

Methane production from *Sargassum muticum* (*Ochrophyta*, *Phaeophyceae*): modeling by experimental design methodology of the influence of size and inoculum/substrate ratio.

Yiru ZHAO¹, Marina GIBLAINE¹, Nathalie BOURGOUGNON², Jean-Louis LANOISELLÉ¹,
Thomas LENDORMI¹

1 : Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56300 Pontivy, France

2 : Univ. Bretagne Sud, EA 3884, LBCM, IUEM, F-56000 Vannes, France

Abstract: Marine macroalgae are present in the ocean and more particularly in the coastal zone. Their distribution is related to biotic and abiotic factors. Considered as sustainable raw materials for a wide range of value-added products and energy production, they are valued in the fields of human and plant health, agriculture, food or construction (Baghel et al., 2020). Since 2011, large rafts of brown algae of the genus *Sargassum* have been observed, causing strandings in West Africa, throughout the Caribbean basin and the Gulf of Mexico. These include the species *S. fluitans* and *S. natans*. Faced with this recurring phenomenon of massive seaweed strandings, the French State has made a strong commitment to the fight against these phenomena: after a first crisis management plan in 2018, a second plan (2022-2025) was deployed with a view in particular to better prevention, health monitoring and the recovery of collected algae. In Guadeloupe, there are still around 116,000 m³ of sargassum stranded each year (ADEME in Guadeloupe, 2018). At present, valorization, which is very partial (90% of the algae collected is stored without use), is mainly done by composting or manufacturing biomaterials. This untapped biomass could be valorized in the energy sector by Anaerobic Digestion (AD) for the production of a gas rich in methane (anr.fr/Projet-ANR-19-SARG-0009 “Valorisation agro-énergétique des Sargasses – SAVE”). The objective of this study is to perform AD experiments with *S. muticum* as a substrate, a brown alga with characteristics similar to the previously mentioned stranded species, in order to assess their Bio-Methanogenic Potential (BMP), define the experimental conditions of AD, and to propose, in the long term, an energy recovery of the co-products resulting from the biorefining of seaweed stranded or harvested at sea.

Production de méthane à partir de *Sargassum muticum* (*Ochrophyta, Phaeophyceae*) : modélisation par la méthodologie des plans d'expériences de l'influence de la taille et du rapport inoculum/substrat

Yiru ZHAO¹, Marina GIBLAINE¹, Nathalie BOURGOUGNON², Jean-Louis LANOISELLÉ¹
Thomas LENDORMI¹

Affiliation 1 : Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56300 Pontivy, France

Affiliation 2 : Univ. Bretagne Sud, EA 3884, LBCM, IUEM, F-56000 Vannes, France

Introduction

Les macroalgues marines sont présentes dans l'océan et plus particulièrement en zone côtière. Leur répartition est liée aux facteurs biotiques et abiotiques. Considérées comme des matières premières durables pour une large gamme de produits à valeur ajoutée et la production d'énergie, elles sont valorisées dans les domaines de la santé humaine et végétale, de l'agriculture, de l'alimentation ou de la construction (Baghel *et al.*, 2020). Depuis 2011, d'importants radeaux d'algues brunes du genre *Sargassum* sont observés, provoquant des échouages en Afrique de l'Ouest, dans tout le bassin caraïbe et du golfe du Mexique. Il s'agit notamment des espèces *S. fluitans* et *S. natans*. Face à ce phénomène récurrent d'échouements massifs d'algues, l'État français s'est engagé fortement dans la lutte contre ces phénomènes : après un premier plan de gestion de crise en 2018, un second plan (2022-2025) a été déployé en vue notamment d'une meilleure prévention, d'une surveillance sanitaire et en matière de valorisation des algues collectées. En Guadeloupe, on note encore chaque année environ 116.000 m³ de sargasses échoués (ADEME en Guadeloupe, 2018). À l'heure actuelle, la valorisation, très partielle (90% des algues collectées sont stockées sans usage), se fait principalement par compostage ou fabrication de biomatériaux. Cette biomasse inexploitée pourrait être valorisée dans le secteur énergétique par Digestion Anaérobie (DA) pour la production d'un gaz riche en méthane (anr.fr/Projet-ANR-19-SARG-0009 « Valorisation agro-énergétique des Sargasses – SAVE »). L'objectif de cette étude consiste à effectuer des expérimentations de DA avec comme substrat *S. muticum*, une algue brune portant des caractéristiques similaires aux espèces échouées mentionnées précédemment, afin d'évaluer leur Potentiel Bio-Méthanogène (BMP), définir les conditions expérimentales de méthanisation, et de proposer, à terme, une valorisation énergétique des co-produits issus du bioraffinage d'algues échouées ou récoltées en mer.

