ANALYSE DE LA FAISABILITE D'UN COUPLAGE DE PRODUCTION DE BIOGAZ ET DE SPIRULINE

Rapport final

octobre 2015

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : DECID & RISK et ESETA

N° de contrat : Marché 1406C0091

Coordination technique ADEME :
Julien THUAL
Direction Economie Circulaire et Déchets

ADEME

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

RAPPORT D'ÉTUDE

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée avec le concours et la supervision d'un Comité technique associant des représentants des différentes parties prenantes, ainsi que de certains spécialistes :

• Frankie	ANGEBAULT	ADEME Poitou-Charentes
• Guillaume	BASTIDE	ADEME, Service Mobilisation et Valorisation des Déchets
• Luc	BOUCHER	DECID & RISK
• Adeline	HAUMONT	AILE
• Claire	INGREMEAU	ATEE – Club Biogaz
• Jean-Paul	JOURDAN	Expert Spiruline
• Servane	LECOLLINET	Ass. Agriculteurs Méthaniseurs de France (AAMF), GAZEA
• Laurent	LEJARS	Chambre d'Agriculture du Loiret
• Lea	MOLINIE	Ministère de l'Agriculture
• Denis	OLLIVIER	TRAME
• Jean-Marc	ONNO	Ass. Agriculteurs Méthaniseurs de France (AAMF), Earl Guernequay
• Frédéric	REIMUND	Fédération des Spiruliniers de France (FSF), Spiruline Atoufred
• Marc	SCHLIENGER	ATEE - Club Biogaz
• Julien	THUAL	ADEME, Service Mobilisation et Valorisation des Déchets
• Jean-Jacques	VERMEIRE	ESETA
• Jean François	THEVENET	Coordonnateur de la FSF

Leurs contributions ont été essentielles pour recueillir des informations et surtout pour valider nos hypothèses de calcul. Nous espérons ainsi qu'elles puissent aider les porteurs de projets.

Un remerciement particulier à M. Jean-Paul JOURDAN pour la disponibilité et la curiosité dont il a fait preuve.

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME, Boucher L, Vermeire JJ, 2015, Analyse de la faisabilité d'un couplage de production de biogaz et de spiruline, 85 pp
Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr, rubrique Médiathèque

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

TABLE DES MATIÈRES

1. Présentation de l'étude 10
1.1. Objectifs : Donner des repères 10
1.1.1. Données et références 10
1.1.2. Modèles de couplage et recommandations 10
1.2. Démarche 11
1.2.1. Identification des enjeux 11
1.2.2. Etudes de faisabilité 11
1.2.3. Intégration de la révision tarifaire 12
1.3. Comparaison et projection des enseignements 12

PARTIE 1 : ETAT DES LIEUX, ENJEUX ET PERSPECTIVES 13

1. Marché et potentiel des microalgues de culture 13
1.1. Aperçu du marché des microalgues, actuel et à 2030 13
1.1.1. 127 000 espèces recensées, quelques dizaines cultivées aujourd'hui 13
1.1.2. Les intérêts des microalgues : Alimentation, Chimie verte et Energie 13
1.1.3. Des productions localisées sur la zone intertropicale 15
1.1.4. Un marché mondial significatif, en croissance rapide 15
1.2. Perspectives intéressantes à 2030 15
1.2.1. Des opportunités de marché réelles … 15
1.2.2. … Conditionnées par les progrès de la R&D 15
1.2.3. Analyse Atouts et Difficultés des marchés (Livre Turquoise p 122) 17

2. La place particulière de la spiruline 19
2.1. Un **aliment** protéiné à 37°C en milieu hostile 19
2.2. Les différents systèmes de culture 19
2.3. La production française actuelle et potentielle 20
2.3.1. Spiruline au Sud/Sud-Est, Méthanisation au Nord/Nord-Ouest 20
2.3.2. Une production artisanale et fermière 20

3. Produits et marché de la spiruline 22
3.1. Produits à base de spiruline 22
3.1.1. Certification et signe de qualité 22
3.1.2. Images revendiquées des offres commerciales : Santé, nature, équitable 24
3.2. Les acteurs et les circuits de commercialisation 24
3.3. Les prix de la spiruline et partage de la valeur ajoutée 24
3.4. Potentiel et freins au développement du marché 25

4. Enjeux du couplage Méthanisation – Spiruline 26
4.1. Motivations des porteurs de projets 26
4.1.1. Valoriser la chaleur pour sécuriser la prime chaleur 26
4.1.2. Augmenter la production de spiruline grâce à la chaleur 26
4.1.3. Apprendre un nouveau métier pour développer une nouvelle activité 26
4.1.4. Exploiter le potentiel d'un marché en développement 26
4.2. Dynamiques 26
4.2.1. Un méthaniseur équivaut à 5 à 10 exploitations actuelles 26
4.2.2. De nouveaux réseaux commerciaux 27
4.2.3. Vers des unités algoindustrielles ? 27
4.3. Facteurs de réussite du couplage Méthanisation – Spiruline 27
4.3.1. Structurer la filière 27
4.3.2. Elargissement et substitution des débouchés 28
4.3.3. Accompagner l'apprentissage d'un 3e métier 28
4.3.4. Intérêts et contraintes du couplage 29
4.3.5. La spiruline, une histoire renouvelée du maraîchage hors-sol ? 30
4.3.6. Quelle efficacité énergétique souhaite-t-on ? Que vaut la chaleur ? 30

PARTIE 2 : ETUDE DE FAISABILITÉ TECHNIQUE, ÉCONOMIQUE ET HUMAINE 31

1. Faisabilité technique du modèle méthanisation à la ferme et spiruline 31

1.1. Exigences physiologiques de la spiruline 31
1.1.1. Ensemencement, Développement, Maintien, Déclin 31
1.1.2. Rendement saisonnier limité par la luminosité 31
1.1.3. Récolte et séchage 31
1.2. Conduite de la culture 32
1.2.1. Les différentes souches de spiruline 32
1.2.2. Conditions de culture 33
1.2.3. Inhibitions et facteurs limitants 34
1.2.4. Contaminations, couverture des bassins et mort subite 35
1.2.5. Micronutriments et orientation du métabolisme 35
1.2.6. Pilotage de la chaleur 35
1.2.7. Quels sous-produits de la méthanisation pour alimenter la spiruline ? 36
1.3. Hypothèses de rendements 37

2. Principes de fonctionnement et choix des unités Méthanisation-Spiruline 38

2.1. Choix retenus 38
2.1.1. Livraison de la chaleur 38
2.1.2. Caractéristiques des couplages 38
2.2. Fonctionnement thermique et démarche de calcul 38
2.2.1. 2 Chaleurs disponibles : soleil et cogénération 41
2.2.2. Choix du type de serre 42
2.2.3. Bilan énergétique et besoin de chauffage 43

3. Dimensionnement 46
3.1. Surface de la serre pour le projet Poitou 46
3.1.1. Prise en compte des dimensions standards des serres 46
3.1.2. Surface en hiver en Poitou Charentes 47
3.1.3. Surface en été en Poitou Charentes 47
3.1.4. Energie consommée selon le mois par les bassins sous serres. 47
3.2. Surface de la serre pour le projet en Lorraine 48
3.2.1. Prise en compte des dimensions standards des serres 48
3.2.2. Surfaces en hiver en Lorraine 48
3.2.3. Surfaces en été en Lorraine 48
3.2.4. Le stockage de chaleur 49
3.2.5. Impact du stockage de chaleur sur les surfaces en production 50
3.2.6. Energie consommée selon le mois par les bassins sous serre 52
3.3. Production de l'unité de méthanisation Poitou (105 kWe) 52
3.3.1. A surface variable des bassins maintenus à 33 - 35°C 52
3.3.2. Avec tous les bassins en production, mais à température variable 53
3.3.3. Production sans Open Buffer 53
3.3.4. Production avec Open Buffer 54
3.4. Comparaison des performances des unités à 105 et 400 kWe 54

4. Faisabilité économique 55
4.1. Coûts d'installation 55
4.1.1. Dimensions des installations 57
4.1.2. Montant de l'investissement 58
4.2. Coût d'exploitation 59
4.2.1. Hypothèses par poste 59
4.2.2. Coûts d'exploitation (hors chaleur) 61
4.2.3. Coûts fixes et proportionnels 61
4.2.4. Origine des économies d'échelle 62
4.3. Intégration du coût de la chaleur dans le prix de revient de la spiruline 63
4.3.1. Scénario 1 : Achat de toute la chaleur 63
4.3.2. Scénario 2 : Achat selon les besoins 63
4.4. Sensibilité des résultats au prix de la chaleur 64
4.4.1. Deux niveaux de prix de revient pour 2 modèles d'activités différents 64
4.4.2. Un complément de revenu intéressant pour le méthaniseur 65
4.4.3. Calcul de V selon les modes choisis 65
4.5. Risque économique et financier 66
4.5.1. Risque économique et financier du projet de 105 kWe 66
4.5.2. Sensibilité du résultat économique du projet de 400 kWe 68

5. Faisabilité humaine 69
5.1. Compétences 69
5.2. Disponibilité, spécialisation et saisonnalité 69
5.3. Commercialisation et savoir-être 70
5.4. Quatre clés d'une cohabitation réussie des métiers 70

PARTIE 3 : SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS 72

1. Enseignements 72

1.1. Observations à partir des unités à 105 et 400 kWe 72

1.1.1. Incertitudes sur le développement du marché 72

1.1.2. Spiruline : atelier principal ou secondaire, autonome ou non 72

1.1.3. Efficacité énergétique à améliorer 72

1.1.4. Le chauffage ne suffit pas à l'intensification 72

1.1.5. Des modèles différenciés 73

1.2. Montée en charge entre 105 et 400 kWe 73

1.3. Pistes de progrès 74

1.3.1. Coût de production et économies d'échelle 74

1.3.2. Risques et opportunités 74

2. Impacts de la révision tarifaire 75

2.1. Coût de revient et prix de vente 76

2.2. Niveaux d'exigence revus à la hausse 76

2.3. Sélection et étalement des investissements et des projets 76

2.4. Effet structurant ou mortifère 76

3. Synthèse : 4 modèles de couplage 77

3.1. Modèles de couplage 77

3.1.1. Méthaniseur, fournisseur d'énergies 77

3.1.2. MicroMéthaSpiruline : Méthanisation et Spiruline artisanales (105 kWe) 77

3.1.3. Algoculture portée AES : Agricoles - Energie – Spiruline (250- 500 kWe) 77

3.1.4. Projets industriels 77

3.2. Caractéristiques des différents modèles 78

3.3. Recommandations techniques 79

Conclusion 80

4. Références bibliographiques 81

5. Index des tableaux et figures 82

6. Sigles et acronymes 83

Annexe : 84

RÉSUMÉ

Face à la multiplication des projets de couplage d'unité de méthanisation et d'atelier de spiruline, l'ADEME a souhaité mieux cerner l'intérêt et les limites de cette association.

Les microalgues représentent un marché en fort développement. Du fait de sa relative simplicité de culture, la spiruline est la microalgue la plus cultivée dans le monde. En France, avec 150 exploitations artisanales, la production est modeste mais le chauffage permet de lever le premier facteur limitant qu'est la température de culture (35°C). Une unité de méthanisation permet de produire l'équivalent de 5 à 10 exploitations traditionnelles de spiruline. Le couplage avec la méthanisation est susceptible d'augmenter rapidement la production tout en valorisant la chaleur de la cogénération. La capacité du marché à absorber un afflux important d'offres reste incertaine.

L'étude de faisabilité de 2 unités de 105 et 400 kWe de cogénération met en évidence la forte saisonnalité de la production, mais aussi qu'en hiver la chaleur nécessaire et le manque de lumière limitent fortement la production alors qu'en été, la chaleur est peu utile. Sur des petites unités, le coût de revient apparait équivalent à celui des exploitations non chauffées, autour de 75 €/kg, mais chutent grâce à des économies d'échelle sur les investissements et sur le travail pour s'établir autour de 50 €/kg. Selon la stratégie d'achat, la chaleur représente entre 4 et 11% des coûts.

Sans être inintéressantes, les performances économiques apparaissent fragiles et exigent une implication, des compétences et un apprentissage significatif de la part du porteur de projet. Le couplage n'est donc pas la solution aussi simple, rustique et efficace qu'au premier abord.

La révision des tarifs d'achat de la cogénération biogaz, en fin d'année 2015 avec la disparition de la prime à l'efficacité énergétique devrait amener à différer la réalisation des projets et renforcer les exigences des différents partenaires.

Pour autant, cette association Spiruline – Méthanisation ouvre des perspectives intéressantes pour valoriser la chaleur de la cogénération et stimuler le développement de l'algoculture. Leur concrétisation dépendra grandement des modalités de soutien en la matière.

TABLEAU DE SYNTHESE DES 2 MODÈLES DE COUPLAGE ÉTUDIÉS

	Localisation	Unité	Poitou	Lorraine
Cogénération et Installation	Puissance électrique cogéneration	kWe	105	400
	Puissance thermique cogénération	kWth	128	445
	Puissance thermique disponible (Min (en hiver) – Max (en été))	kWth	80 à 103	322 à 381
	Nombre de bassins	u *m²	4 *200 m²	4 * 800 m²
	Taille de la serre (à partir de module de taille standard)	m²	1 056	4 032
Production de spiruline	Facteur limitant du rendement		Hiver : chaleur disponible + luminosité Printemps – Automne : Luminosité Eté : Travail – taille des bassins	
	Rendement Min - Max (avec aléas)	g/m²/jour	3,5 à 8	
	Main-d'œuvre nécessaire		0,75 ETP	1 ETP + 2 saisonniers
	Production tous bassins à température variable sur 8 mois	Kg	993	4 023
	Production avec ouverture consécutive de bassins à température fixe sur 12 mois	Kg	973	4 164
Economie du projet	Montant de l'investissement	k€	256	616
			Economies possibles si autoconstruction et/ou réutilisation de serres existantes	
	Coût d'exploitation hors chaleur par an	k€ / an	35	124
	Prix de revient de la spiruline (hors chaleur)	€ / kg	67	48
	Dont Travail	€ / kg	19	15,6
	Dont Amortissements	€ / kg	27,4	15,7
	Coût de revient complet avec chaleur payée 10€/MWh	€/kg	69,3	51,9
	Coût de revient complet avec chaleur payée 30€/MWh	€/kg	74,6	55,3
	Facteurs clés de succès		Prix de vente (contractualisé ou en vente directe)	Maîtrise technique Rentabilité
			Vente directe « rentable »	Création de débouchés spécifiques
	Ressources clés		Temps disponible	Technicité
	Compétences clés		Capacité d'apprentissage	Suivi et pilotage
	Marges de progrès		Automatisation et Maîtrise technique	
	Risques		Emergence de producteurs industriels avec une baisse des prix de vente	
	Enjeux pour la filière		Image, affirmation de l'origine France et structuration de l'offre pour accéder à des débouchés industriels	

INTRODUCTION

Face à la multiplication des projets de couplage d'unité de méthanisation et d'atelier de spiruline, l'ADEME a souhaité mieux cerner l'intérêt et les limites de cette association.

La spiruline est une production ancienne comme produit de cueillette ou production artisanale, mais un changement d'échelle et d'intensification apparait possible grâce à la valorisation de la chaleur de cogénération. Dès lors, la question des débouchés se pose. La première partie de l'étude vise donc à préciser les perspectives de marché.

Par ailleurs, ce couplage exige des investissements importants. L'ADEME se doit donc d'en valider la pertinence en apportant aux porteurs de projets les références de base nécessaires et en validant l'efficacité énergétique des installations mises en place. A cette fin, une étude de faisabilité est réalisée sur deux unités de cogénération du biogaz de 105 kWe et 400 kWe. Ces puissances ont été retenues car, elles correspondent, pour les 105 kWe, au projet de couplage à la ferme avec un emploi à plein temps et, pour les 400 kWe, à des unités autonomes qui pourraient voir le jour à côté de méthaniseurs.

Ces deux exemples sont suffisamment différents pour mettre en évidence les constances et les différences entre les deux projets. Les schémas techniques apparaissent proches, mais on peut espérer des économies d'échelles et des organisations spécifiques. L'analyse des coûts de revient et de la sensibilité de ces projets aux aléas en donnera une lecture.

Le soutien de l'ADEME à la méthanisation est conditionné par l'efficacité énergétique des projets et donc de la valorisation de la chaleur par la spiruline. Pour les méthaniseurs, l'obtention de la prime à l'efficacité et énérgétique est une motivation forte. La révision tarifaire et la suppression de la prime énergétique fin 2015 obligent à réexaminer l'intérêt du couplage pour les parties prenantes (méthaniseur, spirulinier) d'un point de vue qualitatif et en s'appuyant sur les calculs de performance.

En précisant les exigences techniques et les modèles de couplage envisageables, cette étude conduit à faire des recommandations pour la conduite des projets à venir.

1. Présentation de l'étude

1.1. Objectifs : Donner des repères

Sur cette problématique émergente, l'étude doit permettre de donner des repères aux porteurs de projet, sous forme de données, de références et de modèles qui aideront les néophytes à interroger leurs partenaires et à arrêter les caractéristiques de leurs projets.

1.1.1. Données et références

La méthanisation (encore appelée digestion anaérobie) est une technologie basée sur la dégradation par des micro-organismes de la matière organique, en conditions contrôlées et en l'absence d'oxygène (réaction en milieu anaérobie, contrairement au compostage qui est une réaction aérobie). Cette dégradation aboutit à la production :

- d'un produit humide riche en matière organique partiellement stabilisée appelé digestat. Il est généralement envisagé le retour au sol du digestat après éventuellement une phase de maturation par compostage ;
- de biogaz, mélange gazeux saturé en eau à la sortie du digesteur et composé d'environ 50 % à 70 % de méthane (CH_4), de 20 % à 50 % de gaz carbonique (CO_2) et de quelques gaz traces (NH_3, N_2, H_2S). Le biogaz a un Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) de 5 à 7 kWh/Nm3. (source : Ademe- Fiche technique)

Les unités de méthanisation envisagées valorisent leur biogaz par production d'électricité et de chaleur au travers d'un moteur de cogénération. Pour le cas à 105 kWe, le moteur utilisé pour un des travaux de cette étude utilise 273 kW d'énergie primaire (biogaz) pour délivrer 105 kWe et 128 kWth, le solde est une énergie perdue. Le second cas à 400 kWe délivrera 445 kWth. La méthanisation est considérée dans cette étude comme une source de chaleur fatale.

Les indications 105 kWe et 400 kWe dans l'étude sont donc la donnée de production électrique seulement.

Nous considérons que l'installation de méthanisation est pourvue d'une chaudière de secours dimensionnée à la production thermique du moteur de cogénération (128 kW pour l'exemple ci-dessus) afin de maintenir la production thermique par combustion directe de biogaz en cas d'arrêt du moteur de cogénération.

La méthanisation est largement dotée de guides. L'approche est centrée sur la production de spiruline. La synthèse bibliographique amène une présentation des exigences de l'algue en termes de conduite de culture, mais aussi à resituer les perspectives du marché.

Ce travail se heurte à l'absence de références structurées et validées. La production de spiruline en France est largement artisanale et empirique. Les données sur les coûts d'installation sont propres à chaque projet. Sur le fonctionnement, la productivité de la culture fait débat. Elle résulte de l'installation et de l'expérience acquise, mais intègre ou non les accidents. De plus, la culture sous abris chauffée est une pratique nouvelle.
Les hypothèses retenues sont le fruit d'un débat au sein du Comité technique.
Sur cette base, l'impact économique de la variabilité des rendements a été estimé.

1.1.2.Modèles de couplage et recommandations

Différents niveaux de taille et d'intensification sont possibles. Ils sont recentrés sur les installations et les projets qui correspondent à des unités de méthanisation à la ferme en France. Les choix techniques correspondent à des investissements financiers limités et à l'idée que l'investissement dans la méthanisation laissait peu de marges pour la spiruline. Cette orientation est largement validée par les entretiens avec les porteurs de projets.

Deux dimensionnement très différents ont été retenus. Une puissance de 105 kWe correspond à un atelier artisanal à temps partiel. Une puissance de 400 kWe alimente une unité d'activité autonome avec 1 personne à temps plein et 2 saisonniers. Les temps et les frais commerciaux ne sont pas intégrés.

La comparaison de ces modèles alimente les recommandations.

1.2.Démarche

Conformément aux cahiers des charges, la démarche a été construite autour d'une analyse bibliographique et de calcul de dimensionnement. Il nous a semblé utile de l'enrichir d'entretiens avec des experts, des porteurs de projets et des constructeurs.

1.2.1.Identification des enjeux

L'étude « Potentiel algal 2030 » de l'ADEME constitue le cœur de la bibliographie. Elle est complétée par d'autres références plus techniques, ainsi que par l'analyse de documents de projets.
Nous avons aussi interrogé 7 porteurs de projets de couplage, dont 2 en fonctionnement, pour cerner leurs motivations et leurs choix. Les représentants des sociétés de conseil accompagnant les projets de méthanisation ont été également sollicités.

Ces différentes informations permettent d'identifier des enjeux et les variables clés pour la réussite technique, commerciale et humaine des projets. Cette matrice se décline en ensembles de choix cohérents, que nous avons traduit sous forme de modèles, assortis de facteurs clés et d'incertitudes.
Ils sont présentés dans les « Enseignements » en dernière partie.

1.2.2. Etudes de faisabilité

L'étude de faisabilité a permis de décliner 2 puissances types, de 105 et 400 kWe correspondant à une activité à temps partiel et à une activité avec 1 ETP et 2 saisonniers. Derrière ces puissances, il y a 2 logiques de fonctionnement.
Deux sites ont été retenus pour donner un aperçu des différences météorologiques à prendre en compte : Poitiers en Poitou-Charentes, avec un climat océanique et Nancy en Lorraine, plus continental.
Pour plus de réalisme, les dimensionnements ont été réalisés sur des exemples de moteurs de cogénérations existants. La chaleur disponible additionnée à la chaleur solaire est comparée aux besoins de la culture de spiruline sous abris chauffés mois par mois, tenant compte des déperditions. On en déduit une surface théorique de bassins, redimensionnée en surface réelle de projet en tenant compte des dimensions des équipements standards et des contraintes de production.

