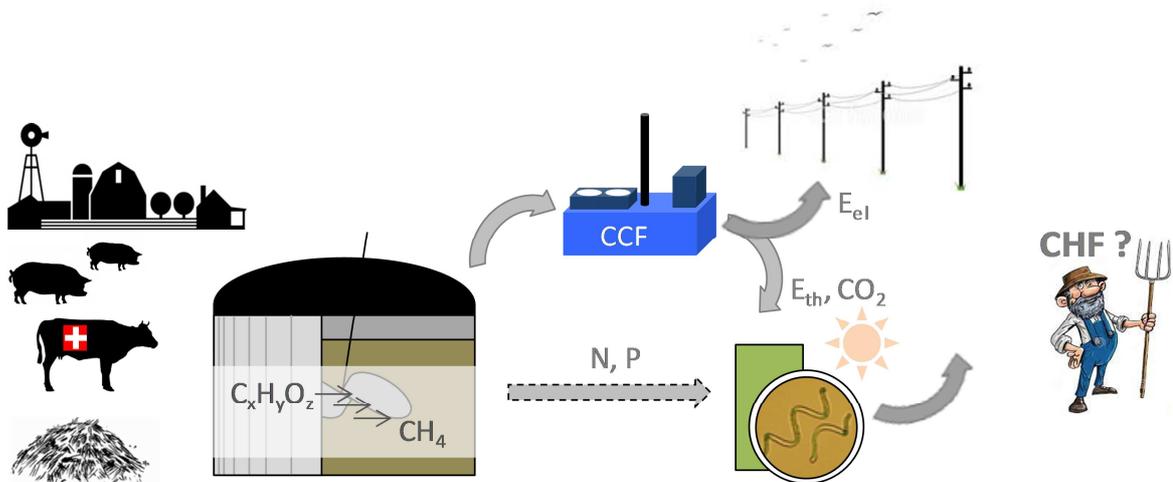




Schlussbericht 17.12.2015

Production de spiruline à la ferme

Produire de la spiruline à la ferme grâce au digestat et à la chaleur excédentaire d'une installation de biogaz





Traitement et valorisation
de déchets et
d'effluents organiques



Date : Le 17 décembre 2015

Lieu : Bern

Mandant :

Office fédéral de l'énergie
Programme de recherche énergie
CH-3003 Berne
www.bfe.admin.ch

Mandataire :

EREP SA
Chemin du Coteau 28, CH-1123 /Aclens
www.erep.ch

Auteurs:

Nuria Montpart Planell, EREP SA, contact@erep.ch
Yves Membrez, EREP SA, yves.membrez@erep.ch
Dominik Refardt, ZHAW, refa@zhaw.ch

Responsable de domaine de l'OFEN : Pascal Previdoli, pascal.previdoli@bfe.admin.ch

Chef de programme de l'OFEN : Rolf Schmitz, rolf.schmitz@bfe.admin.ch

Numéro du contrat de l'OFEN : SI/501229-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Office fédéral de l'énergie, OFEN

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; adresse postale : CH-3003 Bern

Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung

Die Entwicklung von Verfahren, die landwirtschaftliche Biogasanlagen mit der Produktion von Spirulina verbinden, sind interessant, weil Restelemente aus der Biogasanlage und aus der Biogasaufwertungsanlage benutzt werden können, um ein Produkt mit Mehrwert zu produzieren. Dieses Prinzip erlaubt eine bessere Energie Verwertung von überschüssiger Hitze und von Abgasen, die aus der Heizkraftanlage kommen. Die Grenzen von dieser Konfiguration sind in der Schweiz geschätzt, damit die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von landwirtschaftlichen Biogasanlagen nachgeprüft werden kann. Die Wärmeautonomie des Verfahrens wird als Hauptkriterium genommen, um die Spirulina Anlage zu dimensionieren. Für die verschiedenen Arbeitsumstände (Bestrahlung, Nährstoffe Quelle, Grosse der Biogasanlage) ist die Produktion von Spirulina geschätzt worden. Die energetische, umweltbedingte und ökonomische Einschätzung zeigt, dass 50% der überschüssigen Hitze verwertet werden kann, d.h. 85-90% der Hitze in den Abgasen; dass die Verminderung von Kohlendioxid nicht bedeutend ist und dass die Betriebskosten heutzutage zu hoch sind, um die ökonomische Rentabilität des Verfahrens zu sichern.

Résumé

Le couplage d'installations de méthanisation agricole avec des unités de production de spiruline constitue un concept séduisant puisqu'à partir des flux résiduels de la digestion anaérobie et de la valorisation du biogaz un produit à valeur ajoutée est obtenu. Ce principe permet de réaliser une meilleure valorisation énergétique de la chaleur excédentaire et des gaz d'échappement issus des moteurs de cogénération. Les limites de cette configuration ont été évaluées pour la Suisse afin de vérifier si la mise en œuvre d'un tel couplage augmente la compétitivité de la technologie de la méthanisation agricole. L'autonomie thermique de l'installation a été prise comme principal critère de dimensionnement des unités de production de spiruline. Pour différentes conditions de travail (radiation solaire, source de nutriments, taille des unités de méthanisation) la production potentielle de spiruline a été évaluée. L'évaluation énergétique, environnementale et économique montre que 50% de la chaleur excédentaire peut être valorisée, soit 85-90% de la chaleur contenue dans le gaz d'échappement ; que la diminution des émissions de dioxyde de carbone n'est pas significative et que, pour les conditions évaluées, les coûts d'exploitation sont actuellement trop élevés pour permettre la rentabilité du projet.

Abstract

The development of projects coupling an agricultural anaerobic digestion installation with the production of spirulina is an attractive concept, since the waste streams from the méthanisation and from biogas valorization can be used to produce a high value product. This principle allows a better energetic valorization of surplus heat and of exhaust gases coming from the cogeneration unit. The limits of this configuration have been evaluated for Switzerland to study if the implementation of such coupling increases the competitiveness of agricultural anaerobic digestion. The thermal autonomy of the plant has been established as the main criterion to design the spirulina production units. For different working conditions (light radiation, nutrients source, size of méthanisation units), the potential production of spirulina has been evaluated. The process energy yield, the environmental impact and the process economy show that 50% of surplus heat can be valorized, being 85-90% of heat contained in the exhaust gases; that the decrease in carbon dioxide emissions is not relevant and that, for the conditions tested, the operating costs are currently too high to allow the economic feasibility of the project.





Contenu

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Abstract	3
Contenu	5
Liste des abréviations	6
1. Introduction	7
1.1. La valorisation des effluents d'élevage par méthanisation.....	7
1.2. Les micro-algues et leur production.....	8
1.3. Le couplage méthanisation-production de spiruline.....	12
1.4. Marché de la spiruline en Suisse.....	14
2. Objectifs de l'étude	15
3. Matériels et méthodes	15
3.1. Définition des paramètres de l'étude.....	15
3.2. Définition des paramètres d'évaluation des résultats.....	19
3.3. Modèle de production de la spiruline.....	20
3.4. Modèle d'évaluation couplage méthanisation et production de spiruline.....	25
4. Résultats et discussion	28
4.1. Production de spiruline à la ferme.....	28
4.1.1. Source de carbone.....	28
4.1.2. Source d'azote.....	32
4.1.3. Valorisation de la chaleur.....	34
4.1.4. Production de spiruline sous serre.....	35
4.1.5. Surface de culture.....	36
4.2. Analyse économique.....	37
4.3. Analyse énergétique.....	43
4.4. Analyse environnementale.....	44
5. Conclusions	45
6. Perspectives	46
7. Références	47



Liste des abréviations

CCF : couplage chaleur- force

CH₄ : méthane

CO₂ : dioxyde de carbone

CHF : Confédération Helvétique Franc

FAO : organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

FP : flat panel

MS : matière sèche

N : azote

ORP : open raceway pond

OMC : organisation mondiale du commerce

OMS : organisation mondiale de la santé

P : phosphore

PAR : rayonnement photosynthétiquement actif

PBR : photobioréacteur

RPC : rétribution à prix coûtant

1. Introduction

1.1. La valorisation des effluents d'élevage par méthanisation

La méthanisation est un procédé biologique dans lequel la matière organique est dégradée par des microorganismes en conditions anaérobies (absence d'oxygène). Le biogaz est le produit de leur consommation ; il est composé essentiellement de gaz méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2) (environ 50-65% vol. et 35-50% vol. respectivement).

La méthanisation agricole d'effluents d'élevages et de biodéchets permet aux exploitants de valoriser leurs sous-produits (lisier, fumier, déchets verts, ...) en produisant du biogaz et une matière fertilisante, le digestat.



Figure 1. Installation de biogaz agricole (Saugealles, VD).

La production de biogaz dans des installations agricoles de méthanisation peut être augmentée en ajoutant à la ration des substrats autres que des effluents d'élevage (lisier, fumier) ou des déchets agricoles (paille, résidus de récolte, etc). Ces co-substrats peuvent avoir une origine agricole (p.ex. maïs), industrielle (p.ex. lactosérum) ou urbaine (biodéchets ménagers).

La valorisation électrique et thermique du biogaz dans des unités de cogénération est habituelle dans des installations agricoles. Dans l'unité de cogénération, la combustion du biogaz dans le moteur fait tourner la génératrice d'électricité. La chaleur produite par la combustion, contenue dans l'eau du circuit de refroidissement et dans le gaz d'échappement du moteur, est disponible pour utilisation. Les températures disponibles se situent à env. 90 et 500 °C respectivement.



En plus de la valorisation énergétique des déchets, la valorisation agronomique de ceux-ci est obtenue. Ainsi, la matière issue du procédé de méthanisation, le digestat, présente des caractéristiques appropriées pour leur utilisation comme produit fertilisant, car il présente une teneur élevée en azote et phosphore facilement accessible (0.5-5 g N-NH₄/L, ~1 g P/L).

La plupart des installations agricoles en Suisse valorisent le biogaz produit dans un moteur de cogénération, atteignant au total une production électrique de 80 GWh et une production thermique de 95 GWh (1). Cependant, actuellement la valorisation moyenne de la chaleur produite ne dépasse pas 20% (2,3), ce qui limite le rendement énergétique de la filière.

Face à la difficulté de bien valoriser la chaleur produite, de plus en plus des projets de méthanisation agricole en Europe envisagent le couplage à une activité de production de micro-algues de type spiruline, car cette dernière est consommatrice de chaleur (4–6). De plus, le couplage de ces deux procédés peut permettre une voie de valorisation des nutriments présents dans le digestat et du CO₂ issu du moteur de cogénération, diminuant ainsi les émissions de ce gaz à effet de serre.

1.2. Les micro-algues et leur production

Les micro-algues sont un groupe divers d'organismes unicellulaires, qui croît dans une large gamme d'environnements aquatiques, depuis des eaux fraîches jusqu'aux eaux salines saturées. Les micro-algues peuvent produire de la biomasse très rapidement et, par conséquent, des systèmes à haut rendement sont envisageables, soit de biomasse comme telle, des huiles, des protéines, etc. (7).

Parmi les groupes les plus importantes de micro-algues on trouve les diatomées (p.e. *Skeletonema costatum*), les algues vertes (p.e. *Dunaliella salina*, *Chlorella vulgaris*) ou les cyanobactéries (p.e. *Arthrospira platensis*).

La micro-algue spiruline (figure 2) (notamment *Arthrospira platensis* et *Arthrospira maxima*) concentre l'intérêt de beaucoup de producteurs, car, techniquement, cette cyanobactérie présente une croissance élevée et elle est facile de récolter grâce à la morphologie filamenteuse des cellules juxtaposées. Son contenu riche en protéines (60-70% du poids sec), vitamines (spécialement vitamine B12 et β-carotènes), acides aminés essentiels, acides gras et minéraux (notamment fer), en fait une



source nutritionnelle importante, et en conséquence elle est la micro-algue la plus cultivée au monde (5 kT MS/an) (8,9). La croissance de spiruline est optimale à 35-37°C et à pH 10. Elle croît de manière naturelle dans des lacs tropicaux et subtropicaux avec un pH élevé et une haute concentration de carbonate et de bicarbonate.

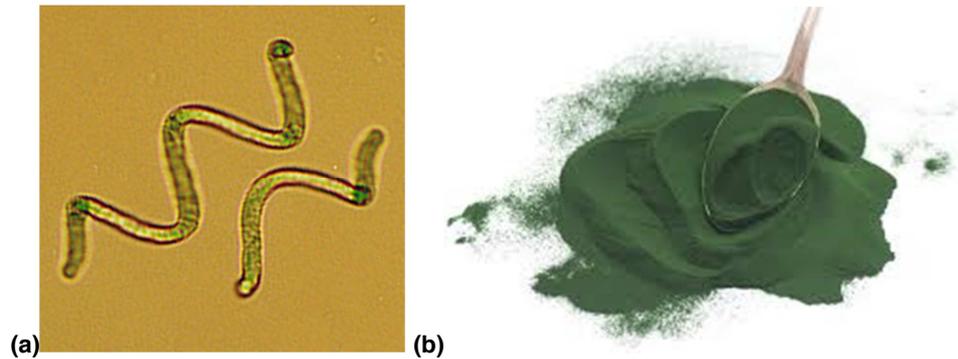


Figure 2. (a) Image au microscope d'*Arthrospira platensis* **(b)** produit commercial de spiruline en poudre

Les besoins généraux des micro-algues comprennent : la présence de lumière et de CO₂, de l'eau et des nutriments pour en garantir la croissance. Les nutriments nécessaires sont l'azote, le phosphore, le fer et le soufre. Les nutriments azotés peuvent être apportés soit sous forme de nitrate, soit sous forme d'ammonium (10,11), bien que l'assimilation d'ammonium soit préférée par la spiruline (12). Cependant l'alcalinité du milieu favorise la production d'ammoniaque, qui est volatile et de plus peut devenir inhibiteur pour la croissance des micro-algues. Un régime de production semi-continu peut minimiser ces inconvénients (13–16). Dans les cas où des eaux usées ou d'autres flux résiduels sont utilisées comme milieu de croissance, le contenu en nutriments de ces sources peut suffire pour garantir cette croissance (7).

Les deux principales méthodes de production des micro-algues sont les systèmes ouverts de type bassins ou ORP (de l'anglais *open raceway pond*) ou les photobioréacteurs (PBR) fermés (en configuration tubulaire, colonne ou plate) (figure 3). Le choix entre les procédés dépend des conditions d'opération et de l'utilisation finale de la biomasse, ce qui détermine l'économie du procédé.



Figure 3. Systèmes de production de micro-algues type bassin, PBR tubulaire, PBR plat et PBR colonne sous serre ou à l'extérieur.

Les systèmes de type bassin ou ORP ont de faibles besoins techniques, mais présentent aussi des productivités modestes (entre 0.06 et 0.23 g/L_{réacteur} j) à cause des faibles conditions d'illumination et d'un brassage réduit. En plus, ces systèmes subissent un haut degré d'évaporation et un risque important de contamination de la culture. L'utilisation d'ORP implique aussi la disponibilité de grandes surfaces, qui est aussi dictée par une profondeur maximale du bassin à respecter (pas plus de 30 cm) afin de garantir l'accès de la lumière (9).