Dans le processus de méthanisation, le Rapport Inoculum Substrat (ISR) est un paramètre clé pour l'évaluation du BMP. L'ISR est déterminé comme le rapport massique de la Matière Organique (MO) amenée par l'inoculum et la MO amenée par le substrat (algue). Dans la littérature, ce rapport impacte la concentration et le type d'Acides Gras Volatils (AGV) produits, les voies métaboliques impliquées et les phénomènes potentiels d'inhibition (Raposo *et al.*, 2008). Pour une fermentation classique en mode batch, un rapport inoculum substrat compris entre 2 et 4 est généralement appliqué. Dans le cas où le substrat est facilement dégradable, ce ratio devrait être plus élevé pour éviter l'accumulation d'AGV inhibiteurs, dès quelques mg/L, de la Digestion Anaérobie. Afin d'assurer des conditions optimales, il est souvent recommandé de tester plusieurs rapports inoculum substrat. Seulement si au moins deux rapports inoculum substrat conduisent au même BMP, on peut supposer qu'il n'y a pas eu lieu d'inhibition (Holliger *et al.*, 2016). D'autre part, la taille du substrat est susceptible d'influencer le coût énergétique du prétraitement et la production de méthane (Chamaa, 2017). Cependant, à notre connaissance, ce paramètre n'a jamais été étudié chez *Sargassum*. Nous souhaitons trouver, à travers cette étude, des conditions favorables pour les tests BMP. L'influence de la taille et du rapport

inoculum substrat sur la production de méthane ont été explorés sur *S. muticum* congelé, en mode batch, par l'utilisation d'un plan d'expériences composite centré (PCC) dit « plan étoiles ».

