, une deuxième partie qui portera sur sa gestion, enfin une partie qui concernera les voies de valorisation possibles pour ces macroalgues.

Partie I : Présentation

I.1. Description du problème

L'apparition des algues sargasses sur l'arc Antillais incluant la Guadeloupe, la Martinique, Saint Martin, Saint Barthélemy et la Guyane ont été principalement observée en 2011. Dès 1984, la problématique de ces algues était connue dans le golfe du Mexique. Ces algues Sargasses lorsqu'elles ne s'échouent pas, causent moins de problèmes au bien-être des organismes vivants aquatiques et terrestres car elles sont pélagiques, c'est-à-dire qu'elles ont une propriété de flottabilité grâce à des petites branches constituant des flotteurs. Par conséquent, ne se décantent pas dans le fonds des cours d'eau (mers, eaux douces) la difficulté majeure avec ces macroalgues est principalement due à leur échouage sur les plages, qui à défaut d'un ramassage suivant les 72h après cet échouage conduit à leur décomposition. Cette décomposition se déroule en deux phases, d'abord une phase dite aérobie au cours de laquelle la décomposition se fait en présence d'oxygène en quantité suffisante. A ce niveau, les nuisances sont négligeables voire acceptables. Lorsque le phénomène d'échouages suit son cours, et sans ramassage des algues échouées, on assiste à un tassement de ces derniers en bordure des plages atteignant parfois des dizaines de centimètres d'épaisseur. A ce niveau, l'ensemble des dépôts n'est plus aéré dans toute la profondeur par faute d'oxygène ,cela conduit ensuite à une phase dite anaérobie au cours de laquelle l'oxygène fait défaut, ce qui entraîne une fermentation des algues sargasses échouées, et qui par la suite engendre des grosses problématiques d'odeur très nauséabondes dues principalement à la formation de sulfure d'hydrogène (H_2S), qui est un gaz très nuisible et qui a de fortes concentrations peut causer des problèmes sanitaires pouvant aller d'une simple irritation à un décès. L'autre difficulté avec les algues sargasses est l'obstruction des berges et des plages (figure 1), ce qui constitue un ralentissement de l'activité économique car les plages deviennent moins attractives et donc par conséquent moins de touristes visitent la région.



Figure 1: Echouage des algues sargasses sur les berges et plages (Extrait de Outremernews).

I.2. Présentation de la zone d'étude

Les zones où l'on a pu observer ce phénomène d'échouages des algues sargasses après des expéditions d'explorations et l'analyse des imageries satellitaires sont principalement le golfe du Mexique soupçonné d'être l'origine du départ du phénomène, la Côte Ouest-africaine et l'arc Antillais dont les zones les plus touchées sont la Guadeloupe et la Martinique.

Les résultats de ses différentes investigations révèlent aussi que les espèces concernées dans ce phénomène d'échouages sont principalement les *Sargassum fluitans* et *Sargassum natans*. Nous pouvons donc observer la distribution mondiale de ces deux espèces (figure2) :



Figure 2: Présence de *S. natans* et *S. fluitans* à l'échelle mondiale (Extrait de *Impact Mer 2011*).

Sur la figure 2, les étoiles rouges traduisent la distribution des *sargasses natans* à l'échelle mondiale tandis que les étoiles bleues présentent la distribution des deux espèces des sargasses à savoir les *S.natans* et *S.fluitans*. Ici, on note clairement que notre zone d'étude qui est l'arc Antillais est touchée par les deux espèces de Sargasses tout comme d'autres régions du monde comme l'Asie du sud-Ouest et du sud-Est

I.3. Origine des algues sargasses

À priori, les algues sargasses qui échouent sur l'arc Antillais ne sont pas liées directement aux activités anthropiques. L'origine de la prolifération de ces algues sargasses serait « la petite mer de sargasses » située au large du Brésil. Cependant ; d'autres investigations devront être menées afin d'affirmer cette hypothèse. En effet, la région de recirculation nord équatoriale (NERR : North Equatorial Recirculation Region) qui se situe entre le Brésil et les côtes Ouest-africaines aurait bénéficié d'un apport très important de nutriment (azote, phosphore, etc...) en provenance des rivières Congo, Amazone, Orénoque, ainsi que des poussières en provenance du Sahara. À cela, s'ajoutent les conditions climatiques principalement de l'année 2010 marquées par une baisse de la pression de l'air, des vents moins forts, des tempêtes moins fréquentes et surtout une élévation de la température. Ces facteurs rendent le NERR plus calme favorisant ainsi le développement et la croissance des algues sargasses. Donc d'une manière indirecte les activités anthropiques ont aussi une part de responsabilité dans ce phénomène, dans la mesure où le bouleversement des conditions

climatiques mondiales (réchauffement climatique) est principalement dû à l'activité humaine. La figure 3 présente le NERR et toutes les côtes environnantes.



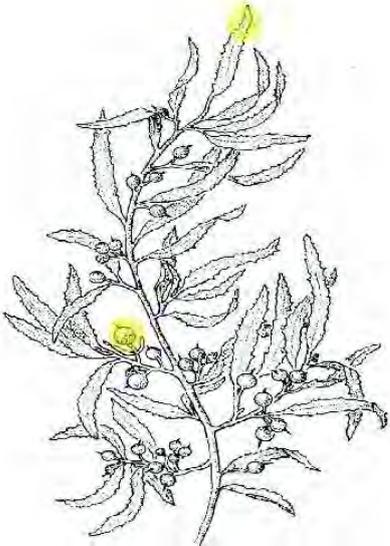
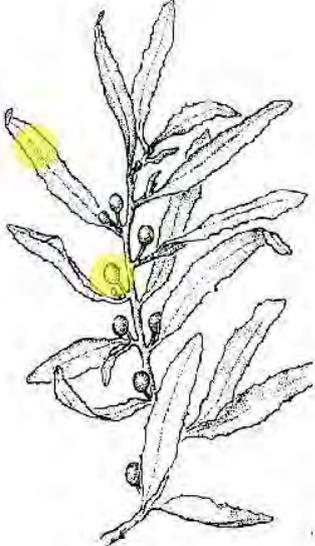
Figure 3: Origine de la prolifération des sargasses : la mer des sargasses (Illustration de Mark Garrison).

Sur figure 3, nous pouvons remarquer que l'arc Antillais est relativement proche de la mer des sargasses. À défaut d'une échelle de mesure convenable, nous ne pouvons déterminer de manière précise la distance séparant les côtes Antillaises de la mer de sargasses. Grâce à la circulation Océanique, ces espèces arrivent à migrer jusqu'aux Antilles et dans le reste du monde.

I.4. Identification des sargasses : Natans et Fluitans

Les deux espèces d'algues sargasses que l'on retrouve dans le phénomène d'échouage sur les côtes Antillaises sont principalement les *Sargassum fluitans* et *Sargassum natans* (Tableau 1).

Tableau 1: Identification des sargasses (*Illustrations de Julia S. Child Schneider et Searles, 1991*).

IDENTIFICATION DES SARGASSES	
<i>Les Sargassum natans</i>	<i>Les Sargassum fluitans</i>
	
 <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gousses (flotteur à l'extrémité) généralement pourvues de pointes ou de petites feuilles ▪ Feuilles - à long pétiole, étroit 	 <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pods (flotteur à l'extrémité) généralement pas de pointes ou de petites feuilles ▪ Feuilles - courtes, larges

Les caractéristiques décrites dans le tableau 1 permettent de différencier les deux espèces. Cependant, les caractéristiques varient et l'identification d'un échantillon particulier peut ne pas être simple. Plusieurs études d'identification indiquent ainsi que les algues

Sargassum fluitans sont lisses ou avec très peu d'épines, tandis que les *Sargassum natans* sont lisses.

Une identification plus détaillée nous permet d'avoir des connaissances sur les différentes parties de ces sargasses comme nous pouvons le constater sur la figure 4.

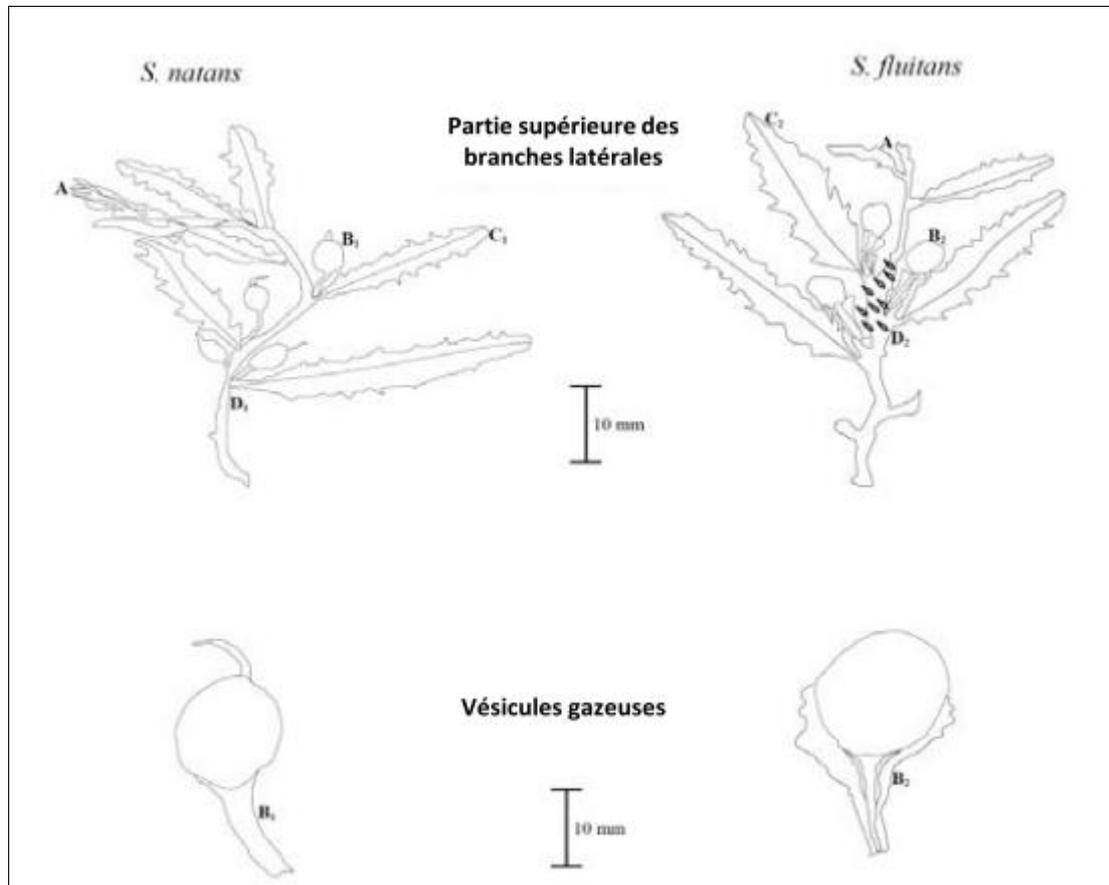


Figure 4: Identification détaillée des sargasses (Illustrations de Oyesiku et A. Egunyomi, 2014).