Combinée aux rendements espérés mois par mois, la production de l'installation est calculée. En parallèle, un chiffrage des investissements et des coûts de fonctionnement a été fait, ce qui permet au final de déterminer la rentabilité de chaque installation.

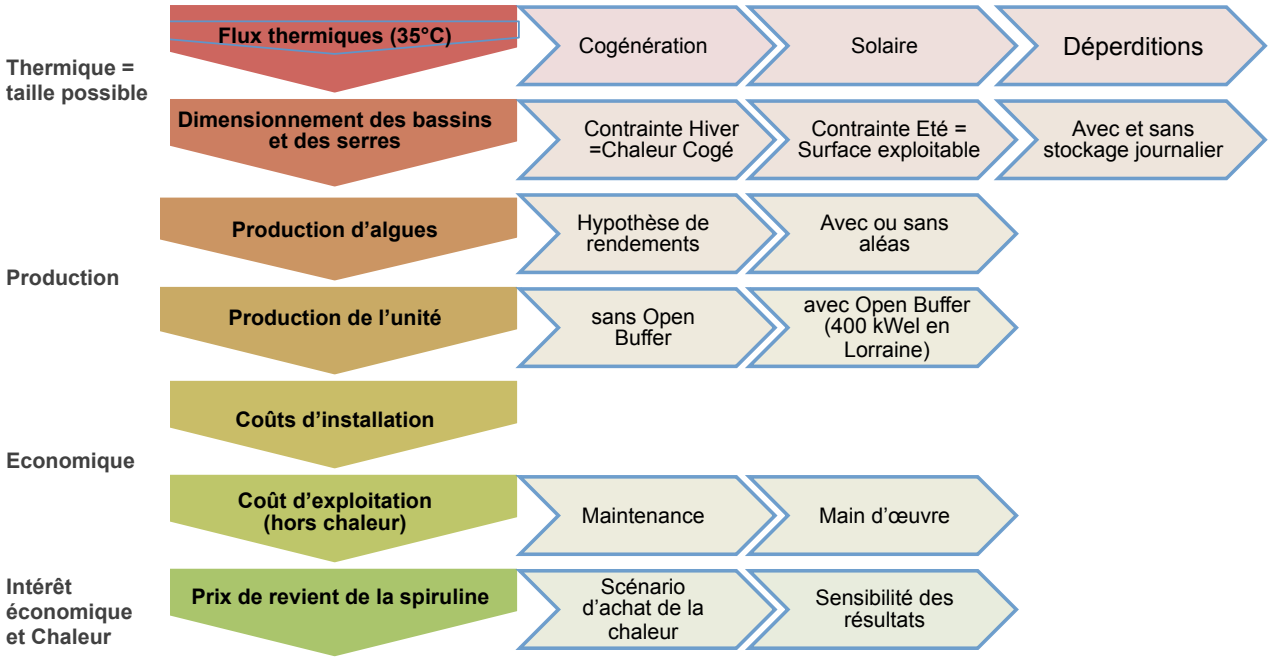


Figure 1 : Démarche de calcul des études de faisabilité

1.2.3. Intégration de la révision tarifaire

Parmi les coûts de fonctionnement, le coût de la chaleur ressort comme un élément clé. Il dépend grandement de la politique tarifaire et du niveau d'exigence pour la valorisation de la chaleur de méthanisation. Sécuriser l'obtention de la prime chaleur reste la motivation première de tous les porteurs de projets de méthanisation intéressés par la spiruline.
La révision tarifaire en cours (avec la disparition de la prime chaleur) est susceptible d'avoir des impacts forts sur le choix d'un couplage méthanisation-spiruline et sur l'enchainement des investissements et de montée en production. Ces impacts sont analysés de façon qualitative.
Le coût d'achat de la chaleur est intégré aux évaluations de la rentabilité sous forme de scénarios.

1.3. Comparaison et projection des enseignements

Les résultats pour les 2 dimensionnements sont comparés en termes d'exigences, de contraintes et d'opportunités. La rentabilité calculée est enrichie par les aspects plus qualitatifs liés au travail de production ou de commercialisation. De 105 à 400 kWe, nous identifierons des paliers de montée en charge à envisager.

Nous nous attacherons à identifier les ruptures et comment elles peuvent être gérées.

PARTIE 1 : ETAT DES LIEUX, ENJEUX ET PERSPECTIVES

1. Marché et potentiel des microalgues de culture1

1.1. Aperçu du marché des microalgues, actuel et à 2030

1.1.1. 127 000 espèces recensées, quelques dizaines cultivées aujourd'hui

Les algues sont des végétaux par abus de langage, **on regroupe sous le terme « microalgues », l'ensemble des microorganismes photosynthétiques,** qui se développent dans tous les milieux aquatiques. Cette appellation cache une grande diversité : plus de 117 000 espèces de microalgues sont recensés dans la base de données AlgaeBase. Mais on estime que leur nombre pourrait dépasser le million. Pour les plus connues, dont la spiruline, on distingue des souches différentes.

Au maximum une centaine de microalgues font l'objet de culture et qu'une douzaine sont réellement exploitées. De ce fait, nos connaissances restent limitées. L'intérêt économique pour ces ressources est récent. Si la consommation en cueillette de certaines algues se perpétue depuis au moins 500 ans, les études scientifiques n'ont commencé que dans les années 1940 et véritablement au tournant des années 1970.

Les microalgues se classent en 4 grandes familles selon la dominante de leurs pigments : les cyanobactéries (bleu, dont la spiruline), les algues rouges et vertes (Plantae), les algues brunes et les alvéolobiontes. Ce sont des eucaryotes (microalgues stricto sensu), sauf les cyanobactéries qui sont des procaryotes (sans noyau cellulaire).

Elles sont photoautotrophes (la lumière fournit l'énergie pour transformer le CO^2 en chaines carbonées). Elles ont capacité à exploiter les formes minérales d'azote. Mais certaines ont aussi la possibilité d'avoir une croissance hétérotrophe en valorisant les nutriments du milieu. Ce type d'algues peut donc être cultivé à la lumière ou sans lumière. Les différents pigments chlorophylliens permettent de valoriser les longueurs d'ondes de la lumière
Le potentiel génétique s'exprime de façon différente selon les conditions naturelles du milieu.

Cette diversité est forcément source d'opportunités de valorisation. Malheureusement, les connaissances actuelles apparaissent faibles au niveau des algues, de la maîtrise de la culture et des procédés nécessaires à leur préparation ou l'extraction de molécules intéressantes.

1.1.2. Les intérêts des microalgues : Alimentation, Chimie verte et Energie

Un intérêt supplémentaire tient à la vitesse de leur croissance (et de leur reproduction), de quelques heures, d'où une production rapide de biomasse.

Les débouchés potentiels pour les produits micro-algaux dépendent de la composition biochimique des algues, qui elle-même varie selon les espèces ou encore les conditions de culture et de croissance. On distingue 4 grands domaines de valorisation avec des préparations et des transformations plus ou moins sophistiquées :

Alimentation et nutrition humaine
Cette consommation vise à profiter des qualités nutritives de ces algues, sous 3 formes :
- Algue entière comme complément alimentaire (type spiruline)
- ω3 (Omégas 3) pour la nutrition infantile et les compléments alimentaires
- Pigments comme colorants alimentaires

1 Cette partie est largement construite sur l'étude de l'ADEME « Potentiel algal 2030 », http://www.ademe.fr/evaluation-gisement-potentiel-ressources-algales-lenergie-chimie-france-a-horizon-2030

Valorisation pharmaceutique et cosmétique
Ces usages valorisent des « molécules d'intérêt », à chaque fois spécifique, mais à haute valeur ajoutée.

Alimentation et nutrition animale
Les microalgues pourraient venir en substitution des ressources actuelles et notamment aux farines de poissons :
- Huiles et farines pour alimentation des poissons
- Algue « fourrage » consommée entière comme nourriture ou additif nutritionnel pour bétail

Biocarburants (Biodiesel, Bioéthanol ou biogaz.)

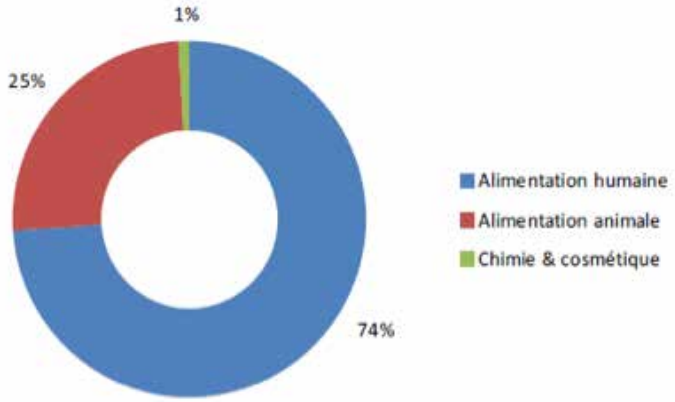


Figure 2 : Répartition des marchés mondiaux actuels des microalgues en volumes (cité dans "Potentiel algal 2030")

La production reste cependant limitée : elle est estimée entre 10 et 15 000 tonnes MS par an dans le monde, 99% provenant d'une douzaine de microalgues. A elle seule la spiruline représente entre 30 et 55 % de cette production selon les sources. Les coûts de production, trop élevés et la maîtrise des process, encore incertaine, limitent la capacité des microalgues à être compétitives face aux autres ressources.

Micro-algue	Production annuelle de biomasse (t_{MS}/an)	Principaux pays producteurs	Produit typique	Applications
Spirulina platensis	4-5000	Etats-Unis, Chine, Inde, Japon, Myanmar	Biomasse Algue séchée riche en phycocyanine	Alimentation et nutrition humaine et animale, nutrition, cosmétique
Chlorella vulgaris	2000	Taiwan, Allemagne, Japon		Alimentation humaine, aquaculture, cosmétique
Dunaliella salina	1200	Australie, Israël, Etats-Unis, Chine	Algue séchée riche en β-carotène Extrait de β-carotène	Alimentation humaine et animale, agroalimentaire, cosmétique
Nostoc fusiforme	600	n.r	Biomasse	Alimentation humaine
Aphanizomenon flos-aquae	500	Etats-Unis	Biomasse	Alimentation humaine
Haematococcus pluvialis	50-300	Etats-Unis, Inde, Israël	Algue séchée riche en asthaxantine Extrait d'asthaxantine	Aquaculture, agroalimentaire, pharmaceutique (immunologie, anti-oxydant)
Crypthecodinium cohnii	240	Etats-Unis	DHA	Nutrition (infantile)
Ondotella aurita	20	n.r	Biomasse EPA	Alimentation humaine, cosmétique (anti-inflammatoire, renforcement capillaire)
Shizochytrium	10	Etats-Unis	DHA	Nutrition infantile

Tableau 1 : Principales micro-algues commercialisées (cité dans «Potentiel algal 2030 »)

Néanmoins des progrès importants sont espérés qui diviseraient les coûts de production par 2 à 5 ans et par 10 à 10 ans.

1.1.3. Des productions localisées sur la zone intertropicale

La production est localisée essentiellement en Asie et aux Etats-Unis.
Logiquement, les volumes les plus importants sont réalisés avec des modes de culture plutôt extensifs en plein air et en milieu tropical. Certaines unités ont des tailles réellement industrielles et exploitent des dizaines d'hectares ou des milliers de m^3 en cultures.

La production européenne représenterait entre 5 et 10% de ces volumes. Trois facteurs essentiels l'expliquent : les conditions naturelles (besoins de chauffage pour contrecarrer la saisonnalité, faible luminosité dans certains pays..) ; les habitudes alimentaires moins tournées vers les algues et la réglementation qui peut faire obstacle à la consommation et à la valorisation des algues ou de leurs sous-produits.
En revanche, la communauté scientifique se montre être fortement mobilisée sur ce domaine d'avenir.

1.1.4. Un marché mondial significatif, en croissance rapide

La valeur du marché est mal connue entre 600 millions et 3,3 milliards d'euros. Cette imprécision s'explique par l'absence de recensement et/ou d'organisation de la filière, par l'importance des consommations locales en Asie et par la valorisation des productions faites en interne des grands groupes.
Le marché des microalgues se développe dans l'ombre de celui des macro-algues, beaucoup plus important (100 fois en volumes). C'est un marché à la fois local pour les consommations en frais et mondial pour les plus importants. Ainsi, en France, la production ne représenterait que 10 à 20% de la consommation, ce qui montre les opportunités qui existent mais aussi, esquissent les difficultés pour se positionner face à une offre importée abondante et à prix faible.

1.2. Perspectives intéressantes à 2030

1.2.1. Des opportunités de marché réelles …

Le marché des microalgues apparait prometteur. Le large spectre des productions potentielles laisse espérer que les microalgues se substituent aux ressources actuelles. Par ailleurs, les progrès de la chimie verte et des process de l'algoculture ouvrent la voie à de nouveaux débouchés au travers des molécules d'intérêt.

Les estimations réalisées pour l'étude « potentiel Algual 2030 » montrent qu'en volume, sans tenir compte de la compétitivité, il y a de la place pour les produits algaux sur tous les marchés auxquels ils peuvent prétendre. Sur tous les segments, ils représentent moins de 10% de ce marché européen. C'est particulièrement marqué pour le marché de l'alimentation du bétail avec une consommation en « Algues entières ».

Néanmoins, hors algues entières, les volumes à produire sont significatifs mais limités, de l'ordre de 25 000 tonnes. Selon les projections de « Potentiel algal 2030 », 5% du potentiel de production français permettrait de couvrir les besoins. Ce potentiel a été calculé en intégrant les contraintes de lumière, de disponibilités des sols, de CO^2 et de nutriments (hors agriculture).
Seuls les biocarburants et l'alimentation animale offrent des débouchés suffisamment importants pour assurer la valorisation du potentiel.

Place des couplages avec de la méthanisation

Le couplage de la méthanisation ne représenterait que 0,1% du potentiel de production de microalgues. Même en revisitant les hypothèses retenues, **le couplage algoculture - méthanisation n'est pas à même de modifier significativement le développement attendu du marché des microalgues.** En revanche, il peut s'avérer pertinent au regard des conditions de production, puisqu'il lève le facteur limitant de la température.

1.2.2. … Conditionnées par les progrès de la R&D

La question laissée en suspens est celle de la compétitivité des produits algaux. C'est pourtant un obstacle majeur qui ferme les débouchés en carburants, et rend l'équilibre incertain pour l'alimentation animale. Les coûts d'investissements, d'exploitation et la productivité font que les débouchés des microalgues resteront ceux des produits à haute valeur ajoutée, en alimentation humaine et/ou sur les molécules d'intérêt, … sauf à avoir des progrès significatifs.

Un second obstacle tient aux capacités de production. Sous nos latitudes, la mise en place d'installations de grande taille est difficile. Les volumes produits restent limités ce qui freine la construction de filière industrielle de valorisation.

Au final, les perspectives de marché apparaissent à modérer. Les freins technologiques pèsent sur la compétitivité, situation qui cantonne les microalgues à des modes de production limitant les investissements et les coûts de production, et par suite, l'émergence de débouchés agro-industriels capables d'inciter à une production de masse.

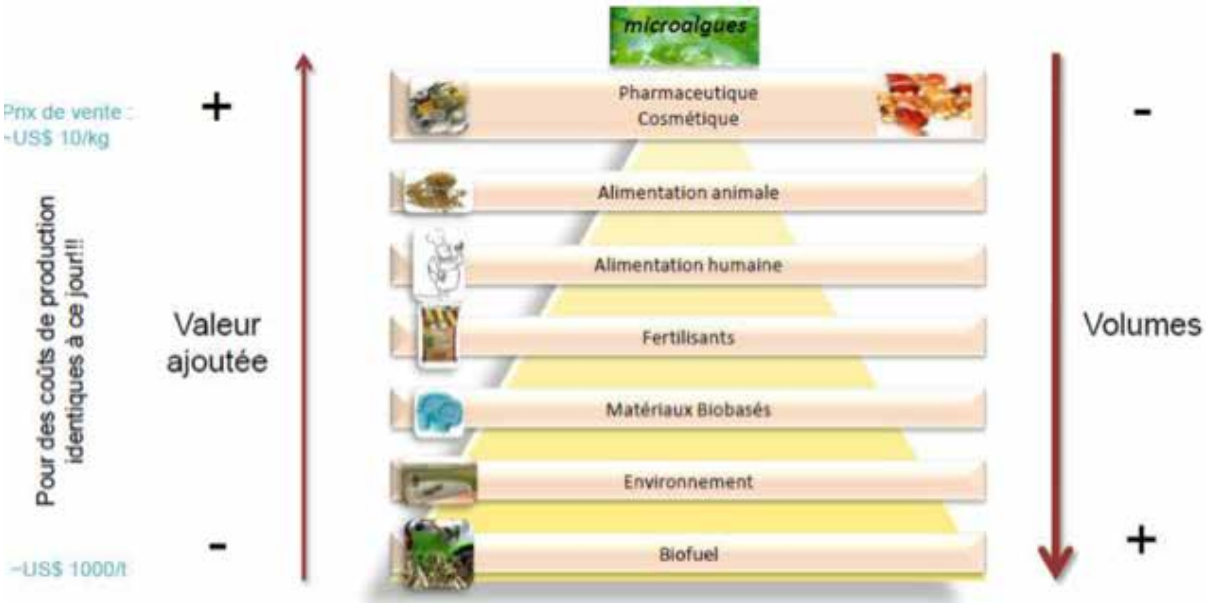


Figure 3 : Microalgues, le champ des applications possibles (source: Etude TechKnowMetrix pour Algasud - 2010)

Attention, il y a une erreur sur a figure : l'alimentation humaine a une valeur ajoutée que l'alimentation animale.

1.2.3. Analyse Atouts et Difficultés des marchés (Livre Turquoise p 122)

Le Livre Turquoise, ouvrage collectif, réalisé en 2010, identifie les atouts et les difficultés sur chacun des marchés potentiels.

Secteurs	Applications, Potentiels	Atouts	Difficultés
Cosmétiques	Principes actifs Colorants Anti-oxydants Protection solaire	- Actifs naturels innovants - Forte diversité d'espèces et de molécules - Forte teneur en anti-oxydants -Bonne image marketing	- Peu d'espèces cultivées à grande échelle - Très forte teneur en eau de la biomasse - Évolution de la réglementation
Compléments alimentaires Nutraceutique	Oméga-3 Caroténoïdes Protéines	- Importantes qualités nutritionnelles (oméga-3, protéines, vitamines) - Marchés existants	- Réglementation longue et compliquée - Coûts production élevés - Remédiation CO2 quasi-incompatible - Maîtrise des marchés
Santé humaine	Diagnostic de contrôle	- Très haute valeur ajoutée - Remplace utilisation de produits radioactifs	- Petit marché de niche - Remédiation CO2 impossible - Réglementation longue
Alimentation humaine	Aliments Colorants Ingrédients	- Qualités nutritionnelles - Colorants naturels - Combat sous-nutrition	- Réglementation longue et compliquée - Acceptabilité par les consommateurs
Secteurs	**Applications, Potentiels**	**Atouts**	**Difficultés**
Environnement	Remédiation CO2 Traitement effluents (lagunes)	- Consommation de CO2, d'azote et de phosphore - Systèmes de lagunage existent déjà	- CO2 et effluents pollués par molécules toxiques
Énergie	Biodiesel Biokérozène Bio-gaz	- Rendement d'huile à l'hectare 7 à 30 fois > au colza - Pas de compétition avec l'alimentaire - Co-valorisation	- Production de masse - Technologie industrielle - Grande surface nécessaire
Aquaculture	Aliment de qualité (protéines, oméga-3)	- 1ere maillon chaine alimentaire aquatique - Qualités nutritionnelles	- Besoin d'intrants « propres » pour culture - Monoculture requise
Alimentation animale	Bétail Pet food	- Co-valorisation - Apport protéique - Réduit dépendance soja	- Production de masse - Technologie industrielle
Chimie verte Bio-matériaux	Bio-polymères Lipo-chimie	- Une nouvelle source pour bio-plastiques et agro-tensioactifs	- Production de masse - Technologie industrielle

Tableau 2 : Analyse Atouts et Difficultés des marchés (source Livre Turquoise p 122)

L'étude « Potentiel algal 2030 » actualise et chiffre ces perspectives de marché (cf. tableau ci-dessous).

Secteur	Produit	Volume (tonne/an)	Part de la spiruline	Maturité technologique	Prix pour être compétitif
Nutrition et Alimentation humaines	Omega 3 pour nutrition animale	300	Possible sous contrainte de stress	Extraction difficile	36 €/kg
	Omega 3 compléments alimentaires	1 500	Faible teneur en oméga 3 des spirulines		
	Algues entières	400	100-150 t (+ 10% par an)	Mature	50 – 100 €/kg selon le positionnement qualitatif
	Colorants	50	Faible aujourd'hui, important pour la Chorelle	En cours de développement	300 – 3000 €/kg selon la molécule
Pharma cosmétique	Omega 3	800			
Alimentation animale	Huile Aquaculture	6 400	Très faible		
	Farines Aquaculture	6 100	Théoriquement important	Durablement non compétitif	Très variable autour de 1500 €/t 1,5 €/kg
	Fourrages	531 000		Durablement non compétitif	Entre 0,2 et 5 €/kg
	Additif	5 400	Faible, important pour la Chorelle		10-130 €/kg – 2,5 à 8 k€/kg pour astaxanthine
Chimie	Plastiques bio-sourcés	3 900			
		24 850 (hors fourrages)	Incertain hors Algues entières		

Tableau 3 : Taille des marchés potentiels en 2030 (Source : Potentiel Algal 2030)

2. La place particulière de la spiruline

2.1. Un aliment protéiné, cultivé à 37°C en milieu hostile

Dans le monde des microalgues, la spiruline occupe une place particulière : c'est la mieux connue et la plus cultivée. Elle représente 30 à 50% des volumes produit dans le monde, soit environ 5000 t/an. Elle a pour mérite de se développer dans un milieu difficile : tropical et alcalin (basique), ce qui a tendance à éliminer les concurrents potentiels et les autres micro organismes. De ce fait, elle est aussi assez facile à cultiver.
Ses propriétés nutritives sont connues depuis plusieurs siècles au Mexique et/ou autour du Lac Tchad.
Plus récemment, ses vertus ont été reconnues en tant que compléments alimentaires pour la lutte contre la malnutrition et en santé – sport. Dans les années 1970, la FAO l'avait identifiée comme une source de protéines du futur.
Ce statut particulier a conduit à mieux explorer comment intensifier sa production.