Matériels et méthodes

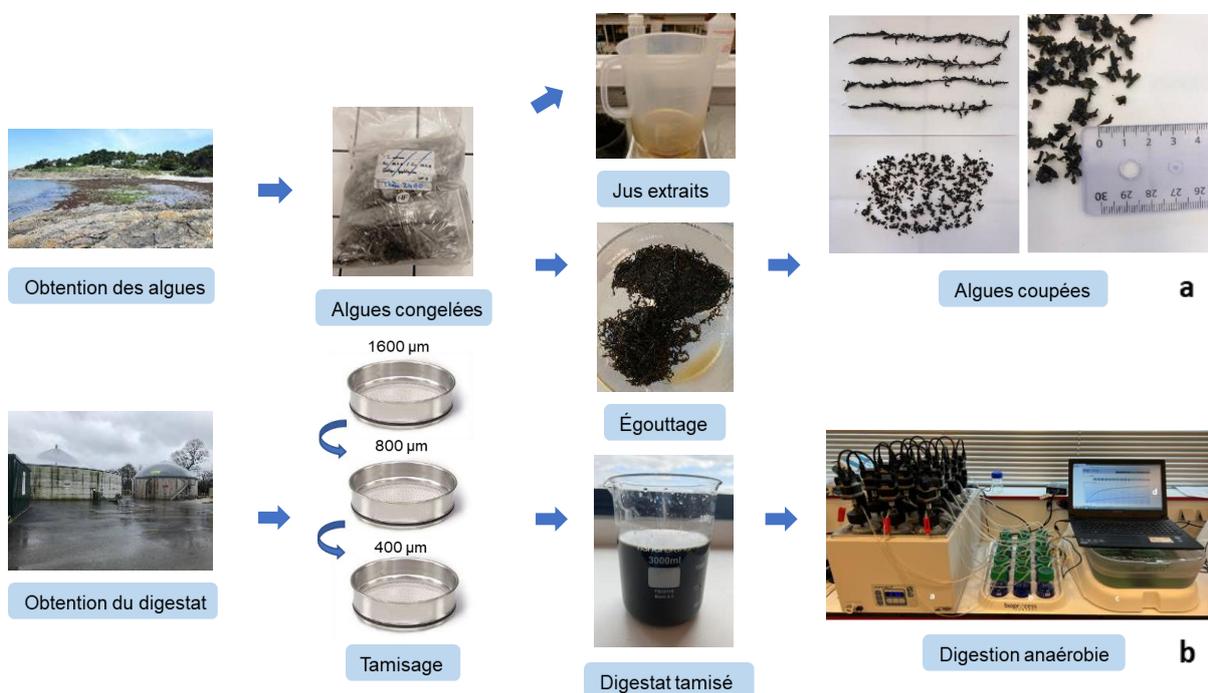


Figure 1 - a : préparation des algues ; b : préparation d'inoculum bactérien

L'algue brune *Sargassum muticum* a été collectée en deux hivers successifs (novembre, décembre 2020 et décembre 2021) sur la côte de Kercambre (47°29'22.5"N, 2°49'15.4"W) (Saint-Gildas-de-Rhuys, France) puis stockée à -20 °C. Après décongélation, les échantillons sont égouttés sur un tamis pendant 15 min à température ambiante. Du jus extrait durant la décongélation a été collecté et rajouté *a posteriori* proportionnellement à la masse utilisée de manière à minimiser la perte en Matière Organique. Après égouttage et avant les expériences de Digestion Anaérobie, les algues ont été coupées à la longueur souhaitée (0,0034 - 0,02 - 0,06 - 0,1 - 0,1166 m) en utilisant une paire de ciseaux et un couteau de cuisine. Afin d'avoir une bonne représentativité, nous avons essayé de conserver la morphologie des algues à l'état initial. Pour ce faire, l'ensemble des échantillons a été coupé le long du stipe (tige), à l'exception des extrémités des thalles (frondes) ayant une taille extrêmement petite (inférieure à 0,02 m) (Fig. 1a). Puis l'échantillonnage est réalisé de façon aléatoire selon les parties de l'algue concernées. L'inoculum utilisé provient d'une unité de méthanisation fonctionnant en condition mésophile (EPLEFPA Le Gros Chêne, Pontivy, France). Les substrats utilisés pour alimenter ce méthaniseur sont des déjections animales et des déchets d'industrie agro-alimentaire. Après sa récupération, l'inoculum a été tamisé à 400 µm pour obtenir un échantillon relativement homogène, puis laissé à température ambiante pendant 6 jours pour un épuisement de Matière Organique résiduelle (Fig. 1b).

Les matières sèches (MS) ont été déterminées par séchage à l'étuve à 105 °C. Les MO ont été déterminées par calcination pendant 2 heures dans un four à moufle à 550 °C.

Le système AMPST II® (Bioprocess Control, Lund, Suède) a été utilisé pour réaliser des essais de détermination de BMP. La durée des essais était de 30 jours, la température a été réglée à 37 °C. Les bioréacteurs ont un volume de travail de 450 mL avec un espace de tête de 50 mL, ils sont équipés chacun d'un moteur et d'une tige courbée servant d'agitateur tournant à une vitesse de 160 tr/min environ. Le biogaz produit passe par des bouteilles contenant une solution de NaOH à 3M pour

adsorber les gaz acides tels que le CO₂ et l'H₂S. La production nette de méthane de chaque réacteur a été calculée en retranchant la moyenne des deux blancs. Le pH a été mesuré avant et après le test afin de s'assurer qu'il n'y a pas d'acidification du milieu.

Des courbes de production de gaz ont été construites à l'aide du modèle Gompertz (Lo *et al.*, 2010) et d'un modèle du premier ordre, permettant une évaluation des paramètres clés de méthanisation tels que le potentiel méthanogène du substrat BMP₀ (NL CH₄·kg MO⁻¹), la vitesse maximale de production de méthane R_m (NL CH₄·kg MO⁻¹·jour⁻¹), le temps de la phase de latence λ (jour), la constante de vitesse K_h (jour⁻¹) :

$$BMP_t = BMP_0 \cdot \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_m \cdot e}{BMP_0} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$

$$BMP_t = BMP_0 \cdot \exp(1 - e^{-t \cdot K_h}) \quad (2)$$

Deux paramètres ont été mis en place, afin d'évaluer statistiquement la qualité des modèles, tel que le coefficient de détermination ajusté (R²_{ajusté}), l'erreur quadratique moyenne ajustée (MSE_{ajusté}). Nous cherchons à la fois à maximiser la valeur de R²_{ajusté} et à minimiser la valeur de MSE_{ajusté} en vue d'obtenir un modèle adéquat.

$$R_{ajusté}^2 = 1 - \frac{(n - 1) \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n - k - 1) \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

$$MSE_{ajusté} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - k - 1} \quad (4)$$

$$Erreur\ relative = \frac{|BMP_0 - BMP'|}{BMP'} \quad (5)$$

Où : n est le nombre de mesures, k le nombre de facteurs, y_i la valeur de la mesure, ŷ_i la valeur prédite correspondante, ȳ la moyenne des mesures et BMP' le BMP à la fin de l'essai (66 jours) de Digestion Anaérobie (NL CH₄·kg MO⁻¹).