Réceptacle (**A**), vésicule gazeuse avec pointe, tige sans ailettes (**B1**), vésicule gazeuse sans pointe, tige avec ailettes (**B2**), feuille linéaire à bords dentés (**C1**), feuille lancéolée à bords dentés (**C2**), branche latérale sans épines (**D1**), branche latérale avec épines (**D2**)

I.5. Composition chimique des algues sargasses

Les sargasses sont photosynthétiques, elles associent le prélèvement des nutriments dissous dans l'eau de mer et la photosynthèse pour assimiler le carbone atmosphérique. Les sargasses contiennent un large éventail de composés biologiquement actifs tels que des polysaccharides sulfatés, composés phénoliques, plastoquinone,

phlorotannins, fucoxanthine, fucoïdane, acide sargaquinoïque, sargachroménol, stéroïdes, stéroïdes, terpénoïdes et avoine (Milledge et Harvey , 2016). Ainsi, différents échantillons d'espèces de sargasses, y compris *S. natans*, ont révélé un potentiel thérapeutique significatif pour les produits pharmaceutiques, destinés au traitement et à la prévention de plusieurs troubles. La composition et le pouvoir calorifique supérieur de *S. natans* sont similaires à ceux de *S. muticum* (tableau 2).

Tableau 2: Analyse finale de *S. muticum* et de *S. natans* (D'après Milledge et Harvey,2016).

	Ash	C	H	O	N	S	HHV	LHV
<i>S. muticum</i> (Summer)	33.3	30.1	% dw 4.2 28.1		3.6	0.8	kJ·g ⁻¹ ·dw 12.0	
<i>S. natans</i>	32.5	28.9	6.2	27	4	1.4	12.2 *	9.7

HHV : Higher heating value : Pouvoir calorifique supérieur(PCS)

LHV : Lower heating value : Pouvoir calorifique inférieur (PCI)

Ash : cendre

Nous constatons que la teneur en cendre des *Sargassum natans* est relativement importante ce qui pourrait réduire son efficacité énergétique dans les procédés d'incinération. De plus, La teneur en protéines peut être estimée à partir des données HHV à environ 11% de matières volatiles et à environ 7% du poids sec (ps) pour les *S.Natans*.

a. Protéines

Les algues brunes contiennent généralement entre 3% et 16% de protéines, en fonction de l'espèce et de la saison. La teneur en protéines d'une biomasse peut être estimée à partir de la teneur en azote. Bien que les algues contiennent 22 acides aminés, elles sont généralement riches en acides aspartique et glutamique, mais limitées en lysine, thréonine, tryptophane, cystéine et méthionine. Des études nutritionnelles ont montré que les protéines algales sont généralement comparables aux protéines végétales, le déséquilibre des acides aminés peut ainsi limiter l'utilisation des sargasses en tant que produit alimentaire.

b. Polysaccharides

Les sargasses peuvent contenir jusqu'à 68% de polysaccharides. La teneur en polysaccharides des rideaux flottants de sargasse est de 57%. La composition en polysaccharides des algues brunes est différente de celle des plantes terrestres, les principaux polysaccharides des algues brunes étant la laminarine, le mannitol, l'alginate, le

fucoïdane et la cellulose. Les alginates sont une composante majeure de la paroi cellulaire des algues brunes, représentant jusqu'à 40% du poids sec. Ce sont des polymères employés dans les industries des produits alimentaires et cosmétiques, mais également dans l'industrie textile.

c. Lipides

La biomasse de macroalgues a généralement une faible teneur en lipides, 0,3% à 6%, la teneur en lipides des sargasses est également faible. *S. natans* a une teneur en lipides de 1%. Dans l'article de *Van Ginneken et al* on constate que les lipides de *S. natans* contiennent 50% d'AGPI (Acides Gras Polyinsaturés) et que la biomasse est particulièrement riche en acide docosahexaénoïque (DHA) à $1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. Le DHA est utilisé comme complément dans les préparations pour nourrissons et comme complément alimentaire pour adultes.

d. Composés inorganiques

Les algues contiennent généralement de grandes quantités de cendre (matière inorganique) (9% à 44% en poids sec), les sargasses *natans* ont environ 30% de cendres en règle générale. La teneur élevée en cendres des sargasses peut fournir des minéraux et des oligo-éléments qui sont bénéfiques dans l'alimentation animale, mais aussi dans la valorisation en tant qu'engrais car c'est une source de N, P et K.

I.6. Historique d'échouage des algues sargasses

L'analyse de l'historique du phénomène d'échouage des algues sargasses sur l'arc Antillais (figure 5), nous montre clairement que ce phénomène ne suit pas un cycle régulier. Même si cette partie constitue notre zone d'étude, l'échouage des sargasses a été observé sur d'autres continents et pendant les mêmes périodes à l'image de la côte ouest-africaine impliquant le Nigeria et la Sierra Leone.

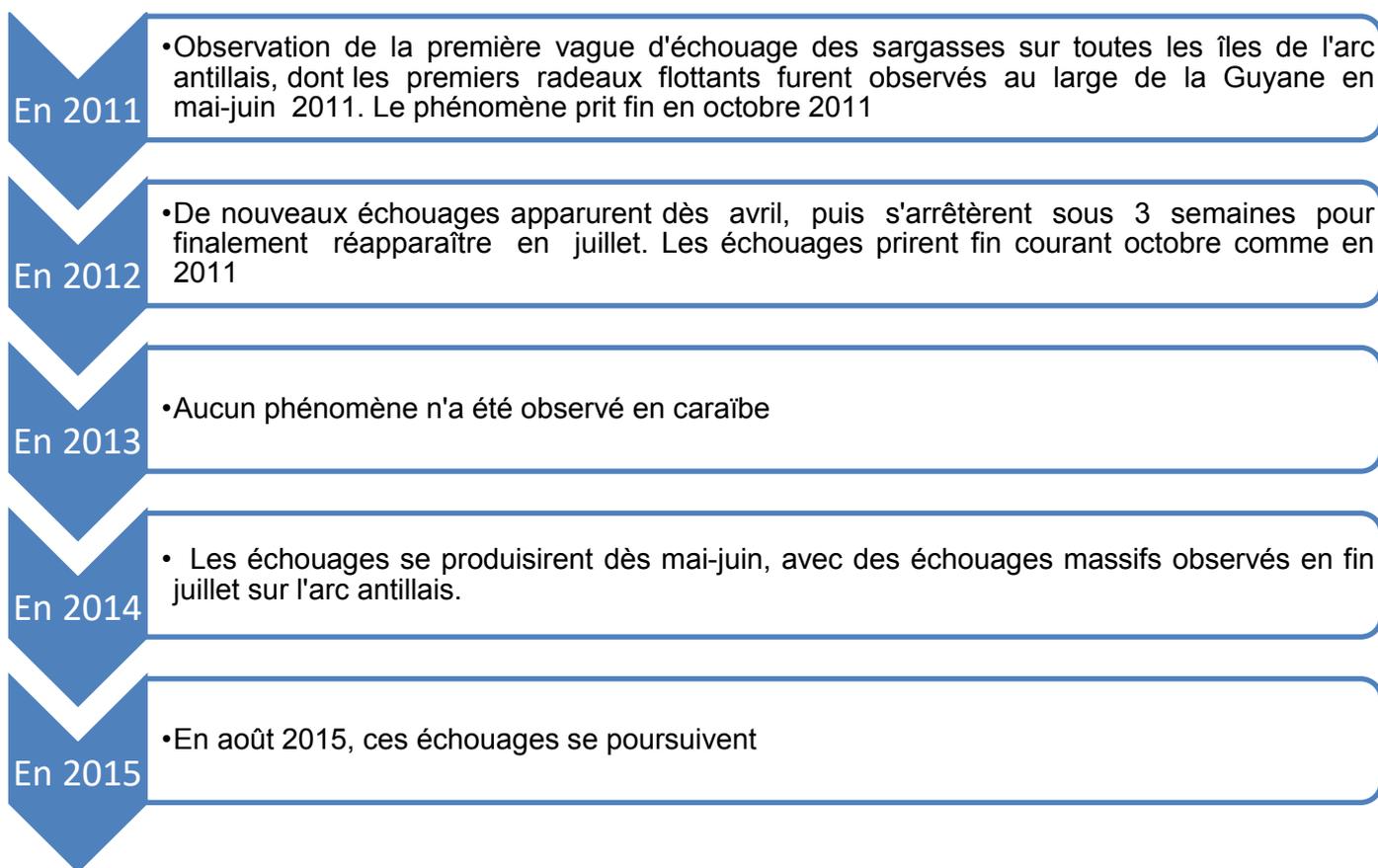


Figure 5: Historique d'échouage des sargasses (Extrait de la note de DEAL).

La direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DEAL) de Guadeloupe a estimé qu'entre 20 et 50 mille tonnes de matière sèche se sont échouées sur les côtes guadeloupéennes chaque année entre 2011 et 2015 (sauf en 2013). Tandis que la DEAL Martinique a estimé le 17 septembre 2011, suite à un unique survol, que 205 000 m³ de sargasses étaient présents aux abords du littoral martiniquais représentant 58 000 tonnes en poids sec (*extrait du rapport de l'ANSES*). Étant donné qu'aucun protocole de quantification et de suivi du phénomène n'a réellement été mis en place, ces chiffres sont donc des valeurs approximatives.

Partie II : Etat des lieux sur la gestion du phénomène

II. 1. Etude des impacts

a. Impacts sanitaires

C'est l'une des problématiques majeures de l'échouage des algues sargasses. Au-delà d'un délai de 72 h après l'échouage des sargasses sur les côtes et sans ramassage, on assiste à un dégagement de gaz par fermentation, notamment de l'hydrogène sulfuré (H_2S), produit au cours de la décomposition anaérobie des sargasses. Qui, à faibles doses, répandent une odeur particulièrement nauséabonde et, à doses plus importantes, peuvent devenir toxiques. De plus, on y rencontre d'autre gaz comme l'ammoniac (NH_3) qui peut également provoquer lorsqu'il est inhalé, des irritations oculaires (larmolements) et respiratoires (toux, difficultés respiratoires, etc.) *extrait algues sargasses en clair*. Selon un rapport de l'ANSES (tableau 3), en collaboration avec les ARS locaux, une partie de la population de l'arc antillais a été exposée de manière quasiment constante en 2015 à des concentrations d' H_2S allant de 0,1 à 1 ppm (0,14 à 1,4 $mg.m^{-3}$), et de manière plus irrégulière à des concentrations allant de 0 à 5 ppm (0 à 7 $mg.m^{-3}$), voire plus. Avec des pics allant à 10 et 15 ppm (14 et 21 $mg.m^{-3}$). Les effets sur la santé humaine de l'exposition à ce gaz sont fonction de la durée d'exposition et la concentration, et cela peut être visible sur le tableau ci-dessous.

Tableau 3: Effets sanitaires chez l'Homme pour des expositions aiguës à l' H_2S (Extrait du rapport de l'ANSES).

CONCENTRATION D'EXPOSITION	DUREE D'EXPOSITION	EFFETS OBSERVES
0,7 à 14 $mg.m^{-3}$ (0,5 à 10 ppm)	Quelques minutes à plusieurs heures	Augmentation de la consommation en oxygène, augmentation du taux de lactate dans le sang, variations transitoires d'activités enzymatiques sanguines et musculaires, céphalées
70 à 280 $mg.m^{-3}$ (50 à 200 ppm) (concentrations modérées)	Expositions courtes (<1h)	Irritation des muqueuses oculaires et respiratoires : photophobie, conjonctivite, rhinite, enrouement, toux, douleur thoracique
	Expositions prolongées (plusieurs heures)	Possible lésion cornéenne (kératite) et risque d'altération durable de la vision
dès 280 $mg.m^{-3}$ (200 ppm)	> 10 minutes	Symptômes neurologiques : céphalées, vertiges, nystagmus, désorientation, troubles de la coordination, nausées, vomissements, asthénie intense
dès 350 $mg.m^{-3}$ (250 ppm)	-	Œdème pulmonaire lésionnel de survenue retardée (dans 4 à 16 % des cas)

dès 700 mg.m ⁻³ (500 ppm)	Plusieurs minutes d'exposition	- Signes neurologiques constants avec possibilité de coma - Troubles cardiovasculaires : hypotension, tachycardie, troubles du rythme cardiaque, ischémie du myocarde...
dès 1 400 mg.m ⁻³ (1000 ppm)	quelques secondes	formes suraiguës avec perte de connaissance immédiate, brutale : « coup de plomb des vidangeurs » ou « knock-down » avec arrêt cardiaque ; des séquelles sont possibles

Le cycle de formation chimique et les propriétés physico-chimiques du sulfure d'hydrogène H₂S t citées en annexe 1 et 2.

b. Impacts environnementaux

La mise en place d'une économie circulaire dans le processus de traitement des algues sargasses reste un effort à encourager. Cependant, la capacité des sargasses à piéger et accumuler les cations, notamment des métaux lourds, tels que l'arsenic, le cadmium constitue un danger potentiel pour les opérations de traitement et la valorisation de ces algues. Par exemple, l'épandage, le compostage et le traitement des algues qui sont les principales perspectives employées sur le plan local pourraient conduire à une contamination environnementale. Ces métaux lourds, pouvant se retrouver dans les aliments (fruits et légumes) se stockent principalement dans les os, le foie, les reins et le cerveau. "Chez l'homme, ils peuvent affecter le système nerveux, les fonctions rénales, hépatiques, respiratoires. Certains, comme le cadmium, l'arsenic, le nickel et le chrome sont cancérigènes" (*ministère de l'écologie*). Cette problématique nous amène à mettre en cause la valorisation agricole des sargasses.

c. Impacts économiques

L'île de la caraïbe (Arc Antillais) est une région qui se démarque par la qualité de son paysage incluant les plages, le climat, la nature, la mer etc. Ces éléments permettent ainsi de booster les activités touristiques qui directement permettent une bonne relance de l'économie locale. Mais dès l'apparition du phénomène d'échouage des sargasses sur les côtes, l'activité touristique a été fortement ébranlée car les plages sont devenues inaccessibles (figure 6). À cela s'ajoutent également les activités de pêche et l'aquaculture qui ont été touchées car les sargasses rendaient ces activités presque impraticables.



Figure 6: Les plages infectées par les sargasses (Ouest-France, Publié le 04/05/2018).

II.2. La politique de ramassage des algues

Depuis l'apparition du phénomène d'échouages des sargasses en 2011 sur les côtes Antillaises, le ramassage des débris de sargasses fut l'une des premières mesures adoptées sur le plan local, avant l'appel à projet lancé par les structures gouvernementales pour la valorisation de sargasses et la mise en place d'une économie circulaire. Ainsi, une politique de ramassage à deux volets a été mise en place, entre autres le ramassage en mer (pour des mesures préventives) et le ramassage terrestre (pour des mesures curatives). Même si d'autres moyens de ramassage existent, nous pouvons en énumérer quelques-unes :

Le ramassage manuel : Le mode de ramassage de la figure 7 est pratiqué par la brigade verte, une équipe de personnes recrutées localement et formées afin de faire face aux potentiels échouages des sargasses. Avec un matériel utilisé plutôt basique : brouettes, râteliers, pelles.



Figure 7: Opération de ramassage par les agents de la brigade verte (ADEME, février 2018).

Cette méthode s'est avérée peu productive à l'instar des moyens matériels mécanisés mais aussi à cause de la problématique sanitaire liée aux H_2S qui est un gaz nocif, auquel les agents de la brigade verte pouvaient être exposés.

Le ramassage mécanisé : Sur la figure 8, cette méthode de collecte, est l'une des plus appliquées dans les départements concernés, car elle nécessite moins d'agents sur le terrain et la majorité du travail (le ramassage et le transport) est effectué par des engins mécanisés. De plus, la majorité de ces engins sont équipés d'une cabine fermée offrant un environnement de travail plus sécurisé au conducteur. Les engins employés sont principalement des pelles, des pelles à long bras et des tractopelles.



Figure 8: Opération de ramassage effectuée par une pelleuse (Site web, expertise Cedre).

Cette méthode de collecte offre une grande productivité (rapidité, efficacité) mais son champ d'application reste cependant limité, car elle a une bonne efficacité en ramassage terrestre mais reste limité en collecte en mer. De plus, le coût d'exploitation de ces engins est non négligeable.

Ramassage aux outils spécialisés : Sur la figure 9, ce sont des matériels ayant été développés spécialement en réponse aux contraintes de collecte rencontrées sur le terrain. Il s'agit, des fourches à fumier, râteaux goémoniers, ratisseurs de plages. Leur usage est encore plus flexible car ils peuvent être montés sur des engins agricoles du type tracteur. De plus, ces engins ont la capacité d'effectuer un ramassage terrestre mais aussi un ramassage en mer (faible hauteur d'eau).



Figure 9: Un ratisseur en activité (Fiche de synthèse, SAFEGE ingénierie conseil).

Ces engins bien que développés récemment présentent une bonne efficacité sur le terrain car ils permettent d'optimiser le temps de charge des camions benne, de s'adapter au ramassage des algues sargasse échouées, mais ils sont aussi dotés d'une capacité de collecte en mer pour des hauteurs d'eau allant jusqu'à 40 cm.

Ramassage en mer: C'est une nouvelle technique préventive sur la figure 10, qui consiste à ramasser les sargasses fraîches en mer avant leurs échouages sur les plages. Cette méthode est assez encouragée car elle permet de réduire fortement l'impact sanitaire des sargasses échouées. L'engin principal utilisé est un bateau muni d'un sargator (Tapis permettant la collecte en mer).



Figure 10: Un sargator en opération de ramassage des sargasses en mer (Photo d'Éric Stimpfling).