2.2. Les différents systèmes de culture

Deux grands systèmes de culture sont envisageables :

- En bassin ouvert, d'un bloc type « baignoire » ou « lagune » (open ponds) ou avec une circulation de l'eau organisée (type « circuit » ou Raceway)
- En enceinte fermée,
  - au sein d'un photobioréacteur (PBR avec lumière et photosysnthèse) ou
  - de fermenteur (sans lumière, l'énergie est puisée dans l'alimentation)

Le premier est ouvert sur l'extérieur, donc aux contaminations mais simples à mettre en œuvre.
Le second permet de mieux maîtriser la culture, mais au prix d'une infrastructure plus lourde.
Il a une productivité beaucoup plus importante (jusqu'à 10 fois selon la bibliographie).

Leurs caractéristiques sont ajustées pour optimiser la pénétration de la lumière et la maîtrise des températures. En zone tempérée, ils seront couverts par des plastiques ou par des serres selon les exigences d'isolation, la saisonnalité de la production et la productivité souhaitée.
Les contraintes d'exploitation ne sont pas les mêmes.
Au final, les investissements supplémentaires liés aux PBR doivent s'amortir par des gains de productivité et de rentabilité par rapport aux bassins.
Tous les projets en France s'orientent vers des bassins ouverts, ce qui a conduit le comité technique à retenir uniquement ce mode de culture pour l'étude.

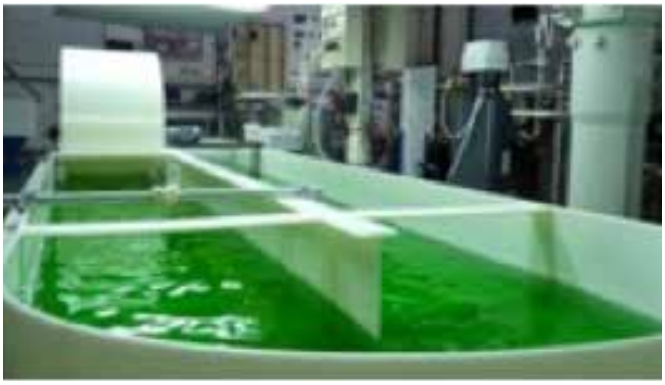


Figure 4 : Exemple d'un «Raceway» de laboratoire

Un troisième mode de culture serait envisageable : le Fermenteur dans lequel la microalgue se dévelope à partir des nutriments du milieu, sans recours à la photosynthèse.

	Avantages	Inconvénients
Bassin Open ponds Raceways (quasi-majorité des projets de spiruline)	Simplicité de conception et d'exploitation Faible coût d'installation Culture possible sur des surfaces importantes	Besoin d'eau Maîtrise du milieu – Contaminations Volume d'eau à brasser et à filtrer Sensibilité aux variations de chaleur saisonnières et jour-nuit Productivité limitée
PBR fermés (pas de projets de spiruline identifiés)	Pilotage de culture, intensification Plus de surface éclairée par volume, d'où des concentrations volumiques de cellules plus importantes Efficacité énergétique	Difficulté de nettoyage - fooling Gestion des températures excessives et surconcentration de 02 (faute de dégazage, photoinhibition) Coût élevé et procédés complexes Problèmes d'échelle
Fermenteurs	Maîtrise des conditions de production optimales et la prévention de contamination Capacité à orienter la production de certaines substances Concentrations élevées en biomasse	Coûts Problèmes d'échelles Compétitivité avec des usages plus classiques (levures, bactéries, ..)

Tableau 4 : Comparaison des systèmes et modes de spiruline (d'après National algal biofuels technology roadmap – CRIBIQ)

Pour la suite de l'étude, nous ne considèrerons que des systèmes en bassins (raceway).

2.3. La production française actuelle et potentielle

2.3.1. Spiruline au Sud/Sud-Est, Méthanisation au Nord/Nord-Ouest

Si on compare les cartes des implantations de spiruline (Données Fédération des Spiruliniers de France) et des projets d'unités de méthanisation à la ferme (Bilan ADEME au 1er janvier 2013), le couplage des 2 activités pourrait entrainer une multiplication des projets au nord de la Loire de la production de spiruline.

2.3.2. Une production artisanale et fermière

En France, les ateliers actuels se situent majoritairement entre 500 et 1000 m² de bassins couverts. La société ALGO-SUD, qui s'affiche comme le plus grand producteur, annonce 4000 m². La taille des ateliers installés dans le monde va de quelques m² à une cinquantaine d'hectares à Hawaï en open bonds (bassins ouverts).

Figure 5 : Carte d'implantation des Spiruliniers de France (site FSF)

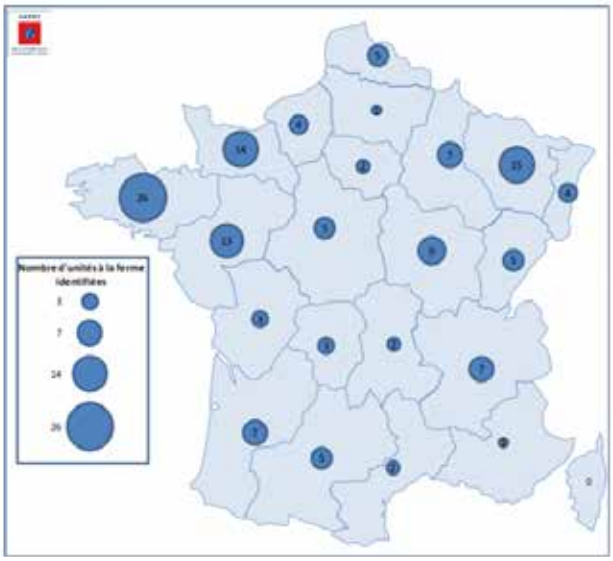


Figure 6 : Répartition régionale des projets de biogaz par cogénération à la ferme (Source : Bilan ADEME 2013 - Site ADEME)

Ces tailles sont somme toute modestes et correspondent à une production artisanale et saisonnière. Comme en agriculture, elle glisse vers des modes de production agroindustriels.

La possibilité de chauffer permet d'envisager une production continue ou sur une période plus longue pour la même surface de bassins, mais incite à installer des surfaces de bassins beaucoup plus importantes en été. C'est en effet pendant cette saison que les besoins de chauffage sont réduits pour la spiruline et la disponibilité en chaleur et en lumière est maximale.

Avec une surface moyenne de bassin de 500 m², le rendement non chauffé est de l'ordre de 1 à 2 g/jour/m² sur 9 mois, puisqu'en hiver la production s'arrête.
Avec la chaleur, la production va devenir moins saisonnière, et surtout plus importante aux intersaisons.

Source	D'après entretiens et bibliographies	Etude économique FSF
Production française	20 t MS /an	23,3 t MS /an
Exploitations artisanales	150	103
Production annuelle / exploitation	133 kg/ an	226 kg/an
Surface moyenne de bassin	500 m²	400 m²
Rendement moyen (production sur 9 mois)	Env. 1 g / jour m²	2 à 2,3 g/j/ m²
Prix	150 €/kg MS	80 (gros) 150 €/kg (détail)
CA	20 000 €/an	entre 20 et 33 000 €*
Coût exploitation (hors amortissements)	40 €/kg	70 €/kg
Marge	15 000 €/an	entre 5 et 18 000 €*
* Calcul d'après les données disponibles		

Tableau 5 : Rendement et données économiques de la production de Spiruline en 2014

En repartant de la production française estimée à 20t MS/an, les 150 exploitations actuelles produiraient environ 133 kg/an en moyenne pour un chiffre d'affaires autour de 20 000 euros. Avec un prix de revient de 40 €/t, la marge s'établirait alors à 15 000 euros.

Ces chiffres sont à prendre avec réserve. Ils semblent repris en boucle dans les différentes études sans pouvoir donner lieu à d'autres vérifications qu'un contrôle de cohérence.
Au regard de nos estimations, il nous semble que les amortissements et la rémunération du travail ne peuvent pas être totalement intégrés.

Ainsi, dans son étude économique 2014, la Fédération des Spiruliniers de France situe une productivité par m² de bassin à plus de 2 g/j/m².
Ici encore, pour faire des comparaisons, le calcul de cette moyenne doit être précisé selon que l'on considère la période de récolte, de production des bassins, ou l'année civile. Une autre incertitude tient au prix de vente moyen.

Ces différents aperçus font ressortir l'hétérogénéité des modèles possibles.

Cependant, les exploitations de spiruline sont des petites structures qui dégagent des marges limitées.
Un point important est aussi de bien comptabiliser le temps nécessaire à la commercialisation. La production française

correspond à une consommation de 18 000 consommateurs réguliers (à raison de 3g/jour) et donc à un portefeuille client de 120 à 180 acheteurs pour une exploitation qui souhaiteraient commercialiser toute sa production en vente directe.

Chacun de ces consommateurs régulier dépense 165 €/an pour la spiruline à 150 €/kg. Ce sont 2 caractéristiques d'un marché haut de gamme.

Recommandation de consommation	3 g/j
Volumes produits en France	20 t /an
Nombre de consommateurs réguliers	18 000
Budget consommateur	165 €/an / pers
Nb clients / exploitation 100%Vente Directe	180

Tableau 6 : Esquisse de la taille du marché français de la spiruline

3. Produits et marché de la spiruline

3.1. Produits à base de spiruline

La gamme des produits à base de spiruline se décompose en plusieurs catégories :

- Spiruline fraîche, consommée directement sans séchage (et donc à proximité du lieu de production)
- Spiruline séchée, présentée en filaments, en comprimés, en poudre ou en paillette
- Spiruline « enrichie » en oligoéléments
- Spiruline ingrédients incorporée à d'autres produits alimentaires, pour faire des barres énergisantes, des crackers ou des biscuits apéritifs, ou encore des boissons (Springwave, Spiralps, Bloo Tonic..)
- Extrait de spiruline, tel que la phyocyanine, qui est un des pigments.

L'offre commerciale en France apparaît relativement homogène. Elle se fait sous forme de petits conditionnements (de 80 à 500 g).

3.1.1. Certification et signe de qualité

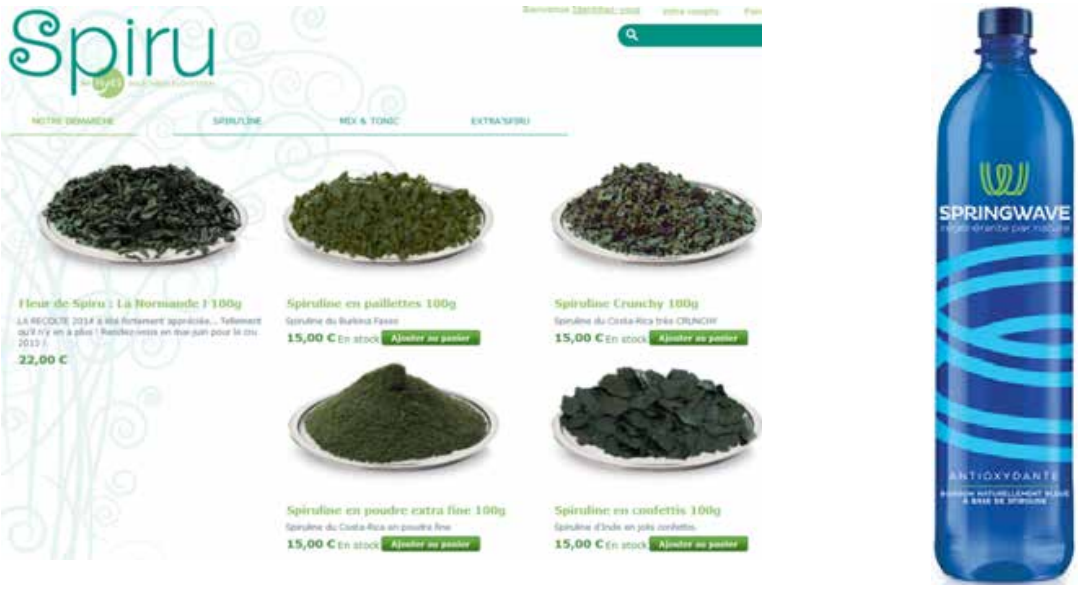


Figure 7 : Exemples d'utilisation de spiruline

Figure 7 (suite) : Exemples d'utilisation de spiruline

La définition des signes de qualités et de certification est en cours. La Fédération des Spiruliniers de France travaille avec Ecocert sur une certification de process.

En revanche, il n'y a pas d'appellation bio reconnue. On trouve sur le marché des spirulines qui revendique cette appellation. La confusion vient du fait que cette appellation existe en Allemagne et dans d'autres pays.

Par ailleurs, il n'y a pas d'assertion Santé officiellement reconnue en Europe ou aux Etats-Unis. La spiruline bénéficie d'une autorisation de commercialisation sous ces différentes formes.

De même, il n'y a pas de reconnaissance officielle comme produit AOP (Appellation d'Origine Protégée) ou IGP (Indication Géographique Protégée) assortie de cahiers des charges.

Figure 8 : Exemples de signes de qualité

3.1.2. Images revendiquées des offres commerciales : Santé, nature, équitable

Les marchés visés sont ceux des compléments alimentaires avec différentes déclinaisons : santé, bien-être, sport (seule ou en association).

La spiruline est avant tout associée à une image de santé. Ensuite, le caractère naturel différencie les produits. L'appellation Bio - avec les limites situées ci-dessus - vient compléter ce panel.

Enfin, certaines marques mettent en avant le caractère équitable de leur produit.

Derrière les caractéristiques se dévoilent les origines géographiques des spirulines, qui sont alors plus ou moins affirmées. La spiruline n'échappe pas à une segmentation classique :
• Un haut de gamme, santé, naturel et local ou une origine affirmée
• Des petites productions locales, attachées à un terroir ou à une exploitation
• Un positionnement Santé.

Les diverses appellations et qualificatifs accolées aux produits recouvrent des réalités très différentes, avec des qualités, des origines et modes de production hétérogènes. C'est une source de confusion, voire de tromperie, pour le consommateur, et de fragilité pour la filière.

3.2. Les acteurs et les circuits de commercialisation

Vente directe et circuits spécialisés
La spiruline est commercialisée auprès des consommateurs par des circuits spécifiques.

La vente directe est le canal privilégié des producteurs sur le site des exploitations des producteurs, sur les marchés et dans les salons spécialisés. Elle se double quasi-obligatoirement d'une vente par internet qui permet de se faire connaitre et de relayer l'offre.
Enfin, on la trouve dans certains magasins spécialisées au titre des compléments sportifs ou des rayons Santé-Bien-être.

De nouveaux acteurs se positionnent
Le marché se structure donc traditionnellement autour de 2 pôles : des producteurs et des importateurs.

Un 3ème acteur est en train de se développer : les négociants grossistes concentrent l'offre pour la revendre soit directement, soit auprès de réseau en attente de volumes plus importants. Les perspectives du couplage avec de la méthanisation semble pousser à la constitution de réseau de producteurs, regroupés autour d'un « agrégateur » issus du monde de la spiruline ou de l'algoculture (Hyes, AlgaeGreenValue, ..) ou plutôt de la méthanisation (Canopy, par exemple).

3.3. Les prix de la spiruline et partage de la valeur ajoutée

La gamme des prix au détail est large puisqu'elle va de 1 à 3 ou 4 pour des produits qui présentent des caractéristiques proches. La différenciation est un enjeu important. Pour autant, si les produits importés fournissent les prix d'entrée de gamme, on en trouve aussi à des prix élevés.
Les signes distinctifs de qualité n'agissent pas de façon absolue. Il y a sans doute plusieurs catégories de consommateurs qui réagissent différemment au prix.

Notons cependant l'asymétrie qu'il y a entre les importateurs et les producteurs français: les premiers ont le choix de leur positionnement alors que les seconds sont obligés d'avoir des prix élevés du fait de leurs coûts de productions élevés.

Cet écart de prix semble se traduire en volume puisque les opérateurs affirment que la spiruline produite en France ne représente que 10% du marché. Faire monter en gamme les consommateurs n'est pas forcément évident. En conséquence, la substitution de la spiruline importée par une production française peut s'envisager sur un créneau milieu et haut de gamme, occupés par des spirulines estampillées d'origine naturelle et/ou équitable. Il n'est pas sûr que l'image de la méthanisation soit porteuse des mêmes atouts.

Nom commercial	Société	Nature	Conditionnement	PU (€)	Prix €/kg
Spirulidaire	Hyes	poudre	1 sachet 100g		202
			8 sachets 100g		154
Algosud	Algosud	Poudre	100g		140 à 170
Trec Nutrition Spirulina	Leider	Comprimés de 1000 mg	60 comp	14	233
Slogan Spiruline D Hawai			75g	18,9	252
Spirulysat	AlphaBio Tech	Extrait 20 ampoules de 10ml		65	
Spirumiette			150	24	160
Inde	Alterafrica	Poudre	500	55	110
	Alterafrica	Gélules	77g	130	168
Divers exportateurs (via Alibaba)					13-25
Sevenhills Organics	Tablettes De Spiruline Bio	1000 x 500mg	500g	21,97	44 €
Relevés de prix sur Internet, à titre d'illustration, du 13 au 17 avril 2015					

Tableau 7 : Relevé de prix de vente de la spiruline

3.4. Potentiel et freins au développement du marché

En synthèse, nous pouvons identifier le potentiel et les freins au développement de la spiruline.

Potentiel	Freins au développement
Potentiel de nouveaux consommateurs	Prix élevés
Qualité naturelle du produit	Fourre-tout des différentes qualités
Image positive	Atomisation de l'offre
Conditions de culture très spécifiques	Besoin de chaleur et exigence d'efficacité énergétique
Mode de production accessible	Aléas de production et de valorisation
Volonté de diversification des serristes	Besoin de créer de nouveaux débouchés
Potentiel de substitution limité	
	Le couplage est plus motivé par les difficultés à valoriser la chaleur que par des débouchés acquis
	Filière peu structurée, peu accompagnée, laissant place aux comportements opportunistes

Tableau 8 : Potentiel et freins au développement du marché.

4. Enjeux du couplage Méthanisation - Spiruline

Le couplage de la méthanisation et de la spiruline vise uniquement à valoriser la chaleur de la cogénération par la production de spiruline. Les enjeux peuvent s'envisager au niveau du porteur de projet, de la filière et des politiques d'accompagnement.

4.1. Motivations des porteurs de projets

4.1.1. Valoriser la chaleur pour sécuriser la prime chaleur

Avec les règles tarifaires connues jusqu'au 1er octobre 2015, le principal intérêt du couplage est de valoriser la chaleur et ainsi de sécuriser l'obtention de la prime chaleur. Pour de nombreux projets à la ferme, sans possibilité de valorisation autre, ce nouvel atelier apparait comme une solution plus simple que de mettre en place un atelier de séchage traditionnel. La sécurisation de la prime chaleur est souvent déterminante dans la rentabilité du projet de méthanisation.

4.1.2. Augmenter la production de spiruline grâce à la chaleur

Le point de vue symétrique du spirulinier est d'augmenter sa productivité en levant le facteur limitant qu'est la chaleur. La période de production est allongée ce qui laisse espérer un amortissement plus rapide et un travail plus régulier ou mieux rémunéré.
La production devient aussi envisageable au nord de la France dans des régions plus froides.

4.1.3. Apprendre un nouveau métier pour développer une nouvelle activité

La spiruline est aussi une opportunité de diversifier l'activité et de créer un emploi à temps partiel ou complet. La difficulté est qu'elle demande des compétences particulières, souvent nouvelles, tant techniques que commerciales. La spiruline correspond à l'apprentissage d'un 3ème métier, en aval de celui d'agriculteur et de méthaniseur. Cette algue sera une production hors-sol, ni réellement végétale ni animale et sur des marchés de niche qui ont leurs codes.

Une attention particulière doit être portée à la coordination des 3 activités, que ce soit, en temps de travail, besoin d'attention ou gestion de la saisonnalité. De plus, la commercialisation se fait en vente directe sur une niche particulière.

4.1.4. Exploiter le potentiel d'un marché en développement

Cette nouvelle activité est aussi la possibilité de se positionner sur un marché en développement. Ici encore, le nouveau producteur a des choix à faire sur son positionnement qualité, son implication dans la commercialisation ou dans le développement de partenariat producteur-distributeur. La réussite technique et le partage de la valeur ajoutée ne sont pas les mêmes.

4.2. Dynamiques

4.2.1. Un méthaniseur équivaut à 5 à 10 exploitations actuelles

Une unité de méthanisation à la ferme de 150 à 200 kWe pourra chauffer environ 1200 à 1500 m^2 de bassin, soit 2 à 3 fois la surface de l'exploitation moyenne actuelle. Le chauffage va accroitre la productivité notamment au printemps et à l'automne pour un effet équivalent à celui des surfaces. Au final, on a une très forte augmentation de la production par exploitation, qui va passer de 133 kg/an à plus d'une tonne par unité.

Il faut donc considérer **qu'une unité couplée méthanisation - spiruline à un potentiel de production de 5 à 10 fois celui d'une exploitation artisanale.**
En volume, le couplage de « 15 méthaniseurs à la ferme (traitant chacun 6 000 tonnes de biomasse) avec une production de spiruline correspondent à doubler la production, et 100 suffiraient pour assurer l'autonomie actuelle de la France ».