Un Plan Composite Centré a été mis en place à l'aide du logiciel RStudio® (RStudio, Inc., MA, USA). Cette approche conduit à des modèles polynomiaux qui établissent la relation entre les paramètres clés et le volume de méthane produit ou la valeur de BMP (Goupy *et Creighton*, 2006). Le passage des paramètres aux valeurs codées (x_i) est décrit par l'équation suivante :

$$x_i = \frac{X_i - X_i^*}{\Delta X_i} \quad (6)$$

Où : X_i est la valeur réelle du i^e paramètre, X_i^{*} est la valeur centrale de chaque paramètre et ΔX_i le pas correspondant à la valeur pour le passage de la variable codée de 0 à 1.

La forme générale du modèle prédictif est :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} x_i x_j \quad (7)$$

Les sargasses contiennent environ 50 à 60% de carbohydrates en matière sèche. Le choix de la zone d'étude du rapport inoculum substrat (entre 2 et 4) a été réalisé au regard de sa composition qui est normalement facilement biodégradable (Holliger *et al.*, 2016). En visant un critère de précision uniforme, cinq niveaux pour chaque facteur ont été étudiés (rapport inoculum substrat : 1,59 - 2 - 3 - 4 - 4,41 et taille : 0,0034 - 0,02 - 0,06 - 0,1 - 0,1166 m). Un total de 13 essais a été réalisé (2 blancs),

avec 5 *replicata* au point dit « central » (rapport inoculum substrat : 3, taille : 0,06 m), 4 points dit « étoiles » à une distance du centre $\alpha = 1,41$ ($\alpha = \sqrt[4]{n_f}$, n_f est le nombre d'essais du plan orthogonal). Des analyses de variance (ANOVA) ont été réalisées sur les valeurs de BMP et de volume de méthane produit. Les résultats sont considérés comme significatifs si la *p-value* est inférieure à 0,05.

Résultats et discussion

Le Tableau I présente le volume V de CH₄ (NmL) produit à 30 jours aux différents niveaux de facteurs du PCC. Une production maximale de CH₄ de 1152 (NmL) a été observée pour un rapport inoculum substrat de 1,59 et une taille de 0,06 m (essai 10).

Tableau I - Conception de Plan Composite Centré avec les deux variables indépendants et les résultats expérimentaux correspondants

Essais	Rapport Inoculum Substrat		Taille (10 ⁻² m)		V (NmL)	
	X ₁	Code	X ₂	Code	Observées	Prédites
1	2	-1	2	-1	910	915
2	4	1	2	-1	443	446
3	2	-1	10	1	883	915
4	4	1	10	1	402	446
5	3	0	6	0	510	558
6	3	0	6	0	509	558
7	3	0	6	0	544	558
8	3	0	6	0	517	558
9	3	0	6	0	644	558
10	1,59	-1,41	6	0	1152	1132
11	4,41	1,41	6	0	495	471
12	3	0	0,34	-1,41	640	558
13	3	0	0,1166	1,41	586	558

Afin d'identifier les facteurs significatifs, la régression de différents ordres a été réalisée, avec plusieurs niveaux d'interaction allant de 0 à 2, ce qui permet de déterminer un modèle adéquat d'ordre 2. Un tableau d'ANOVA associé à ce modèle a également été construit, les résultats d'ANOVA ainsi que l'équation (8) sont présentés dans le tableau II.

Tableau II - ANOVA sur les valeurs de BMP

Source	Somme des carrées	Degré de libertés	Moyen des carrés	F-value	<i>p-value</i>
X ₁ : ISR	439655	1	439655	154,30	5 10 ^{-6*}
X ₂ : Taille	2596	1	2596	0,91	0,4
X ₁ X ₂	46	1	46	0,016	0,9
X ₁ ²	105731	1	105731	37,11	5 10 ^{-4*}
X ₂ ²	2606	1	2606	0,91	0,4
Manque d'ajustement	6921	3	2307	0,71	0,6
Erreur pure	13024	4	3256	-	-
Total	570580	12	-	-	-

$$V_{CH_4} = 2426 - 978 \text{ ISR} - 16 \text{ Taille} + 125 \text{ ISR}^2 + \text{Taille}^2 - \text{ISR} \times \text{Taille} \quad (8)$$

* : *p-value* < 0,05, les facteurs sont considérés significatifs

Où V_{CH_4} est le volume de CH₄ produit à 30 jours (NmL), ISR est le rapport inoculum/substrat, *p-value* = 6 10⁻⁵, R_{ajusté}² = 0,94.