Cette technique de ramassage peut être appliquée pour tout type d'eau (eau de mer, eau douce), ce qui constitue un paramètre intéressant. Cependant, la capacité de stockage des sargasses dans les bateaux collecteurs est fortement limitée. Le choix d'une technique de ramassage peut être apprécié en se référant au tableau 4.

Tableau 4: Rendements et coûts des méthodes de collecte (Extrait du rapport N° 15132-15092-02 du Ministère des outre-Mer).

Méthodes de collecte	Manuel ⁴⁵	Ratisseur	Tracteur agricole	« Sargator »
Rendement	11 à 16 m ³ /homme jour dans les meilleures conditions Moyenne : 10 m ³ /homme jour ⁴⁶	450 m ³ /jour ⁴⁷ 210 à 240 m ³ /jour ⁴⁸	?	35 à 50 m ³ /jour ⁴⁹
Coût	30,5 €/m ³ ⁵⁰ 110 €/tonne ressuyée	7,2 à 10 €/m ³ ⁵¹ 24€/tonne ressuyée	2 €/m ³ ⁵²	40 €/m ³ ? ⁵³ 80 €/tonne ⁵⁴

⁴⁵ (SAFEGE, Evaluation des méthodes de ramassage des sargasses : collecte manuelle à terre, 07 janvier 2016)

⁴⁶ (CAID Patrimoine, juin 2016)

⁴⁷ Source : entreprise Latchan

⁴⁸ (SAFEGE, Evaluation des méthodes de ramassage des sargasses : ratisseur, 7 janvier 2016)

⁴⁹ Sur une durée quotidienne de 7 heures

⁵⁰ (CAID Patrimoine, juin 2016)

⁵¹ Source : entreprise Latchan

⁵² Estimation de la mission pour reprise d'un tas et chargement en benne par comparaison aux autres opérations avec les mêmes types d'engins

⁵³ Calcul de la mission sur la base d'algues égouttées alors que le sargator ramasse en pleine eau.

⁵⁴ Source : entreprise Karueralg

Le nombre de personnes et d'équipes à mobiliser pour assurer ces opérations de ramassage reste assez variable car l'échouage des sargasses ne suit pas un cycle régulier d'une part, d'autre part les quantités de sargasses pouvant d'échouer à chaque cycle restent inconnues. Par conséquent, c'est un paramètre difficile à optimiser car nous pouvons facilement nous retrouver en sous-effectif ou sureffectif sur le terrain, ce qui dans certains cas pourrait allonger le temps de ramassage.

II.3. Les avantages liés aux sargasses

a. Elimination de la pollution

Les sargasses ont une forte capacité à piéger et accumuler les cations, notamment des métaux lourds, tels que l'arsenic, le cadmium à des concentrations assez importantes. Si les sargasses restent en mer et n'échouent pas sur les plages, c'est un avantage dans les domaines de la dépollution de l'eau, ce qui a un impact positif sur la protection de la biodiversité aquatique. Dans le cas contraire, si elles échouent sur les berges cela pourrait engendrer de graves problématiques environnementales et sanitaires comme cité plus haut.

b. Protection de la biodiversité marine

Les algues *Sargassum fluitans* et *Sargassum natans* constituent un refuge sûr pour environ 120 espèces marines différentes, parmi lesquelles des poissons juvéniles, des insectes, des invertébrés, des tortues de mer, des crabes, des crevettes, des oiseaux et plus encore. Grâce aux contours interdépendants des algues, les juvéniles et autres espèces marines peuvent se camoufler dans les algues, se cachant des prédateurs jusqu'à ce qu'ils soient assez grands pour s'aventurer au large (figure 11).



Figure 11: Les sargasses et la protection de la biodiversité (Photo de Cali Turner).

Les sargasses constituent donc une couverture et un refuge sûr pour les tortues. C'est un lieu de reproduction, et d'alimentation pour un large éventail d'espèces occupant différentes niches écologiques dans les profondeurs de l'océan

Elles constituent donc un habitat essentiel pour entretenir une grande diversité d'espèces, dont beaucoup sont en voie de disparition ou menacée. À titre d'exemple c'est l'un des seuls lieux de reproduction pour les espèces comme les anguilles européennes et américaines menacées.

Partie III : Les voies de valorisation des sargasses

Quelle filière choisir ?

Le choix de la filière de valorisation des sargasses se fait en amont par un certain nombre d'analyses. La première étape consiste à l'analyse physico-chimique de cette espèce, ce qui a été introduit dans la première partie. L'évaluation de la quantité et l'analyse spatio-temporelle s'avère difficile car les échouages sont non périodiques dans une zone donnée et sont de quantités difficiles à prédire. Cet élément constitue une difficulté non négligeable pour chaque filière de traitement.

La deuxième étape est l'étude de faisabilité technique en se basant sur la connaissance physico-chimique et comportementale des Sargasses, et les contraintes que ça représente.

L'étape ultime, consiste à confronter les filières possibles sur l'aspect environnemental, mais aussi l'aspect sociologique (Création d'emplois...) et bien évidemment évaluer si le projet est réalisable d'un point de vue budgétaire.

A l'issue de cette analyse, plusieurs voies de valorisations se dégagent, des plus populaires comme la valorisation en agriculture et en élevage, le compostage, et la méthanisation aux plus originales comme la fabrication de bioplastiques ou de biocarburant.

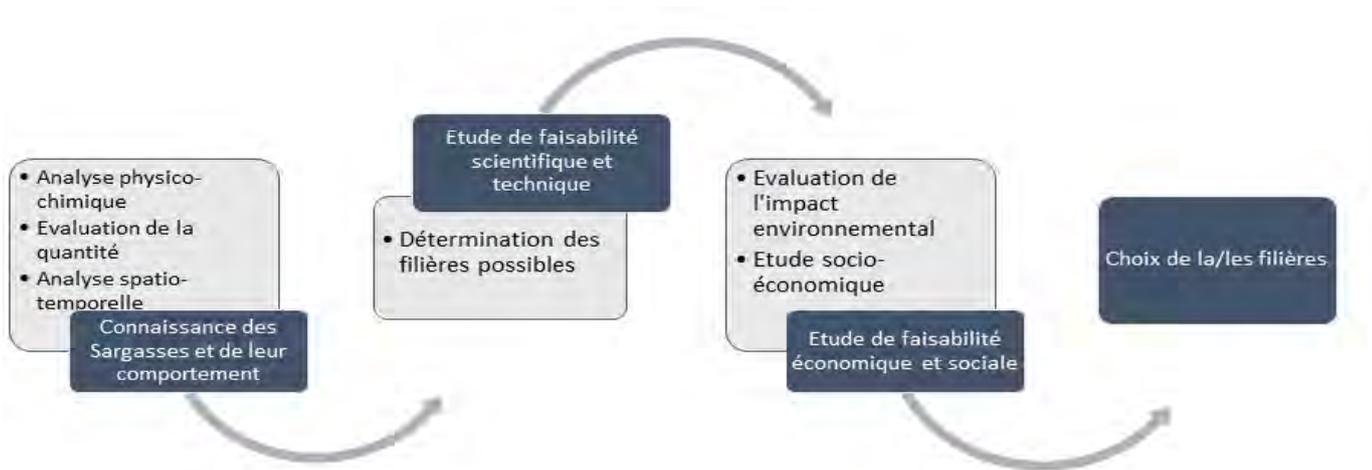


Figure 12: Schématisation des étapes de choix de la filière de valorisation.

III.1. Valorisation en agriculture et en élevage

a. Le potentiel agronomique des sargasses

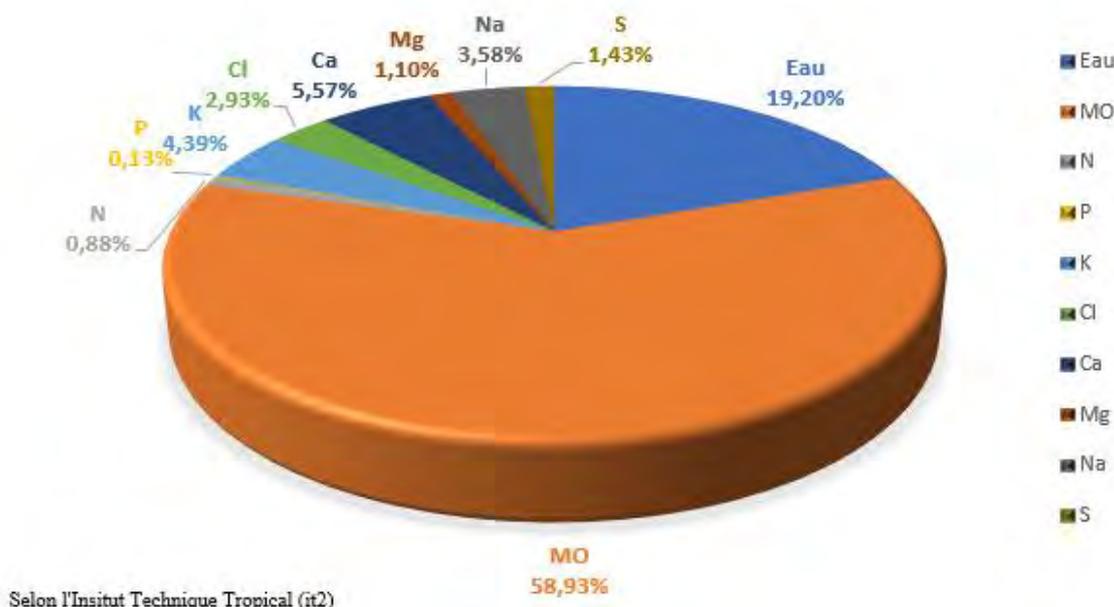


Figure 13: Composition moyenne des sargasses (Teneurs en %MS).