4.2.2. De nouveaux réseaux commerciaux

Avec la prime à l'efficacité énergétique, la mise en place de ces couplages méthanisation-spiruline pouvait être rapide. Nous avons identifié 3 acteurs actifs pour accompagner les projets et fédérer l'offre :

- Hyes
- Canopy
- Algae Green Value

Ils assurent une fonction de conseil, de suivi de l'installation et de la production et aussi un rôle d'agrégateur des volumes de façon à pouvoir s'impliquer sur de nouveaux marchés : les chaines de distribution spécialisées sur les produits naturels et/ou diététiques (voire bio), l'incorporation de produits transformés et, à horizon plus lointain, la chimie verte.

Chacun d'entre-eux revendique 10 à 20 projets en cours ou à l'étude avec un potentiel entre 0,5 et 2 tonnes par projet, soit un potentiel de production supplémentaire autour de 15 à 20 t/an (avec des extrêmes à 5 et 40 t).
Selon ces projections, la production française serait amenée à doubler d'ici 2 à 3 ans. La disparition de la prime dans l'évolution tarifaire 2015-2016 remet en cause ce rythme de développement de ces couplages.

4.2.3. Vers des unités algoindustrielles ?

Dans le même temps, des projets plus importants sont ou ont été à l'étude, tels que :

- METHANE INVEST : 3000m² de serres : 8 t de spiruline prévues
- ALGHODIS: 2000m² de serres avec PBR et bassin: 5 à 7 t de spiruline prévues

Certains autres auraient une dimension résolument industrielle. Sans avoir une orientation première sur la spiruline, ils pourraient cependant être tentés de consacrer une partie de leur surface à la production de spiruline :

- SAMBRE AVENOISE, 10 000m² de serres, 10 à 15 t/an (fin 2104)
- CAPIK 76 FRESNOY-FOLNY 30 000m² de bassin de microalgues (Avril 2014)
- LDC ALGAE 22150 PLOUGUENAST : 55 900 m² de serres verre (Sept 2014) 2 500t/an de microalgues

Ces différents projets ne s'orientent pas tous à priori sur le marché de la spiruline, mais chercheront plutôt à sécuriser leurs débouchés avec des molécules d'intérêt. On peut cependant craindre des perturbations sporadiques, mais importantes vu leur production potentielle.
Au final, nous pouvons identifier 4 modèles qui pourraient nous servir de repères :

- Culture artisanale : <400m²
- Production fermière : de 400 à 2000 m² de bassins, avec une interruption d'hiver
- Production algo-industrielle : au moins 2000 m² de bassins permanents, avec une forte modulation saisonnière
- Production industrielle : plus de 5000 m² de bassins

4.3. Facteurs de réussite du couplage Méthanisation – Spiruline

4.3.1. Structurer la filière

Les producteurs traditionnels de spiruline sont conscients de ces risques et cherchent à structurer leur profession et pour mieux défendre leur orientation « paysanne et alimentaire » :

- Création de la Fédération des Spiruliniers de France (FSF) en 2009
- Formalisation des expérimentations et des échanges d'expériences (Ass. Spiruline et progrès)
- Finalisation en cours du Guide de Bonnes Pratiques Hygiéniques (2014-15)
- Négociation pour la définition d'une certification Bio en France (en cours),
- …

La « spiruline de méthanisation » et ses producteurs devront trouver leur place au sein de la filière.
Plus largement, les producteurs de spiruline devront se positionner par rapport à France MicroAlgues, créée le 22 octobre 2015 et qui se définit comme une « structure associative dédiée à la filière française des microalgues fondée par et a vocation à associer des entreprises de toute la France qui souhaitent développer et valoriser les microalgues dans les marchés de la nutrition, de la santé et des cosmétiques [2]».

2 http://www.pole-trimatec.fr/actualite/creation_de_france_microalgues

4.3.2. Elargissement et substitution des débouchés

Trois chiffres illustrent la problématique du marché de la spiruline (estimation ENEA) :

- Taux de croissance de la production : + 10% par an entre 2008 et 2030 :
- Besoin de l'Aquaculture : +2,3%/an – 40 kt/an
- Potentielle de l'Alimentation animale : 531 kt

Selon ces estimations, les volumes de production et de consommation sont appelés à croître de façon très importantes.

Le marché de la spituline est en croissance d'environ 4% par an, et porteur au travers de nouveaux débouchés industriels (Etude « Potentiel Algal 2030 »).

Bien que souffrant de fortes incertitudes, la production française à destination de la production alimentaire est estimée à environ 20 t/an qui représenterait 10% de la consommation. Il y aurait donc **à minima un potentiel lié à la substitution des importations**. La condition est d'être compétitif en termes de coûts de production face à des produits originaires sur des fermes industrielles et/ou dans des pays à bas coût de main d'œuvre (Chine, Inde, ..) mais à faible niveau de qualité (culture en plein air).

La multiplication des unités couplées entrainera l'augmentation rapide de la production. Le taux de croissance devrait passer de 10% par an à 30 à 50%. **A ce niveau, il y a une rupture de rythme.**

Le marché en algues entières absorbe la croissance de la production. La question est de savoir si il peut se développer 5 fois plus vite qu'aujourd'hui grâce à une offre mieux structurée, mais en maintenant un niveau de marges suffisant. Sauf nouveaux débouchés, il y a un risque de saturation et donc de déstabilisation du marché actuel de la spiruline séchée.

Selon l'étude « Potentiel algal en 2030 », des débouchés pourraient exister, mais selon des filières qui restent à construire pour fiabiliser les procédés et sécuriser des valorisations. La consommation fourragère représente les volumes importants, mais les fabricants d'aliments ont l'habitude de faire un sourcing international, de faire des substitutions de ressources en fonction du prix. Les coûts de production actuels devraient sans doute être divisés par 10 pour accéder de façon durable à ce marché.

Positionner une offre alimentaire française à destination industrielle exige des volumes homogènes et importants et de pouvoir faire valoir l'Origine France pour faire accepter un prix d'achat plus élevé.
La mise en place d'unités plus importantes ou de réseaux peut permettre de répondre aux exigences d'industriels en termes de volumes et de régularité de la production. Le couplage peut être l'opportunité de développer une filière intéressante, mais avec le risque de « créer une bulle » déstabilisatrice au regard du rythme de développement à court terme. Un moyen de limiter ces risques est **d'encourager la différenciation des modèles Modes de Production – Marchés.**

Parions que nous serons rapidement amenés à parler de spirulineS au pluriel pour affirmer les différences origines.

4.3.3. Accompagner l'apprentissage d'un 3ème métier

A court terme, les nouveaux spiruliniers devraient être confrontés à des choix de positionnement, parmi lesquels : quels débouchés pour leur spiruline? Quels degrés d'intensification ? Avec quels niveaux d'investissement ? Et quelles parts de risques ?

La construction du projet doit être l'occasion de répondre à ces questions. La difficulté est d'être clair sur ses compétences et le niveau d'implication souhaité, d'une part, et de partir avec des hypothèses ou des perspectives réalistes, d'autre part. De ce point de vue, on ne peut que déplorer le manque de références clairement établies et reproductibles.

Enfin, une exploitation performante exigera des fonctions dédiées avec du personnel qualifié voire spécialisé.

L'apprentissage de ce 3ème métier représente un investissement significatif. Il se fera en parallèle de la montée en puissance de l'unité de méthanisation. Il se double d'une part de risques et d'incertitudes que le porteur de projet devra être à même de gérer et d'assumer. Cette étude doit permettre de définir l'équilibre entre l'investissement financier et humain sur la méthanisation et sur la spiruline.

4.3.4. Intérêts et contraintes du couplage

Vu du méthaniseur avec cogénération	Vu du spirulinier
⊕ Valorisation de la chaleur	⊕ Etendre la période de production grâce à la chaleur disponible
⊕ Obtention de la prime d'efficacité énergétique ou d'un complément de revenu	⊕ Augmenter la productivité du travail et l'amortissement des équipements
⊕ Développement et diversification de l'activité	⊕ Intensifier la production
⊕ Création d'emploi	⊕ Spécialiser les fonctions commerciales en s'appuyant sur les apports de spirulinier-méthaniseur
⊕ Marché de niche à haute valeur ajoutée avec un fort potentiel de développement	
⊕ Originalité / exemplarité du projet	
⊖ Un investissement supplémentaire important	⊖ Trouver des débouchés
⊖ 3e métier - apprentissage	⊖ Temps de travail
⊖ Gérer les contraintes sanitaires de la spiruline	⊖ Pic saisonnier accentué
⊖ Nécessité de s'impliquer dans la commercialisation ou de la déléguer à un tiers	⊖ Conflit entre les différents acteurs de la filière (spiruline traditionnelle contre méthanisation)
⊖ Incertitude sur la pérennité de l'exploitation de spiruline	⊖ Payer tout ou partie de la chaleur

Tableau 9 : Intérêts et contraintes du couplage Méthanisation-Spiruline du point de vue du méthaniseur et du spirulinier.

4.3.5. La spiruline, une histoire renouvelée du maraichage hors-sol ?

En France, la spiruline est aujourd'hui une production fermière à petite échelle qui valorise l'expérience, l'empirisme et le partage de bonnes pratiques. Cette production se fait la plupart du temps sous abris froids (tunnels ou serres plastique non chauffés).

Le couplage avec la méthanisation permet de lever le facteur limitant qu'est la chaleur pour une culture d'origine tropicale. Elle nécessite le développement d'abris chauffés (plastique ou serres verres) ce qui ouvre la question de l'efficacité énergétique exigée.

Le couplage conduit à une remontée vers le nord de la France, où sont identifiées le plus grand nombre de projet de méthanisation à la ferme.

Ce 1er pas incite à lever progressivement les facteurs limitants (lumière, enrichissement en CO^2..). En poussant au bout la logique, ces nouvelles conditions de culture seront à terme le pendant des cultures hydroponiques de salades ou de tomates.

Mais, comme pour ces légumes frais, se pose la question de la qualité, de la saisonnalité et de la naturalité, d'où la segmentation des consommateurs potentiels et une différenciation des prix, avec une bataille autour des signes de qualité si chacun ne trouve pas spontanément sa place.

Au final, il faut trouver le bon équilibre entre intensification – investissement –productivité et prix de vente. En 1ère approche, comme pour beaucoup de productions, plusieurs équilibres sont envisageables.

Ce processus pourrait s'apparenter à celui observé pour d'autres légumes :
« La production de légumes d'une région répond maintenant à de nouveaux critères comme le niveau d'équipement en installations spécialisées ou encore l'organisation de producteurs en groupement, acteurs de la filière aptes à accompagner le développement à travers l'évolution des équipements, la formation des exploitants, l'assistance administrative et technique ou encore les liens tissés avec les réseaux de commercialisation. Ainsi, les cultures de quelques légumes phares comme la tomate, la carotte ou la fraise ont connu de véritables migrations géographiques. « in Agreste Conjoncture Synthèses n° 2015/260 »1989-2013 : concentration et relocalisation des productions légumières françaises ».

4.3.6. Quelle efficacité énergétique souhaite-t-on ? Que vaut la chaleur ?

Le couplage Méthanisation Spiruline est d'autant plus intéressant que la chaleur est peu valorisée et que l'on dispose d'un foncier adapté (plat et non ombragé).

La révision tarifaire en cours sera déterminante sur la forme des projets et le rythme de développement de la production de spiruline.
La première motivation des porteurs de projets tient à la réussite de leur projet de méthanisation. La spiruline est un moyen de sécuriser la prime d'efficacité énergétique. Si elle disparait, il y a fort à parier que nombre de projets de spiruline seront reportés voire abandonnés. Les méthaniseurs préfèreront ne pas investir davantage et se concentrer sur la maitrise de leur unité de méthanisation, tout au moins dans un premier temps.

Pour les convaincre de poursuivre leurs projets de spiruline, ils seront sans doute plus exigeants sur les performances attendues et les résultats financiers.
Certains souhaiteront valoriser leur chaleur, mais chercheront à la vendre ou en laisseront la libre utilisation à un producteur de spiruline, charge à lui de financer le raccordement et l'investissement du réseau de chaleur.
La moindre dépendance des méthaniseurs vis-à-vis de la prime chaleur va se traduire par des exigences accrues par rapport à la spiruline.

PARTIE 2 : ÉTUDE DE FAISABILITÉ TECHNIQUE, ÉCONOMIQUE ET HUMAINE

1. Faisabilité technique du modèle méthanisation à la ferme et spiruline

L'étude de faisabilité doit dimensionner techniquement une installation, puis évaluer sa pertinence économique. Pour se faire les hypothèses doivent être chiffrées. Cette étape est aussi un moyen d'identifier les seuils critiques techniques et économiques par des simulations.

1.1. Exigences physiologiques de la spiruline

1.1.1. Ensemencement, Développement, Maintien, Déclin

En milieu naturel, une colonie de spiruline se développe selon 4 phases : ensemencement ou colonisation, développement, maintien, déclin.

1. Phase de latence :
La phase de latence correspond à la période où le microorganisme s'adapte au milieu, la vitesse de croissance durant cette période est quasi nulle.

2. Phase exponentielle :
C'est la phase où la vitesse de croissance est à son maximum et est constante. Les microorganismes se multiplient et la mortalité est faible.

3. Phase stationnaire :
Durant cette phase, la capacité du milieu est atteinte, la croissance est nulle, le taux de reproduction est égal au taux de mortalité.

4. Phase de déclin :
Les microorganismes meurent et ne se reproduisent plus.

En culture, l'objectif est de lever les facteurs limitants pour optimiser la phase de développement, puis de récolter sans prolonger la phase stationnaire pendant laquelle la colonie se maintient.

Selon les installations, plusieurs stratégies sont envisageables : un prélèvement en continu ou un fonctionnement en discontinu (selon les saisons ou « par bande »), voire un mixte avec la préparation des colonies souches en continu avant un ensemencement des bassins de production, selon la saison.

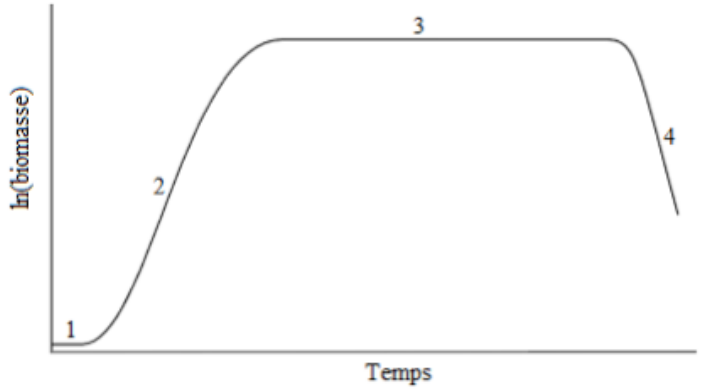


Figure 9 : Les phases de croissance des microorganismes (D'après FAO,1996)

1.1.2. Rendement saisonnier limité par la luminosité

La productivité de la spiruline est liée à plusieurs facteurs, la température du milieu de culture, et nous avons basé tous nos calculs sur un maintien d'une eau à 35°C soit un milieu optimal. Un autre facteur clé est la luminosité pour assurer la photosynthèse.
De nombreuses études scientifiques ont été publiées sur ce sujet mais toujours en bassin non chauffés et nous avons retenu celle de Carlos Jiménez, Belén R Cossí o, Diego Labellab et F Xavier Niella « The Feasibility of industrial production of Spirulina (Arthrospira) in Southern Spain" qui serait la moins éloigné de nos latitudes et longitudes.

Voici la courbe décrite dans leur étude qui se situe dans le Sud de l'Espagne

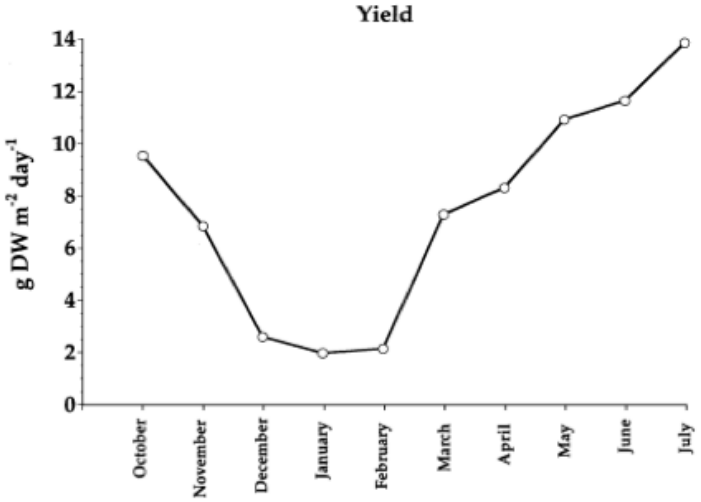


Figure 10 : Rendements observés au Sud de l'Espagne pour la production de spiruline

Aujourd'hui de nombreuses références sont également disponibles, dont celles du logiciel SPIRPAC-F, construit par Mr Jourdan (membre du comité technique) qui permet de définir un potentiel de production selon la température, la luminosité et de nombreux autres facteurs.

1.1.3. Récolte et séchage

La spiruline fait partie des « grandes » microalgues. Le mode de récolte privilégié est la filtration, car plus simple et moins énergivore que les autres. Elle est rincée, le liquide pouvant être recyclé dans les bassins de production.
La spiruline récoltée est pressée, extrudée en filaments, puis séchée en étuve. Elle peut être conditionnée en paillettes, en vermicelle, ou en comprimés selon sa destination.

1.2. Conduite de la culture

1.2.1. Les différentes souches de spiruline

Arthosira est une cyanobactérie qui à la particularité de se développer sous forme de filaments en spirale, d'où son nom. Il en existe plusieurs souches (espèce) dont les deux plus fréquentes sont Spirulina platensis et Sp. Maxima, elles-mêmes déclinées en plusieurs souches selon leur origines géographiques.

En France, les producteurs exploitent plusieurs souches seules mais aussi en mélange plus ou moins contrôlé.

Les différents lieux d'approvisionnement
Il existe différentes façons d'obtenir une souche de spiruline : on peut soit s'adresser à une banque de microalgue : Nous pouvons citer par exemple :

- **Algobank de Caen :** Deux souches de spirulina maxima sont disponibles, ce sont des spirulines se développant à forte salinité (proche de celle de l'eau de mer). Elle a un gout plus prononcé de poisson que spirulina platensis qui provient plus des terres en Afrique (comme la tribu tchadienne).
- **NCMB, Bigelow Institute :** https://ncma.bigelow.org/products/algae/ Une seule souche de type spirulina y a été déposé. Finalement, quasiment aucune étude n'a été réalisée hormis le brin ARN16S qui est là pour la caractériser.
- **Institut Pasteur :** L'institut pasteur possède une collection de spirulina platensis (7 au total). Ces souches ne sont disponibles depuis 2000 que pour des aspects recherche. Muriel Gugger est la curatrice.
- **Institut de physiologie des Plantes de Timiryazev :** Une publication de Musolovilishi montre que la souche utilisée par cette institution a une très forte teneur en fer.
- **CCAP (Culture Collection of Algae and Protozoa) :** Plusieurs souches de spiruline y sont déposées. http://www.ccap.ac.uk/results.php?mode=basic&strainsearch=spirulina mais aucune n'est de de type platensis, il y en a en revanche une de type maxima.
- **UTEX (University of Texas) :** Une souche de spirulina platensis se développant à 10g/l http://web.biosci.utexas.edu/utex/algaeDetail.aspx?algaeID=4806 est disponible dans cette collection.
- **Spiruliniers de France :** La Fédération des Spiruliniers de France est une association solidaire qui dispose de leur souche de spiruline au CFPPA de Hyères.

Ou s'adresser à des entreprises productrices : Nous pouvons citer AlphaBiotech, IGV Gmbh, Université Ben Gurion du Negev…, ainsi qu'à la Fédération des Spiruliniers de France.

1.2.2. Conditions de culture

Les données ci-dessous visent à poser quelques références et à illustrer les exigences de la culture. Elles peuvent varier en fonction des souches exploitées, des lieux et modes de production.

Force est de constater que tous les auteurs et les producteurs ne sont pas tous du même avis sur les exigences de la culture.

Trois conditions fortes sont à réunir pour faire prospérer de la spiruline : de la chaleur, entre 28 et 37° C, une eau avec un pH élevé (entre 9,5 et 10,4) et de la luminosité, mais en alternant les phases d'obscurité et de lumière.

Sous nos régions tempérées, l'enjeu est de s'approcher le plus possible de ces conditions naturelles et de trouver le bon équilibre entre ces 3 facteurs.

	Optimum	Mini	Max	Remarques
Température	35°C	18°C = arrêt de la croissance 12° = déclin de la colonie	42°C, létale vers 45°C	Culture saisonnière en zone tempérée
pH	9,5 à 10,4	Inf. 8	Sup. 11	
Lumière		Arrêt de la production	Photoinhibition possible sur trop forte exposition	L'alternance Jour-nuit nécessaire pour avoir une production des pigments photosynthétiques
O2	10 mg/l	2,1 104 kJ/m²	500%	Une surconcentration entraine une inhibition
Nutriments				

Tableau 10 : Aperçu des principales exigences de culture de la spiruline

Alimentation en CO^2
L'aliment principal de la spiruline est le carbone dont la source normale est le gaz carbonique de l'air. La méthode de culture la plus simple, où la nourriture carbonée vient de l'air (qui contient du gaz carbonique, mais extrêmement dilué), présente une productivité modeste, mais qui, exprimée en protéines, reste très supérieure à celle des meilleures cultures agricoles ou horticoles, et qui, exprimée en calories alimentaires, leur est équivalente, et ceci en consommant mois d'eau.
L'enrichissement en CO^2, puis en éléments minéraux apparait nécessaire pour optimiser la productivité.
Mais il est aussi possible d'augmenter la productivité par beau temps, de la faire passer par exemple à 12 ou 15, voire 20 g/jour/m^2, si l'agitation est suffisante, en injectant du gaz carbonique pur directement dans la culture. Il faut faire attention à l'acidification du milieu. La consommation de CO^2 est de l'ordre de 2 kg/kg de spiruline. Le gaz est amené sous un morceau de film plastique tendu sur un cadre flottant sur le bassin, formant comme une «cloche» ou une «tente» quand le gaz s'y accumule. La surface du cadre flottant doit être de 3 % de la surface du bassin. On règle le débit de gaz pour ne pas en perdre trop par les bords du cadre. Il est nécessaire d'éviter l'entrée de bulles d'air et purger une fois par jour l'oxygène qui s'accumule sous le plastique. On a intérêt à faire buller le gaz au fond du bassin à travers un diffuseur donnant des bulles très fines, ou même au bas d'un puits pratiqué au fond du bassin (si la hauteur de barbotage est supérieure à 30 cm on peut se passer de la cloche flottante en film plastique). A noter qu'on obtient un meilleur rendement d'absorption du CO^2 la nuit en raison de l'absence de dégagement d'oxygène dans le milieu de culture. Une autre façon d'injecter le gaz est de l'introduire dans un venturi à la sortie d'une pompe et de faire parcourir à l'émulsion un ou deux mètres de tuyau.