La valeur de *p-value* du manque d'ajustement du modèle indique sa bonne représentativité (*p-value* = 0,6 > 0,05). Un seul facteur significatif a été identifié, soit ISR. Concernant la taille, ce facteur n'a pas d'effet sur la production. Il a donc été intégré, dans un second temps, dans l'erreur résiduelle en vue d'obtenir une équation prédictive optimisée de production (9) qui intègre uniquement les effets linéaire et quadratique du rapport inoculum substrat (*p-value* = 1,7 10⁻⁷, R²_{ajusté} = 0,95). Nous constatons que cette équation est pertinente au regard de la valeur élevée de R² et de la bonne adéquation entre les valeurs observées et les valeurs prédites (Fig. 2a). Quarante-vingt-cinq pourcents (95%) de la variabilité des réponses peut être expliqué par ce modèle (R²_{ajusté} = 0,95). La représentation graphique de l'évolution de production de méthane avec le niveau des facteurs constitue une approche intéressante de l'influence des différents facteurs (Fig. 2b). Nous avons pu observer une relation quadratique entre ISR et le volume de méthane produit. Cependant, aux valeurs élevées de rapport inoculum substrat (ISR > 3), les faibles quantités de substrat ajoutées engendrent une incertitude importante. Nous avons émis hypothèse qu'en l'absence de phénomène biologique limitant, la production devrait être linéairement corrélée avec le rapport inoculum substrat.

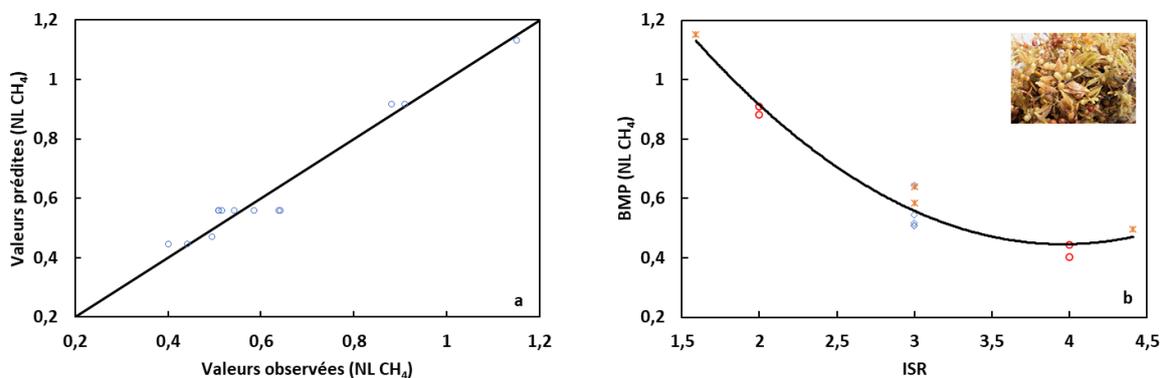


Figure 2 - a : valeurs de la production de méthane prédites en fonction des valeurs observées ; b : production de méthane en fonction de ISR (points rouges : 4 points principaux, losanges bleus : 5 points centraux, étoiles orange : 4 points étoiles)

$$V_{CH_4} = 2362 - 968 \text{ ISR} + 122 \text{ ISR}^2 \quad (8)$$

Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons construit les courbes de production cumulée de méthane en fonction de ISR. Ce choix repose sur le fait que la taille n'influence que très peu la production de méthane, nous constatons que son effet physique sur la production cumulée reste également limité. Comme le montre la figure 3a, les répétitions de chaque modalité sont globalement superposées (ISR de 2, 3 et 4). Aux valeurs d'ISR entre 1,59 et 4, nous n'avons pas remarqué une grande différence sur l'allure de courbes, les valeurs moyennes de production normalisée de méthane BMP obtenus à 30 jours sont également similaires (189-204 NL CH₄·kg MO⁻¹). Cependant, pour un ISR = 4,41, nous observons sur ce graphique une augmentation importante de la production de méthane dès le 5^e jour et du BMP (114 NL CH₄·kg MO⁻¹). En effet, aucune répétition n'a été réalisée sur cette modalité. À 30 jours de Digestion Anaérobie, seulement 40% de gaz produit est attribué au substrat (résultats non présentés), l'effet du rapport inoculum substrat est en partie masqué par la MO résiduelle présente dans le digestat. La production endogène de méthane est donc à prendre en considération, lorsqu'un ratio relativement élevé est appliqué.

Des courbes de production de gaz ont été construites à l'aide du modèle Gompertz et d'un modèle du premier ordre, pour la modalité ISR = 2. Il semble que le modèle Gompertz représente une meilleure simulation sur l'allure de courbe notamment sur la phase exponentielle. Néanmoins, ce modèle risque de sous-estimer BMP₀, contrairement au modèle du premier ordre qui semble plus adéquat en termes d'adaptation de la phase stationnaire. Sur la zone d'étude du Plan Composite Centré (2 ≤ ISR ≤ 4), nous

constatons que le rapport inoculum substrat n'a pas d'effet sur la production normalisée de méthane (Fig. 3b).