La figure 13 révélant la composition moyenne des sargasses prouve la présence de K et Mg qui ont une bonne valeur agronomique (Tableau 5). Pour sa croissance, l'algue ne consomme pas d'engrais ou de pesticides, elles sont donc de meilleures qualités que les végétaux terrestres de ce point de vue pour l'épandage ou pour la nourriture animale. Cependant si les eaux dans lesquelles elles évoluent sont exposées à une pollution importante, les sargasses peuvent avoir bioaccumulé ces polluants. Une étude de contamination s'impose sur les échantillons. Les algues fraîchement prélevées de mer (jusqu'à maximum 3 jours) sont avantagées aux sargasses sèches car le processus de séchage est laborieux et plus coûteux.

Tableau 5: Les aspects positifs et négatifs de l'épandage.

Les aspects positifs	Les aspects négatifs
Valeur agronomique : K, Mg	Possibilité de présence de polluants
Apport nutritionnel pour les animaux	Possibilité de présence de traces de métaux lourds
	Apport en sels

Les difficultés rencontrées pour l'épandage direct sont d'une part liées à la qualité des Sargasses ramassées (teneur en sable, pureté, degré de décomposition: odeur, texture), à la fourniture en Sargasses vu la non périodicité des échouages, mais aussi des apports agronomiques relativement faibles et de potentiels problèmes de salinisation des sols comme on peut le voir avec la composition moyenne de l'algue (figure 13), d'ailleurs la Direction de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Forêt a déconseillé l'utilisation directe des sargasses de manière prolongée comme engrais agricole et une plaquette de précaution d'usage des sargasses faite par l'Institut Technique Tropical (IT²) est en cours de validation.

b. Le compostage

Le compostage est un procédé permettant de valoriser un déchet et ainsi réduire le tonnage allant en enfouissement ou en incinération, procédés ultimes ne conférant aucune valorisation au matériau.

C'est un procédé biologique aérobie d'un matériau organique en fin de vie permettant son hygiénisation et sa stabilisation par dégradation ou réorganisation de la matière organique. À la fin du processus, on récupère le compost composé de matière organique non biodégradable, d'une faible proportion de matière minérale introduite au début du processus et inerte, et d'une proportion en eau réduite par rapport au mélange de départ. Ce procédé s'accompagne également de dégagement de chaleur, de CO₂ et de vapeur d'eau.



Figure 14: Schéma récapitulatif du processus de compostage.

Le compost a un volume réduit à environ 50% par rapport au volume initial, cette réduction du volume y permet une concentration des minéraux. La matière organique stabilisée forme des agrégats “argilo-humique” dans le sol, les empêchant d’être minéralisées dans le sol. Elles ont donc un temps de résidence plus grand que les matières organiques libres. C’est sur cette propriété que repose la valeur agronomique du compost.

Pour les Sargasses, l’une des pistes envisagées pour leur valorisation consiste à transformer ces algues en compost. Ce procédé doit comprendre en amont un prétraitement des algues pour surveiller et éliminer une probable contamination par l’arsenic et d’autres métaux lourds et micropolluants, mais aussi l’élimination des grandes quantités de sel de mer qui brûlent les sols à forte concentration. Si tous ces éléments se retrouvent dans le compost, ils seront nocifs pour les sols par la suite. Un deuxième contrôle doit donc être prévu pour les lots de compost afin d’analyser la teneur en ces éléments et s’assurer d’atteindre des seuils réglementaires.

Un compost constitué à 10% de sargasses est déjà commercialisé en Martinique par les sociétés Holdex, Idex et la Société Martiniquaise des Eaux à Ducos. De plus, Holdex propose actuellement une plateforme de compostage qui accepte gratuitement les algues jusqu’à 100 t/semaine et qui prévoit une extension de cette plateforme afin d’accueillir plus de sargasses (ou déchets agronomiques le cas échéant). La capacité totale annoncée de traitement des algues est de 26000 t de sargasses fraîches.

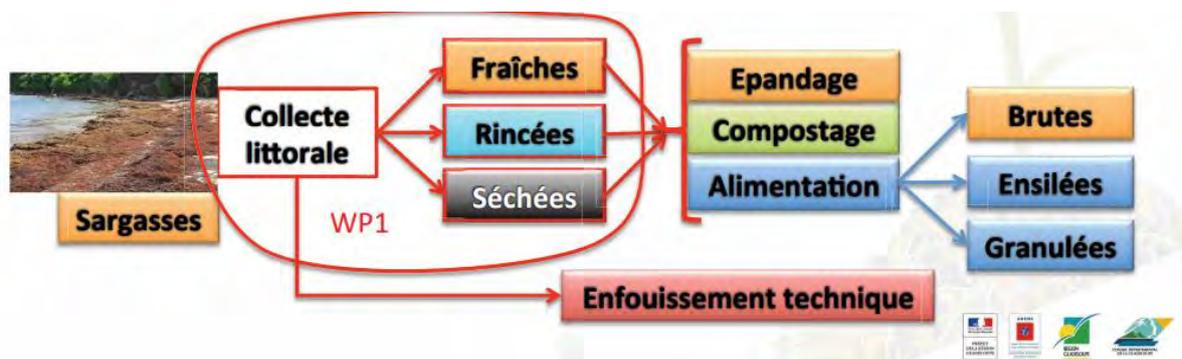


Figure 15: Schéma de synthèse des modalités de valorisation agronomique.

III.2. La méthanisation

a. Définition et intérêts :

La méthanisation permet une valorisation énergétique par le dégagement de biogaz : 70% de méthane CH_4 , 20% à 50% de CO_2 et quelques traces des gaz (NH_3 , N_2 , H_2S), lors de la digestion anaérobie d'un déchet, mais aussi une valorisation matière par la restitution au sol des déchets organiques stabilisés. Le biogaz a un pouvoir calorifique inférieur (PCI) de 5 à 7 kWh/Nm³. Cette énergie verte peut être utilisée pour la production d'électricité et de chaleur, ou injectée dans le réseau de gaz après épuration.

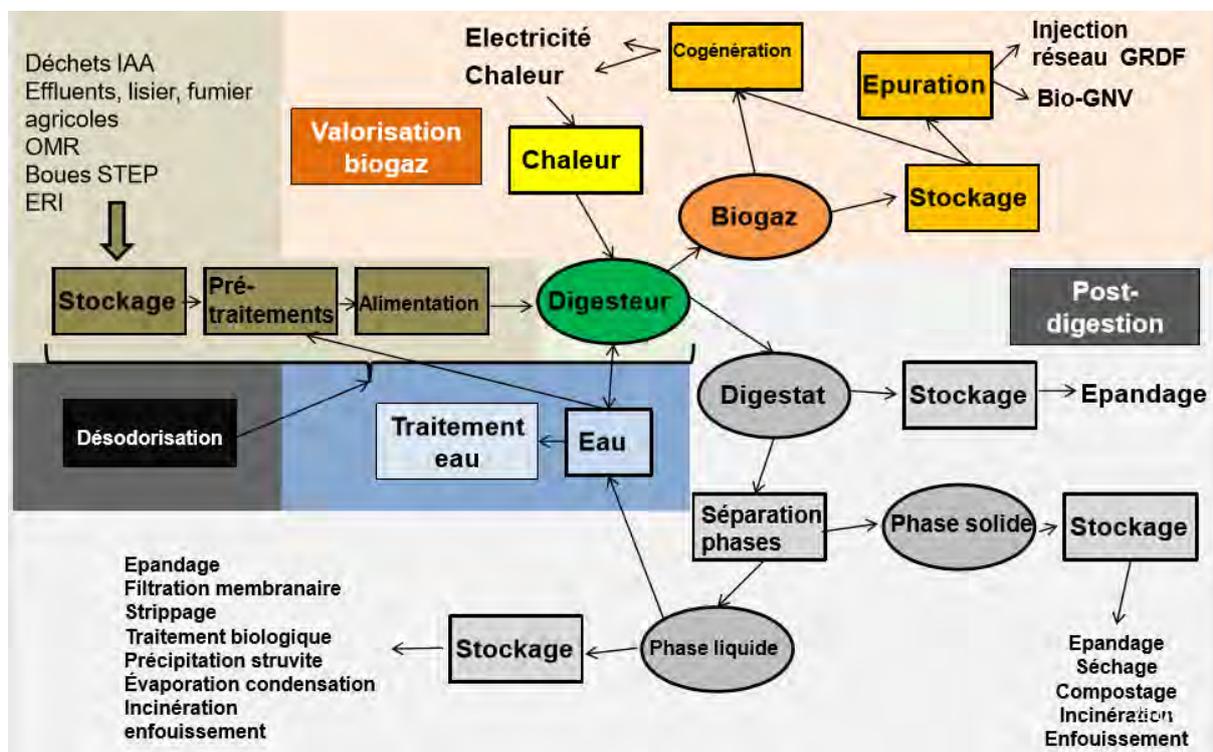


Figure 16: Schéma synthétique du fonctionnement d'une installation de méthanisation et ses débouchés (D'après le cours "Gestion et valorisation des Déchets" de Mme Leloup Maud).

Le digestat qui est le résidu du processus, est riche en éléments fertilisants. En effet, la matière organique carbonée est éliminée sous forme de biogaz et la matière organique azotée est transformée en azote minéral principalement sous forme de NH_4^+ plus facilement assimilable par les plantes lors de l'épandage (même si il est également plus volatile : 70% de perte), les autres éléments du substrat comme : P, K, etc... se conservent, et se

concentrent dans le digestat par rapport à la matière entrante, car durant le processus il y a perte de matière.

Néanmoins, la méthanisation nécessite des conditions précises (température, %MS, pH, granulométrie, Ratio C/N...) pour son bon fonctionnement, un déséquilibre de ces paramètres peut perturber les microorganismes anaérobies et donc causer un rendement de biogaz plus faible voire un arrêt complet de sa production.