Au lieu de gaz carbonique on peut utiliser du bicarbonate, mais alors il faudra pratiquer des purges pour maintenir la salinité à un niveau acceptable (densité voisine de 1015 g/l) et rajouter les éléments du milieu de culture (autres que le bicarbonate) correspondant au volume purgé. Il faut environ 2 à 6 kg de bicarbonate par kg de spiruline, selon la productivité souhaitée. Cette méthode est très pratique ; elle évite notamment d'avoir à surveiller le Ph, mais nécessite un entretien important et le coût du bicarbonate est rapidement supérieur ou égal à celui du gaz.
La consommation étant de 2 t de CO^2 pour une tonne produite.

1.2.3. Inhibitions et facteurs limitants

La température, le pH et la concentration en oxygène constituent 3 facteurs d'inhibition absolue et par suite, l'arrêt de la croissance et le déclin de la colonie. La température et le pH sont des caractéristiques du milieu de culture. La concentration en oxygène résulte de l'activité photosynthétique (captage du CO_2 et relargage de O_2). Plus la culture est active, plus la production d'oxygène est importante.

Les facteurs d'inhibition de la croissance changent avec les saisons ; en hiver, la température bloque le développement de la spiruline. En été, la lumière devient le facteur limitant, à condition que la température ne soit pas trop élevée. Dans ce cas, il y a un phénomène de photoinhibition qui bloque la photosynthèse. Il faut donc ajuster la lumière reçue par chaque spiruline. C'est une des fonctions du brassage. Il facilitera aussi les échanges gazeux.
Le mélange va limiter la stratification des algues et homogénéiser la composition du milieu et donc l'accès aux nutriments.

Le suivi et l'ajustement du milieu de culture sont nécessaires. En zone tempérée, la température, l'ensoleillement et donc l'irradiation vont fortement varier selon les saisons et la latitude ; la production de spiruline et la consommation de nutriments en conséquence.
Une autre exigence est de compenser l'évaporation de l'eau, ce qui exige d'avoir une ressource en eau de qualité stable et disponible (autour de 2,5 m^3/kg MS - Site Domaine Algal, SCIRCEE).

Une complexité supplémentaire est de gérer les transitions saisonnières avec des interactions entre les différents facteurs qui ne sont pas complètement connus, d'où une capacité d'observation de la culture pour juger du comportement de la colonie.

1.2.4. Contaminations, couverture des bassins et mort subite

De par son milieu de culture très alcalin, la spiruline est protégée des contaminations de la plupart des autres algues ou d'autres micro-organismes. Ce milieu particulier rend la culture accessible et moins difficile que celle d'autres microalgues.

Cependant, la spiruline est un organisme chélateur, qui aura tendance à accumuler les métaux lourds, si le milieu et notamment l'eau en fournissent.

Enfin, il faudra faire attention aux contaminations externes après récoltes, notamment d'origines humaines ou animales, avec les précautions exigées pour toutes productions alimentaires.

1.2.5. Micronutriments et orientation du métabolisme

Pour se développer, la spiruline a aussi besoin de micronutriments, essentiellement des sels minéraux tels que le sélénium, le zinc, le cuivre. L'eau peut y concourir, mais sur des cultures intensives, le recours à des enrichissements extérieurs apparait nécessaire, ce qui est techniquement accessible, mais représente un coût.
Observons que certains producteurs font de l'enrichissement un argument commercial, puisque la spiruline va concentrer ces produits (AlphaBiotech pour le magnésium, Proselem- laboratoire VitaApi pour le sélénium, par exemple).

De même, la longueur d'onde de la lumière va orienter la production des pigments nécessaires au métabolisme et par la suite dans les produits ou les extraits de spiruline. La spiruline produite en période de faible luminosité est plus riche en phycocyanine.

Plus généralement, les conditions du milieu et les stress auront des impacts sur la qualité du produit. La maitrise des différents facteurs en interaction tient plus du savoir-faire et de l'expérience de chacun que d'une connaissance fine et bien formalisée.

1.2.6. Pilotage de la chaleur

Régulation saisonnière : Maintenir la bonne température selon les saisons

La chaleur de la cogénération va venir chauffer les bassins en complément du rayonnement solaire moins les pertes dans l'atmosphère.
Selon la disponibilité en chaleur, il va donc falloir ajuster le volume d'eau à chauffer selon la saison, et donc ajuster la surface des bassins. Deux conduites de la chaleur sont envisageables :

- soit un ajustement de la température en maintenant la superficie en production,
- soit un ajustement de la superficie des basins en production à température proche de l'optimale.

Eviter les chocs thermiques

La spiruline est sensible aux brusques variations de température. De plus, si le milieu se refroidit trop, la spiruline n'est plus à même d'exploiter toute lumière disponible. Ces exigences plaident pour la mise en place d'une régulation intrajournalière grâce à un stockage tampon d'eau chaude (ou open buffer).

Cependant, il apparait intéressant de laisser la température baisser pendant la nuit de 3 à 5°C pour ralentir son métabolisme et la libération d'oxygène. Nos simulations illustrent l'intérêt de ce type de solutions. Elles plaident pour un pilotage fin des températures adaptées à chaque site.

Influence de la température sur le rendement

La spiruline est une algue tropicale dont le développement est sensible à la température. On peut tirer de la thèse de Mr Zarrouk[3] la courbe de productivité suivante, avec un optimum autour de 35°C et des températures létales en deçà de 12°C et de 42°C.

En été, les besoins de chauffage peuvent être très limités. Pour éviter les inhibitions, les bassins devront au contraire être ventilés pour être refroidis. En hiver, il faudra préserver les colonies de température excessivement froides.

3 « Contribution à l'étude d'une cyanophycée. Influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de Spirulina maxima Geitler »

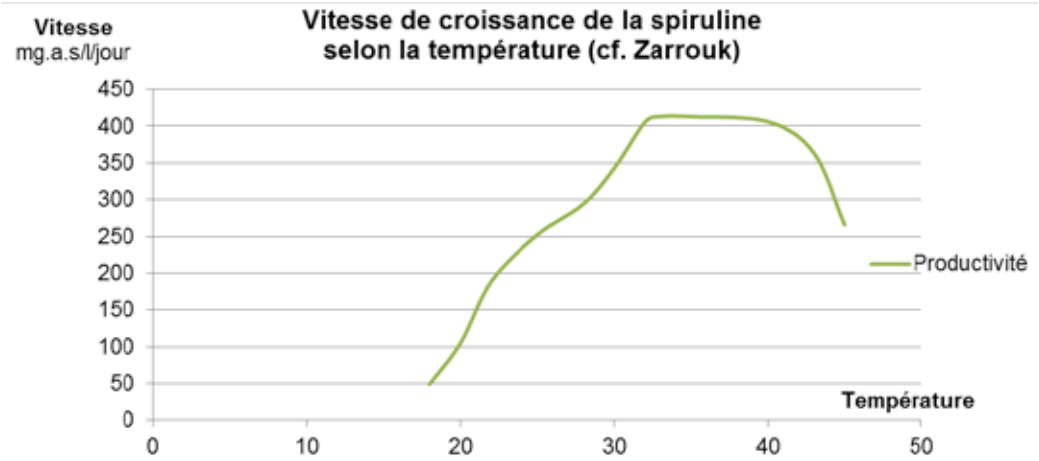


Figure 11 : Vitesse de croissance de la spiruline selon la température

Bien entendu cette donnée peut être légèrement différente selon la souche de spiruline, il sera important de réaliser des essais dans votre laboratoire en fonction de la souche utilisée, mais les variations seront normalement assez mineures.

Cette courbe permet de définir que dès 22°C la productivité d'un bassin est égale à la moitié d'un bassin chauffé à 33°C.

1.2.7. Quels sous-produits de la méthanisation pour alimenter la spiruline ?

En plus de l'énergie, la méthanisation produit du CO^2 et des digestats qui contiennent des matières minérales (N-P-K) nécessaires à la croissance des plantes. En première approche, il est tentant d'envisager de les valoriser pour la culture d'algues.

CO_2

Un des inconvénients majeurs est l'impossibilité de mettre les fumées de combustion directement dans la serre, comme les serristes en ont l'habitude avec les chaudières. La présence de CO_2 de Nox nécessite des traitements préalables de purification très coûteux.

Les fumées de moteur des chaudières fonctionnant au gaz naturel sont injectées dans les serres agricoles pour augmenter le taux de CO_2 à 1000 ppm et jusqu'à 1500 ppm afin de favoriser la photosynthèse et la croissance des plantes.

L'Institut National de Recherche et de Sécurité indique dans son document « Valeur limite d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France » les teneurs en ppm autorisés :

	VME - Valeur limite de moyenne d'exposition	n° de la fiche technologique	année
Unité	ppm		
CO_2	5 000		2007
CO	50	47	1985
NO	25	133	1987

Tableau 11 : Valeur limite d'exposition professionnelle aux agents chimiques en france - INRS 2011

Alors que l'arrêté du 8 décembre 2011 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique n°2910-C de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement (enregistrement) donne comme valeur limite 1200mg de CO par m^3 (soit 1047 ppm) et 270 mg de Nox par m3 (soit 132ppm) voire même 525 (256ppm) en cas de moteur dual fuel.

Il est donc impossible de prendre le risque d'une exposition du personnel avec des valeurs qui peuvent être jusqu'à 20 fois supérieures (en CO) aux recommandations de 1985 de l'INRS.

Digestats
Les ressources minérales des digestats seraient à équilibrer chimiquement pour correspondre aux besoins de la spiruline. Surtout, elles sont susceptibles de contenir des microorganismes pathogènes qui pourraient s'avérer dangereux d'utiliser pour une culture à destination de l'alimentation humaine.

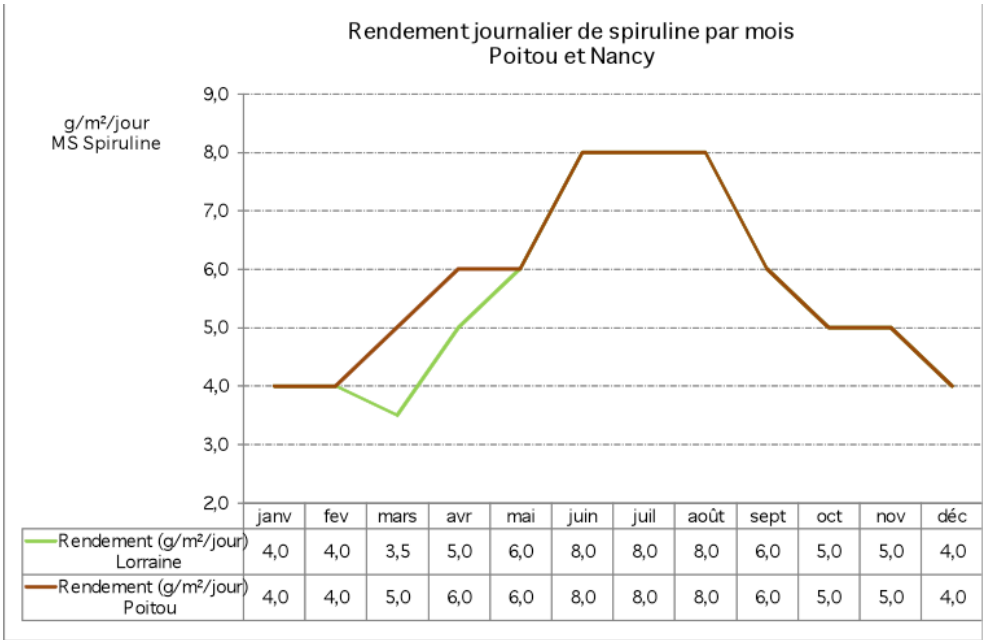
Enfin, le coût et la simplicité de mobilisation de ces nutriments achetés rendent peu compétitifs la valorisation après purification des ressources annexes de la méthanisation.
Sans écarter définitivement ces perspectives, il ne semble pas opportun de les retenir et de complexifier ainsi les schémas de fonctionnement.

1.3. Hypothèses de rendements

La bibliographie présentée auparavant prend en compte l'influence de la luminosité sur la production de spiruline. Mais pour définir des hypothèses de rendement réalistes, il est nécessaire de prendre en compte les aléas qui vont amputer le rendement théorique. Nous pouvons citer :

- La perte du rendement quantique de la photosynthèse
- La perte de biomasse pendant les périodes d'obscurité
- Les aléas liés à la livraison de chaleur par la méthanisation
- Les possibles contaminations des bassins de production
- ……..

A partir des données des chapitres 1.1.2 et 1.2.6, nous pouvons retenir les valeurs suivantes qui ont été validées par le Comité technique.



	janv	fev	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
Rendement (g/m²/jour) Lorraine	4,0	4,0	3,5	5,0	6,0	8,0	8,0	8,0	6,0	5,0	5,0	4,0
Rendement (g/m²/jour) Poitou	4,0	4,0	5,0	6,0	6,0	8,0	8,0	8,0	6,0	5,0	5,0	4,0

En rouge, le rayonnement limite le rendement.
En vert, le décrochage est accentué par l'impact thermique

Figure 12 : Hypothèses de rendement mois par mois

En Lorraine, nous avons pris en compte l'étude citée au paragraphe 1.2.2. Nous avons dû minorer la productivité de deux mois du fait d'une température légèrement plus basse des bassins que l'optimum pendant les mois de Mars et Avril (soit respectivement 3,5 g/m²/jour et 5 g/m²/jour contre 5 et 6 dans le Poitou, en rouge sur le graphe).

Les hypothèses de travail excluaient l'utilisation de lumière artificielle. Un porteur de projet pourrait envisager cette solution, mais il est vraiment nécessaire de faire des études préalables avant d'explorer cette piste.

2. Principes de fonctionnement et choix des unités Méthanisation-Spiruline

2.1. Choix retenus

2.1.1.Livraison de la chaleur

Une unité de cogénération a tendance à fonctionner entre 8 000 et 8 200 heures par an sur les 8760h que comptent une année. Il existe des périodes d'arrêt obligatoires (entretien), d'autres aléatoires (pannes). Le mode de gestion est lui aussi différent entre chaque exploitant, certains préférant fonctionner uniquement à plein régime et arrêter le moteur quelques heures par jour ou tous les 48 ou 72 heures….
Devant l'ensemble de ces comportements différents et aléatoires, nous avons considéré une livraison de chaleur constante, tout en sachant que cela ne sera pas le cas dans la réalité. Il sera important de prendre en compte le mode d'exploitation prévu, du dimensionnement du moteur en rapport de la production de gaz prévu (on voit de nombreux projets avec des moteurs mal dimensionnés, et généralement, plutôt surdimensionnés) pour affiner vos calculs en fonction des paramètres que vous aurez choisis pour l'installation.

2.1.2. Caractéristiques des couplages

Les 2 modèles d'installation retenus par le Comité technique correspondent à des puissances de cogénération de 105 et 400 kWe électriques avec une utilisation totale de la chaleur produite pour chauffer des bassins couverts sous serre plastique (et le digesteur).

Pour les données météorologiques, nous avons considéré que l'installation de 105 kWe était localisée à Poitiers en Poitou-Charentes sous un climat océanique et celle de 400 kWe à Nancy en Lorraine où les hivers sont plus rigoureux et un climat continental.
Nous avons pris comme hypothèse que la chaleur issue de l'unité de cogénération de méthanisation est issue des moteurs suivants :

- Agenitor 212 qui produit 400 kWe et qui délivre 445 kWth.
- CGC-0105MA-080-DG-50-500 qui produit 105 kWe pour 128 kWth.

2.2. Fonctionnement thermique et démarche de calcul

Apports et déperdition de chaleur dans les serres
La serre reçoit de la chaleur du soleil et de la méthanisation. Dans le même temps, elle perd de l'énergie par

- convection
- rayonnement (eau/serre)
- évaporation de l'eau du bassin
- rayonnement (serre/extérieur).

La nuit, il n'y a pas d'apport solaire et la méthanisation doit compenser les déperditions de chaleur pour maintenir la température de l'eau aussi proche de 35°C.
Les calculs de dimensionnement ont pour but d'optimiser l'utilisation de la chaleur selon les saisons.

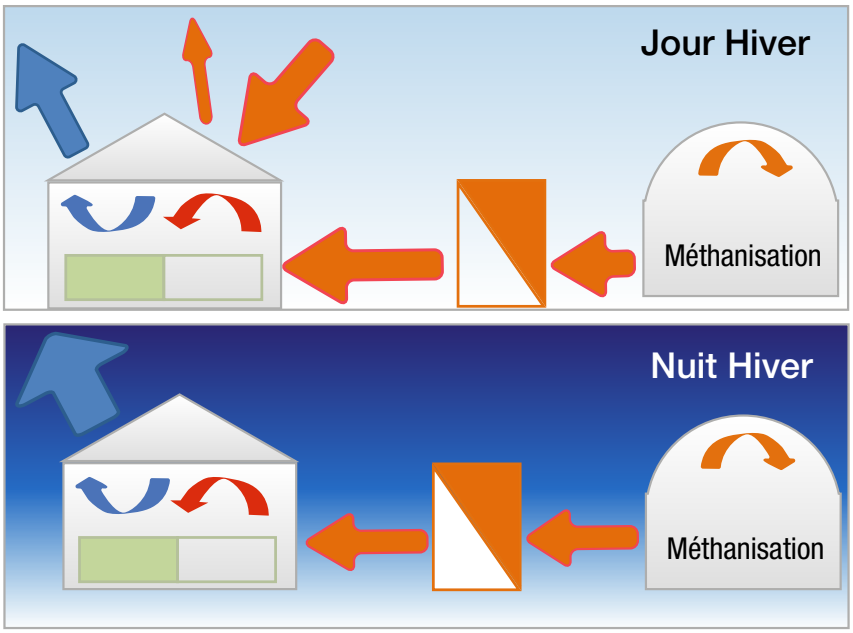
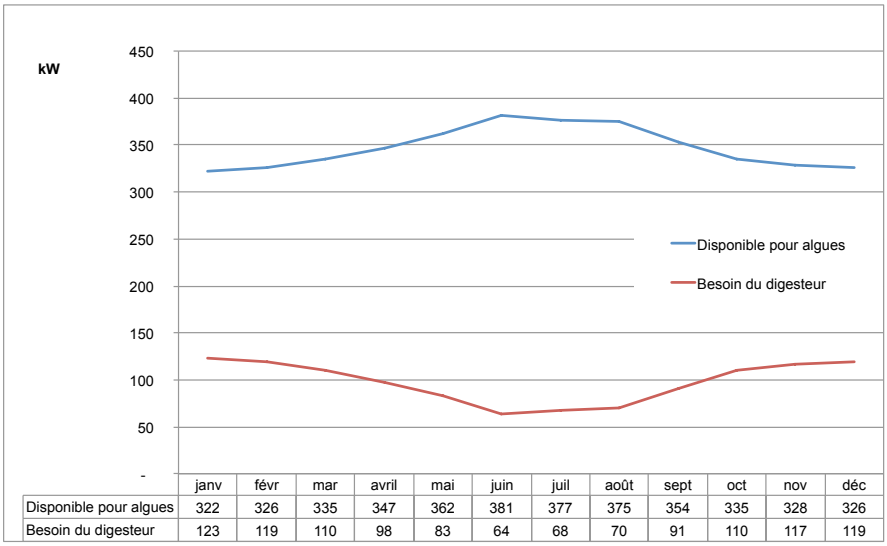


Figure 13 : Circulation de la chaleur au sein du couplage méthanisation -spiruline Jour Nuit en hiver (la taille des flèches donnent une illustration de l'importance des flux)

Flèche bleu : déperdition de chaleur
Flèche Rouge : apport de chaleur

La cogénération : une production stable, des disponibilités plus fortes en été



	janv	févr	mar	avril	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
Disponible pour algues	322	326	335	347	362	381	377	375	354	335	328	326
Besoin du digesteur	123	119	110	98	83	64	68	70	91	110	117	119

Figure 14 : Puissance thermique disponible par mois sur le projet Lorrain

La production de chaleur par la cogénération est stable (aux arrêts techniques et accidentels près). La disponibilité en chaleur est en revanche plus forte en été, car la consommation pour le chauffage du digesteur et de la biomasse est plus faible.

Choix de la serre
La nature de l'isolation de la serre, verre ou plastique, simple paroi ou double parois, va déterminer l'importance des déperditions de chaleur et de la captation de l'énergie solaire.

Surfaces mises en culture selon les saisons
L'hiver, la chaleur de méthanisation va permettre de maintenir la température au moins à 18°C (Cf. partie 1.1 conditions de culture) pour entretenir la souche et la production. L'équipement de la serre est déterminant. En été, l'apport du soleil est important. Le complément nécessaire de la méthanisation est faible (parfois inutile comme nous le verrons). Il est important de veiller à éviter des surchauffes qui détruiraient la souche ou favoriserait les inhibitions.