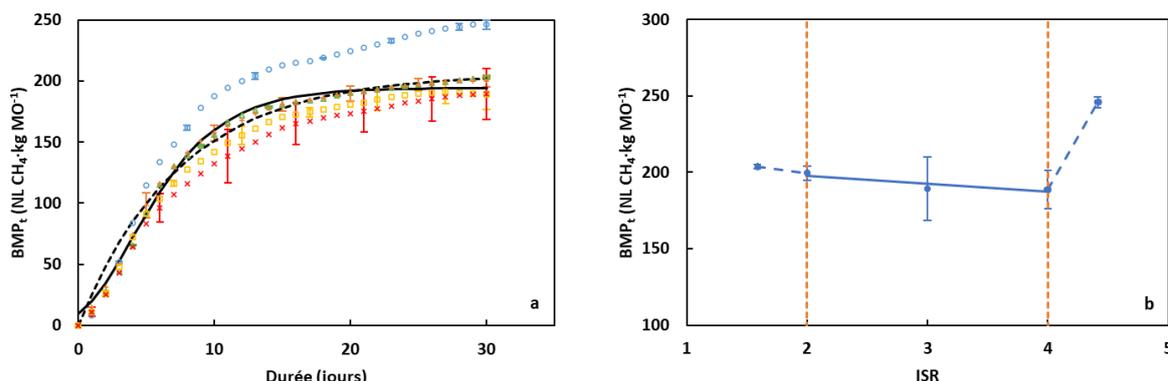


Figure 3 - a : production cumulée de méthane en fonction de ISR (moyenne ± écart type, triangles verts : ISR-1,59, croix orange : ISR-2, croix rouges : ISR-3, carrés jaunes : ISR-4, cercles bleus : ISR-4,41, courbe noire en trait plein : modèle Gompertz appliqué à ISR-2, courbe noire en traits interrompus courts : modèle du premier ordre appliqué à ISR-2) ; b : production cumulée de méthane à 30 jours de Digestion Anaérobie

La modélisation a été réalisée sur les 13 expérimentations, à l'aide des équations (1) et (2). Les indicateurs d'écart ont été calculés en appliquant les équations (3) et (4). D'après nos calculs, la valeur de R^2 ajusté est comprise entre 0,96 et 0,99, la valeur de $MSE_{ajusté}$ est comprise entre 6,5 et 110 ($NL^2 CH_4 \cdot kg MO^{-2}$). Nous n'avons pas pu remarquer une grande différence sur les deux modèles. Cependant, comme mentionné précédemment, l'application de modèle de premier ordre permet de mieux estimer BMP_0 , ce qui donne accès plus précisément au potentiel énergétique de l'algue. Ainsi, ce modèle représente généralement une erreur relative moins importante par rapport au modèle Gompertz (par l'application de l'équation (5), résultats non présentés). Nous avons donc décidé de privilégier le modèle d'ordre 1. De ce fait, la constante de vitesse K_h devient un paramètre clé de la DA.

La figure 4 représente la surface de réponse et le graphe de contour associé. La valeur de K_h se situe entre 0,1 et 0,15 $jour^{-1}$. Le point stationnaire se situe à un rapport inoculum substrat de 3,3 avec une taille de 0,05 m, il correspond à la valeur minimale de K_h de 0,1 $jour^{-1}$. Aux faibles valeurs de rapport inoculum substrat ($ISR < 2,5$), il semblerait que K_h soit inversement corrélé à la taille. En effet, la diminution de la taille des algues permet d'avoir une surface de contact plus importante, et par conséquent conduit à une meilleure hydrolyse du substrat. Cependant, pour les valeurs élevées de rapport inoculum substrat et lorsque la taille est grande, il nous paraît peu probable que la valeur de K_h soit aussi importante. Comme précédemment, l'incertitude introduite par la faible quantité de substrat ajoutée ne devrait pas être négligée. Les résultats obtenus dans ces conditions méritent d'être confrontés par des essais supplémentaires. En somme, un rapport inoculum substrat de 2 est un optimum permettant d'avoir un K_h élevé de façon à maintenir une valeur de BMP_0 cohérente. *A posteriori*, nous avons effectué une expérience pour valider l'optimum trouvé dans cette série d'essai (modalité $ISR = 2$), une valeur normalisée de $229 \pm 6 NL CH_4 \cdot kg MO^{-1}$ a été obtenue permettant de confirmer ce choix de rapport inoculum substrat.