En revanche, les PBR fermés présentent une production plus élevée (presque 3 g/L_{réacteur} j peuvent être obtenus) et une meilleure maîtrise des conditions d'opération. Ils sont donc conçus de façon à optimiser les conditions de culture et leur contrôle tout en maximisant la surface d'exposition à la lumière. Les PBR tubulaires sont constitués de tubes transparents (en verre ou en plastique) d'un diamètre maximum de 0.15 m au travers desquels le milieu de croissance est pompé. Dans les PBR plats, le milieu de croissance est confiné entre deux plaques transparentes et le brassage du système est assuré par l'injection de gaz (p.ex. dioxyde de carbone pur). La turbulence du milieu empêche la sédimentation des micro-algues, en diminuant la possibilité que des bactéries qui s'en nourrissent puissent y croître. Des bonnes conditions de brassage permettent aussi de réduire les problèmes d'illumination, atteignant un équilibre entre les temps que les micro-algues passent en zones éclairées



et en zones sombres. Le principal inconvénient des systèmes fermés est le coût d'investissement supérieur, spécialement dans les configurations avec un éclairage artificiel.

Parmi d'autres, les constructeurs suivants offrent des systèmes de production de micro-algues : Varicon Aqua Solutions (UK), Georg Fischer Piping Systems (CH), LGEM (NL), MicroBio Engineering (USA), NanoVoltaics (USA), IGV Biotech (DE), SCHOTT (DE) et Subitec (DE).

Que ce soit dans des bassins ou dans des PBR fermés, la culture des espèces de micro-algues qui peuvent croître en conditions extrêmes, comme la spiruline en conditions alcalines, ou *Dunaliella sp.* en conditions de salinité élevée, diminue le risque de contamination par d'autres microorganismes.

Par rapport aux méthodes de récolte des micro-algues, aucune ne présente d'avantage sur les autres. Le choix pour une technologie de récolte dépend des espèces de micro-algues, du milieu de culture, de la production, du produit final et des coûts. La récolte des micro-algues peut être difficile à cause de paramètres comme leur petite taille, une faible concentration ou la mobilité des cellules. Différentes combinaisons de procédés de séparation (floculation, flottation, filtration, sédimentation, centrifugation et séparation électrostatique) sont couramment utilisées. Pour donner quelques exemples, la récolte de micro-algues accumulatrices de lipides (avec faible densité) avec des technologies de flottation est plus adéquate qu'avec celles de sédimentation, tandis que pour les micro-algues filamenteuses, comme c'est le cas de la spiruline, la filtration à bas coût est possible (9,17).

La valorisation des micro-algues peut se faire par différentes voies selon le produit final souhaité. Avec des procédés adéquats de production, la consommation humaine des micro-algues est économiquement intéressante. De façon similaire, les micro-algues sont utilisées en alimentation animale, dans des élevages. L'extraction de lipides pour obtenir des biocarburants, l'extraction de molécules antioxydantes pour l'industrie cosmétique ou agroalimentaire se présentent comme des options pour obtenir des produits avec une plus haute valeur ajoutée. Dans ces derniers cas, la matière qui reste après l'extraction peut encore être valorisée dans des filières de valorisation de la biomasse, comme la méthanisation.



1.3. Le couplage méthanisation-production de spiruline

Le couplage des installations de méthanisation avec la production de micro-algues, comme la spiruline, est considéré comme l'un des meilleurs scénarios, permettant la valorisation des flux de matière et d'énergie. Les nutriments présents dans le digestat peuvent être utilisés, ainsi que le CO_2 du gaz d'échappement et la chaleur produite par la combustion dans le moteur de cogénération. Une possible configuration du couplage des deux procédés est présentée à la figure 4, dans laquelle le flux du gaz d'échappement et le digestat liquide sont utilisés pour la culture des micro-algues. La chaleur du gaz d'échappement est utilisée pour la culture des micro-algues, pour le séchage du produit récolté et pour sa stérilisation.

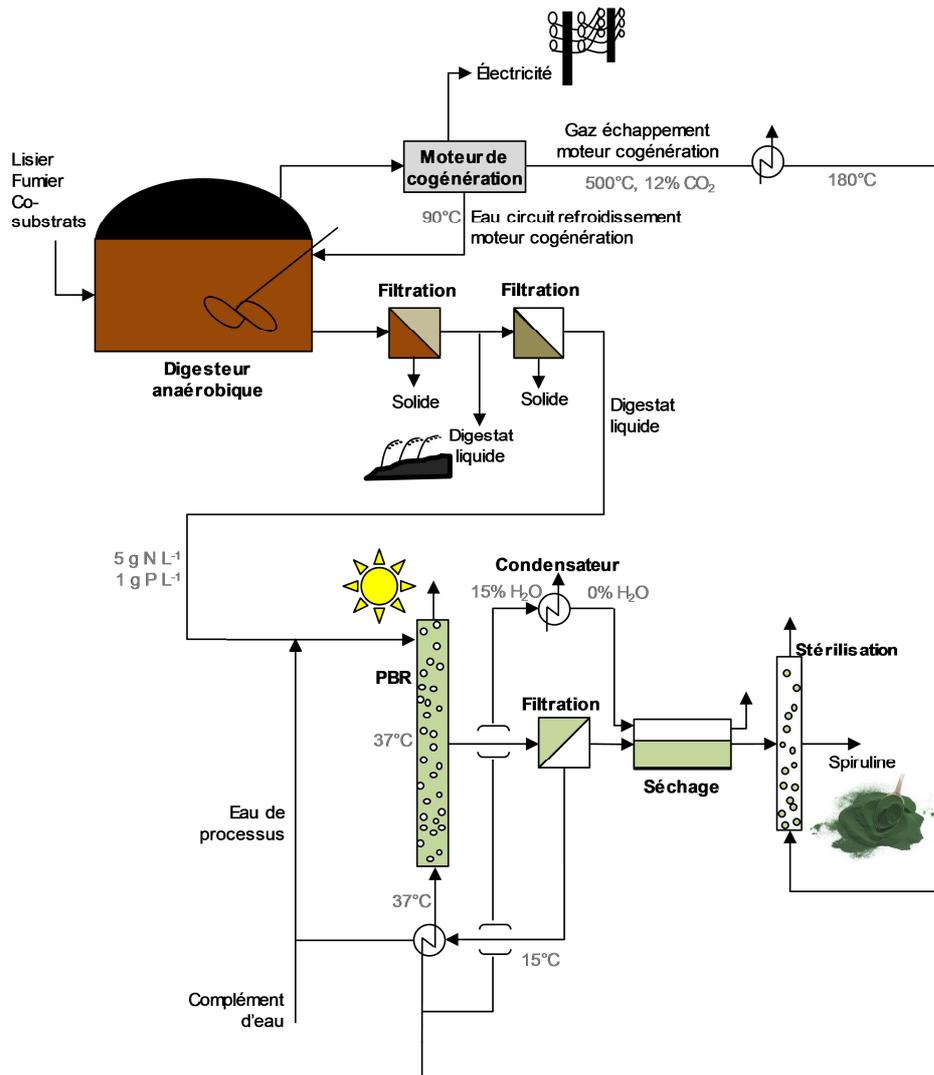


Figure 4. Schéma d'une configuration possible de couplage des procédés de méthanisation et production de micro-algues.



Le couplage de ces deux procédés est déjà mis en œuvre, bien que le niveau d'interaction entre eux varie. Tous les effluents de la méthanisation (digestat, chaleur et gaz d'échappement du moteur) ne sont pas nécessairement utilisés dans l'étape de production algale. L'utilisation du digestat comme source d'azote et de phosphore a été rapportée préalablement comme faisable de même que la consommation du CO₂ issu de systèmes de combustion (18–22). Dans la Ferme de Bouquetôt (France) cette configuration est déjà exploitée sous la supervision de HyES Conseil (5). Le projet EnAlgae et le projet AlgaeBiogas ciblent le même but dans leurs installations pilotes aux Pays Bas et en Slovénie, respectivement (4,23). En Suisse, la Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) a été retenue récemment pour le développement d'un projet européen (projet COST(24)), qui, avec le même but, vise à étudier plutôt les possibilités du couplage à échelle laboratoire dans leur « thin-layer » PBR (0.2 m³, 18 m²), un système ouvert où la maîtrise des paramètres de travail permet l'augmentation de la production (25).

Les contraintes du couplage des deux procédés comprennent l'utilisation d'un digestat assez dilué (inhibition liée à la teneur en ammoniacque, observée à partir de 45 mg/L pour les micro-algues (26); nécessité de pénétration de la lumière dans le milieu de croissance (27)), la possible diminution du pH causée par la dilution du CO₂ et la possible croissance de microorganismes qui ne sont pas désirés (27–29). Ces facteurs peuvent se résoudre avec une maîtrise appropriée de la technologie, tandis que des autres facteurs, comme l'acceptation sociale de la consommation humaine ou animale de la spiruline, peuvent conditionner l'application finale de la micro-algue ou le choix de celle-ci, même si des procédés de stérilisation sont appliqués. Néanmoins, sous forme d'alimentation animale, les micro-algues ont été utilisées avec succès pour l'alimentation de bétail porcin, bovin et de volaille et, bien entendu, dans l'aquaculture (30–32). De la recherche au sujet de l'alimentation animale avec des micro-algues se déroule actuellement en Valais (33). En vue d'une application alimentaire de la spiruline produite, l'extraction préalable des nutriments du digestat présente dans tous le cas plus de possibilités de succès.

Au plan juridique, l'utilisation des micro-algues en tant qu'alimentation humaine ou animal est soumise à la directive européenne EU 183/2005, selon laquelle tous les produits alimentaires doivent être enregistrés et approuvés. La directive est aussi accompagnée par des normes internationales sur la



nutrition, notamment UN *Codex Alimentarius*, soutenue par les institutions onusiennes OMS, FAO et OMC. Sur ces bases, des variations entre les pays européens existent, résultat des réglementations nationales. A titre d'exemple, au Royaume Uni l'utilisation alimentaire des micro-algues n'est pas permise si le digestat et/ou le gaz d'échappement d'une combustion sont utilisés. En Suisse, il n'existe pas de législation spécifique sur l'utilisation de produits alimentaires à base d'algues. La Loi fédérale sur les denrées alimentaires et les objets usuels (LDAI) du 1992, devrait couvrir ce domaine d'activité, en permettant aux autorités d'autoriser des produits alimentaires, des procédés de production et la commercialisation des produits (34).

1.4. Marché de la spiruline en Suisse

Globalement, les micro-algues sont largement utilisées dans l'industrie agroalimentaire. Le premier marché des micro-algues est l'alimentation humaine (74%). Les micro-algues sont aussi utilisées comme alimentation animale dans des fermes d'élevage. D'autres utilisations des micro-algues comprennent la production de produits à haute valeur ajoutée (protéines, molécules antioxydantes, etc.).

Le marché des micro-algues trouve aussi une niche dans la production de biocarburants à cause de l'accumulation élevée en lipides. En fait, selon les espèces, le contenu lipidique d'une cellule de micro-algue peut atteindre 75% de matière sèche (7,9). Cependant l'extraction des huiles requiert l'utilisation de solvants car, à la différence des sources d'huiles végétales terrestres, les micro-algues sont trop petites pour les presser. Ceci fait que les biocarburants issus des micro-algues ont des coûts de 5 à 10 fois plus élevés que les carburants fossiles (35).

Concernant le marché en Suisse, on trouve de l'offre de produits à base de spiruline, qui comprennent essentiellement des compléments alimentaires. Les prix atteignent 100 CHF par kilogramme. Globalement, la production de micro-algues sur le marché suisse n'a pas beaucoup d'acteurs et ceux qui existent développent un métier mêlant le commerce et la recherche (Foundation Antenna Technologies, systèmes à bas coût pour pays en développement ; Georg Fischer Piping Systems et Infors AG, bioréacteurs ; Spiralsps, boissons à base de spiruline) (36). L'essentiel de l'approvisionnement se fait par importation.



2. Objectifs de l'étude

Le but de l'étude est d'évaluer la faisabilité technico-économique des projets de couplage de la méthanisation et de la production de spiruline à la ferme en Suisse. Ainsi le gain environnemental, énergétique et économique de ce type d'installations pour différentes technologies, qualités des digestats, conditions opératoires ou marchés possibles pour la micro-algue spiruline est présenté. Les conclusions de l'étude doivent permettre de disposer d'outils de décision sur la réalisation de ce type de projets.

3. Matériels et méthodes

3.1. Définition des paramètres de l'étude

Les paramètres utilisés pour caractériser les différentes options évaluées dans cette étude distinguent la taille de l'installation de méthanisation, la typologie du photobioréacteur, la radiation solaire, la source de CO₂ et la source des nutriments. Ces paramètres sont détaillés ci-après.

Les installations de biogaz à la ferme

Les types d'installations de biogaz agricoles considérées dans cette étude se distinguent par leur capacité de traitement (tonnes par année de déchets traités) : installations petites (traitement de 5000 t/an), moyennes (8000 t/an) ou grandes (12000 t/an) (37). Un mélange à parts égales de fumier bovin et de lisier porcin a été considéré. De plus, une installation de taille moyenne avec un pourcentage de co-substrats (déchets de triage de céréales, gazon, petit lait) supérieur à 20% de la masse fraîche a été définie (tableau 1). Ce pourcentage contribue à la faisabilité économique du procédé de méthanisation agricole, car il est lié au tarif de rachat de l'électricité produite avec l'unité de cogénération (ordonnance sur l'énergie, OEne : système de rétribution à prix coûtant, RPC).



Taille	Substrats	Quantité (t/an)	Production de biogaz (Nm ³ /an)	Puissance CCF (KW _{éi})	Heures CCF (h/an)	Electricité nette (KWh _{éi} /an)	Chaleur gaz échap. (KWh _{th} /an)	Azote (kg N /m ³)	Phosphore (kg P/m ³)
Petite	Fumier	2500	204357	50	7754	376048	237955	5	1.5
	Lisier	2500							
Moyenne	Fumier	4000	327000	80	8026	622851	371822	5	1.5
	Lisier	4000							
Grande	Fumier Lisier	6000 6000	490500	120	8277	993185	545488	5	1.5
Moyenne	Fumier	1000	411044	100	7915	767759	445191	5	1.5
	Lisier	5000							
	D.triage	500							
	Gazon	500							
	Petit lait	1000							

Tableau 1. Tableau des caractéristiques des installations de biogaz à la ferme.

Les coûts réferents à la technologie de méthanisation sont basés sur les données du rapport *Typischen Kosten in Biogasanlagen* de l'association Biomasse Suisse (37) et ont été résumés dans le tableau 2.

Taille	Quantité intrant (t/an)	Investissement (Mio. CHF)	Gros œuvre (% de l'investissement)	Equipements (% de l'investissement)	Cogénération (% de l'investissement)	Coûts d'exploitation (CHF)
Petite	5000	1.1	40	46	14	97'975
Moyenne	8000	2.22	38	49	13	165'290
Grande	12000	2.9	45	45	10	357'310

Tableau 2. Tableau des coûts d'investissement et d'exploitation des installations de biogaz à la ferme selon le rapport *Typischen Kosten in Biogasanlagen*.

Les photobioréacteurs

Les systèmes envisageables pour la production de micro-algues dans des installations de biogaz agricoles comprennent les systèmes ouverts de type bassin ou ORP et les types PBR fermés. Ces derniers peuvent avoir une configuration plate (FP, de l'anglais flat panel), colonne ou tubulaire. Le tableau 3 présente les avantages et inconvénients de chaque type de technologie considérée dans l'étude. Le type de fonctionnement habituel pour la production de micro-algues est semi continu, avec une production continue sur l'année mais par batchs. Les estimations des coûts d'investissement et

des coûts d'opération des différentes configurations ont été extrapolées des données pour des réacteurs avec des dimensions similaires (38,39).