Parmi les prétraitements requis avant l'introduction du substrat dans le digesteur il y a :

- **Étape de broyage** : A pour effet d'augmenter la surface d'échange entre le substrat et les microorganismes et donc faciliter sa dégradation, par la réduction et l'homogénéisation de sa taille à 1 à 20 mm, taille optimale.
- **Étape de pulpage** : Le pourcentage de gaz produit diminue avec l'augmentation de la teneur en MS du substrat introduit. La méthanisation en voie humide est favorisée pour de plus hauts rendements. Ainsi il faut un pourcentage en MS inférieur à 18

Le pulpage facilitant l'étape d'hydrolyse (limitante pour les solides) assure l'obtention d'un mélange respectant cette condition par injection d'eau ou recirculation de la phase liquide du digestat, avec une température supérieure à 70°C pour hygiéniser le biodéchet et permettre la stabilisation de la MO.

À noter que la méthanisation nécessite aussi la continuité dans la périodicité et la composition des entrants, au risque de causer une instabilité du milieu réactionnel. En effet toute suralimentation ou variation brutale de température par rapport aux valeurs optimales (soit autour de 35°C ou autour de 55°C), de nature du substrat ... peut perturber l'activité des microorganismes anaérobies responsables des réactions (digestion) de fabrication de biogaz. Il est donc impératif d'alimenter quotidiennement le digesteur et préserver une certaine constance des paramètres importants. Et toute modification de la ration doit se faire de manière progressive et sur plusieurs semaines. Les conditions optimales pour une bonne méthanisation sont résumées dans *l'annexe 3*.

Se pose alors la problématique d'irrégularité et de non périodicité des échouages de Sargasses en tant que substrat, qui génèrent de grosses quantités sur des périodes aléatoires et difficiles à prévoir. La solution à envisager dans ce cas pour moduler les apports dans le temps est la conservation et le stockage de ces algues par ensilage ou séchage naturel ou thermique.

b. Le potentiel méthanogène des sargasses :

Les résultats (du Projet de méthanisation des Sargasses en Guadeloupe chapeauté par la Région en 2016) valident les points suivants :

→ Le potentiel méthanogène des sargasses est bon et est proche de celui des déchets verts, soit environ 100 m^3 de CH_4/m^3 de substrat entré, d'après l'Annexe 4.

Cette valeur reste à préciser avec le test du potentiel méthanogène dont l'intérêt est multiple:

- ❖ Valider le potentiel des sargasses et les prétraitements qu'elles devront subir.
- ❖ Cette valeur permettra de dimensionner le digesteur (température mésophile ou thermophile ...) pour un fonctionnement optimal.
- La proportion de sel contenue dans l'algue ne pénalise pas la méthanisation, mais risque de remettre en cause la valorisation du digestat, car les éléments comme Na et Cl s'y concentrent du fait de la perte de matière dans le processus de méthanisation.
- La méthanisation est rapide ce qui accélère les cycles et réduit la taille des installations.
- Les résultats ne permettent pas de différencier le potentiel entre une méthanisation à 37°C et à 55°C , d'où la nécessité d'effectuer un test pilote pour déterminer la température optimale à appliquer.

L'étude de la faisabilité scientifique et technique de la méthanisation repose sur les essais pilotes de laboratoire qui reproduisent les conditions opératoires et le comportement des réacteurs industriels. La biodégradabilité anaérobie des sargasses, la consommation d'additifs, et la production de boues sont mesurées, ainsi que les performances de la méthanisation avec la mesure du débit et de la qualité du biogaz etc... Le dimensionnement de l'installation sera ainsi fait sur des données fiables, les limitations éventuelles seront

également identifiées. Les essais préalables ont aussi pour mission d'étudier la faisabilité économique du projet, surtout que l'échouage des Sargasses est un phénomène non périodique et une unité de préservation et de stockage de ces algues doit être prévue.

c. Précautions

Selon l'ADEME, certaines précautions doivent être prises avant l'initiation d'un projet de méthanisation pour effectuer correctement les études de faisabilité techniques et économiques.

“

- S'assurer que les déchets entrants prévus seront disponibles sur la durée ;
- Vérifier la valorisation énergétique possible du biogaz : valorisation chaleur sur site en cas de cogénération, injection possible ou non dans le réseau de gaz naturel ;
- Complémentarité avec le compostage pour [...] finaliser la maturation du digestat, en particulier dans le cas d'une mise en marché sous les normes NF U 44-051 ou NF U 44-095 ;
- Mise en place d'un traitement des excédents hydriques du process pour les grosses installations ;
- Intégration dans le montage du projet d'une recherche de débouchés conduisant à une réelle substitution énergétique et à une valorisation agronomique du digestat ;
- Selon la valorisation choisie pour le biogaz, la mise en place de traitements adaptés de celui-ci (déshumidification, etc.) ;
- Disponibilité suffisante de capitaux pour investir dans l'installation. [...]"

III.3. Des valorisations innovantes

a. Bioplastiques

L'entreprise française Algopack® confirme la possibilité de créer du bioplastique à partir des sargasses, comme elle sait déjà faire avec les algues brunes de la Métropole issues de l'algoculture. Ce plastique innovant remplissant les mêmes performances que les plastiques d'origine pétrochimique, tout en étant moins énergivore en permettant de s'affranchir de la consommation de pétrole pour la fabrication de plastique, surtout que cette ressource disparaîtra complètement dans quelques années.

De plus, l'utilisation de biomasse renouvelable et inépuisable dans la production atténue le réchauffement climatique par réduction d'émission de gaz à effet de serre (CO₂).

L'autre avantage prometteur de l'Algopack® est sa capacité à réduire les pollutions par les plastiques en mer et sur terre, étant donné que ce bioplastique est constitué à 100% à base d'algues brunes, la matière en fin de vie est donc totalement biodégradable et compostable, et sera ainsi valorisée.

Le procédé de transformation Algues / Bioplastique Procédé :

Tout d'abord, les Sargasses doivent être contrôlées puis lavées, séchées et transformées en poudre. Cette partie du travail peut être réalisée sur place et ainsi créer de l'emploi, mais elle a aussi un coût non négligeable. Cette matière première est ensuite acheminée vers le siège d'Algopack à Saint Malo. Cet acheminement est très judicieux, étant donné que les bateaux d'approvisionnement des Antilles reviennent en Métropole quasi-vides. Une fois la marchandise sur place s'ensuit le procédé industriel ci-dessous :

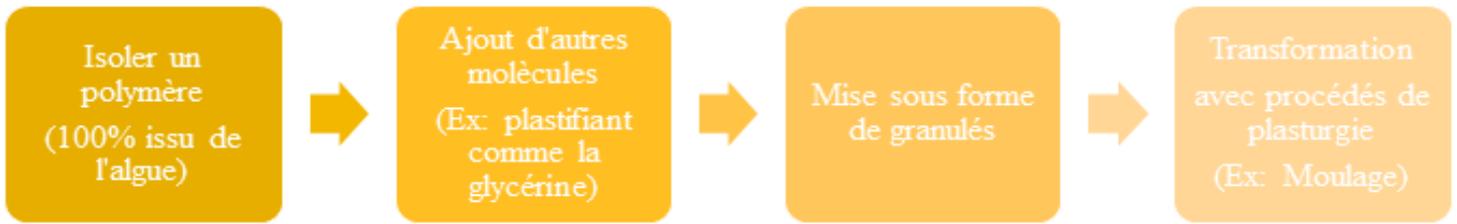


Figure 17: Figure : Le procédé de transformation Algues / Bioplastique.

Selon l'annexe 5 de l'étude de faisabilité la croissance de la production a augmenté de 300% en réponse à la demande croissante dans des secteurs de plus en plus diversifiés.

b. Biocarburants ou algocarburants :

Les Sargasses comme d'autres macroalgues peuvent faire l'objet de production de biocarburant. L'utilisation d'algues pour la production de biocarburant permet de s'affranchir de la culture de végétaux destinés à la fabrication d'huiles à transformer en biodiesel. Cette alternative est intéressante car elle permet de libérer les terres agricoles, afin que ces dernières se focalisent uniquement sur la production des denrées alimentaires, surtout que notre sécurité alimentaire est de plus en plus compromise. Cependant, les algues les plus communément utilisées pour la production de biocarburant proviennent de culture, ces dernières ont un coût relativement élevé, de plus, se pose la question de préservation des écosystèmes aquatiques. En utilisant les Sargasses échouées ce problème est évité.