L'étude de la taille exige l'exécution d'une coupe d'algues, il nous paraît assez difficile d'avoir un échantillonnage complètement homogène et représentatif, notamment lorsque la taille est petite (< 2 cm). Bird *et al.* (1981) ont montré que l'échantillonnage de différents tissus biologiques peuvent provoquer une variation sur les pouvoirs potentiels méthanogènes. Ils ont obtenu un BMP normalisé de $200 NL CH_4 \cdot kg MO^{-1}$ sur les stipes de *S. fluitans*, cette valeur descend à $180 NL CH_4 \cdot kg MO^{-1}$ lorsqu'il s'agit de flotteurs, la valeur minimale de BMP se retrouve avec les frondes ($150 NL CH_4 \cdot kg MO^{-1}$).

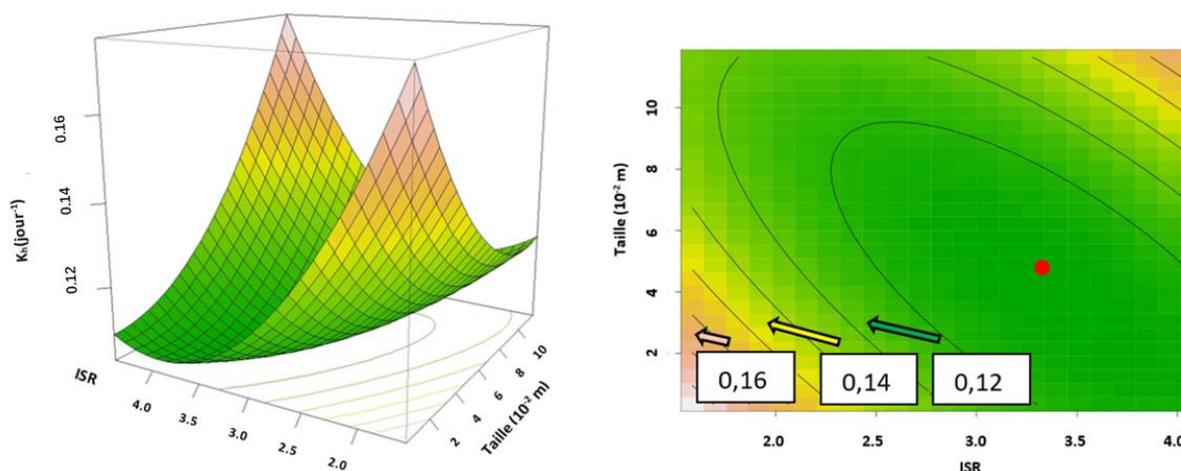


Figure 4 - graphiques des isoréponses (p -value = 0,049, $R^2 = 0,74$, point rouge : point stationnaire)

Le choix de la valeur de rapport inoculum substrat est bien documenté dans la littérature et peut varier selon le substrat : Zeng *et al.* (2010) ont remarqué, avec la microalgue *Microcystis spp.* comme substrat, une diminution du BMP (de 140,48 à 94,42 NL CH₄·kg MO⁻¹) lorsque ISR passe de 2,0 à 0,5. Concernant les macroalgues, Costa *et al.* (2012) ont travaillé avec des valeurs d'ISR relativement faibles, sur l'algue verte *Ulva sp.* (0,17 < ISR < 0,85), une diminution de BMP a été observée lorsque ISR varie de 0,35 à 0,17 (de 196 ± 9 à 167 ± 13 NL CH₄·kg MO⁻¹) ; sur l'algue rouge *Gracilaria sp.* (0,14 < ISR < 0,7), la valeur de BMP augmente puis diminue en fonction d'ISR. Tandis que sur *Sargassum sp.* (0,01 < ISR < 0,04), une augmentation a été remarquée sur le BMP (de 281 ± 7 à 541 ± 10 NL CH₄·kg MO⁻¹) (Costa *et al.*, 2015).

Nos résultats ont mis en évidence l'importance du choix de la valeur de rapport inoculum substrat. Lorsque la valeur de ISR est trop élevée, une production excessive de méthane endogène risque de diminuer la fiabilité des essais. C'est pourquoi nous suggérons, pour des travaux futurs d'appliquer des valeurs d'ISR relativement faible (ISR < 3). Pour les essais en batch sur *S. muticum*, un ISR de 2 nous paraît pertinent. Ceci est en accord avec plusieurs études antérieures (Holliger *et al.*, 2016; Raposo *et al.*, 2008; Chynoweth *et al.*, 1993).