Technologie	Avantages	Inconvénients
ORP	Faible coût d'installation Faible coûts d'opération	Risque de contamination du milieu Evaporation élevée
ORP sous serre	Faible coût d'installation Faible coûts d'opération Maîtrise de la température	Diminution de la radiation disponible
FP	Maîtrise des paramètres Pénétration élevée de la lumière	Coûts importants d'installation Entretien difficile
Tubulaire	Maîtrise des paramètres Pénétration élevée de la lumière	Coûts importants d'installation Entretien difficile

Tableau 3. Technologies de production de micro-algues : avantages et inconvénients.

Radiation solaire

La production de micro-algues avec de l'éclairage naturel a été considérée dans tous les scénarios évalués dans cette étude. La radiation globale qui arrive en Suisse se situe autour de 1250 KWh/m² an (figure 5) (40–42).

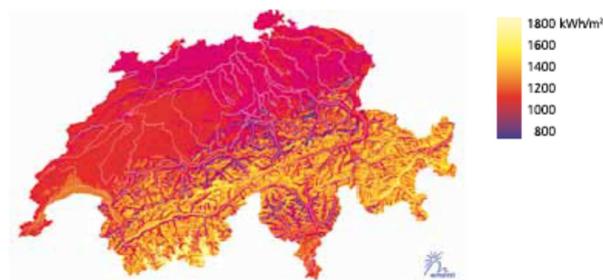


Figure 5. Rayonnement solaire en Suisse.

De toute la lumière incidente seule la gamme visible peut être absorbée par les organismes photosynthétiques. Cette limitation est liée aux systèmes enzymatiques responsables de leur métabolisme (contenus dans la chlorophylle ou dans d'autres pigments). De plus, les systèmes enzymatiques participant à l'obtention d'énergie varient d'un organisme à un autre. Selon le spectre d'absorption de la radiation pour *Arthrospira platensis* (43) l'absorption est maximale pour des longueurs d'onde de 430 et 680nm. Avec ces limites d'absorption de la radiation, l'énergie moyenne



disponible pour la croissance de spiruline en Suisse a été estimée à 350 micromoles de photons par mètre carré et seconde ($\mu\text{mol E/m}^2 \text{ s}$) (soit le rayonnement photosynthétiquement actif, PAR).

Afin de tenir compte des variations saisonnières de radiation solaire sur le territoire, l'évaluation des différents scénarios inclut les situations suivantes d'irradiance journalière (moyenne sur 24 heures) :

- Irradiance élevée : $450 \mu\text{mol E/m}^2 \text{ s}$
- Irradiance moyenne : $350 \mu\text{mol E/m}^2 \text{ s}$
- Irradiance faible : $100 \mu\text{mol E/m}^2 \text{ s}$

La pénétration de la lumière dans le milieu de croissance quand le digestat est utilisé comme source des nutriments a été évaluée selon observations de Marcilhac et al 2014 (28), qui pour différents taux de dilution du digestat agricole mesure l'irradiance arrivant dans le milieu.

Pour des systèmes sous-serre, il a été considéré comme hypothèse conservatrice que la pénétration de la lumière subit une réduction de 50%. Des taux de réduction de 30-40% sont envisageables (44).

Source de dioxyde de carbone

Le CO_2 contenu dans le gaz d'échappement issu de l'unité de cogénération peut être utilisé comme source de carbone. S'il est introduit dans le réacteur au moyen de distributeurs de gaz il peut être aussi utilisé pour brasser le milieu.

L'ajout de CO_2 dissous dans le milieu de culture peut conduire à une diminution du pH, car c'est un composant acide. Un système de contrôle du pH approprié permet de facilement rester dans les gammes de pH non inhibitrices pour la croissance des cellules.

Si on considère que le biogaz est composé de 60% de CH_4 et 40% de CO_2 , que l'unité de cogénération est alimentée avec un excès d'air de 30% par rapport au biogaz, et que l'oxygène ne réagit qu'avec le gaz méthane parce que le biogaz a été préalablement désulfuré, la teneur en CO_2 dans le gaz d'échappement peut être estimé à 12% volume. Le débit d'injection de gaz pour fluidiser le milieu a été fixé à 2.5 L/s (21,45).

L'addition de carbonates (NaHCO_3 et Na_2CO_3) dans le milieu de croissance et aussi possible ; dans ce cas l'addition périodique devient nécessaire. L'avantage de cette procédure réside dans l'addition de capacité tampon au milieu. Permettant un pH initial de 10, quand des carbonates sont ajoutés dans le milieu de croissance les concentrations initiales de ceux-ci sont les suivantes : 6.86 g $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{L}$ et



11.35 g NaHCO₃/L. Cette composition est équivalente à celle du milieu Zarrouk, milieu de croissance synthétique couramment utilisé pour la culture de la spiruline (46).

Source de nutriments

Après la minéralisation de l'azote organique contenu dans le substrat introduit en digestion, le digestat issu de la méthanisation contient principalement de l'ammonium comme source d'azote. Le pH basique du milieu de croissance de spiruline favorise la formation d'ammoniaque. Une phase précédente de nitrification biologique pourrait être envisagée afin de garantir la présence de l'azote sous forme dissoute (N-NO₃). En tout cas, une dilution importante du digestat est prévisible, donc le digestat brut ne permet pas la pénétration de la lumière.

Selon le produit final recherché, l'addition d'azote et de phosphore est possible. Cela peut limiter l'économie du procédé mais l'acceptation sociale du produit final peut être plus favorable. Une troisième alternative qui permet l'utilisation du digestat en évitant des soucis de pénétration de lumière ou l'acceptation sociale de l'utilisation du digestat est l'extraction des nutriments du digestat (procédés de précipitation, stripping, etc.).

Quand les nutriments sont ajoutés dans le milieu de croissance les concentrations initiales de ceux-ci sont les suivantes : 0.4 g N/L et 0.25 g PO₄²⁻/L (46).

3.2. Définition des paramètres d'évaluation des résultats

Les résultats de chaque scénario étudié de couplage de méthanisation à la ferme et production de spiruline s'évaluent selon des critères environnementaux, énergétiques et économiques suivants :

Chaleur additionnelle valorisée (Δq , %) : L'augmentation de la quantité de chaleur valorisée grâce à la production de spiruline

$$\Delta q = \frac{\text{Chaleur valorisée en production spiruline}}{\text{Chaleur valorisée en méthanisation}} \cdot 100$$

Réduction des émissions de CO₂ (ΔCO_2 , %)

$$\Delta CO_2 = \left(1 - \frac{\text{Emissions } CO_2 \text{ en méthanisation} - \text{Consommation } CO_2 \text{ en production spiruline}}{\text{Emissions } CO_2 \text{ en méthanisation}} \right) \cdot 100$$

Consommation d'eau (m_{H_2O} , t/a) : la consommation d'eau est équivalente à la quantité d'eau qui s'évapore et qui faut ajouter régulièrement dans le réacteurs algales.



Surface nécessaire (m²) : augmentation de la surface d'exploitation suite à l'incorporation de l'unité de production de spiruline.

Consommation d'énergie (E, kWh/an) : la consommation d'énergie relative aux équipements de pompage de l'unité de production de spiruline

Production de spiruline (X, t/an) : production de spiruline sous forme de matière sèche.

Consommation de réactifs (t/an) : lors de l'ajout de composants ou solutions qui tamponnent le pH, de nutriments, etc.

Investissement (CHF) : capital initial à mobiliser.

Frais d'exploitation (CHF/an) : coûts incluant les frais liées à l'utilisation de consommables (réactifs, énergie, eau, tamis de récolte), aux heures de travail et aux frais d'amortissement de l'installation.

Revenus d'exploitation (CHF/an) : les revenus peuvent inclure la vente de l'électricité, la vente de la chaleur, et la vente de la spiruline.

3.3. Modèle de production de la spiruline

L'unité de production de la spiruline consiste en un réacteur biologique multiphasique, où de manière simplifiée on trouve une phase gazeuse, une phase liquide et une phase solide. La phase liquide est le milieu de croissance où les nutriments dissous sont accessibles aux micro-algues. La phase gazeuse comprend le flux des composants gazeux produits lors de la photosynthèse et/ou le flux des intrants gazeux. La population de la micro-algue est la phase solide du système.

Le modèle mathématique de l'unité de production de la spiruline (développé en GNU Octave) évalue pour chaque batch les paramètres décrits par la suite.

- La variation de la concentration de spiruline dans le milieu, en Kg de matière sèche par mètre cube (Kg/m³) :

$$\frac{dX}{dt} = \mu_{max} X \left(\frac{I}{I_s + I} \right) \left(\frac{CO_2}{K_{CO_2} + CO_2} \right) \left(\frac{N}{K_N + N} \right) - r_d X$$

Où X c'est la concentration de spiruline, en kg X/m³

t c'est le temps, en s

μ_{max} c'est la vitesse maximale de croissance pour spiruline, en s⁻¹



I c'est l'irradiance moyenne qui arrive dans le milieu de croissance, en $\mu\text{mol E m}^{-2} \text{s}^{-1}$

I_s c'est l'irradiance de semi-saturation pour spiruline, en $\mu\text{mol E m}^{-2} \text{s}^{-1}$

CO_2 c'est la concentration de dioxyde de carbone dissout, en $\text{Kg CO}_2/\text{m}^3$

K_{CO_2} c'est la concentration de semi-saturation du CO_2 pour spiruline, en $\text{Kg CO}_2/\text{m}^3$

N c'est la concentration d'azote, en $\text{Kg N}/\text{m}^3$

K_N c'est la concentration de semi-saturation de l'azote pour spiruline, en $\text{Kg N}/\text{m}^3$

r_d c'est la vitesse de meurt pour spiruline, en s^{-1}

- La variation de l'irradiance moyenne dans le milieu, en micromoles de photons par mètre carré et seconde ($\mu\text{mol E m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

$$\frac{dI}{dt} = \left(\frac{-I_0}{K_a X^2 d} \right) (1 - \exp(-K_a X d)) \frac{dX}{dt} + \left(\frac{I_0}{K_a X d} \right) (K_a d \exp(-d K_a X)) \frac{dX}{dt}$$

Où I_0 c'est l'irradiance qui impact la surface de PBR, en $\mu\text{mol E m}^{-2} \text{s}^{-1}$

K_a c'est le coefficient d'extinction de l'irradiance, en m^2/kg

d c'est la distance à traverser par la lumière (profondeur ORP, épaisseur FP, diamètre tubulaire), en m

- La variation de la concentration de CO_2 dissout, en Kg de CO_2 par mètre cube (kg/m^3)

$$\frac{d\text{CO}_2}{dt} = - \left(\frac{1}{n_{\text{CO}_2}} \right) 44 \left[\mu_{\text{max}} \left(\frac{I}{I_s + I} \right) \left(\frac{\text{CO}_2}{K_{\text{CO}_2} + \text{CO}_2} \right) \left(\frac{N}{K_N + N} \right) - r_d \right] X + k_L a_{\text{CO}_2} (H_{\text{CO}_2} \text{CO}_{2,g} - \text{CO}_2)$$

Où n_{CO_2} c'est coefficient stoechiométrique pour la croissance de spiruline, en $\text{kg X}/\text{Kmol C}$

44 c'est la masse moléculaire du CO_2 , en Kg/Kmol

$k_L a_{\text{CO}_2}$ c'est le coefficient de transfert de matière pour le CO_2 , en s^{-1}

H_{CO_2} c'est la constante de Henry pour le CO_2 , adimensionnelle

$\text{CO}_{2,g}$ c'est la concentration de CO_2 dans la phase gazeuse, en Kg/m^3

- La variation de la concentration d'oxygène dissout, en Kg de O_2 par mètre cube (kg/m^3)

$$\frac{d\text{O}_2}{dt} = n_{\text{O}_2} \left[\mu_{\text{max}} \left(\frac{I}{I_s + I} \right) \left(\frac{\text{CO}_2}{K_{\text{CO}_2} + \text{CO}_2} \right) \left(\frac{N}{K_N + N} \right) - r_d \right] X + k_L a_{\text{O}_2} (H_{\text{O}_2} \text{O}_{2,g} - \text{O}_2)$$



Où n_{O_2} c'est coefficient stoechiométrique pour la croissance de spiruline, en Kg O_2 / Kg X

k_{L,O_2} c'est le coefficient de transfert de matière pour le O_2 , en s^{-1}

H_{O_2} c'est la constante de Henry pour le O_2 , adimensionnelle

$O_{2,g}$ c'est la concentration de O_2 dans la phase gazeuse, en Kg/m^3

- La variation de la concentration d'azote, en Kg de N par mètre cube (kg/m^3)

$$\frac{dN}{dt} = -n_N \left[\mu_{max} \left(\frac{I}{I_s + I} \right) \left(\frac{CO_2}{K_{CO_2} + CO_2} \right) \left(\frac{N}{K_N + N} \right) - r_d \right] X$$

Où n_N c'est coefficient stoechiométrique pour la croissance de spiruline, en Kg N / Kg X

- La variation de la concentration de phosphore, en Kg de P par mètre cube (kg/m^3)

$$\frac{dP}{dt} = -n_P \left[\mu_{max} \left(\frac{I}{I_s + I} \right) \left(\frac{CO_2}{K_{CO_2} + CO_2} \right) \left(\frac{N}{K_N + N} \right) - r_d \right] X$$

Où n_P c'est coefficient stoechiométrique pour la croissance de spiruline, en Kg P / Kg X

- La variation du pH (47) :

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\left(\frac{k_1}{H} + \frac{2k_1k_2}{H^2} \right) dCO_2}{1 + \frac{k_w}{H^2} + \frac{k_1CO_2}{H^2} + \frac{8k_1k_2CO_2}{H^3}} dt$$

Où H c'est la concentration de protons

k_1 c'est la constante de dissociation pour H_2CO_3

k_2 c'est la constante de dissociation pour HCO_3

k_w c'est la constante de dissociation de l'eau

- La variation de la concentration de CO_2 dans la phase gazeuse, en Kg de CO_2 par mètre cube (kg/m^3)



$$\frac{dCO_{2,g}}{dt} = \frac{F_g}{V} (CO_{2,g,0} - CO_{2,g}) - k_L a_{CO_2} (H_{CO_2} CO_{2,g} - CO_2)$$

Où F_g c'est le débit du gaz intrant

V c'est le volume du réacteur

$CO_{2,g,0}$ c'est la concentration d'entrée de CO_2 dans la phase gazeuse, en Kg/m^3

- La variation de la concentration d'oxygène dans la phase gazeuse, en Kg de O_2 par mètre cube (Kg/m^3)

$$\frac{dO_{2,g}}{dt} = -k_L a_{O_2} (H_{O_2} O_{2,g} - O_2)$$

La définition de ces paramètres inclut les bilans de matière de la phase liquide et la phase gazeuse du système. Les paramètres cinétiques de croissance de spiruline (vitesse de croissance maximale, μ_{max} ; constantes de semi-saturation, K_S ; rendements biomasse/substrat) ont été compris. Des termes décrivant le transfert de matière entre la phase liquide et la phase gazeuse font aussi partie des équations développées. En imposant que la température du milieu de croissance des micro-algues reste stable, des bilans d'énergie ont été pris en compte, incluant les besoins thermiques pour le chauffage du milieu et pour couvrir les pertes de chaleur dans l'environnement.