Deux procédés existent selon si une étape de séchage a lieu au préalable ou non. Généralement le processus avec l'étape de séchage préalable est le plus commun, nous étudierons plus en détail ce dernier :

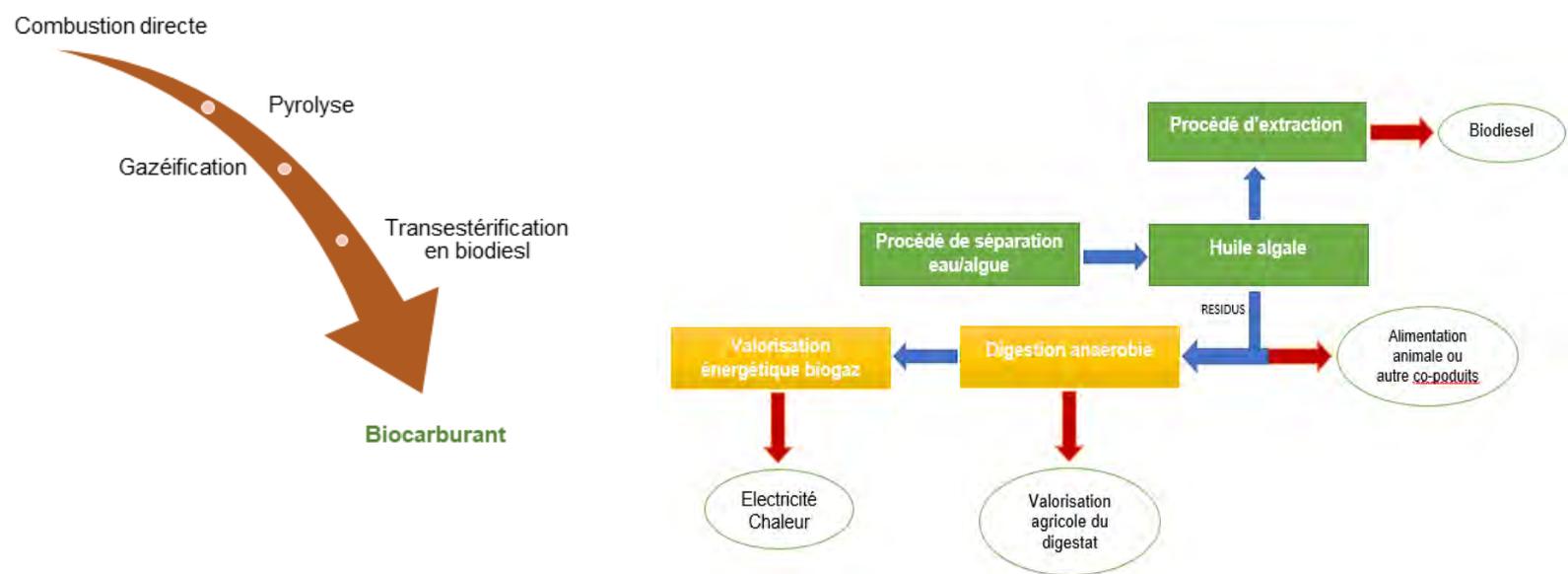


Figure 18: Schématisations du processus de production de biocarburant.

Par lyse thermique ou pyrolyse il y a extraction de l'huile algale. S'ensuit une étape de gazéification qui a pour but de produire du "syngas" un mélange gazeux combustible composé de H_2 et de CO issu de la réduction de CO_2 et de vapeur d'eau formés lors de la pyrolyse. Le syngas sera utilisé dans ce contexte comme source de production de carburant. On peut noter que la gazéification présente un bilan carbone équilibré avec l'utilisation de biomasse, car on considère que le CO_2 rejeté est celui qui a été absorbé par la photosynthèse.

La transestérification est la technique classique de production de biodiesel, ayant des propriétés physiques proches de celles du diesel à partir d'huiles végétales ou de graisses. C'est un procédé dans lequel l'huile à base d'algue produite dans les étapes précédentes est mélangée à froid dans un alcool (éthanol ou méthanol) en présence d'un catalyseur (hydroxyde de sodium ou hydroxyde de potassium), les produits de la transestérification sont des esters éthyliques ou méthyliques ce qui a pour but de réduire considérablement la masse moléculaire, la viscosité, la densité et d'augmenter la volatilité.

La combustion des macroalgues n'a pas été aussi bien explorée que celle des microalgues de part leur plus grande teneur en lipides, plus valorisées pour la transestérification. La teneur en lipides dans les macroalgues est de l'ordre de 0,3% à 6% comparé aux microalgues ayant environ 10% à 70%. Les macroalgues sont donc relativement moins exploitables pour la fabrication de biodiesel avec ce processus de transestérification.

Les Sargasses échouées étant des ressources disponibles, peuvent être valorisées en biocarburant, même si ce n'est pas la filière la plus optimale et l'option la plus viable économiquement parlant.

Conclusion

L'avènement du phénomène d'échouage des algues sargasses en 2011 sur les côtes antillaises a conduit à de graves problématiques sanitaires, environnementales et économiques. Même si le phénomène existe encore, plusieurs actions ont été adoptées sur le plan local afin d'y mettre fin et procurer un environnement agréable aux riverains.

Le potentiel de valorisation des Sargasses est très large et varié, c'est une ressource pour l'agriculture en tant que fertilisant, pour l'élevage, ainsi que pour la production de biogaz, de biocarburant ou de bioplastiques. Mais la possibilité de présence de polluants comme les métaux lourds, les rendent souvent impropres à la consommation, ou à une utilisation directe.

Les échouages non périodiques, non continus et de quantités variables constituent un problème d'approvisionnement, ce qui est une difficulté supplémentaire à surmonter. Cependant cette difficulté peut être compensée par l'existence de méthodes peu coûteuses pour préserver et conserver sur le long terme les sargasses comme le séchage naturel au soleil ou l'ensilage, dès qu'un échouage massif a lieu.

Ces modes de valorisation connus sont à ce jour peu ou mal exploités, et une majeure partie des sargasses échouées sont traitées comme des déchets ultimes et sont donc enfouies ou incinérées. Des recherches sont encore en cours pour exploiter de nouvelles voies de valorisation pour cette ressource gratuite.

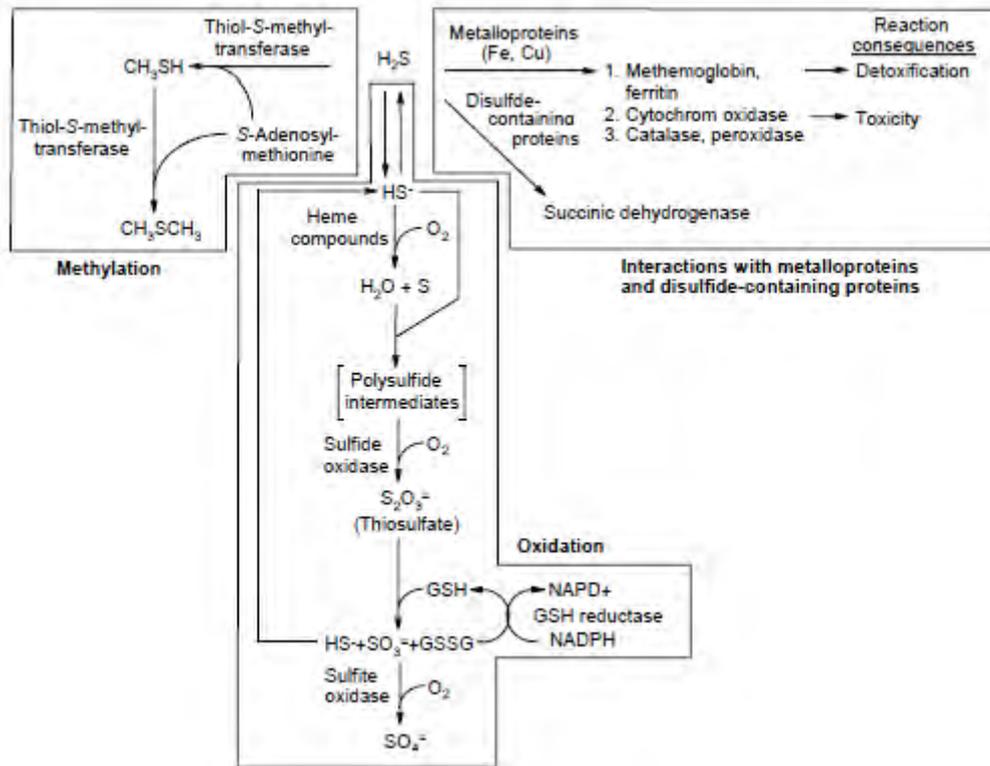
Références bibliographiques

- *Algopack®*, un matériau naturel : <http://www.algopack.com>
- *Expositions aux émanations d'algues sargasses en décomposition aux Antilles et en Guyane*, Rapport d'expertise collective, Avis de l'Anses, Saisine n° « 2015-SA-0225 » Édition scientifique, Mars 2017.
- Franck Mazeas, *Note DEAL sur la description et les explications des échouages*, Unité biodiversité marine DEAL Guadeloupe, 13 Août 2015.
- *Gazéification*, Fiches pédagogiques: Connaissance des Énergies, 03 Juillet 2011 : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/gazeification>
- Jérôme Tirolien, *Valorisation agronomique des algues Sargasses*, Institut Technique Tropical (it2), 2016 :
<http://www.guadeloupe.gouv.fr/index.php/content/download/8208/60217/file/1%20-%20valorisation%20-%20Institut%20Technique%20Tropical.pdf>
- John J. Milledge, Patricia J. Harvey, *Golden Tides: Problem or Golden Opportunity? The Valorisation of Sargassum from Beach Inundations*, Journal of Marine Science and Engineering, 13 Septembre 2016:
<https://www.mdpi.com/2077-1312/4/3/60>
- *La méthanisation*, Nos expertises, L'Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie, 23/08/2018 :
<https://www.ademe.fr/expertises/dechets/passer-a-laction/valorisation-organique/methanisation>
- Leloup Maud, *Gestion et valorisation des déchets*, Université de Poitiers, 2018 :
https://updago.univ-poitiers.fr/pluginfile.php/2195448/mod_resource/content/1/Gestion_valo_d%C3%A9chets_cours%20-%20ML-2018-2019.pdf
- *Les algues sargasses en clair*, le guide qui répond à toutes vos questions sur le phénomène, ars :
<https://www.martinique.ars.sante.fr/system/files/2018-10/SARGASSE%20RELOADED%20V3-final-web%20.pdf>