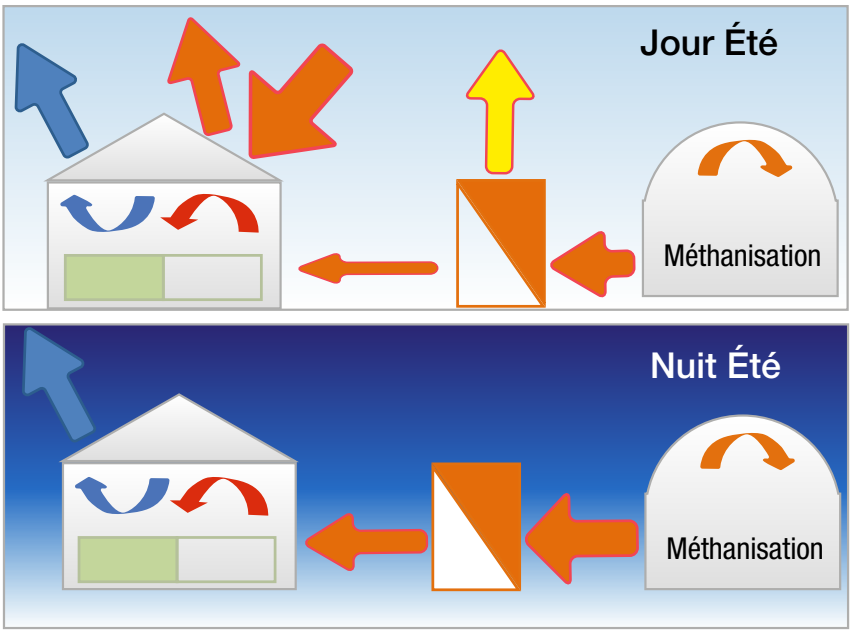
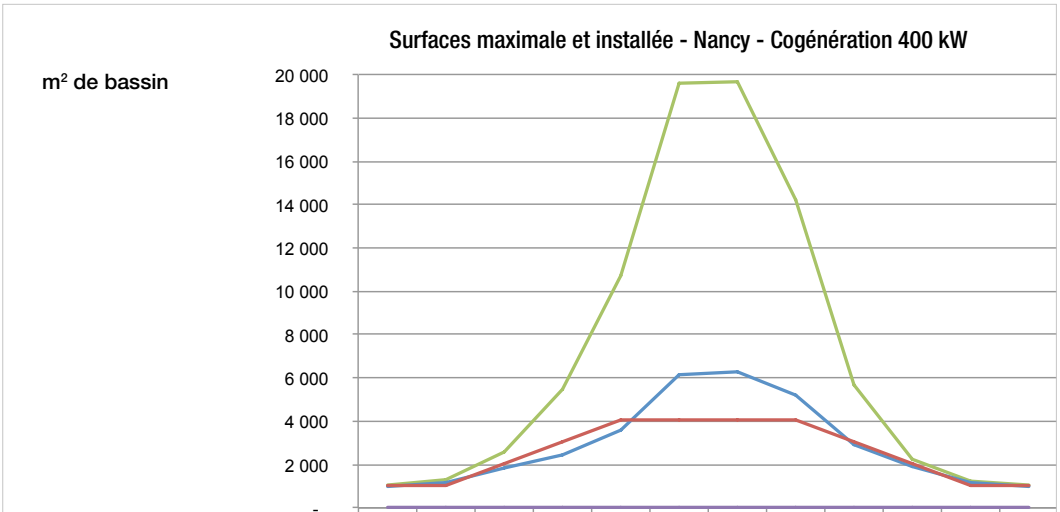


Figure 15 : Circulation de la chaleur au sein du couplage méthanisation -spiruline Jour Nuit en été

La surface pourrait donc être très supérieure en été, si l'on avait capacité à stocker toute la chaleur excédentaire pendant la journée (de l'ordre de 15 fois par rapport à la surface minimale à Nancy). On ne peut pas envisager de mettre en place des équipements qui ne serviraient que quelques semaines en été. De plus, il faut tenir compte du travail nécessaire (même si cette contrainte peut être gérée par des emplois saisonniers). Il faut donc écrêter le potentiel d'été, pour les surfaces soient exploitables au moins 4 mois par an).
Entre ces deux saisons, on va moduler la surface en production pour optimiser l'utilisation de la chaleur.

La contrainte hivernale fixera la surface exploitable minimale en fonction de la chaleur de méthanisation disponible. Selon les situations, il peut cependant être judicieux de s'interroger sur le maintien de la production hivernale.
De même, il est important de calculer l'intérêt d'exploiter une surface plus importante à une température moindre.
La Figure 16 compare la surface installée et des surfaces de bassin sous serre tunnel double paroi, qu'il est possible de chauffer à 33/35°C avec la chaleur disponible mois par mois. La surface au-dessus de la courbe rouge ou bleue correspond à l'énergie solaire qui ne sera pas utilisée.



	janv	fev	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
Surface théorique avec stockage total	1 052	1 276	2 571	5 488	10 734	19 593	19 670	14 229	5 695	2 245	1 216	1 057
Surface théorique de bassin	987	1 186	1 822	2 441	3 599	6 122	6 258	5 221	2 941	1 892	1 139	994
Surface installée de serre	1 056	1 008	2 016	3 024	4 032	4 032	4 032	4 032	3 024	2 016	1 008	1 008
Installée / Possible	93%	118%	90%	81%	89%	152%	155%	129%	97%	94%	113%	99%

Figure 16 : Comparaison des surfaces maximale et installée

On constate qu'au printemps la courbe de la surface installée est légèrement au-dessus du potentiel. Il s'agit d'exploiter au plus tôt ces surfaces quitte à dégrader légèrement le rendement des mois de mars et d'avril en Lorraine.

Dimensionnement opérationnel des 2 projets
Le dimensionnement opérationnel tient compte des dimensions standards des serres et ce qui conduit à des mises en production de bassin (et arrêts) en escalier.

Limitation des pertes de températures nocturnes : Open buffer
Pour aller plus loin, il faut aussi limiter les écarts de température Jour-Nuit. Sans chauffage, la serre se refroidit la nuit, ce qui se répercute sur la croissance de la spiruline. Stocker la chaleur en début d'après-midi pour la restituer la nuit permet de limiter les variations de températures. Chaleur disponible et efficacité énergétique

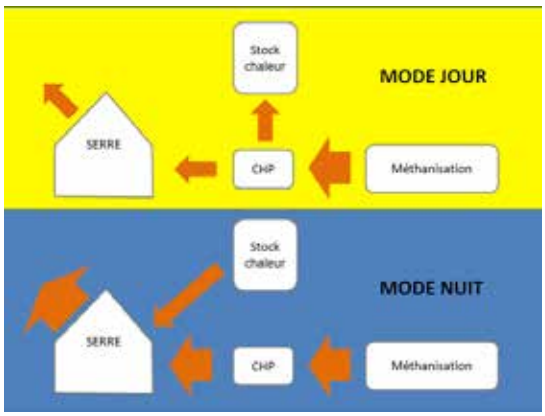
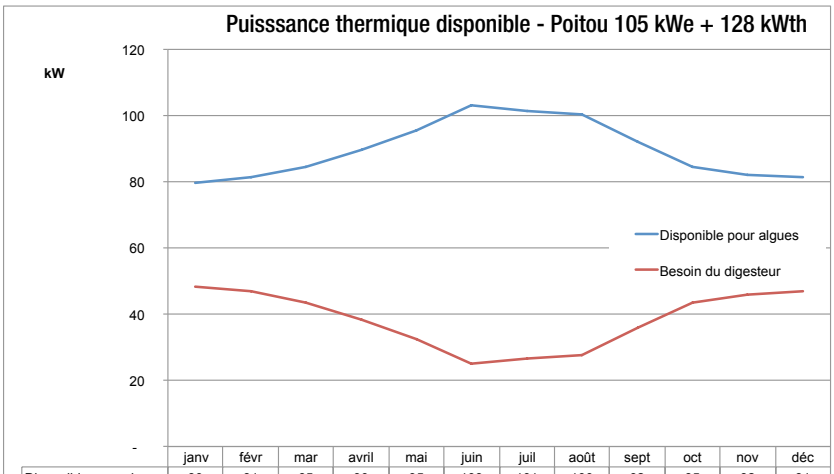


Figure 17 : Fonctionnement du stockage tampon (= Open Buffer, la chaleur disponible en excédent est stockée le jour pour être restituée la nuit)

2.2.1. Deux chaleurs disponibles : soleil et cogénération

La chaleur produite par la cogénération va servir à chauffer le digesteur. L'excédent est affecté à la spiruline (ou à d'autres besoins). Ces flux sont calculés grâce aux modèles de calcul de production et besoin thermique pour la méthanisation. Les valeurs de production et d'autoconsommation par la méthanisation sont une moyenne usuelle pour une unité classique. On en déduit ainsi la part de chaleur disponible pour la culture de microalgues.

L'unité de méthanisation utilise une partie variable de cette chaleur pour son fonctionnement propre. En prenant en compte les données disponibles de la bibliographie nous avons considéré que l'unité de méthanisation de 400 kWe consomme 22% de la chaleur produite par la cogénération, et celle de 105 kWe de 30%. La puissance thermique de référence est respectivement de 445 kWth et 128 kWth. La puissance restante disponible pour la valorisation a donc été calculée pour chaque mois.
Les heures de maintenance ne sont pas comptabilisées ici. Lors de l'arrêt de la cogénération pour maintenance, on considère que le biogaz est envoyé dans une chaudière, ce qui permet le maintien de la livraison de chaleur.
Le tableau et la courbe ci-dessous présentent la puissance moyenne délivrée par la cogénération. Une courbe similaire est présentée page 39 pour le projet lorrain.



	janv	févr	mar	avril	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
Disponible pour algues	80	81	85	90	95	103	101	100	92	85	82	81
Besoin du digesteur	48	47	43	38	33	25	27	28	36	43	46	47

Figure 18 : Puissance thermique disponible - Cogénération 105 kWe - Poitiers

On observe que la simulation prévoit une répartition pseudo-gaussienne avec une fourniture plus importante en été. Cela est cohérent avec la réduction des pertes thermiques de l'unité de méthanisation à cette période.
Le profil de la courbe est le même qu'en Lorraine à la différence que la puissance disponible en Lorraine est en proportion plus importante.

En faisant la différence entre la chaleur produite et la partie autoconsommée pour le digesteur, on en déduit la chaleur de cogénération disponible pour les algues.

2.2.2. Choix du type de serre

Le handicap d'un climat trop froid peut être compensé artificiellement, comme pour tous les végétaux. La construction de bassins sous serre peut être d'autant plus intéressante que cet abri constitue non seulement une protection contre le froid, l'évaporation, et les pollutions que peuvent être les insectes, les poussières et les bactéries… Mais une serre constitue également une protection contre les fortes pluies, qui peuvent faire déborder les bassins et donc provoquer une perte, ou au moins une dilution du milieu de culture.

Type de serre

Il existe plusieurs types de serres de culture, cependant suite à l'enquête réalisée auprès des spiruliniers, il est apparu que la très grande majorité des professionnels utilisent des serres plastique soit tunnel soit de type Venlo.

Nous avons cependant voulu vérifier le bienfondé de cette information d'un point de vue thermique et industriel.
Pour réaliser notre étude thermique nous avons utilisé la littérature et retenu le document : « A dynamic thermal model for heating microalgae incubator ponds using off-gas de H. Shanga, J.A. Scotta, S.H. Shepherdb, G.M. Rossc » ainsi que les données de l'ouvrage du CTIFL « Serres chauffées ».

En se basant sur les données thermiques de Poitiers nous avons réalisé la comparaison des capacités de surface de bassins pour une unité alimentation linéaire de 105 kWe de puissance. Nous avons considéré une perte de 5% au niveau de l'échangeur eau/eau.

En déduisant les apports solaires corrélés au coefficient du facteur de la matière
- Plastique simple : 6,97 W/m²K
- Plastique double paroi : 4,2 W/m²K

kWh/m2/jour	janv	févr	mars	avril	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
Serre plastique Poitou	8,61	8,04	7,06	6,11	4,48	3,43	3,09	3,16	4,76	6,49	7,80	8,58
Plastique double paroi Poitou	7,73	6,86	5,42	4,23	2,98	1,73	1,63	1,77	3,26	5,25	6,91	7,55
Plastique double paroi Lorraine	8,19	7,43	5,83	4,47	3,13	1,91	1,85	2,21	3,76	5,62	7,32	8,06
Impact Double Paroi / Simple Poitou (th)	0,88	1,18	1,64	1,89	1,50	1,70	1,45	1,39	1,50	1,24	0,90	1,04
en %	11%	17%	30%	45%	50%	98%	89%	78%	46%	24%	13%	14%

Tableau 12 : Déperdition moyenne sur une journée en (kWh/m2/jour) selon la région et le type de serres

Le résultat du tableau 12 montre que la serre simple paroi dont la différence de coût d'investissement ne justifie pas son utilisation, tout au moins dans les zones de production envisagées par cette étude.
Nous avons donc continué l'étude sur la version serre tunnel double paroi qui est le modèle vendu à 90% par les serristes (Richel, SVL…) pour les unités de spiruline.
Le résultat du tableau 12 montre que la serre simple paroi dont la différence de coût d'investissement ne justifie pas son utilisation, tout au moins dans les zones de production envisagées par cette étude.
Nous avons donc continué l'étude sur la version serre tunnel double paroi qui est le modèle vendu à 90% par les serristes (Richel, SVL…) pour les unités de spiruline.

Surface théorique de bassin

La différence de besoin de chaleur, vient principalement des différences climatiques (apport solaire et température) entre les deux sites. En divisant la chaleur disponible chaque mois par les valeurs indiquées dans le tableau précédent nous obtenons les surfaces de bassins que l'on peut chauffer chaque mois.

Le calcul réalisé est : puissance délivrée x 24h x 0.95 (pour tenir compte d'un pincement de 5% au niveau de l'échangeur de chaleur) divisée par les besoins thermiques moyen de la serre pour maintenir le bassin à 33/35°C. Le résultat donne un nombre de m² de serres dont la surface permet de recevoir un ou des bassins occupant 75.75% (voir §3.1) de la surface de la serre. Le calcul ci-dessous est celui des périodes sans apport solaire.

Poitou Charentes	janv	févr	mars	avril	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
Plastique double paroi (kWh/m2/jour)	7,73	6,86	5,42	4,23	2,98	1,73	1,63	1,77	3,26	5,25	6,91	7,55
Disponible pour algues (Kw)	80	81	85	90	95	103	101	100	92	85	82	81
Plastique double paroi (m² de bassin)	178	205	270	366	553	1027	1071	981	488	278	205	186
Lorraine	**janv**	**févr**	**mars**	**avril**	**mai**	**juin**	**juil**	**août**	**sept**	**oct**	**nov**	**déc**
Plastique double paroi (kWh/m2/jour)	8,19	7,43	5,83	4,47	3,13	1,91	1,85	2,21	3,76	5,62	7,32	8,06
Disponible pour algues (Kw)	322	326	335	347	362	381	377	375	354	335	328	326
Plastique double paroi (m² de bassin)	679	758	991	1341	2000	3448	3515	2928	1624	1029	774	699

Tableau 13 : Surface de bassins en m²

L'ensemble des entretiens nous avait confirmé cette utilisation de serre plastique, celle-ci se confirme par ce calcul. La productivité d'environ 16% supplémentaire en serre double paroi est cependant intéressante et se justifie pleinement dans les régions les plus froides. Ceci est confirmé par les réalisations en cours où une majorité de réalisation se font sur serre plastique double parois dans l'Ouest et le Nord de la France.

2.2.3. Bilan énergétique et besoin de chauffage

Les échanges thermiques entre l'eau et l'air de la serre, puis entre l'air de la serre et l'extérieur ont été déterminés grâce au calcul de la température d'équilibre dans l'air de la serre. Les données météorologiques obtenues pour Poitiers dans un cas et Nancy pour l'autre ont permis d'évaluer les déperditions thermiques d'une serre en fonction de sa surface via le modèle de calcul ESTHER.
Le flux eau-air intérieur dépend principalement de la géométrie du bassin et de sa surface. Ces informations ont permis de paramétrer le modèle thermique.
La puissance échangée entre les bassins et l'air de la serre doit être suffisamment faible pour que la spiruline en fin de parcours ne dépasse pas une valeur seuil minimale d'entrée en latence.
Les pertes thermiques de la serre vers l'extérieur vont refroidir l'air intérieur de la serre. S'il devient trop froid, la perte bassin-air serre, devient trop importante et la température des algues décroît alors jusqu'à leur entrée en latence / sommeil ou destruction

Explication calculs :

$$\Phi cond_conv(Tin \rightarrow Tp) = \Phi conv(Tp \rightarrow Text) + \Phi rayonnement - \Phi solaire$$

Un équilibre des flux est réalisé au niveau de la paroi extérieure avec :

$$\Phi cond_conv(Tin \rightarrow Tp) = (Tin - Tp) * hserre * Stotal_parois$$

$$\Phi conv(Tp \rightarrow Text) = (Tp - Text) * he * Stotal_parois$$

$$\Phi rayonnement = \epsilon * \sigma * (Tp^4 - Tciel^4) * Stoit$$

Avec Tin fixée en fonction de la température désirée dans la serre, Tparoi en est déduit.

Les pertes thermiques, qui correspondent aux besoins de la serre, sont ensuite calculées. Ainsi la serre doit être dimensionnée pour que les pertes vers l'extérieur ne soient pas supérieures à la puissance disponible. Il est donc nécessaire de bien séparer chaque bassin dans sa propre serre ou de prévoir une séparation qui peut être amovible entre les bassins.

Pour l'ensemble des calculs du moteur de 105 kWe on considère des pertes thermiques dans des conditions où les températures horaires sont moyennées sur un mois. Le mois le plus froid est le mois de Janvier, les températures moyennes sur ce mois nous donnent un profil de température au cours d'une journée à Poitiers :

C'est sur ce profil de température qu'a été effectué le dimensionnement. Lorsque les conditions seront plus froides que celle d'une journée type, il sera possible et conseillé de faire appel à un chauffage d'appoint.

Pour l'unité de 400 kWe on considère les températures de Nancy.

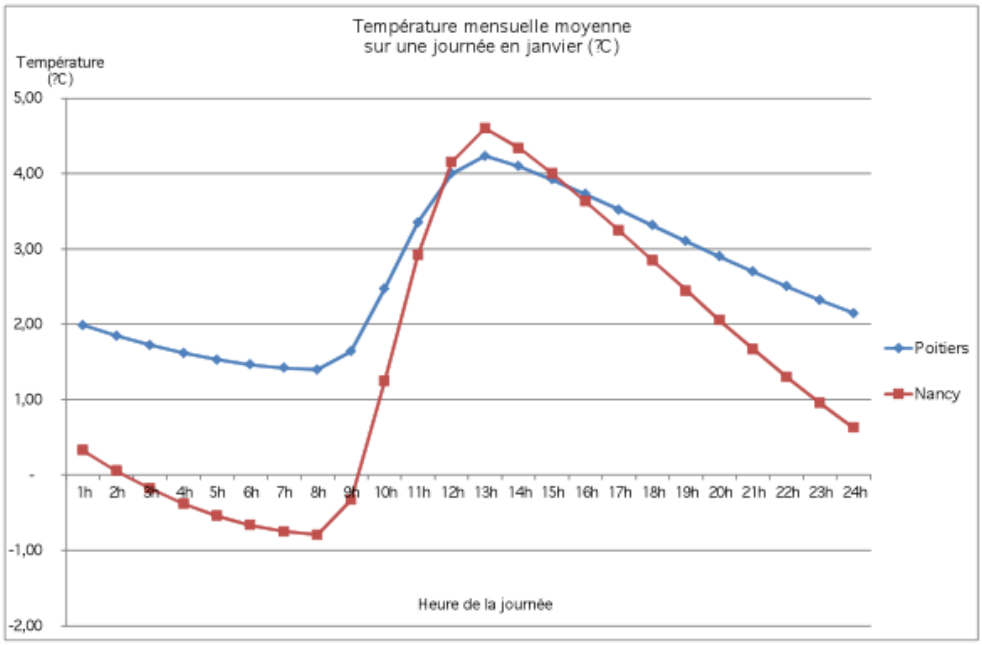


Figure 19 : Température mensuelle moyenne sur une journée en janvier à Poitiers et Nancy

Le problème thermique de dimensionnement a mené à la décomposition en système d'objets où les équilibres thermiques dynamiques horaires ont été calculés via notre calculateur et les données d'entrée : climat et conception / géométrie.

Nous avons reconstitué heure par heure les apports solaires. Ce tableau est obtenu selon une formule qui utilise la moyenne d'irradiation mesurée (W/m^2) et l'étale sur une journée selon une courbe sinusoïdale. Un coefficient correcteur est appliqué (0,87) pour que la moyenne mesurée corresponde à la moyenne calculée.

Nous avons ensuite comparé avec l'énergie thermique disponible par l'unité de cogénération (figure 14 et 18) pour laquelle nous avons pris l'hypothèse d'une livraison constante. Nous l'avons mis en rapport avec l'énergie solaire. La surface en vert indique les heures des jours de l'année où l'irradiation est supérieure à la production d'énergie thermique en provenance de la cogénération. Pendant cette plage horaire l'apport solaire est au moins égal à la fourniture d'énergie que la cogénération peut apporter. Il est donc inutile de livrer cette chaleur qui pourra être utilisée pour un autre usage.

Ceci nous permet de valider l'information donnée par les algoculteurs qu'ils n'ont pratiquement **pas de besoin de chaleur pendant la période estivale.**
Nous pouvons en tirer une première conclusion : **le couplage méthanisation/spiruline ne pourra pas utiliser la totalité de l'énergie disponible**. Comme la plupart des modèles on constate un fort besoin de chaleur à la période hivernale, là où elle est le moins disponible.