- Besoins thermiques des ORP, calculés en $J s^{-1}$ (48):

$$q = q_{evaporation} + q_{convection} = H_{vap} 0.204 A (P_w - P_a) + 0.38 (T - T_{amb})^{0.25} A (T - T_{amb})$$

Où q c'est la chaleur, en Btu/h

H_{vap} c'est l'enthalpie de vaporisation de l'eau, en Btu/lb

A c'est la surface de transfert de chaleur

P_w c'est la pression de saturation de l'eau, en psi

P_a c'est la pression de saturation de l'eau au point de rosée, en psi

T c'est la température du milieu de croissance, en °C

T_{amb} c'est la température ambiante, en °C

Les besoins thermiques par radiation ont été considérés peu significatifs par rapport aux besoins par évaporation et convection.

- Besoins thermiques des FP, calculés en $J s^{-1}$:



$$q = U_{FP} A (T - T_{amb})$$

Où q c'est la chaleur, en J/s

U_{FP} c'est le coefficient global de transfert de chaleur, en W/m^2

Le Tableau 4 présente les différents paramètres et constantes du modèle.

Le modèle de croissance de la spiruline a été validé avec des données expérimentales disponibles dans la littérature pour des systèmes PBR tubulaire et ORP (49–52). Les données expérimentales incluent dans la plupart des cas seulement la production de spiruline.

Paramètre	Valeur	Référence
Paramètres de croissance spiruline		
Vitesse maximale, μ_{max}	$2.06 \cdot 10^{-5} s^{-1}$	(53)
Constante de semi-saturation, K_{CO_2}	$8.8 \cdot 10^{-3} kg CO_2/m^3$	(54)
Constante de semi-saturation, K_N	$1.12 \cdot 10^{-3} kg N/m^3$	(53)
Constante de semi-saturation, K_P	$0.028 g/m^3$	(53)
Constante de semi-saturation, K_{I_s}	$160 \mu mol E s^{-1} m^{-2}$	(53)
Rendement η_{CO_2}	$25 Kg X/Kmol C$	(54)
Rendement η_N	$0.066 kg N/kg X$	(54)
Rendement η_P	$6.2 g P/kg X$	(55)
Rendement η_{O_2}	$1.28 kg O_2 /kg X$	(54)
Vitesse de meurt	$6.95 \cdot 10^{-7} s^{-1}$	(56)
Paramètres transfert de matière		
$k_L a_{CO_2}$	$1.17 \cdot 10^{-4} s^{-1}$	(57)
$k_L a_{O_2}$	$0.002 s^{-1}$	(58)
H_{O_2}	$3.181 \cdot 10^{-2}$	(59)
H_{CO_2}	0.9688	(45)
Paramètres de transfert d'énergie		
Coefficient global flat panel, U_{FP}	$30 W/m^2$	(60)
H_{vap,H_2O}	$2257 KJ/Kg$	(59)

Tableau 4. Paramètres du modèle de l'unité de production de spiruline.



3.4. Modèle d'évaluation couplage méthanisation et production de spiruline

De façon schématique la procédure à suivre pour l'évaluation du couplage des procédés de méthanisation et de production de spiruline est présentée dans la figure 6.

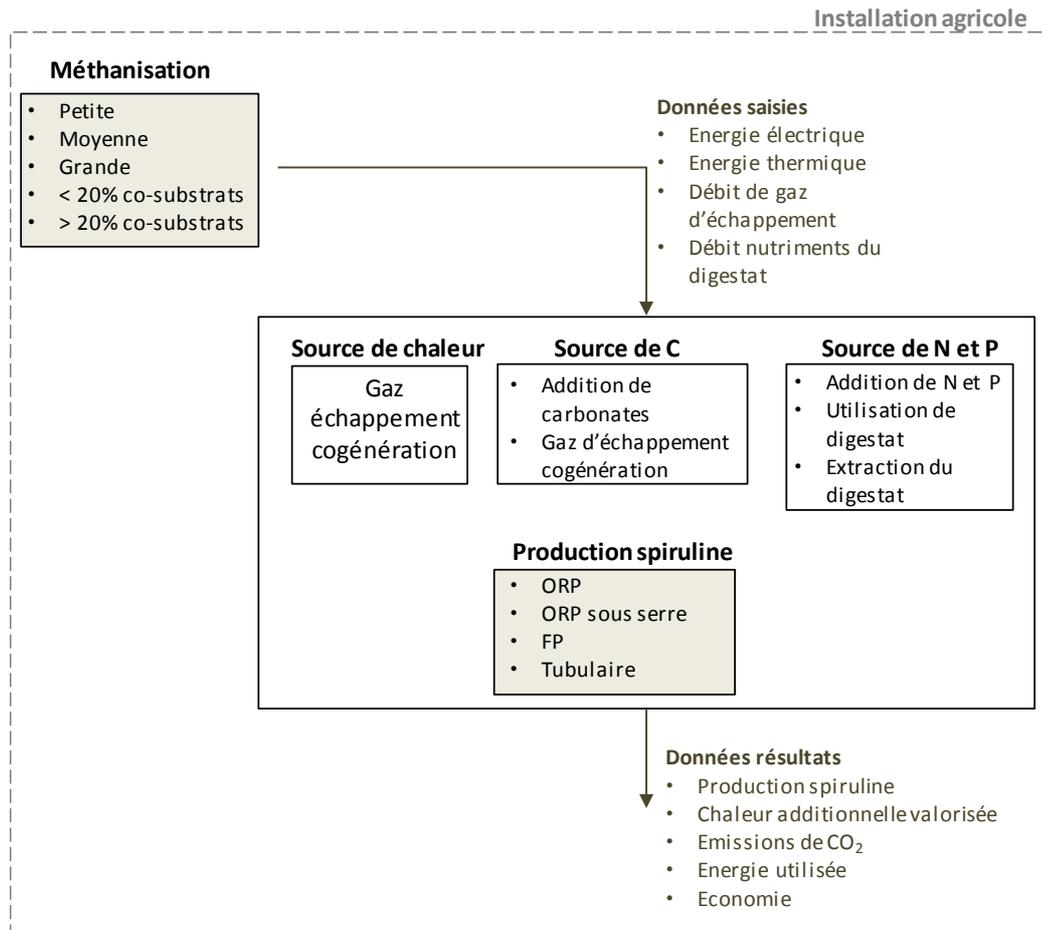


Figure 6. Procédure d'évaluation du couplage méthanisation et production de spiruline.

Les hypothèses et critères pris pour le dimensionnement de l'installation de production de spiruline incluent :

- Conditions météorologiques du nord-ouest du plateau (Spiez, BE) (moyennes de température et humidité des 4 dernières années).
- La chaleur produite par l'unité de cogénération est régulière sur l'année.



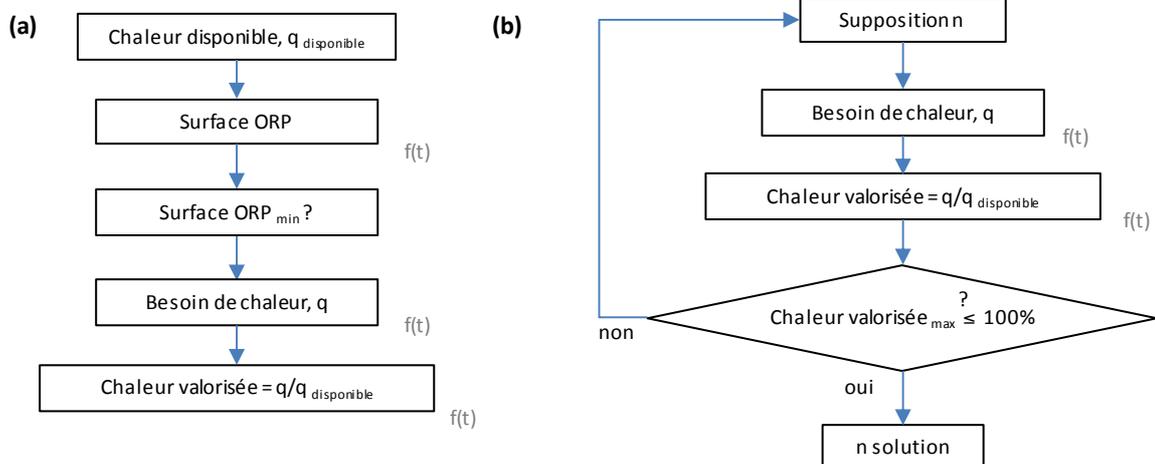
- Seule la chaleur contenue dans le gaz d'échappement est utilisée pour l'unité de production de micro-algues. L'eau chaude récupérée sur le circuit de refroidissement du moteur est donc disponible pour des autres voies de valorisation (par exemple, chauffage des bâtiments).
 - L'utilisation de la chaleur contenue dans le gaz d'échappement est le principal critère de dimensionnement des unités de production de micro-algues ; la base de dimensionnement étant la surface d'ORP et le nombre de modules de FP (Box 1). De cette façon les besoins de chaleur sont totalement couverts par la seule utilisation du gaz d'échappement.
 - L'évaporation d'eau est uniquement importante dans des ORP.
 - 10% d'eau est perdue lors de la récolte des micro-algues.
 - Les dimensions des unités de production de micro-algues sont définies comme suit : 30 cm de profondeur pour ORP ; 1 m x 1 m x 0.05 m (hauteur, largeur, épaisseur) par module de FP ; 1.5 m longueur, 0.05 m diamètre, 10 tubs par module.
 - La production en PBR tubulaires est comparable à celle en PBR FP. Le volume de dimensionnement est considéré identique.
 - Le pH initial du milieu de croissance est de 10, obtenu grâce à l'addition de carbonates ou à l'addition de soude caustique (NaOH).
 - La concentration initiale de spiruline pour chaque batch est 0.15 kg/m^3 .
 - La durée par batch est de 5 jours.
 - 12 heures par jour sont disponibles pour la photosynthèse et l'installation fonctionne 330 jours à l'année, afin de tenir compte des périodes d'arrêt pour maintenance.
 - L'installation de méthanisation est déjà existante et elle se trouve dans sa dixième année d'exploitation. L'analyse économique du projet de couplage avec une unité de production de spiruline s'évalue pendant la période des 10 ans suivants. Les frais d'amortissement pour l'installation de méthanisation prévoient l'amortissement du moteur de cogénération, de l'ensemble des équipements (unités mécaniques, électriques, etc.) et du gros-œuvre tous les 8, 10 et 20 ans respectivement.
- Le tableau 5 présente les paramètres considérés pour l'analyse technico-économique du projet de couplage de l'installation de méthanisation avec la production de spiruline.



Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Prix de vente spiruline	100 CHF/kg	Prix du phosphore (61)	1.64 CHF/kg
Prix de vente de l'électricité	(dépendant de la puissance équivalente installée du moteur et des substrats)	Prix de l'eau (42)	1.5 CHF/m ³
Consommation électricité ¹ ORP (41)	3.7 W/m ³	Prix du carbonate	1 CHF/kg
Consommation électricité ¹ FP (41)	100 W/m ³	Charge de travail ²	600 h/an
Consommation électricité ¹ PBR tubulaire (41)	2500 W/m ³	Prix personnel	42 CHF/h
Prix de l'azote (61)	1.59 CHF/kg	Impôts	20%
Taux d'actualisation	4%	Prix des assurances	0.5% sur l'investissement

Tableau 5. Paramètres considérés pour l'analyse technico-économique. ¹ Consommation électrique par unité de volume du système de production de micro-algues (pompes et compresseurs pour le brassage et le transfert appropriés des matières). ² Heures travaillées (base conservative).

Box 1. Schéma procédure de dimensionnement des unités de production de spiruline.



(a) La chaleur disponible dans le gaz d'échappement doit permettre de couvrir les besoins de chaleur du système. Ces besoins sont différents sur l'année et en ORP cela entraîne à un dimensionnement de la surface de réacteur qui est aussi variable ($A=f(t)$). Afin de garantir que seule la chaleur du gaz d'échappement soit utilisée en tant que source thermique, le réacteur doit être dimensionné pour la surface minimale. La surface étant déterminée, les besoins de chaleur peuvent être estimés, ainsi que la chaleur valorisée.

(b) La procédure de dimensionnement des PBR FP entraîne un calcul itératif, où le nombre de modules à mettre en place est tout d'abord supposé ; les besoins de chaleur et la chaleur correspondante valorisée sur l'année sont ensuite calculés. Afin que seule la chaleur du gaz d'échappement soit utilisée en tant que source de chaleur, l'énergie thermique valorisée peut atteindre une valeur maximale de 100%.



4. Résultats et discussion

4.1. Production de spiruline à la ferme

4.1.1. Source de carbone

La production de spiruline à la ferme dans des systèmes de production couplés à l'installation de biogaz a été évaluée pour différentes sources de carbone, soit le dioxyde de carbone contenu dans le gaz d'échappement et des carbonates.

L'utilisation du gaz d'échappement en tant que source de carbone pour la croissance de la spiruline permet une production de la micro-algue par volume de réacteur et par jour plus élevée dans des systèmes FP/tubulaires, d'environ 2.5 fois supérieure à la production dans des systèmes ORP. Elle est indépendante de la taille de l'installation de biogaz considérée. Dans la figure 7 la production de spiruline normalisée au volume de réacteur et la production annuelle de spiruline sont présentées. La production annuelle de spiruline est supérieure pour des systèmes ORP, conséquence de la surface de dimensionnement envisageable plus importante. Le tableau 6 présente les caractéristiques des réacteurs dimensionnés.

Entre 11 et 24 % du volume du batch doit être utilisé pour inoculer le batch suivant, afin de garantir la concentration initiale de micro-algues désirée.

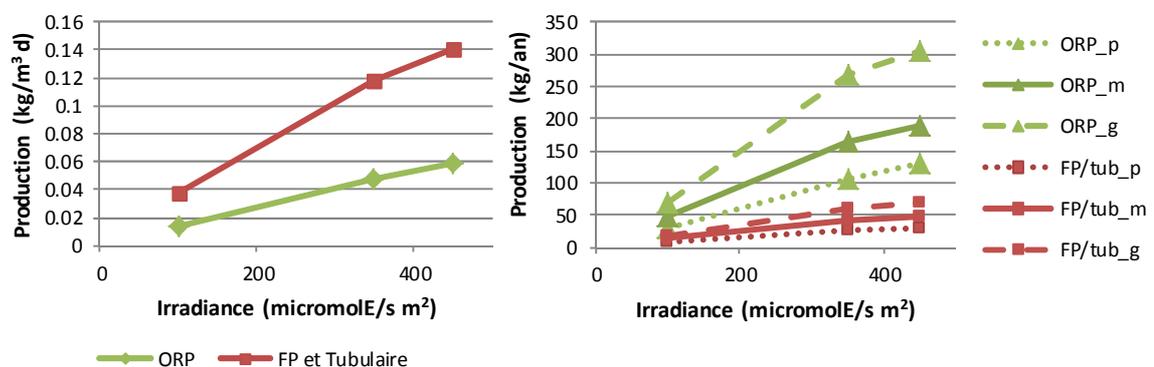


Figure 7. (a) Production de spiruline dans des systèmes ORP et FP/tubulaires. **(b)** Production annuelle de spiruline pour systèmes ORP et FP/tubulaires couplés à des installations de méthanisation de différente taille et sous différentes conditions de radiation solaire.