- *Les algues sargasses : fléau ou opportunité*, Fiche documentaire IFM n° 2/16, , Comité Toulon Provence Corse, Toulon, 2 mars 2016 :
http://www.ifmer.org/assets/documents/files/documents_ifm/Les-algues-sargasses.pdf
- Myra G.Borines, Rizalinda L.de Leon, Joel L.Cuello, *Bioethanol production from the macroalgae Sargassum spp.*, 30 Mars 2013.
- O. Oyesiku, A. Egunyomi, *Identification and chemical studies of pelagic masses of Sargassum natans (Linnaeus) Gaillon and S. fluitans (Borgessen) Borgesen (brown algae), found offshore in Ondo State, Nigeria*, 29 Janvier 2014.
- *Prévention et réparation de certains dommages causés à l'environnement*, Code de l'environnement, Partie législative, Livre 1er : Dispositions communes, Chapitre 1er : Champ d'application, Article L161-1 :
https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do;jsessionid=9D53D3712EF7AD43512014E8E25B6A6D.tplgfr23s_2?idArticle=LEGIARTI000033035418&cidTexte=LEGITEXT00006074220&dateTexte=20190226
- *Projet de méthanisation des sargasses en Guadeloupe*, guadeloupe.gouv, 2016 :
<http://www.guadeloupe.gouv.fr/index.php/content/download/8212/60233/file/3%20-%20valorisation%20-%20ID.pdf>
- *Sargasse Dossier de presse*, Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Mai 2018 :
https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/2018.05.04_dossier_de_presse_sargasses.pdf
- S.Palanisamy *et al*, *Investigation of antioxidant and anticancer potential of fucoidan from Sargassum polycystum*, Available online 2 May 2018
- Teddy Baptiste, *Etude de faisabilité de la mise en place d'une filière de valorisation bioplastique des sargasses*, Novundi, Algopack, 2016 :
<http://www.guadeloupe.gouv.fr/index.php/content/download/8214/60241/file/4%20-%20valorisation%20-%20NOVUNDI.pdf>

- *Trois choses à savoir sur l'invasion des sargasses*, Quotidien : France Antilles Edition Martinique, Edition Principale, Page de l'article : 3, 02 MAI 2018.
- Van Ginneken, V.J.T.; Helsper, J.; de Visser, W.; van Keulen, H.; Brandenburg, W.A. *Polyunsaturated fattyacids in various macroalgal species from North Atlantic and tropical seas*. Lipids Health Dis. 2011, 10, 104.

Annexes



Annexe 1: Voies de métabolisation de l' H_2S (ATSDR 2014).

Poids moléculaire (g/mol)	34,08
Etat physique (20°C)	Gaz
Couleur	Incolore
Odeur	Œuf pourri
Densité dans l'air	1,19
Solubilité dans l'eau (g/L)	4,1 à 20°C
Tension de vapeur (mmHg)	15 600 à 25°C
Constante de Henry (atm/mole)	468 à 20°C
Température d'ébullition	- 60,33°C
Température de fusion	- 85,49°C
Limites d'explosivité	Supérieure : 45,5% ; Inférieure : 4,3%
Facteur de conversion	1 ppm = 1,40 mg.m ⁻³

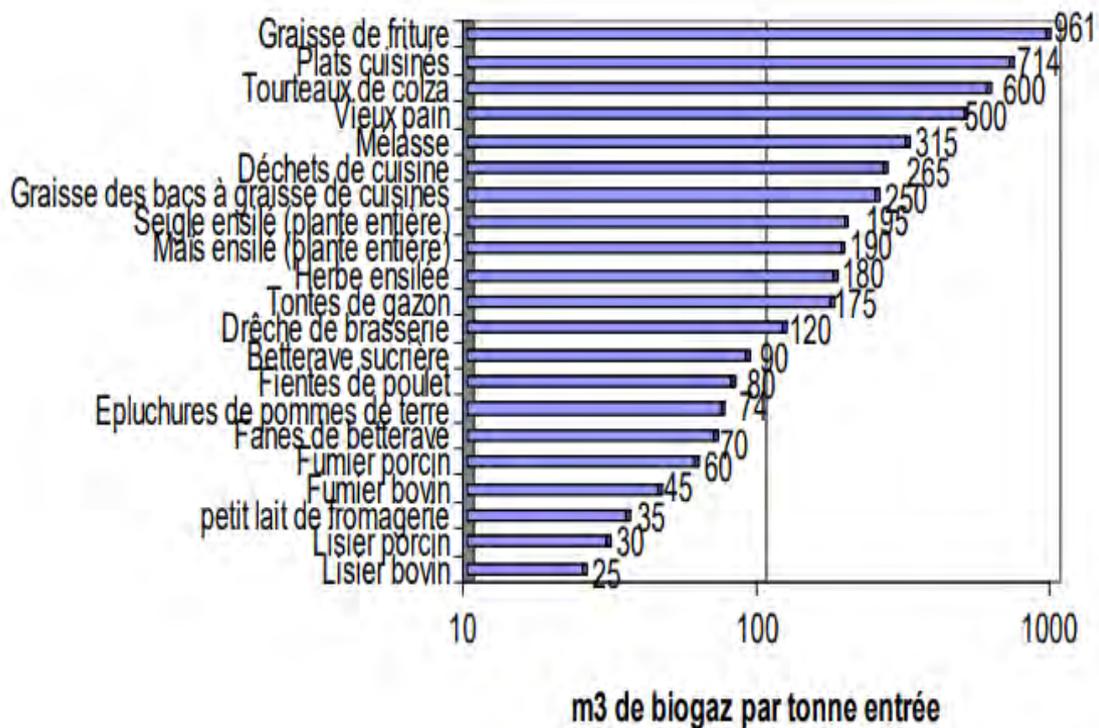
Annexe 2: Propriétés physico-chimiques du sulfure d'hydrogène.

Paramètre	Valeur optimale	unité	Paramètre	Valeur optimale	unité
Température	35°C méso. 55°C thermo.	°C	Agitation	Selon réacteur	
pH	6.5 – 8.5		TS μ org	Selon réacteur	
%MS	10-15 voie humide 20-50 voie sèche	%	Ca ²⁺	100– 200	mg.L ⁻¹
CVA	Selon réacteur	g-MV.j ⁻¹ .m ⁻³ g-DCO.j ⁻¹ .m ⁻³	Mg ²⁺	75 – 150	mg.L ⁻¹
AGV	< 0.050 à 1 selon type	g-CH ₃ COOH.L ⁻¹	K ⁺	200 – 400	mg.L ⁻¹
NH ₄ ⁺	0.5 - 1.7	g-N-NH ₄ ⁺ .L ⁻¹	Na ⁺	100 – 200	mg.L ⁻¹
H ₂ S	< 100 < 500	mg-S ²⁻ .L ⁻¹ ppm	Fe ^{2+/3+}		mg.L ⁻¹
pH ₂	10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁶	atm	Zn ²⁺	< 30 (soluble)	mg.L ⁻¹
TAC	2 - 17	g-CaCO ₃ .L ⁻¹	Cu ²⁺	< 50 (soluble)	mg.L ⁻¹
Ratio C/N/P	100/5/1 m/m	Massique	Ni ²⁺	< 30 (soluble)	mg.L ⁻¹
Ratio C/N	20-30 mol/mol	molaire			
Inoculation	10-70	%v	Co ²⁺		mg.L ⁻¹
Granulométrie	1 - 20	mm	ORP	-300 à -400	mV

Annexe 3: Tableau récapitulatif des conditions optimales de méthanisation.

		%MS	%MV	m ³ CH ₄ / m ³ substrat entré
Déjections	Lisier	8%	81%	20
	Fumier	16%	88%	38
	Fumier	22%	88%	52
	Lisier	4%	80%	8
	Fientes	65%	79%	138
	Fumiers	50%	78%	86
Culture	Paille	85%	80%	131
	Ensilage (maïs, triticales)	30%	80%	65
Biodéchets	Céréales grains	46%	95%	136
	Déchets	40%	75%	59
	Boues	15%	75%	25
	Graisse	50%	100	190
	Marc de raisin	20%	75%	40
	Déchets de conserverie	8%	90%	22

Référence : S. Berger, C. Couturier dans « La méthanisation », Edition Tec Doc Lavoisier (2008) R. Moletta coordonnateur, ISBN 978-2-7430-1036-2



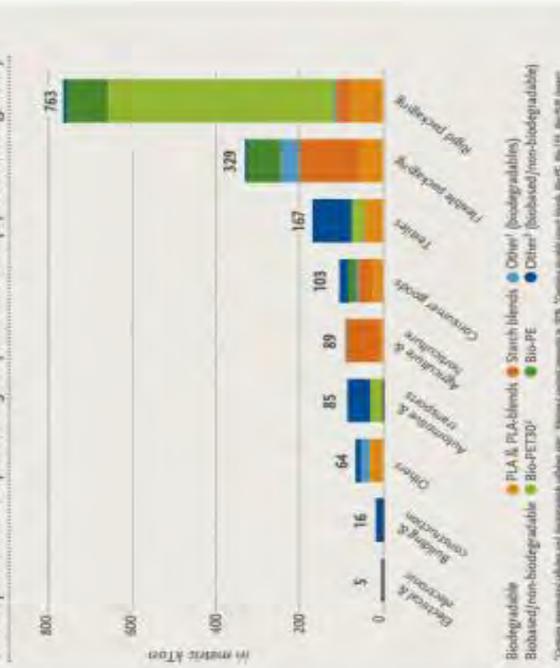
Annexe 4: Pouvoir de méthanisation.

II. PRESENTATION DE L'ETUDE: Quelques chiffres sur l'industrie et l'avenir du bioplastique, un marché vaste et international

Global production capacities of bioplastics



Global production capacities of bioplastics 2013 (by market segment)



- Une offre répondant à une demande croissante.
- 300% de croissance en 2018!

- De nombreux secteurs intéressés, une infinité de domaines d'application.
- Un prix similaire à celui du plastique conventionnel

Etude de faisabilité de la mise en place d'une filière de valorisation bio plastique des sargasses