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	96	249	159	-	-	-	-	-
8	-	-	48	191	439	639	537	264	-	-	-	-
9	14	24	217	486	860	1 076	983	673	84	92	24	11
10	60	61	415	807	1 292	1 506	1 432	1 118	378	271	79	50
11	109	102	601	1 107	1 684	1 885	1 834	1 535	725	454	133	91
12	145	142	744	1 351	1 993	2 178	2 150	1 872	1 050	596	170	119
13	158	176	821	1 508	2 188	2 359	2 349	2 091	1 300	668	181	127
14	145	200	821	1 563	2 250	2 412	2 413	2 167	1 435	655	161	112
15	109	213	744	1 508	2 174	2 333	2 335	2 091	1 435	560	118	79
16	60	213	601	1 351	1 966	2 128	2 123	1 872	1 300	401	62	38
17	14	200	415	1 107	1 647	1 815	1 797	1 535	1 050	215	11	3
18	-	176	217	807	1 250	1 423	1 388	1 118	725	48	-	-
19	-	-	48	486	817	988	937	673	378	-	-	-
20	-	-	-	191	400	556	495	264	84	-	-	-
21	-	-	-	0	70	183	128	0	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 14 : Apports solaires heure par heure et tenant en compte de l'évolution de surface des serres pendant l'année

Heure	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
1	359	395	502	525	540	560	555	553	532	493	371	355
2	359	395	502	525	540	560	555	553	532	493	371	355
3	359	395	502	525	540	560	555	553	532	493	371	355
4	359	395	502	525	540	560	555	553	532	493	371	355
5	359	395	502	525	540	560	555	553	532	493	371	355
6	359	395	502	525	540	560	555	553	532	493	371	355
7	359	395	502	525	444	310	396	555	555	555	555	555
8	359	395	454	335	102	-	-	291	555	555	555	555
9	359	395	286	40	-	-	-	-	471	463	531	544
10	299	334	87	-	-	-	-	-	177	284	476	505
11	250	293	-	-	-	-	-	-	-	102	422	465
12	214	253	-	-	-	-	-	-	-	-	385	436
13	201	219	-	-	-	-	-	-	-	-	375	428
14	214	195	-	-	-	-	-	-	-	-	394	443
15	250	182	-	-	-	-	-	-	-	-	437	476
16	299	182	-	-	-	-	-	-	-	154	493	517
17	359	195	87	-	-	-	-	-	-	341	544	552
18	359	219	286	-	-	-	-	-	-	507	555	555
19	359	395	454	40	-	-	-	-	177	555	555	555
20	359	395	502	335	141	-	60	291	471	555	555	555
21	359	395	502	525	470	377	555	553	532	493	371	355
22	359	395	502	525	540	560	555	553	532	493	371	355
23	359	395	502	525	540	560	555	553	532	493	371	355
24	359	395	502	525	540	560	555	553	532	493	371	355

Tableau 15 : Périodes d'inutilité des thermies en provenance de la cogénération selon la journée mois par mois - Projet Lorraine

Comment lire ce tableau :
La valeur correspond la différence entre l'énergie solaire reçue par la serre en Lorraine et celle fournie par la cogénération. Cette valeur est calculée pour chaque heure de la journée, sur la moyenne mensuelle. La surface verte correspond à des valeurs négatives et à des périodes pendant lesquelles l'apport solaire est plus important que la chaleur de cogénération, la rendant non nécessaire.
Par exemple, au mois de mars dès 10h et jusqu'à 17h, la seule énergie solaire est plus que suffisante pour chauffer les bassins, l'excédent sera évacué par les ouvrants. Les thermies de la cogénération seront nécessaires pour le reste de la journée en quantité variable selon la température extérieure. Ces données sont basées sur une moyenne mensuelle.

3. Dimensionnement

3.1. Surface de la serre pour le projet Poitou

3.1.1. Prise en compte des dimensions standards des serres

Nous avons déterminé les surfaces de bassins maximales. Ces bassins vont devoir s'intégrer dans une serre. Des zones de passage doivent être créées, ainsi qu'une zone technique également sauf s'il existe des bâtiments existants disponibles.

Chez les constructeurs contactés pour les doubles parois, les largeurs standards des serres sont 3.2 m et multiples. La solution la plus standard est d'une largeur de 9.60 m ou multiple, ce qui permet d'abriter un bassin de 8 m de large. Les tailles de serres les plus couramment utilisées abritent des bassins compris entre 250 et 500m².

Pour le projet du Poitou Charentes nous avons besoin de serre de 2 fois 200 m² soit 2 x 8 x 25 m. Nous utiliserons donc une serre de 55 m x 9,60 m ou de 28 m x 19.2 m
Une des 2 serres devra comporter un local technique de 5 m x 9,6, mais celui-ci n'est pas pris en compte dans les calculs de thermique.

La surface de la serre est de 528 m² pour 400 m² de bassins. On a donc dans cet exemple assez représentatif un coefficient de 1,32 entre la surface du bassin et celle de la serre. Nous garderons ce coefficient pour faire les calculs des autres serres.

Nous avons vu en fin de chapitre 2 que la répartition de chaleur n'était pas homogène sur une journée, les apports solaires ne se faisant que pendant les heures diurnes.
Nous avons donc reconstitué les apports théoriques moyens de chaque mois selon les heures de la journée.
Mais du fait de la faible puissance disponible, et d'un budget d'investissement limité pour cette taille d'installation, il n'est pas envisagé de stockage de chaleur.

A Poitiers l'énergie solaire disponible est un peu plus importante qu'à Nancy.

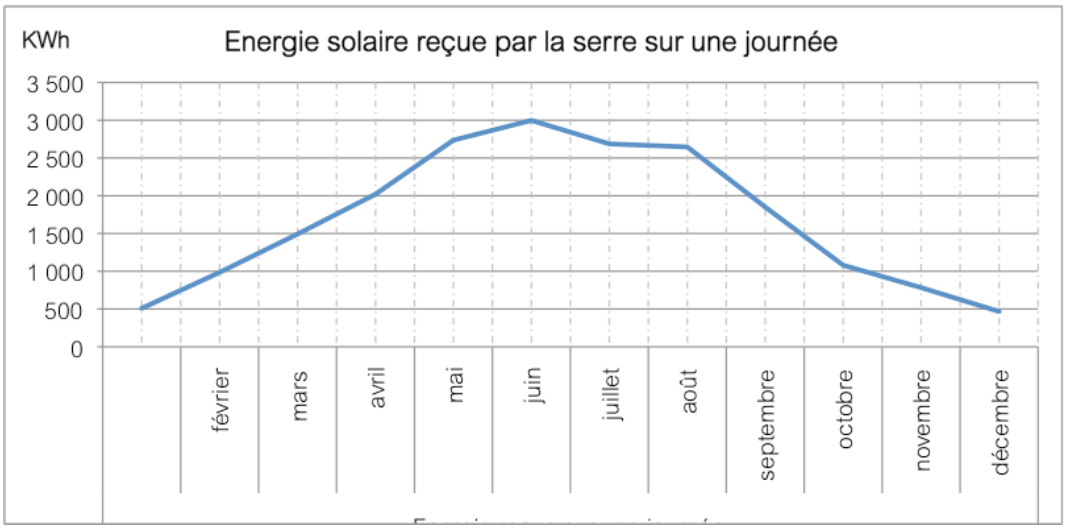


Figure 20 : Energie solaire reçue par la serre sur une journée selon les mois

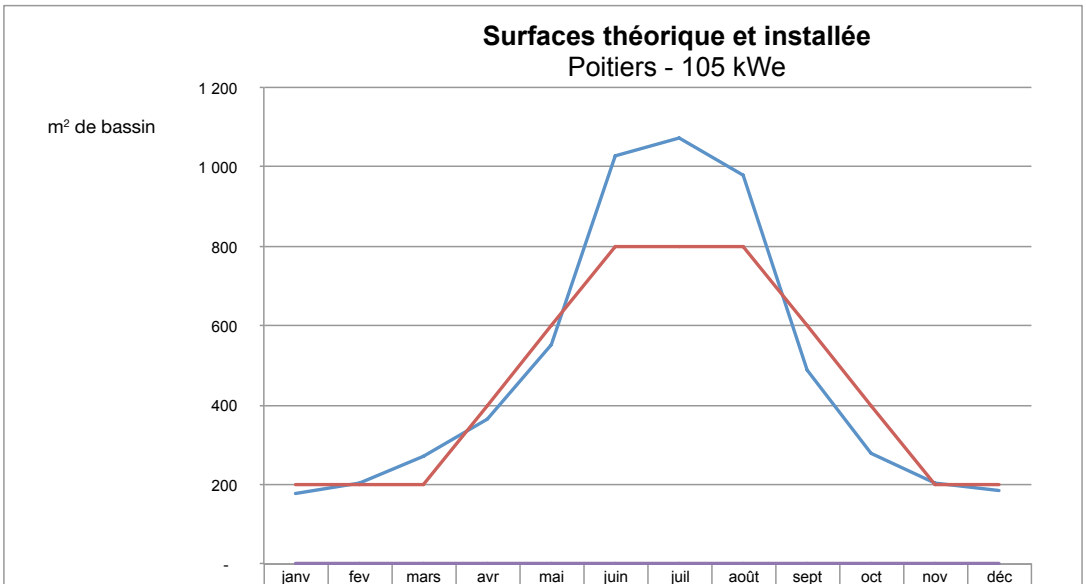
3.1.2. Surface en hiver en Poitou Charentes

Les pertes thermiques ont été calculées en fonction de la surface de la serre, sur la base d'une température extérieure à 1°C (moyenne des températures minimum constatées sur Poitiers en janvier). Lorsque la température extérieure passe en dessous de ces valeurs, un complément de chaleur pourra être apporté. Sans quoi la production sera réduite, voire nulle, sur cette période mais utile pour maintenir les souches.

3.1.3. Surface en été en Poitou Charentes

Il ne serait pas judicieux de dimensionner les serres et donc les bassins en fonction des seuls besoins hivernaux. Si nous restons sur un plan théorique il serait possible de chauffer un bassin 8 fois plus grand en juillet qu'en décembre. Mais il ne serait pas non plus judicieux de dimensionner la serre sur le mois de uillet.

La logique économique nous impose de prévoir des serres seulement 4 fois plus grandes en été qu'en hiver. Un seul bassin est utilisé toute l'année ; 2 bassins 7 mois sur 12 et 3 bassins pendant 5 mois.



	janv	fev	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
Surface théorique de bassin	178	205	270	366	553	1 027	1 071	981	488	278	205	186
Surface installée de bassin	200	200	200	400	600	800	800	800	600	400	200	200
Installée / Théorique	113%	98%	74%	109%	108%	78%	75%	82%	123%	144%	98%	108%

Figurine 21 : Surfaces de bassin théorique et installée - Poitou - 105 kWe

Pour optimiser à la fois les coûts et l'exploitation, nous préconisons de construire deux serres avec deux bassins chacune, ainsi qu'une cloison amovible entre les deux bassins permettant d'éviter les déperditions thermiques En cas d'exploitation d'un seul des deux bassins.
Cependant, l'exploitant la possibilité de choisir ultérieurement son mode de culture entre les deux options :

- Une partie des bassins à température optimale selon le tableau ci-dessus
- Tous les bassins à température dégradée que pendant 8 mois.

Ces 2 modes de conduite vont être comparés par la suite.

3.1.4. Energie consommée selon le mois par les bassins sous serres.

En prenant en compte les apports solaires, on constate que la serre n'a pas besoin d'apport complémentaire de la chaleur pendant 27,4% du temps, comme le montre la zone verte du Tableau 15. Si elle est livrée, cette chaleur ne sera pas utilisée et devra être dissipée dans l'atmosphère par ventilation de la serre pour éviter une surchauffe des bassins.

Nos calculs ne prennent pas en compte l'inertie thermique de fin de journée.

Enfin, pendant la période estivale, les pertes thermiques sont assez souvent inférieures aux thermies délivrées.
De l'ensemble de ces données on voit qu'un maximum de 70% de la chaleur disponible sera utilisé pour la culture de spiruline.

3.2. Surface de la serre pour le projet en Lorraine

3.2.1. Prise en compte des dimensions standards des serres

Pour le projet de Nancy, les bassins sont quatre fois plus grands et les serres prévues sont de quatre fois 105m x 9.6m ou deux fois 210 x 9.6 m si le terrain le permet. Mais de préférence en ayant plusieurs bassins côte à côte (35*28.8m) pour diminuer les déperditions.
Nous réalisons nos calculs sur une serre de 105 x 9.6 m.

On constate qu'il existe une énergie renouvelable disponible qui pourrait être utilisée de préférence à celle disponible. Dès le mois de Mai et jusqu'en Août elle est supérieure aux besoins de chaleur. La livraison de l'énergie de la cogénération étant par nature constante, il est nécessaire de stocker l'énergie non utilisée pour envisager son utilisation en période nocturne, ou ne pas la recevoir.

Lorraine	Unités	janv	fev	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
Besoin du digesteur Kw	Kw	123	119	110	98	83	64	68	70	91	110	117	119
Disponible pour algues	Kw	**322**	**326**	**335**	**347**	**362**	**381**	**377**	**375**	**354**	**335**	**328**	**326**
Besoin thermique	kW/m²/j	8,19	7,43	5,83	4,47	3,13	1,91	1,85	2,21	3,76	5,62	7,32	8,06
Surface théorique de bassin	m²	987	1 186	1 822	2 441	3 599	6 122	6 258	5 221	2 941	1 892	1 139	994
Surface installée de bassin	m²	**800**	**800**	**1 600**	**2 400**	**3 200**	**3 200**	**3 200**	**3 200**	**2 400**	**1 600**	**800**	**800**
Surface de serre	m²	1 303	1 566	2 405	3 223	4 751	8 082	8 262	6 892	3 882	2 498	1 503	1 313
Surface installée de serre	m²	**1 056**	**1 008**	**2 016**	**3 024**	**4 032**	**4 032**	**4 032**	**4 032**	**3 024**	**2 016**	**1 008**	**1 008**
Installée / Possible	%	93%	118%	90%	81%	89%	152%	155%	129%	97%	94%	113%	99%
Thermique disponible cogé	kWh/j	7 338	7 435	7 629	7 920	8 259	8 695	8 599	8 550	8 065	7 629	7 484	7 435
Apport solaire	kWh/j	741	1 377	5 196	11 378	17 463	19 842	19 230	15 774	9 080	3 616	858	576
Apport solaire Stockable	kWh/j	741	1 377	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	858	576
Total	**kWh/j**	**8 080**	**8 812**	**10 629**	**10 920**	**11 259**	**11 695**	**11 599**	**11 550**	**11 065**	**10 629**	**8 342**	**8 012**

Tableau 16 : Apport de chaleur thermique et solaire

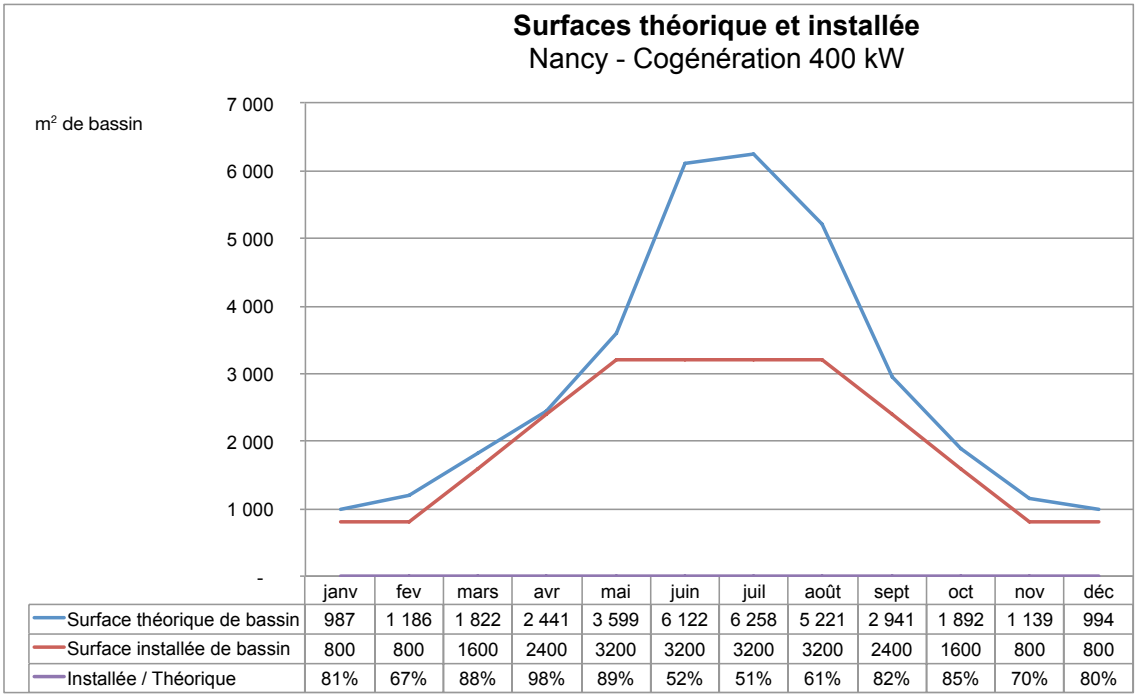
3.2.2.Surfaces en hiver en Lorraine

Les pertes thermiques ont été calculées à partir de la surface de la serre, sur la base d'une température extérieure à -2°C en janvier (moyenne des températures minimum constatées sur Nancy en Janvier). Lorsque la température extérieure passe en dessous de ces valeurs, un complément de chaleur pourra être apporté, sans quoi la production sera réduite.

3.2.3.Surfaces en été en Lorraine

On a tout d'abord déterminé l'énergie valorisée pour différentes surfaces de serres exploitées par des bassins uniquement.

Les pertes thermiques, et donc les besoins énergétiques, dépendent de la surface de serre exploitée. On a donc pris en compte les besoins en chaleur pour alimenter les bassins en hiver pour déterminer la taille de la serre de base.
Nous venons de constater qu'il existe une énergie renouvelable disponible en complément de celle disponible par l'unité de méthanisation.
Il serait dommage de se passer de cette énergie et de limiter la surface des bassins à l'apport thermique en période d'hiver. Nous pouvons utiliser la chaleur disponible et ouvrir des bassins en fonction des apports solaires qui vont compléter l'apport de l'énergie thermique de la méthanisation.



	janv	fev	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
Surface théorique de bassin	987	1 186	1 822	2 441	3 599	6 122	6 258	5 221	2 941	1 892	1 139	994
Surface installée de bassin	800	800	1600	2400	3200	3200	3200	3200	2400	1600	800	800
Installée / Théorique	81%	67%	88%	98%	89%	52%	51%	61%	82%	85%	70%	80%

Figure 22 : Surfaces de bassin théorique et installée – Lorraine – 400 kWe

Si nous restons sur un plan théorique, il serait possible de chauffer un bassin 7 fois plus grand en juillet qu'en décembre (cf. Figure 22 : Comparaison des surfaces maximale et installée). Mais cette hypothèse n'est pas réaliste car il faudrait pouvoir stocker toute l'énergie solaire en excédent, ce qui est impossible. D'autre part sur un plan économique cela ne serait pas rentable, puisque la majorité des équipements ne servirait que quelques semaines par an. Les contraintes de travail doivent aussi être intégrées.

Il est donc nécessaire de convenir d'une évolution de la taille des bassins pour optimiser l'utilisation de la chaleur en rapport avec les énergies disponibles : la chaleur issue de la cogénération et l'énergie solaire.
Nous proposons que la surface estivale corresponde à 4 fois la surface minimale comme indiqué sur le graphe ci-dessus avec la courbe rouge.
Sur la base de ces données nous présentons dans les paragraphes suivants les surfaces de serres retenues pour le projet.

3.2.4. Le stockage de chaleur

Devant cet apport d'énergie renouvelable, il est important d'analyser la possibilité de stocker une partie de l'énergie non renouvelable.
Une solution qui peut être envisagée est l'installation d'un stockage de chaleur de type Open Buffer (Réservoir d'hydro accumulation) couramment utilisé par les serristes, et qui fait l'objet depuis plusieurs années de délivrance de certificat d'économie d'énergie.

Ce principe nécessite des volumes minimums afin de pouvoir gérer la stratification des eaux chaudes et froides.

Figure 23 : Stockage tampon de chaleur (= Open Buffer)

Le coût du ballon de stockage d'eau n'est pas très important, mais le logiciel de fonctionnement du système a tendance à doubler le montant d'investissement nécessaire à un bon fonctionnement de l'installation.
De ce fait nous avons étudié l'utilisation de ce stockage de chaleur uniquement pour le projet de 400kWe.

La puissance disponible sera fournie d'une part par la cogénération, d'autre part par un stock de chaleur journalier. C'est un stock journalier qui emmagasine l'énergie non utilisée le jour (quand il fait plus chaud) et la redistribue la nuit (quand il fait plus froid). La puissance fournie par la méthanisation est constante sur 24 heures.

Le système doit permettre de stocker de l'énergie le jour pour la céder la nuit, à n'importe quel moment de l'année, de sorte que l'énergie nécessaire la nuit ne soit jamais supérieure à celle emmagasinée le jour. Ainsi pour une fourniture d'énergie par le moteur de cogénération donnée, ce sera la capacité maximale d'énergie stockable le jour le plus froid qui déterminera la taille de serre à ne pas dépasser pour rester en conditions d'exploitabilité. Les jours de froidure exceptionnelle devront être compensés par une alimentation en thermie par une chaudière.