Taille méthanisation	Réacteur	Volume (m ³)	Surface (m ²)
Petite	ORP	6.77	45.13
	FP	0.65	26
	Tubulaire	0.65	52
Moyenne	ORP	10.58	70.5
	FP	1.05	42
	Tubulaire	1.05	84
Grande	ORP	15.51	103.45
	FP	1.5	60
	Tubulaire	1.5	120

Tableau 6. Volume et surface des réacteurs dimensionnés.

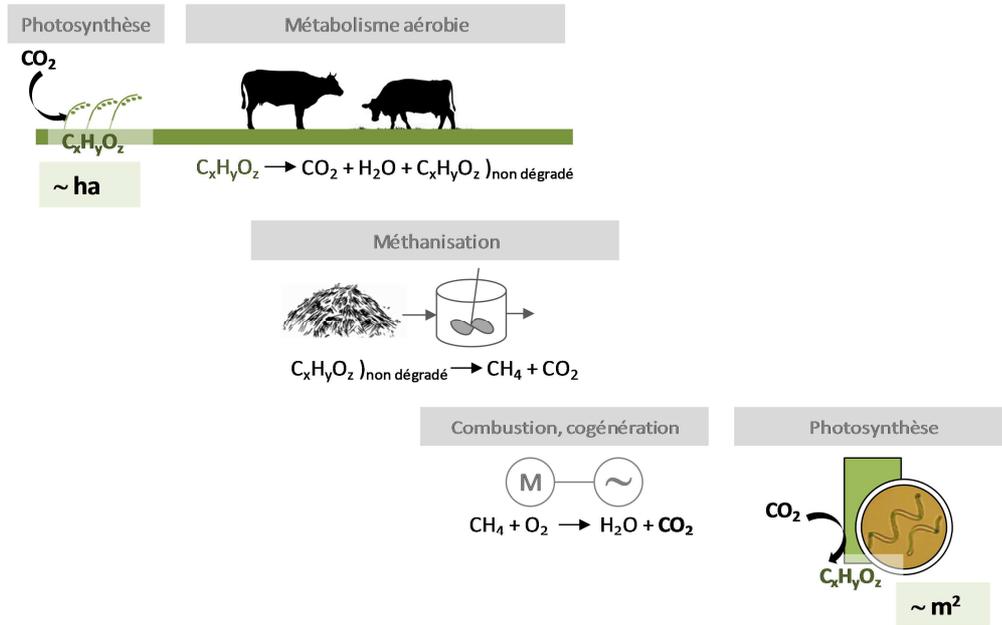
L'incrément de radiation solaire, évalué entre 100 et 450 $\mu\text{mol E/m}^2 \text{ s}$, entraîne une augmentation des productions, ce qui pouvait être attendu mais qui démontre l'influence significative de ce paramètre. Egalement, la taille de l'installation de biogaz entraîne des capacités de production plus élevées, donc la quantité de gaz d'échappement utilisable et de chaleur disponible sont plus élevées et les systèmes de production de spiruline dimensionnés ont de tailles plus importantes.

Néanmoins, pour les conditions environnementales évaluées les productions observées sont plutôt faibles, comparables à des unités couramment qualifiées de bas rendement, où le maximum observé permet une production de $0.14 \text{ Kg m}^{-3} \text{ j}^{-1}$, loin des $3 \text{ Kg m}^{-3} \text{ j}^{-1}$ théoriquement atteignables avec des systèmes tels que les PBR FP.

La consommation totale annuelle du dioxyde de carbone contenu dans le gaz d'échappement est présentée à la figure 8 pour les différents scénarios considérés. Des valeurs de consommation maximales (couplage à une installation de méthanisation grande et irradiance élevée) se situent à 540 et 120 $\text{kg CO}_2/\text{an}$ respectivement pour ORP et FP/tubulaires. Malheureusement ce taux de consommation représente une partie insignifiante de la quantité produite par la combustion du biogaz dans l'unité de cogénération ($\sim 0.5\%$). En conséquence, selon les conditions évaluées, la réduction des émissions de CO_2 grâce à la production de micro-algues est négligeable. La faible réduction des émissions de CO_2 est attendue, la surface des cultures en rapport avec les gisements digérés et la surface de production de la micro-algue ayant des ordres de grandeurs très différents (Box 2).



Box 2 : Schéma de comparaison des surfaces de culture de fourrage et de production de micro-algues.



Le CO_2 consommé lors de la photosynthèse dans les unités de production de spiruline est produit par la combustion du méthane, qui dans une installation agricole provient essentiellement de la méthanisation des effluents d'élevage (matière organique non-dégradée, $C_xH_yO_z$ non dégradée, lors du métabolisme aérobie). La quantité de matière organique $C_xH_yO_z$, c'est-à-dire de fourrage, consommé par l'exploitation d'élevage est produite sur des surfaces avec plusieurs ordres de grandeur de plus que la surface de culture de spiruline. Ces surfaces étant largement différentes, la production de CO_2 lors de la méthanisation et la combustion du biogaz est beaucoup plus importante que la consommation de CO_2 pour la croissance de la micro-algue.

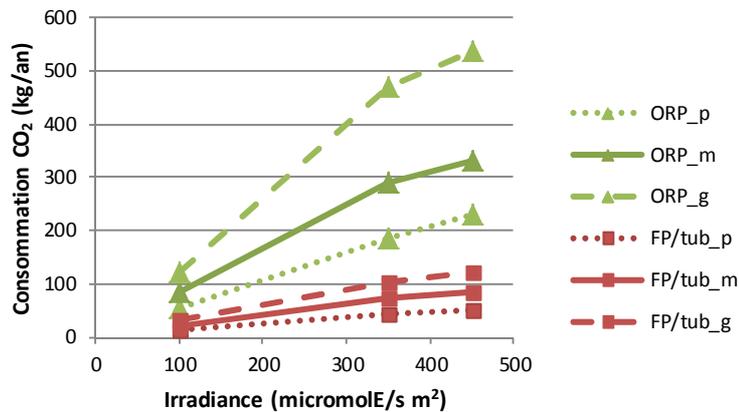


Figure 8. Consommation annuelle de dioxyde de carbone provenant du gaz d'échappement par des systèmes de production de spiruline couplés à des installations de méthanisation de différentes tailles (p : petite, m : moyenne, g : grande) et sous différentes conditions de radiation solaire.

L'utilisation du carbonate comme source de carbone permet d'avoir une production normalisée au volume du réacteur plus élevée indépendamment du système de production (ORP ou FP/tubulaire), en passant de 0.047 à 0.07 Kg m⁻³ j⁻¹ pour ORP et de 0.118 à 0.164 Kg m⁻³ j⁻¹ pour FP/tubulaire. En conséquence la production annuelle est plus importante (figure 9). Les productions obtenues en utilisant le gaz d'échappement restent dans le même ordre de grandeur, néanmoins elles sont environ 50% plus faibles.

Le fait que les carbonates restent en phase aqueuse permet une meilleure accessibilité au carbone par part des micro-algues. De l'autre côté, la concentration initiale de carbone dissout au milieu de croissance, qui est plus élevée quand les carbonates sont ajoutés au milieu (8.8 g/L vs 0.09 g/L respectivement pour l'utilisation de carbonates ou du gaz d'échappement), s'avère la cause la plus plausible pour une telle différence de production. A titre d'exemple, pour un système FP couplé à une installation de biogaz de petite taille et avec des conditions d'irradiance moyenne, si des carbonates sont ajoutés au milieu de croissance avec une concentration initiale de 0.09 g/L la production diminue à 0.048 Kg m⁻³ j⁻¹, et la croissance de la spiruline est limitée à partir de 0.5 jours de production.

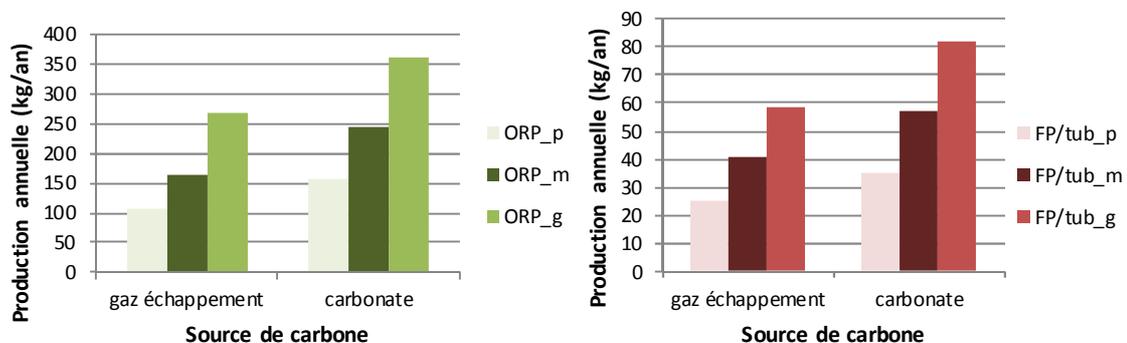


Figure 9. Comparaison de l'utilisation du gaz d'échappement ou du carbonate comme source de carbone dans des systèmes (a) ORP et (b) FP/tubulaires, couplées à des installations de biogaz de différentes tailles (p : petite, m : moyenne, g : grande). Conditions d'irradiance moyenne.

Selon les simulations du modèle, pour les conditions de travail évaluées la variation du pH n'est pas significative ; elle reste stable autour de 10±0.1 si le gaz d'échappement est utilisé en tant que source de carbone ou si les carbonates sont ajoutés au milieu en excès (pas en concentrations limitantes).



4.1.2. Source d'azote

Les besoins d'azote et de phosphore ont été évalués par le modèle de production de spiruline (figure 10). Etant donné la faible productivité de la micro-algue, la consommation de nutriments est aussi faible : une quantité maximale de 16 Kg d'azote et 1.5 kg de phosphore sont prévues annuellement pour un système ORP couplé à une installation de taille grande et avec une irradiance moyenne, quand le gaz d'échappement est utilisé comme source de carbone.

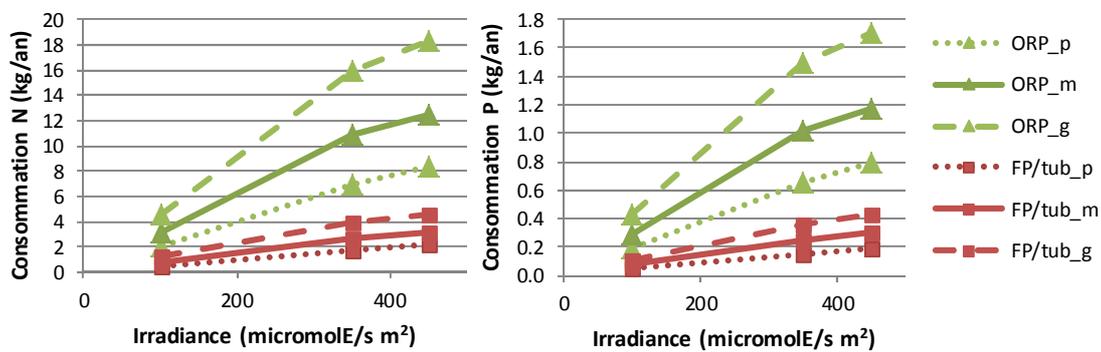


Figure 10. Consommation annuelle d'azote et de phosphore par des systèmes de production de spiruline couplés à des installations de méthanisation de différente taille (p : petite, m : moyenne, g : grande) et sous différentes conditions de d'irradiance.

Même si les besoins de nutriments ne sont pas importants et en conséquence les coûts liées à l'addition de ceux-ci ne s'avèrent pas sensibles, la possibilité d'utiliser le digestat liquide (issu d'une unité de séparation du digestat, par exemple, une presse à vis) comme source des nutriments a été testée. La principale limitation de cette procédure étant l'impossibilité de pénétration de la lumière, ce qui rend la dilution du digestat nécessaire.

Une dilution forte est requise pour garantir la pénétration de lumière. Trois taux de dilution du digestat ont été modélisés : 25 fois, 50 fois et 100 fois dilué. La figure 11 présente la production annuelle de spiruline attendue si le digestat, sous les dilutions mentionnées, est utilisé comme source de nutriments. La production normalisée au volume de réacteur diminue entre 87 à 49% et de 72 à 31%, pour ORP et FP/tubulaire respectivement, par rapport à la production volumique quand les nutriments sont ajoutés au milieu de croissance (figure 12). La production diminue pour des taux de dilution faibles ; on peut attendre une production négligeable pour des dilutions inférieures à 25, où la pénétration de la lumière atteint des valeurs inférieures à 10%.

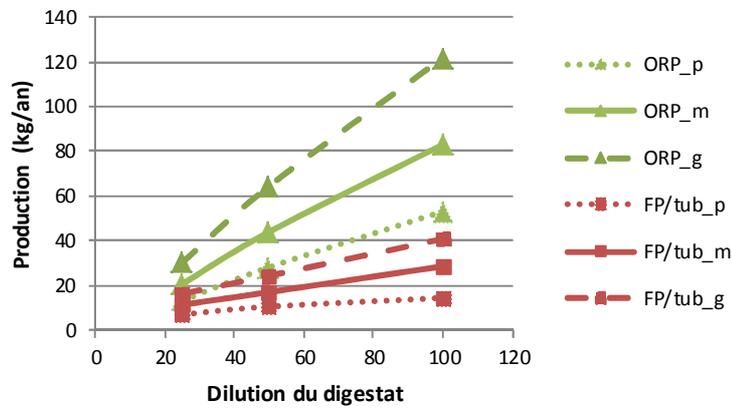


Figure 11. Production annuelle de spiruline pour systèmes ORP et FP/tubulaires, couplés à des installations de méthanisation de différentes tailles et sous conditions de radiation solaire moyenne, qui utilisent le digestat en tant que source de nutriments avec des dilutions différentes.

Résultat d'une dilution importante, la concentration de nutriments diminue fortement. Les simulations effectuées indiquent que cela entraîne une diminution du temps per batch afin de ne pas atteindre des concentrations limitantes des nutriments, en passant de 5 à 0.5-2 jours par batch. Des récoltes plus fréquentes vont augmenter la quantité d'eau requise, étant donné que plus de pertes sont envisageables. Egalement la consommation électrique liée à la récolte sera plus importante.

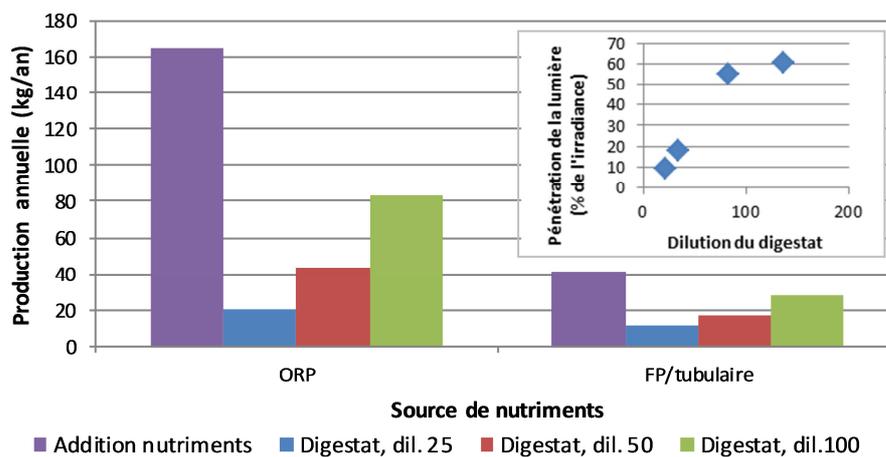


Figure 12. (a) Comparaison des productions annuelles dans des ORP et des FP/tubulaires (couplés à installation de méthanisation moyenne, irradiance moyenne) avec l'addition de nutriments ou avec l'utilisation de digestat **(b)** Réduction de la lumière arrivant au milieu de croissance selon la dilution du digestat.