Le travail réalisé reste préliminaire, une étude complète exige l'analyse de la composition des algues, en tenant compte des éventuels effets des teneurs en sels, en polyphénols ainsi que d'autres molécules présentes dans les sargasses et susceptibles d'inhiber les micro-organismes (arsenic, chlrodécone). Cela permettrait la mise en place d'équations plus complexes, rendant possible une estimation de façon précise de la production de méthane. Il serait intéressant aussi de déterminer les types et la concentration en AGV présents au cours et à la fin de Digestion Anaérobie, ainsi que la variation de la demande chimique en oxygène (DCO), qui donne l'accès à l'évaluation de la biodégradabilité et du suivi de la DA étape par étape. Par ailleurs, les résultats obtenus à l'issue de cette expérience méritent d'être validés pour des bioréacteurs de taille plus grande.

Conclusion et perspectives

Les effets de la taille et du rapport inoculum substrat ont été testés en batch sur la production de méthane d'algues brunes, à l'aide de plan d'expériences. Le travail réalisé apporte une information pertinente sur le choix de rapport inoculum substrat. Cette étude préliminaire permet donc de définir des conditions expérimentales pour la suite des essais. Les valeurs de BMP normalisées obtenues (170-216 NL CH₄·kg MO⁻¹) sont comparables à celles de la littérature, et vont permettre de réaliser une première estimation de la production énergétique dans un schéma de bioraffinage des algues. Cependant, il existe encore de nombreux obstacles à la mise en place d'un procédé de méthanisation

des sargasses en Caraïbes comme par exemple la prédiction fiable de la localisation des échouages d'algues, l'amélioration des méthodes de conservation et une meilleure compréhension des variations saisonnières de leur composition biochimique. Pour le futur, une estimation plus précise des aspects énergétique et économique à grande échelle sera nécessaire en vue d'une amélioration de la gestion des côtes.

Références bibliographiques

ADEME en Guadeloupe. Algues Sargasses. Disponible en ligne : <https://guadeloupe.ademe.fr/expertises/algues-sargasses> (consulté le 1 juillet 2022).

Baghel, R.S.; Suthar, P.; Gajaria, T.K.; Bhattacharya, S.; Anil, A.; Reddy, C.R.K., Seaweed biorefinery: A sustainable process for valorising the biomass of brown seaweed, *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263, 121359.

Bird, K.T.; Hanisak, M.D.; Ryther, J.H., Changes in agar and other chemical constituents of the seaweed *Gracilaria tikvahiae* when used as a substrate in methane digesters, *Resources and Conservation*, 1981, 6(3), 321–327.

Chamaa, M.A., Couplage de la méthanisation et des électrotechnologies : intensification de la production de biogaz et du séchage du digestat, thèse de doctorat en génie des procédés et bioprocédés, Université Bretagne Sud, 2017, 234 p.

Costa, J.C.; Oliveira J.V.; Pereira, M.A.; Alves, M.M.; Abreu, A.A., Biohythane production from marine macroalgae *Sargassum* sp. coupling dark fermentation and anaerobic digestion, *Bioresource Technology*, 2015, 190, 251–256.

Costa, J.C.; Gonçalves, P.R.; Nobre, A.; Alves, M.M., Biomethanation potential of macroalgae *Ulva* spp. and *Gracilaria* spp. and in co-digestion with waste activated sludge, *Bioresource Technology*, 2012, 114, 320–326.

Chynoweth, D.P.; Turick, C.E.; Owens, J.M.; Jerger, D.E.; Peck, M.W., Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks, *Biomass and Bioenergy*, 1993, 5(1), 95–111.

Goupy, J.; Creighton, L., *Introduction aux plans d'expériences*; Technique et ingénierie; 3e éd.; Dunod "L'Usine nouvelle": Paris, 2006; ISBN 978-2-10-049744-7.

Holliger, C. *et al.*, Towards a standardization of biomethane potential tests, *Water Science and Technology*, 2016, 74(11), 2515–2522.

Liu, X.; Boy, V.; Lendormi, T.; Lemée, Y.; Lanoisellé, J.L., Valorization of Common Starfish (*Asterias rubens*) by Air Impingement Drying and Mesophilic Anaerobic Digestion: A Preliminary Study, *Waste and Biomass Valorization*, 2021, 12(6), 2969–2981.

Lo H.M. *et al.*, Modeling biogas production from organic fraction of MSW co-digested with MSWI ashes in anaerobic bioreactors. *Bioresource Technology*, 2010, 101, 6329–6335.

Raposo, F.; Borja, R.; Rincon, B.; Jimenez, A.M., Assessment of process control parameters in the biochemical methane potential of sunflower oil cake, *Biomass and Bioenergy*, 2008, 32(12), 1235–1244.

Zeng S.; Yuan X.; Shi X.; Qiu Y., Effect of inoculum/substrate ratio on methane yield and orthophosphate release from anaerobic digestion of *Microcystis* spp., *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 178, 89-93.