Avec le même raisonnement que pour l'utilisation du digestat en tant que source de nutriments, l'obtention de l'azote pour la croissance des micro-algues par procédés de stripage ne s'avère pas intéressante, donc les besoins de nutriments sont trop faibles. Avec les quantités requises d'azote un



très faible pourcentage du digestat produit devrait être envoyé à l'unité de strippage (0.035% du digestat disponible pour une installation de taille moyenne avec des ORP, irradiance moyenne). Ce scénario a des conséquences notamment sur l'économie du concept général du procédé et sera donc discuté après.

4.1.3. Valorisation de la chaleur

Le principal critère de dimensionnement des différents scénarios a été de profiter au maximum de la chaleur contenue dans le gaz d'échappement. La chaleur qui peut être valorisée selon le dimensionnement des réacteurs est présentée à titre d'exemple à la figure 13. De façon générale, pendant les mois d'été les besoins de chaleur sont plus faibles et donc le pourcentage de la chaleur valorisée est inférieur.

Le pourcentage total de la chaleur contenue dans le gaz d'échappement qui est valorisé atteint 86% quand des systèmes ORP sont utilisés et 71% quand des FP sont mis en place ; ces valeurs étant indépendantes de la taille de l'installation (figure 14).

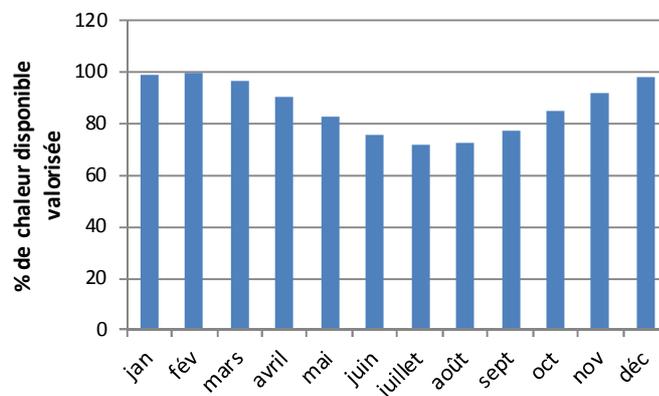


Figure 13. Chaleur qui peut être valorisée mensuellement dans ORP couplé à une installation de taille moyenne. L'essentiel des besoins de chaleur d'une configuration ORP correspondent aux pertes de chaleur que le système subit à cause des pertes par évaporation et par convection. Concernant les systèmes FP ou tubulaires, le transfert de chaleur avec l'environnement est la source principale de pertes de chaleur. Les pertes de chaleur étant plus importantes pour les PBR FP que pour les ORP, le volume de dimensionnement devient plus limité pour les PBR FP.

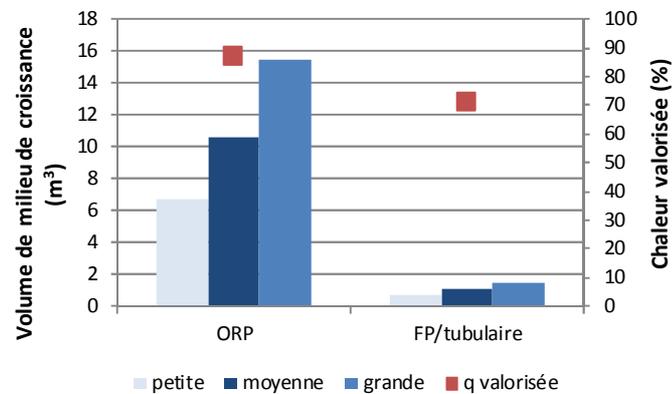


Figure 14. Volume du milieu de croissance des microalgues et la chaleur totale valorisée.

L'augmentation de la chaleur valorisée grâce au couplage des procédés de méthanisation et de production de spiruline est évaluée à 35% pour des systèmes de production de spiruline ORP et de 29% pour des réacteurs FP/tubulaires (figure 15). Le pourcentage de valorisation de la chaleur pour le chauffage des digesteurs étant de 34%, la valorisation totale envisageable atteint de 69% et 63% pour ORP et pour FP/tubulaires respectivement. Le pourcentage restant à valoriser inclut la partie de la chaleur des gaz qui n'a pas été valorisée et la chaleur disponible dans l'eau du système de refroidissement de l'unité de cogénération, qui est facilement valorisable, notamment pour des utilisations de chauffage dans les habitations du site et/ou de chauffage à distance des bâtiments voisins.

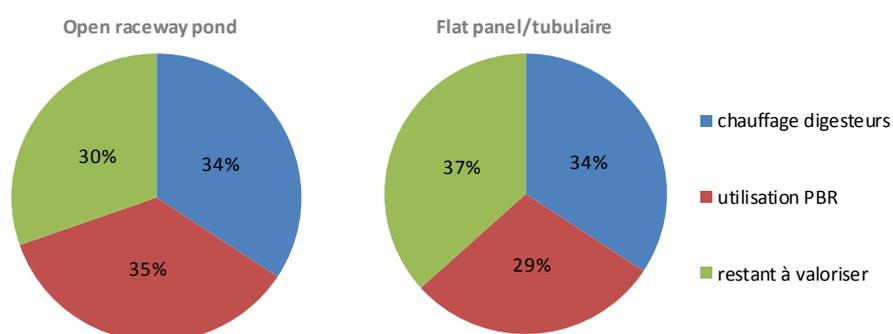


Figure 15. Distribution de la valorisation de la chaleur totale disponible d'une unité de méthanisation agricole couplée à la production de spiruline en PBR ORP ou FP/tubulaire.

4.1.4. Production de spiruline sous serre

La production de spiruline sous serre a été évaluée comme une stratégie pour limiter les pertes d'eau et pour diminuer le risque de contamination du milieu de croissance. Egalement, le risque de



débordement du réacteur pour des périodes de pluie est évité. Le principal inconvénient de cette configuration est la diminution de l'irradiance qui arrive jusqu'aux micro-algues.

Etant donné que les pertes de chaleur sont inférieures dans cette configuration, des surfaces d'ORP 20% plus grandes peuvent être envisagées et la valorisation de la chaleur augmente de 86% à 90%.

Cependant la réduction de la lumière disponible pour la croissance des micro-algues entraîne une production de spiruline 40% inférieure à celle des installations ORP placés en plein air (figure 16).

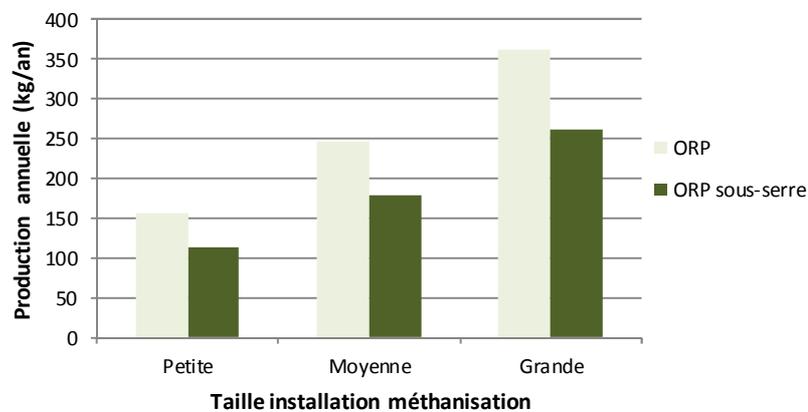


Figure 16. Production annuelle de spiruline pour ORP placés en plein air ou sous serre et couplées à des installations de méthanisation de différentes tailles. Conditions d'irradiance moyenne.

4.1.5. Surface de culture

Les besoins minimaux de surface de culture de micro-algues ont été estimés pour les différents systèmes envisagés. Pour un ORP la surface représente la surface du bassin dimensionné. Pour les FP et les PBR tubulaires la surface nécessaire pour la production de spiruline est estimée en considérant que les modules se situent de manière décalée et à une distance de séparation entre un module et le suivant de 1 m (figure 17), afin que l'ombrage entre modules soit minimisé.

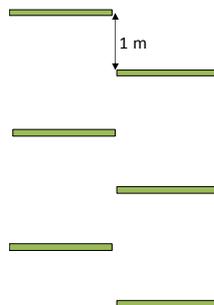


Figure 17. Plan au sol de l'organisation spatiale prévue pour les modules FP/tubulaires (exemple pour six modules).



Pour les conditions de production de spiruline considérées les surfaces minimales nécessaires pour l'implantation des réacteurs est au plus de 150 m² (figure 18), ce qui rend l'intégration d'une telle surface facilement envisageable sur l'installation existante.

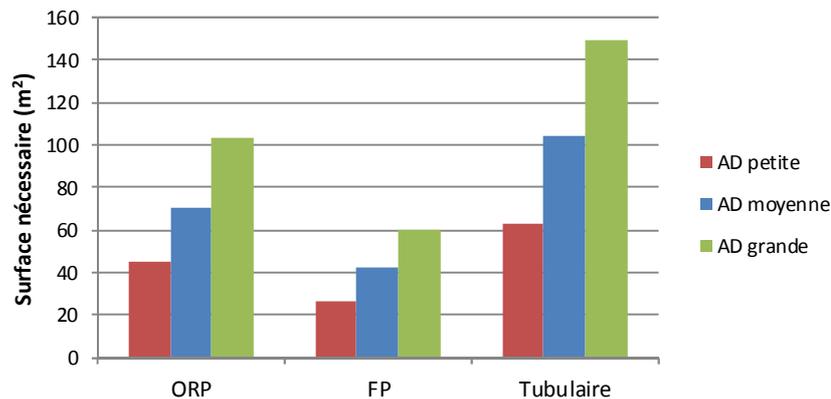


Figure 18. Surface minimale nécessaire pour l'implantation des systèmes de culture de micro-algues.

4.2. Analyse économique

Une analyse économique a été faite pour chacun des différents scénarios évalués précédemment.

L'investissement estimé pour les différentes technologies de production de spiruline couplées à des installations de méthanisation de taille différente est présenté dans la figure 19. Les installations avec des ORP requièrent un investissement plus élevée, conséquence d'un dimensionnement plus important. Par rapport aux systèmes FP et tubulaires, pour des volumes de réacteur équivalents des montants plus élevés sont attendus pour les PBR-tubulaires. Les investissements pour les différents systèmes ont été estimés selon les prix de différentes échelles de dimensionnement, étant donné qu'ils sont fortement non linéaires. Le tableau 7 présente les coûts d'investissement par type et surface de PBR.



Taille méthanisation	Réacteur	CHF/ m ²
Petite	ORP	743
	FP	1550
	Tubulaire	580
Moyenne	ORP	669
	FP	1550
	Tubulaire	557
Grande	ORP	651
	FP	1550
	Tubulaire	530

Tableau 7. Coûts d'investissement par type et surface de l'unité de production de spiruline (38,39).

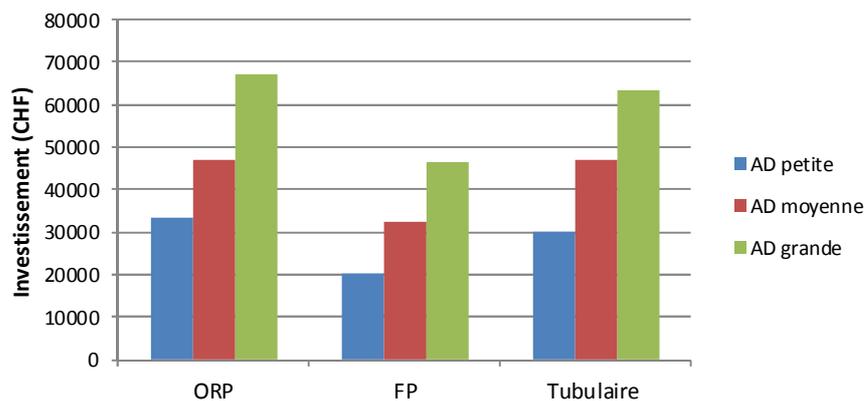


Figure 19. Investissement pour les différents scénarios considérés.

Par apport aux revenus de l'installation de méthanisation et production de spiruline, trois produits principaux peuvent être mis sur le marché : l'électricité, la chaleur (celle restant à valoriser) et la spiruline. La chaleur restant à valoriser n'a pas été incluse dans les revenus, donc il a été considéré qu'elle est utilisée sur site pour chauffer les installations de la ferme ou pour d'autres utilisations.

Les revenus de l'exploitation d'une installation de production de spiruline couplée à une installation de méthanisation moyenne sont présentés dans la figure 20. Des revenus annuels allant jusqu'à 16'500 CHF pourraient être attendus au prix du marché de la spiruline en ORP. Les revenus concernant la vente de l'électricité incluent la quantité nette d'électricité à injecter au réseau électrique. Moins d'électricité peut être vendue pour des systèmes de production en PBR tubulaires, résultat d'une consommation électrique plus importante dans ce type de système.

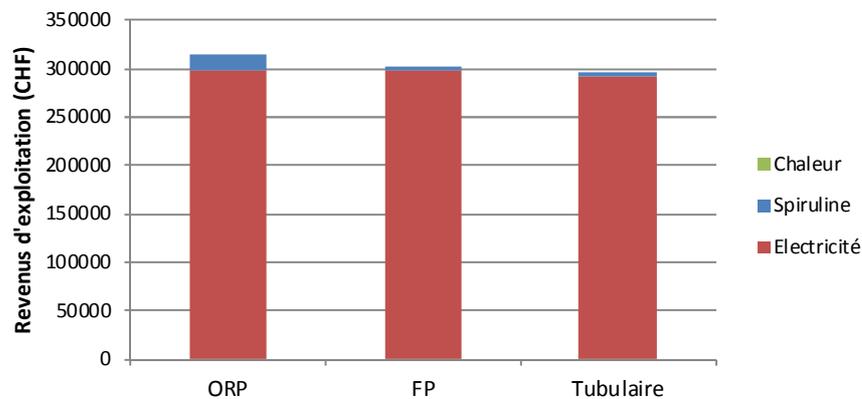


Figure 20. Revenus de l'exploitation d'une unité de production de spiruline couplée à une installation de méthanisation de taille moyenne (conditions d'irradiance moyenne).

Les coûts d'exploitation ont été présentés à la figure 21 pour une unité de production de spiruline couplée à une installation de méthanisation moyenne. L'essentiel des coûts d'exploitation est constituée par les coûts de personnel dans les trois configurations de production de spiruline. Les coûts associés à la consommation d'eau sont remarquables pour les installations ORP, et la consommation d'électricité n'est importante que pour les installations de PBR tubulaires. Les coûts des nutriments ne sont pas significatifs.

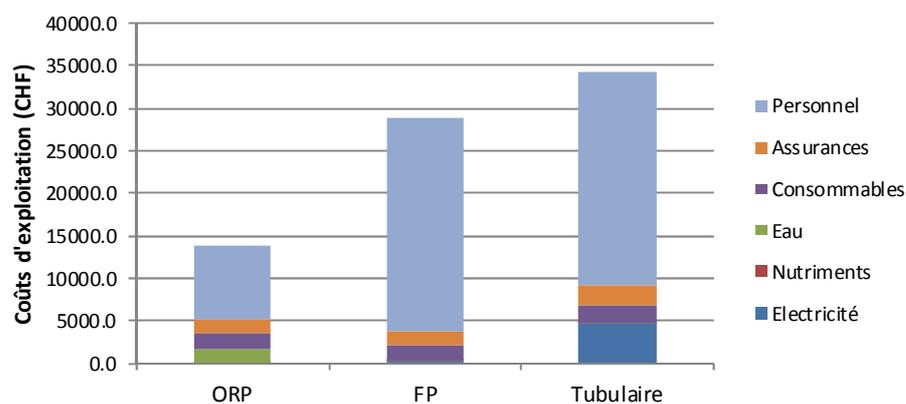


Figure 21. Coûts d'exploitation d'une unité de production de spiruline couplée à une installation de méthanisation de taille moyenne (conditions d'irradiance moyenne).

L'évaluation économique des différents scénarios considérés est présentée par la suite. La valeur actuelle nette (VAN) du projet a été calculée afin d'analyser sa faisabilité économique. Le calcul de la VAN inclut les paiements de capital, les revenus et les coûts d'exploitation pour toute la durée du projet, évaluée à 10 ans. Pendant les 10 ans que le projet de production de spiruline est prévu,



l'exploitation de méthanisation doit subir des activités de renouvellement, notamment pour les équipements électromécaniques de l'installation (pompes, brasseurs, sondes, détecteurs, etc.) et pour l'unité de cogénération. A partir du résultat brut de l'exploitation les impôts (20%) sont déduits, étant le résultat net le flux de trésorerie annuel.

La figure 22 présente l'évaluation pour les différentes technologies de production de micro-algues dans le cas où le gaz d'échappement est utilisé comme source de carbone et les nutriments sont ajoutés au milieu de croissance. La VAN des scénarios présentés est toujours négative, ce qui veut dire que, évaluée au jour d'aujourd'hui, le projet entraîne des pertes économiques et il n'est donc pas rentable. De plus, on observe que ces pertes sont plus importantes pour des installations plus grandes.

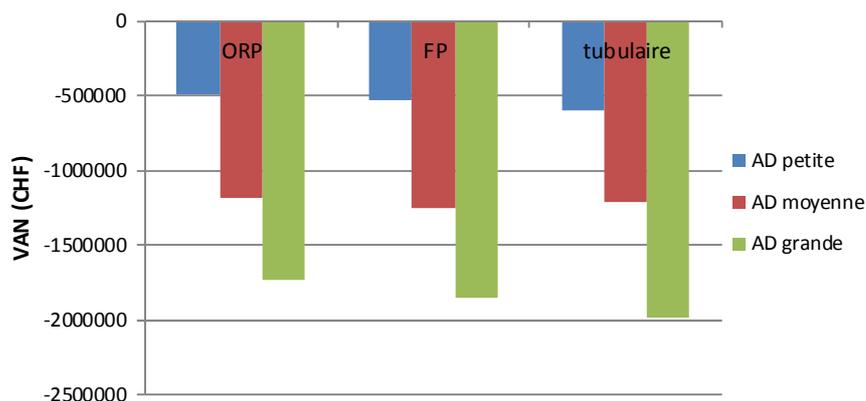


Figure 22. Valeur actuelle nette des projets de couplage des installations de méthanisation de taille différente avec la production de spiruline en utilisant le gaz d'échappement en tant que source de carbone et sous conditions d'irradiance moyenne.

La production de spiruline en utilisant l'addition de carbonates au milieu de croissance permet une augmentation de la production annuelle de la micro-algue, mais les coûts d'exploitation sont aussi plus élevés. L'évaluation de la faisabilité du projet quand les carbonates sont utilisés en tant que source de carbone montre que les pertes sont réduites (VAN moins négative). Les gains liés à l'augmentation de la production surpassent les coûts d'approvisionnement de la source de carbone.

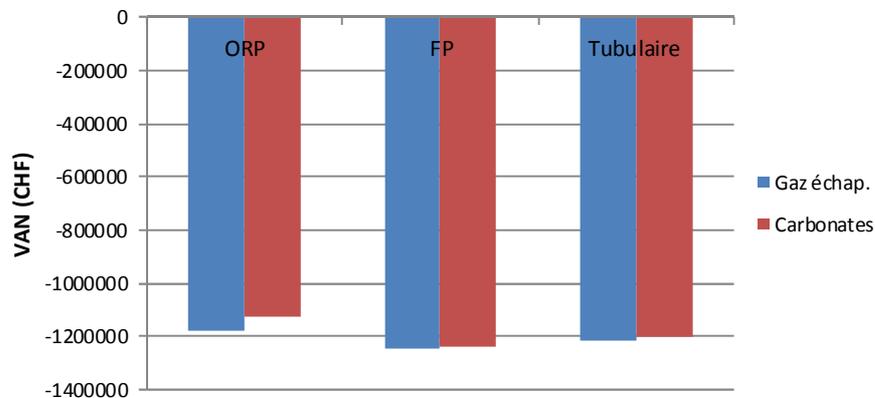


Figure 23. Comparaison de la valeur actuelle nette pour le couplage d'une installation de méthanisation et une unité de production de spiruline utilisant comme source de carbone le gaz d'échappement du moteur de cogénération ou des carbonates.

L'évaluation économique de l'installation de production de spiruline a été faite séparément afin d'évaluer indépendamment sa faisabilité (figure 24). Dans ces cas la vente d'électricité n'est pas incluse et ce poste est ajouté aux coûts d'exploitation. Les amortissements des équipements électromécaniques de l'installation de méthanisation et l'unité de cogénération ne sont également pas compris. Même si le projet présente des pertes très inférieures (VAN moins négative), il continue à ne pas être économiquement rentable.

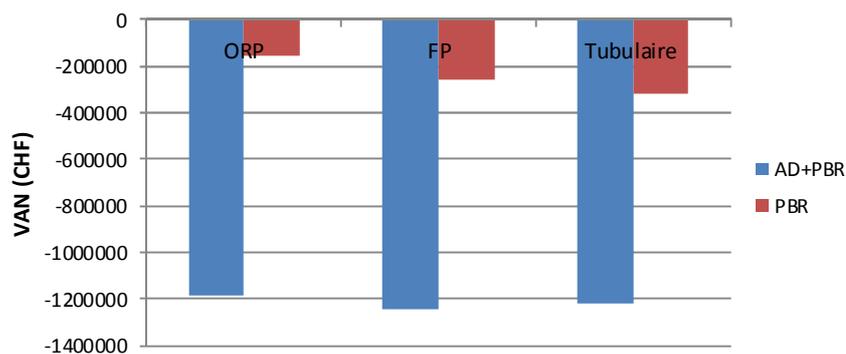


Figure 24. Comparaison de la valeur actuelle nette du projet de couplage d'une installation de méthanisation et la production de spiruline avec le projet de production de spiruline indépendant (AD taille moyenne ; source de carbone : gaz d'échappement ; irradiance moyenne).

Afin de permettre la rentabilité du projet ($VAN > 0$) les productions devraient augmenter à des valeurs supérieures à 500 kg/an pour un système ORP, et à 655 kg/an pour des systèmes FP. Pour les conditions considérées et avec le procédé en PBR tubulaire, les revenus liés à l'augmentation de



production de spiruline ne permettent pas de compenser les coûts d'investissement et d'exploitation et en conséquence la faisabilité n'est pas atteignable. Une diminution des coûts de personnel d'environ 70% permettrait la rentabilité de l'unité de production de spiruline avec les conditions considérées.

Les autres solutions envisageables, telles que la vente de chaleur excédentaire ne permettraient pas de rendre le projet rentable, même si celui-ci présenterait moins de pertes (figure 25). Par rapport à l'utilisation de la spiruline en tant que complément alimentaire pour le bétail, les économies envisageables pour l'exploitation d'élevage de la ferme ou la vente de la spiruline comme concentré protéique pour le bétail n'arrivent pas à rendre le projet rentable.

L'utilisation du digestat en tant que source de nutriments a des conséquences sur l'économie du concept générale du procédé, car de l'énergie électrique et thermique doivent être fournies ($\sim 0.45 \text{ kWh}_{\text{el}}$ et $\sim 100 \text{ kWh}_{\text{th}}$ par mètre cube de digestat traité). Bien que les besoins en nutriments soient trop faibles pour rendre cette stratégie envisageable, une solution intéressante peut être l'extraction de l'azote de la totalité du digestat et de le récupérer sous forme de sulfate d'ammonium. À un prix de 1.65 CHF/kg et avec l'énergie thermique restant à valoriser, 45% du digestat peut être traité par stripage. Avec ce nouveau revenu le projet devient largement rentable (VAN 1Mio CHF).

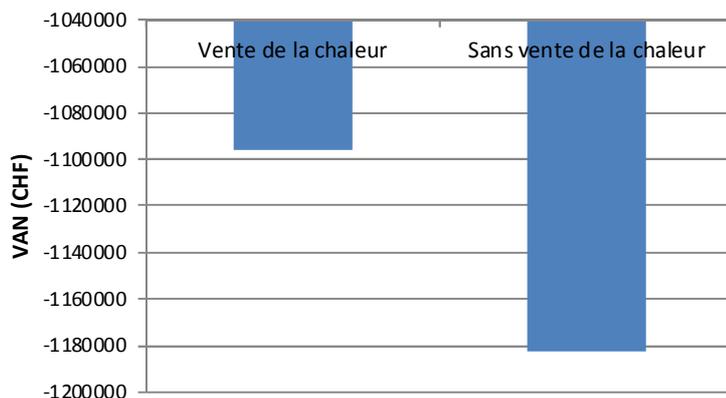


Figure 25. Valeur actuelle nette du projet si la chaleur non valorisée est vendue ou pas pour une installation de méthanisation de taille moyenne couplée à des ORP (conditions d'irradiance moyenne).

L'utilisation de co-substrats d'origine non agricole dans des installations de méthanisation agricoles est fréquente ; ceux-ci peuvent être constitués de déchets de triage de céréales, de déchets verts communaux, de déchets de l'industrie agro-alimentaire, etc. Souvent le potentiel de biométhane de ces substrats est important et la production de biogaz est boostée. En contrepartie, lors de la vente de



l'électricité produite, le prix de rétribution selon le système RPC descend fortement si la part des co-substrats est supérieure à 20% du total.

Pour une installation de méthanisation de taille moyenne, la production de biogaz subit une augmentation de 25% en alimentant le digesteur avec 25% de co-substrats (déchets de triage de céréales, gazon et petit lait) ; il en résulte une augmentation de 23% de l'électricité produite. Le fait d'avoir une part de co-substrats supérieure à 20% diminue le tarif de rétribution de l'électricité de 45.3 à 27 ct CHF/KWh_{éi}. La figure 26 montre que dans l'évaluation du projet de couplage de la méthanisation avec la production de spiruline la diminution du prix de vente de l'électricité a plus de poids que l'augmentation de la production, et donc, pour les conditions évaluées le projet est moins rentable.

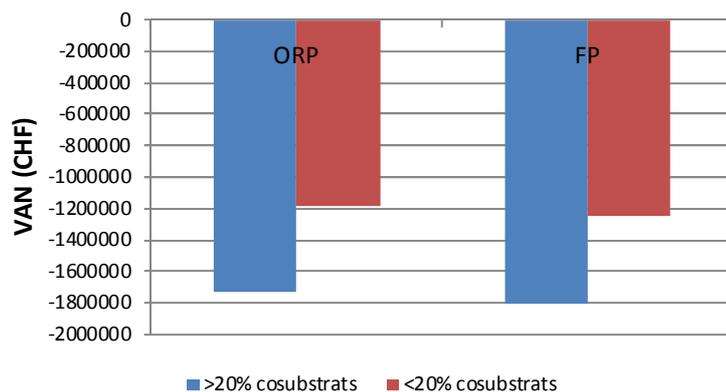


Figure 26. Valeur actuelle nette du projet de couplage d'une installation de méthanisation et la production de spiruline si la participation des co-substrats à l'alimentation du digesteur anaérobie est supérieure ou inférieure à 20%.

4.3. Analyse énergétique

Dans le but de profiter au maximum de la chaleur contenue dans le gaz d'échappement, les systèmes de production de spiruline dimensionnés permettent une valorisation de la chaleur contenue dans le gaz d'échappement de 86% quand des systèmes ORP sont utilisés et 71% quand des FP sont mis en place. L'augmentation de la chaleur valorisée grâce au couplage des procédés de méthanisation et de production de spiruline est évaluée à 35% pour des systèmes de production de spiruline ORP et de 29% pour des PBR FP/tubulaires. Le pourcentage de valorisation de la chaleur pour le chauffage des



digesteurs étant de 34%, la valorisation totale envisageable atteint de 69% et 63% pour ORP et pour FP/tubulaires respectivement. Autour de 50% de la chaleur excédentaire est donc valorisée lors du couplage de la méthanisation avec la production de spiruline. Ceci représente un gain important en termes d'efficacité énergétique du procédé de méthanisation, qui atteint presque 100% si la totalité de la chaleur contenue dans le circuit de réfrigération du moteur est aussi utilisée.

Concernant les coûts énergétiques des équipements de pompage (pompes, compresseurs), les besoins électriques sont largement compensés par la production électrique de l'unité de cogénération. Ceux-ci sont plus importants pour les systèmes PBR tubulaires.

4.4. Analyse environnementale

Les impacts environnementaux du procédé de couplage de la méthanisation agricole et la production de spiruline, en Suisse, peuvent s'analyser sous l'angle de la réduction des émissions de dioxyde de carbone, de la consommation en eau, des effluents produits ou encore de l'utilisation du sol.

Pour les conditions de culture évaluées, les systèmes dimensionnés ne permettent pas une utilisation significative du dioxyde de carbone injecté issu du moteur de cogénération (réduction ~0.5%). Seules des unités de production plus grandes, avec une production de la micro-algue plus importante, pourraient permettre une diminution des émissions significative. A titre d'exemple, dans l'étude de Brandenberger (41), le critère de dimensionnement des unités de production de micro-algues est la réduction de 25% des émissions de CO₂ contenu dans le gaz d'échappement. Pour atteindre un tel objectif une surface de production de 2250 ha d'ORP est nécessaire.

La consommation d'eau dans les unités de production de spiruline n'est importante que pour les systèmes ORP, où l'approvisionnement peut aller jusqu'à 1400 m³ par année (unité de spiruline couplée à une installation de méthanisation de grande taille). Le stockage d'eau de pluie pourrait être une stratégie pour couvrir en partie ce besoin.

Concernant les effluents de l'unité de production de spiruline, l'eau de processus est récirculée après la récolte de la spiruline. Lors de la filtration des pertes d'eau sont envisageables. La gestion de l'eau à pH basique sera nécessaire. Des effluents ponctuels tels que de l'eau de lavage du réacteur ne présentent pas de problèmes, car des techniques mécaniques de lavage des parois sont plutôt



répandues (nettoyage manuel avec de l'eau sous pression, injection de particules polymériques, flux pulsant, corps mobiles, etc.).

L'utilisation du sol n'a pas été observée comme étant une contrainte pour les systèmes dimensionnés. Dans l'étude, la surface maximale étant requise inférieure à 150 m², elle est facilement intégrable dans les infrastructures de la ferme. Un des avantages de la culture des micro-algues est la possibilité d'utiliser de surfaces qui ne seraient pas appropriées pour la culture de végétaux (par exemple, sols pauvres).

5. Conclusions

L'étude que ce document présente vise à évaluer la faisabilité technique et économique du couplage d'une installation de méthanisation agricole avec une unité de production de spiruline. Cette configuration peut être intéressante pour les possibilités de valorisation des flux de matière et d'énergie issus de l'installation de méthanisation, notamment le carbone contenu dans le gaz d'échappement et la chaleur excédentaire. Un des atouts de cette étude est l'intégration des deux procédés comme un ensemble pour l'évaluation de sa faisabilité.

Pour les conditions analysées, les conclusions suivantes peuvent être tirées pour le territoire suisse:

- La production maximale de spiruline, en Suisse, peut atteindre 0.14 g/L_{réacteur}. Les conditions d'irradiance ne permettent pas une production supérieure.
- La production annuelle envisageable en systèmes ouverts ORP est plus élevée que pour des photobioréacteurs fermés, conséquence du dimensionnement plus important.
- Indépendamment des technologies de production de spiruline, près de 50% de la chaleur excédentaire, contenue dans le gaz d'échappement, peut être valorisée.
- L'utilisation du gaz d'échappement du moteur de cogénération en tant que source de carbone est possible, mais la réduction des émissions de dioxyde de carbone est presque négligeable.
- Economiquement le projet de couplage n'est pas intéressant pour aucun des scénarios évalués, étant donné que les productions de spiruline sont trop faibles et les coûts



d'exploitation, notamment de personnel, trop élevés. L'installation de systèmes ouverts ORP permettrait de réduire ces pertes.

Au vu des résultats de cette étude, et toujours pour les conditions évaluées, le procédé de couplage de ces deux procédés sur le territoire suisse semble difficile à promouvoir. Cependant, l'outil de simulation développé permettra pour des conditions différentes à celles considérées d'évaluer la faisabilité du concept.

6. Perspectives

Des perspectives et pistes d'amélioration qui pourraient permettre d'envisager la faisabilité d'un tel projet de couplage incluent : la production d'autres espèces de micro-algues qui soient plus productives et qui croissent à des températures élevées; travailler avec des conditions d'éclairage artificiel ; optimiser les conditions de travail afin de réduire le temps de personnel requis. Quelques-unes de ces options augmentent également les coûts d'investissement et d'exploitation, mais une compensation par des revenus supérieurs pourrait avoir lieu.

L'évaluation de la faisabilité de ce procédé de couplage devrait inclure également une variation journalière et saisonnière des conditions d'irradiance sur le territoire suisse considéré ; l'irradiance journalière moyenne n'étant pas un paramètre assez précis pour avoir des résultats exacts.

Même si les systèmes ORP présentent plus d'opportunités que les PBR fermés, des contraintes pas évaluées dans l'étude peuvent limiter son application. La contamination par des espèces de bactéries, champignons ou protozoaires, ou le débordement du milieu de croissance lors de périodes de pluie sont de sujets à prendre en compte.

Concernant l'utilisation du gaz d'échappement du moteur et du digestat en tant que sources de carbone et de nutriments pour la croissance de spiruline, il reste la question à confirmer qu'une utilisation alimentaire serait autorisée par les instances fédérales compétentes.



7. Références

1. OFEN. Statistique suisse des énergies renouvelables. 2014.
2. OFEN. Statistique suisse des énergies renouvelables. 2012.
3. OFEN. Statistique suisse des énergies renouvelables. 2013.
4. AlgaeBioGas. www.algaebiogas.eu.
5. HyES Conseil. hyes.eu/realisations.
6. AlgEN. www.algen.si/node/109.
7. Hannon M, Gimpel J, Tran M, Rasala B, Mayfield S. Biofuels from algae: challenges and potential. *Biofuels*. 2010;1(5):763–84.
8. Posten C, Walter C. *Microalgal Biotechnology: Integration and Economy*. 1st ed. Berlin: Walter de Gruyter GmbH Co.KG; 2012.
9. Bajpai R, Prokop A, Zappi M. *Algal Biorefineries, Volume 1: Cultivation of Cells and Products*. Springer Netherlands; 2014.
10. Sassano CEN, Gioielli LA, Ferreira LS, Rodrigues MS, Sato S, Converti A, et al. Evaluation of the composition of continuously-cultivated *Arthrospira (Spirulina) platensis* using ammonium chloride as nitrogen source. *Biomass and Bioenergy*. 2010 Dec;34(12):1732–8.
11. Rodrigues MS, Ferreira LS, Converti A, Sato S, Carvalho JCM. Fed-batch cultivation of *Arthrospira (Spirulina) platensis*: potassium nitrate and ammonium chloride as simultaneous nitrogen sources. *Bioresour Technol*. 2010 Jun;101(12):4491–8.
12. Boussiba S. Ammonia Uptake in the Alkalophilic Cyanobacterium *Spirulina platensis*. *Plant Cell Physiol*. 1989 Mar 1;30(2):303–8.
13. Cruz-Martinez C, Jesus KKC, Matsudo MC, Danesi EDG, Sato S, Carvalho JCM. Growth and composition of *Arthrospira (Spirulina) platensis* in a tubular photobioreactor using ammonium nitrate as the nitrogen source in a fed-batch process. *Brazilian J Chem Eng*. [scielo](http://scielo.org.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-77632015000200005); 2015;32:347–56.
14. Bezerra RP, Matsudo MC, Converti A, Sato S, de Carvalho JCM. Influence of ammonium chloride feeding time and light intensity on the cultivation of *Spirulina (Arthrospira) platensis*. *Biotechnol Bioeng*. United States; 2008 Jun;100(2):297–305.
15. Matsudo MC, Bezerra RP, Sato S, Perego P, Converti A, Carvalho JCM. Repeated fed-batch cultivation of *Arthrospira (Spirulina) platensis* using urea as nitrogen source. *Biochem Eng J*. 2009 Jan;43(1):52–7.
16. Carvalho JCM, Francisco FR, Almeida KA, Sato S, Converti A. Cultivation of *Arthrospira (Spirulina) platensis* (cyanophyceae) by fed-batch addition of ammonium chloride at exponentially increasing feeding rates. *J Phycol*. Blackwell Science Inc; 2004 Jun 1;40(3):589–97.
17. Shelef G, Sukenik A, Green M. *Microalgae harvesting and processing: A literature review*. Tech Res Dev Found Ltd. 1984;



18. Bjornsson W, Nicol R, Dickinson K, McGinn P. Anaerobic digestates are useful nutrient sources for microalgae cultivation: functional coupling of energy and biomass production. *J Appl Phycol.* 2013;25(5):1523–8.
19. Wang L, Li Y, Chen P, Min M, Chen Y, Zhu J, et al. Anaerobic digested dairy manure as a nutrient supplement for cultivation of oil-rich green microalgae *Chlorella* sp. *Bioresour Technol.* 2010 Apr;101(8):2623–8.
20. Cicci A, Bravi M. Production of the Freshwater Microalgae *Scenedesmus Dimorphus* and *Arthrospira Platensis* by Using Cattle Digestate. *Chem Eng Trans.* 2014;38:85–90.
21. Doucha J, Straka F, Lívanský K. Utilization of flue gas for cultivation of microalgae *Chlorella* sp.) in an outdoor open thin-layer photobioreactor. *J Appl Phycol.* Kluwer Academic Publishers; 2005;17(5):403–12.
22. Pawlowski A, Mendoza JL, Guzmán JL, Berenguel M, Acién FG, Dormido S. Effective utilization of flue gases in raceway reactor with event-based pH control for microalgae culture. *Bioresour Technol.* 2014 Oct;170:1–9.
23. EnAlgae. www.enalgae.eu/wageningen-ur-acres-.htm.
24. COST: European Cooperation in Science and Technology. www.cost.eu/about_cost.
25. The open thin-layer photobioreactor at Zurich University of Applied Sciences. <https://www.zhaw.ch/de/forschung/personen-publikationen-projekte/detailansicht-publikation/publikation/206909/>.
26. Marcilhac C. Etude des conditions de culture d'un écosystème complexe microalgues/bactéries: Application au développement d'un procédé d'extraction-valorisation des nutriments issus des digestats. PhD Thesis. 2014.
27. Uggetti E, Sialve B, Latrille E, Steyer JP. Anaerobic digestate as substrate for microalgae culture: The role of ammonium concentration on the microalgae productivity. *Bioresour Technol.* 2014;152:437–43.
28. Marcilhac C, Sialve B, Pourcher A-M, Ziebal C, Bernet N, Béline F. Digestate color and light intensity affect nutrient removal and competition phenomena in a microalgal-bacterial ecosystem. *Water Res.* 2014 Nov;64:278–87.
29. Lovitt R. The key challenges of making biorefineries viable. European Biomass Industry Association: The Algae Event 2013.
30. Lum KK, Kim J, Lei XG. Dual potential of microalgae as a sustainable biofuel feedstock and animal feed. *J Anim Sci Biotechnol.* 2013 Jan 21;4(1):53.
31. Algae for Feed. www.algae4feed.org.
32. Gatrell S, Lum K, Kim J, Lei XG. Nonruminant nutrition symposium: Potential of defatted microalgae from the biofuel industry as an ingredient to replace corn and soybean meal in swine and poultry diets. *J Anim Sci.* 2014;92(4):1306–14.
33. HES-SO. www.hevs.ch/en/rad-instituts/institut-life-technologies/projects/production-of-a-fodder-additive-based-on-microorganisms-with-a-high-nucleotide-content-3325.
34. Parker B, Benson D, Hasenauer C, Malin G, Schlarb-Ridley B. Regulations and Permitting concerning algal cultivation in North West Europe, Public Output report WP2A10.01 of the EnAlgae project. Swansea; 2014.
35. Minet P. Des microalgues pour produire des carburants... et du savon. *Le Temps.* 2014;12 juin.



36. Brinker M-M. Report on the state of algae related research and industrial activities in Switzerland and Luxembourg. EnALgae project report WP2A9.06. 2014.
37. Henzen C, Bolli S, Engeli H, Membrez Y. Typische Kosten von Biogasanlagen in der Schweiz: Schlussbericht. BIOMASSE SCHWEIZ. 2012;non publié.
38. Spruijt J, Schipperus R, Koostra M, Visser CLM de, Parker B. AlgaEconomics: bioeconomic production models of micro-algae and downstream processing to produce bioenergy carriers, Public Output report of the EnAlgae project. 2015.
39. Communications personnelles au Dr. Refardt. Devis de MicroBio Engineering Inc. ZUR201401. MicroBio Engineering Inc. 2014;
40. Swisssolar, VSE, Electrosuisse. Photovoltaik: Technik und Infrastruktur. 2012.
41. Brandenberger M, Matzenberger J, Vogel F, Ludwig C. Producing synthetic natural gas from microalgae via supercritical water gasification: A techno-economic sensitivity analysis. Biomass and Bioenergy. 2013 Apr;51:26–34.
42. Refardt D, Tschudi F, Egloff S. Verwendung von Mikroalgen als alternative Proteinquelle in Futtermitteln. Innovationsscheck KTI-Nr. 15545.1 INNO13-16-LS. 2014.
43. Akimoto S, Yokono M, Hamada F, Teshigahara A, Aikawa S, Kondo A. Adaptation of light-harvesting systems of *Arthrospira platensis* to light conditions, probed by time-resolved fluorescence spectroscopy. Biochim Biophys Acta - Bioenerg. Elsevier B.V.; 2012;1817(8):1483–9.
44. Roberts J. Greenhouse glazing & Solar radiation transmission Workshop. 1998.
45. Fernández I, Ación FG, Berenguel M, Guzmán JL. First Principles Model of a Tubular Photobioreactor for Microalgal Production. Ind Eng Chem Res. American Chemical Society; 2014 Jul 9;53(27):11121–36.
46. Madkour FF, Kamil AE-W, Nasr HS. Production and nutritive value of *Spirulina platensis* in reduced cost media. Egypt J Aquat Res. 2012;38(1):51–7.
47. Molina Grima E, Fernández FGA, García Camacho F, Chisti Y. Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup. J Biotechnol. 1999 Apr 30;70(1–3):231–47.
48. Rosenberg JN, Mathias A, Korth K, Betenbaugh MJ, Oyler GA. Microalgal biomass production and carbon dioxide sequestration from an integrated ethanol biorefinery in Iowa: A technical appraisal and economic feasibility evaluation. Biomass and Bioenergy. 2011 Oct;35(9):3865–76.
49. Reichert CC, Reinehr CO, Costa J a V. Semicontinuous cultivation of the cyanobacterium *Spirulina platensis* in a closed photobioreactor. Brazilian J Chem Eng. 2006;23(1):23–8.
50. Radmann EM, Reinehr CO, Costa J a V. Optimization of the repeated batch cultivation of microalga *Spirulina platensis* in open raceway ponds. Aquaculture. 2007;265(1-4):118–26.
51. Costa JAV, de Morais MG, Dalcanton F, Reichert C da C, Durante AJ. Simultaneous cultivation of *Spirulina platensis* and the toxic cyanobacteria *Microcystis aeruginosa*. Z Naturforsch C. Germany; 2006;61(1-2):105–10.



52. Bezerra RP, Montoya EYO, Sato S, Perego P, de Carvalho JCM, Converti A. Effects of light intensity and dilution rate on the semicontinuous cultivation of *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis*. A kinetic Monod-type approach. *Bioresour Technol.* 2011 Feb;102(3):3215–9.
53. Concas A, Pisu M, Cao G. Novel simulation model of the solar collector of BIOCOIL photobioreactors for CO₂ sequestration with microalgae. *Chem Eng J.* 2010 Mar 1;157(2–3):297–303.
54. Berberoglu H, Barra N, Pilon L, Jay J. Growth, CO₂ consumption and H₂ production of *Anabaena variabilis* ATCC 29413-U under different irradiances and CO₂ concentrations. *J Appl Microbiol. England*; 2008 Jan;104(1):105–21.
55. Markou G, Depraetere O, Vandamme D, Muylaert K. Cultivation of *Chlorella vulgaris* and *Arthrospira platensis* with Recovered Phosphorus from Wastewater by Means of Zeolite Sorption. Clark JH, editor. *Int J Mol Sci. MDPI*; 2015 Feb 16;16(2):4250–64.
56. <https://www.deq.state.ok.us/wqdnew/tmdl/thunderbird/Report/Appendix%20A.pdf>. Appendix A: EFDC water quality parameters and kinetic coefficients.
57. Babcock R, Malda J, Radway J. Hydrodynamics and mass transfer in a tubular airlift photobioreactor. *J Appl Phycol. Kluwer Academic Publishers*; 2002;14(3):169–84.
58. Carvalho AP, Meireles LA, Malcata FX. Microalgal Reactors: A Review of Enclosed System Designs and Performances. *Biotechnol Prog. American Chemical Society*; 2006 Jan 1;22(6):1490–506.
59. Green DW. *Perry's chemical engineers' handbook*. 8th ed. New York, etc.: McGraw-Hill; 2008.
60. Sierra E, Ación FG, Fernández JM, García JL, González C, Molina E. Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae. *Chem Eng J.* 2008 May 1;138(1–3):136–47.
61. Agridea. *Mémento agricole*. 2014.