Voici la représentation des apports en fonction des surfaces évoquées précédemment :

Lorraine	Unités	janv	fev	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
Besoin du digesteur Kw	Kw	123	119	110	98	83	64	68	70	91	110	117	119
Disponible pour algues	Kw	**322**	**326**	**335**	**347**	**362**	**381**	**377**	**375**	**354**	**335**	**328**	**326**
Thermique disponible cogé	kWh/j	**7 338**	**7 435**	**7 629**	**7 920**	**8 259**	**8 695**	**8 599**	**8 550**	**8 065**	**7 629**	**7 484**	**7 435**
Apport solaire	kWh/j	741	1 377	5 196	11 378	17 463	19 842	19 230	15 774	9 080	3 616	858	576
Total théorique	**kWh/j**	**8 080**	**8 812**	**12 825**	**19 298**	**25 722**	**28 537**	**27 828**	**24 324**	**17 145**	**11 245**	**8 342**	**8 012**
Apport solaire Stockable	kWh/j	741	1 377	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	858	576
Total disponible	**kWh/j**	**8 080**	**8 812**	**10 629**	**10 920**	**11 259**	**11 695**	**11 599**	**11 550**	**11 065**	**10 629**	**8 342**	**8 012**

Tableau 17 : Comparaison des apports solaires et thermiques (kWh)

On constate que les apports solaires sont supérieurs aux apports de l'unité de méthanisation dès le mois d'avril et jusqu'en septembre (en jaune). Nous ne pouvons pas stocker l'énergie solaire faute d'outils adaptés, mais nous pouvons stocker l'énergie de l'unité de cogénération pendant la période où les apports solaires sont suffisants à eux seuls pour chauffer les bassins. La quantité d'énergie stockable sera donc limitée à l'énergie de la cogénération, pendant le nombre d'heure ou l'activité solaire est supérieure ou égale aux besoins de la serre pour maintenir le bassin en température.

L'énergie stockable le jour sera celle que l'on pourra dépenser la nuit pour complémenter la chaleur fournie en cogénération.
Les valeurs données dans le tableau ci-dessus nous permettent de préconiser un stock maximal de 3 000kWh, soit 130m^3 d'eau sortant à 90°C, et entrant à 60°C (retour de l'échangeur).

3.2.5. Impact du stockage de chaleur sur les surfaces en production

La puissance thermique disponible en circuit primaire de 445kW, de laquelle on déduit les besoins de l'unité de méthanisation, nous a donné les surfaces évolutives qui ont été définies en 3.2. L'apport d'un stockage de chaleur peut permettre d'accroitre la puissance disponible de chaleur selon le tableau ci-dessous. Il faut noter que nous avons pris en compte la restitution de l'énergie stockée pendant les heures où l'apport en énergie solaire est inférieur à la puissance restituée, ainsi qu'une perte de 5% lors du stockage.

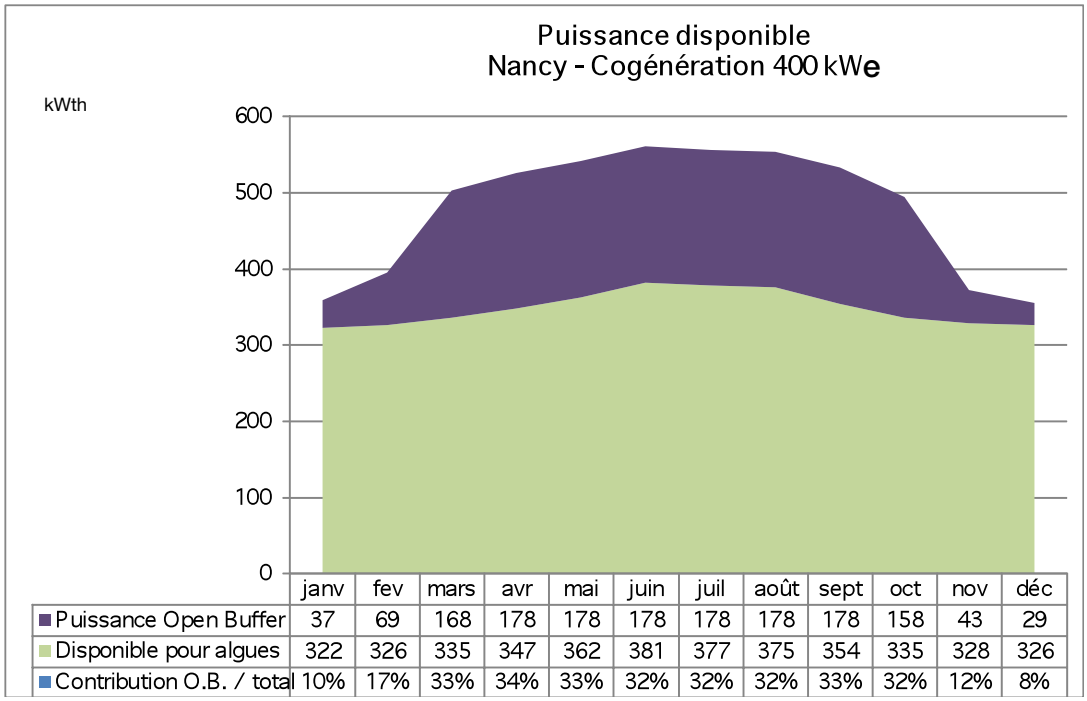


Figure 24 : Contribution thermique de l'open buffer par mois

Le stockage de chaleur accentue l'effet gaussien de la courbe, ce qui ne va pas forcément en direction de l'objectif recherché mais va tout de même permettre d'agrandir la surface de culture.
Si on choisit d'avoir un stock, on pourra augmenter la taille de la serre d'un petit peu moins de 10%, et avec la productivité dans la même proportion. Il ne permet pas de modifier la situation en hiver faute de ressource en chaleur et est assez vite insuffisant en été pour stocker toute la chaleur disponible. Il n'est cependant pas possible de le dimensionner en fonction du stockage de l'été, car il deviendrait trop grand et inefficace pour les périodes plus froides.

Lorraine	Unités	janv	fev	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
Surface maximale possible (m²)													
sans O.B.	m²	943	1 053	1 376	1 864	2 779	4 791	4 884	4 068	2 256	1 429	1 075	971
avec O.B.	m²	1 052	1 276	2 066	2 820	4 146	7 029	7 190	6 001	3 392	2 106	1 216	1 057
Gain O.B.	m²	109	222	690	956	1 367	2 238	2 307	1 932	1 136	676	141	86
Surface installée de serre (m²)													
sans O.B.	m²	1 056	1 008	2 016	3 024	4 032	4 032	4 032	4 032	3 024	2 016	1 008	1 008
avec O.B.	m²	1 104	1 104	2 208	3 312	4 416	4 416	4 416	4 416	3 312	2 208	1 104	1 104
Gain O.B.	**m²**	**48**	**96**	**192**	**288**	**384**	**384**	**384**	**384**	**288**	**192**	**96**	**96**
Surface installée de bassin (m²)													
sans O.B.	m²	800	800	1 600	2 400	3 200	3 200	3 200	3 200	2 400	1 600	800	800
avec O.B.	m²	880	880	1 760	2 640	3 520	3 520	3 520	3 520	2 640	1 760	880	880
Gain O.B.	**m²**	**80**	**80**	**160**	**240**	**320**	**320**	**320**	**320**	**240**	**160**	**80**	**80**

Tableau 18 : Surface supplémentaire exploitable grâce à l'Open Buffer (m²)

3.2.6. Energie consommée selon le mois par les bassins sous serre

Si on calcule les apports solaires heure par heure, on voit dans le tableau 15 que la livraison de chaleur ne sera pas nécessaire de mars à septembre de 10h à 16h et de 9h du matin à 20h en mai et août. Cette situation est celle avec laquelle travaillent les producteurs traditionnels dans le sud de la France.

La surface en vert pendant laquelle la chaleur de cogénération n'est pas nécesaire correspond à 29,5% du temps, et 44,2% sur la période de culture de huit mois.

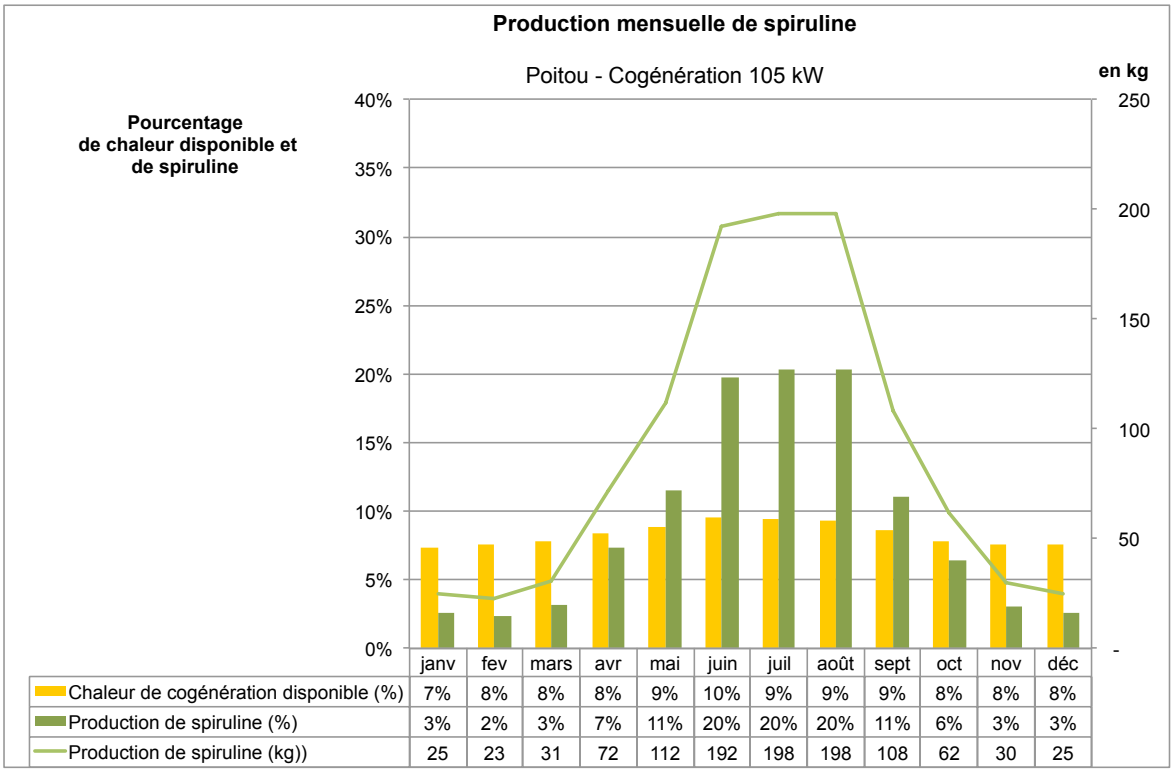
Nos calculs ne prennent pas en compte l'inertie thermique de fin de journée.
Enfin pendant la période estivale, les pertes thermiques sont assez souvent inférieures aux thermies délivrées, ce qui suppose d'avoir une capacité de ventilation de bassins pour éviter des surchauffes.

Ici encore, un maximum de 70% de la chaleur disponible sera utilisé par la culture de spiruline.

3.3. Production de l'unité de méthanisation Poitou (105 kWe)

3.3.1. A surface variable des bassins maintenus à 33 - 35°C

En reprenant nos hypothèses de rendement (Figure 10 : Hypothèses de rendement mois par mois) et en ajoutant ce facteur, nous pouvons estimer la production de micro algues mois par mois, soit 1076 Kg avec une culture 12 mois sur 12.
Force est de constater que la production en période hivernale est très faible, et que 90,5% de la production est réalisée en 8 mois, soit 973 kg.



	janv	fev	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
Chaleur de cogénération disponible (%)	7%	8%	8%	8%	9%	10%	9%	9%	9%	8%	8%	8%
Production de spiruline (%)	3%	2%	3%	7%	11%	20%	20%	20%	11%	6%	3%	3%
Production de spiruline (kg))	25	23	31	72	112	192	198	198	108	62	30	25

Figure 25 : Production mensuelle de spiruline - Poitou – 105 kW

A ce stade on peut donc en conclure que l'efficacité énergétique n'est pas une fin en soi. Car nous observons que 12,4% de la production seulement se réalise pendant la période où la consommation de chaleur est intégrale. 87,6% de la production vont être réalisées avec seulement 59% de la chaleur de cogénération disponible.

Nous avons donc un ratio d'utilisation de la chaleur sur le Kg produit qui est assez moyen. De plus il faut se poser la question sur l'opportunité de travailler pendant 41% de son temps pour récolter 12,4% de spiruline en plus.

3.3.2. Avec tous les bassins en production, mais à température variable

Le Comité technique nous a demandé d'étudier une solution alternative qui consiste à maintenir la totalité de la surface en acceptant une température variable de l'eau. La production de spiruline baise avec la température mais cet effet est compeensé par des surfaces en production plus importantes.

Poitou 105 KWe	janv	févr	mars	avril	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Total sur 8 mois
Température de jour	20	21	23	25	30	33	33	33	31	28	21	18	
Température de nuit	17	17	19,5	22	27	30	30	30	27	24	19	18	
Besoin de puissance	81,9	81,3	87,6	91,9	97,6	99,8	87,7	89,8	87,2	86,6	81,3	82,9	
Puissance disponible	80	81	85	90	95	103	101	100	92	85	82	81	
% Productivité			30	50	71	100	100	100	80	60			
Productivité prenant en compte les aléas			5	6	6	8	8	8	6	5			
Productivité en fonction de la chaleur			1,5	3	4,26	8	8	8	4,8	3			
Production en Kg			37	72	106	192	198	198	115	74			993

Tableau 19 : Production avec tous les bassins à température variable

La production s'établit à 993 kg contre 973 kg sur 8 mois et 1 076 kg sur 12 mois. La moyenne de productivité sur 8 mois serait de 5,07 grammes, ce qui correspond aux chiffres indiqués dans le dossier économique de la Fédération des Spiruliniers de France.

Sur 8 mois de production, les résultats sont donc très proches et l'écart peu significatif (20 kg). Il est donc recommandé à l'exploitant d'envisager les deux solutions et de définir son choix en fonction de la facilité de travail.

Pour la suite, nous conservons une valeur de 1 000 Kg de production afin de faciliter la vision des calculs.

3.3.3. Production sans Open Buffer

En reprenant le schéma analogue la production selon le mode de culture est décrite ci-dessous :

Nombre de mois de production	Surface de bassin variable	Utilisation de tous les bassins
8 mois	4 164 kg	4 023 kg
12 mois	4 573 kg	Sans objet

Tableau 20 : Volumes produits selon la durée et la surface mise en production

En volume, l'écart de production entre les 2 modes de conduite est significatif (141 kg), ce qui plaide plutôt pour une ouverture progressive des bassins.
Cependant, malgré une production additionnelle de 409 kg, on constate une production faible sur les 4 mois les plus froids (9,33%), ce qui justifie l'arrêt de la production pendant l'hiver.

Pour la suite, nous retenons ce mode de fonctionnement avec une production de 4 164 kg/ an sur 8 mois de fonctionnement.

3.3.4. Production avec Open Buffer

Avec un Open Buffer, la production théorique de 4580 kg de spiruline sèche sur 8 mois soit 10% de plus que sans Open Buffer. Les gains sont proportionnels à la production de base et essentiellement concentrés sur la période de mai à septembre.
Nous envisagerons dans la partie économique l'intérêt de cet investissement.

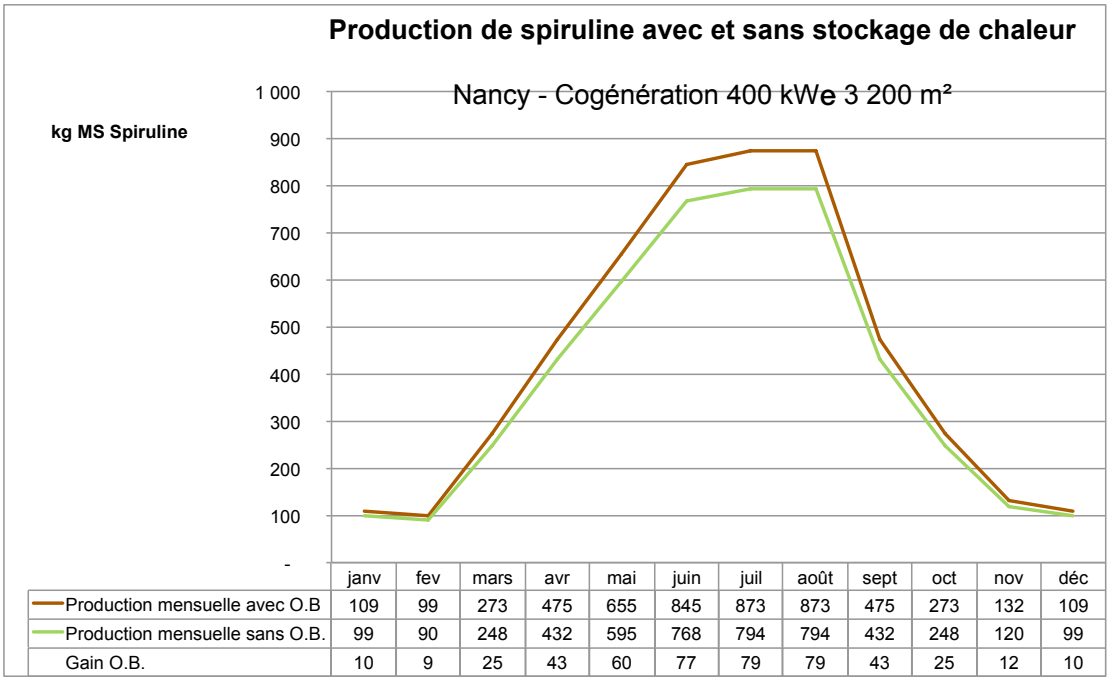


Figure 26 : Production de spiruline avec et sans stockage de chaleur

3.4. Comparaison des performances des unités à 105 et 400 kWe

Il est intéressant de mettre en relation les puissances thermiques disponibles et les productions des 2 unités pour regarder s'il y a des effets d'échelle (données sans open buffer).

		Poitiers 105 kWe	Nancy 400 kWe	Rapport Nancy / Poitiers Effet d'échelle
Energie cogé théorique par an	MWh/an	46	160	3,48
Energie cogé livrée par an	MWh/an	36	144	3,81
Production annuelle 8 mois	Kg MS	993	4 164	4,19
Production annuelle 12 mois	Kg MS	1076	4573	4,25

Tableau 21 : Comparaison de performances des unités à 105 et 400 kWe

Entre la puissance théorique et la puissance livrée, le rapport passe de 3,22 à 3,88. On voit que la puissance disponible est affectée par le besoin en chaleur plus important pour la petite unité de méthanisation en pourcentage de la chaleur disponible. Il y a un effet d'échelle lié à l'efficacité énergétique des équipements de la méthanisation.

Cette autoconsommation plus importante se répercute de façon importante sur la production de spiruline. Le rapport des productions de Nancy sur celle de Poitiers passe à 4,19 sur 8 mois et 4,25 sur 12 mois, malgré un climat plus rigoureux en Lorraine.
Techniquement, l'agrandissement des exploitations améliore la performance du couplage.

4. Faisabilité économique

La première phase du projet consistait en une étude de dimensionnement.
La partie économique a pour but de cerner les coûts d'investissements et de fonctionnement de l'unité. Ceci nous permettra de définir les prix de revient de la spiruline et de valider l'intérêt d'un tel investissement.

Pour rappel les deux scénarios techniques qui seront étudiés sont:

- Scénario 1 : Unité jointe à une cogénération de biogaz de 105kWe basée en Poitou Charente
- Scénario 2 : Unité jointe à une cogénération de biogaz de 400kWe basée en Lorraine.

Les chiffres de cette étude sont basés sur des données estimatives fournies par différentes entreprises (citées dans ce rapport). Les devis plus précis devront être demandés après décision finale sur les surfaces à construire et selon le scénario de production choisi.

4.1. Coûts d'installation

Les coûts d'installation comprennent :

Poste de couts	Références
Terrassement, tranchées	Références bâtiment
Réseau de chaleur	RICHEL – REHAU - auto construction
Gros œuvre	Références batiment
Construction des bassins (matériaux + installation)	AlgaeStream, Spiruline Atoufred, maçon, Auto construction
Serre tunnel (matériel + installation)	S.V.L RICHEL JRC
Système de circulation (roue à aube, pompe d'alimentation)	RICHEL FSF, auto construction
Système de récolte (tables, filtres, pompes)	Rampelt, auto construction
Système de traitement (pressage, séchage)	FSF, Airnaturel (déshumidificateur)
Laboratoire	Armines

Tableau 22 : Références pour les coûts d'installation

Il serait bien entendu possible de réduire les coûts ci-dessous en prenant en charge en auto construction une partie des travaux.

Le terrassement et gros œuvre
Réaliser le terrassement en même temps que l'unité de méthanisation minimiserait les coûts. Les serres doivent être si possible installées au plus près de l'unité de production de chaleur, et du poste de livraison d'électricité. Pour rappel il est préférable d'installer les serres sur un terrain plat, sans arbre, et en dehors des couloirs de vents.
Il faut donc prévoir un décapage du terrain pour environ 2,5€/m², et un terrassement pour 3,5€/m³.
Le coût des tranchées (35€/ml) sera fonction de la distance cogé-bassins ainsi que celui de tubes pré-isolés pour la livraison de l'eau chaude (70€ le m installé).
Les surfaces non occupées par les bassins sous serres devront être bétonnées afin de pouvoir être nettoyées et désinfectées si besoin. Il faudra également prévoir un aménagement pour circuler entre les serres avec des véhicules.

Ces postes peuvent être réalisés par l'exploitant pour minimiser les coûts.

La serre et son équipement
Les estimations obtenues pour une serre tunnel de 2 fois 60m par 9,6m (ou de préférence en multiple de 9.6) varient selon les constructeurs. Il est prévu une séparation au milieu pour isoler les deux bassins.
Nous avons obtenu des prix pour qui peuvent varier de 40 à 75 k€ pour des surfaces de 2 fois 530m² (soit 1 060m² couverts) et de 100 à 120 k€ pour 4 fois 1100m² (soit 4 400m² couverts)

Un ensemble d'équipement intérieur de la serre peut être fourni par un chauffagiste, un électricien ou le serriste avec :

- Chauffage comprenant :
  - l'échangeur à plaque
  - La circulation vanne mélangeur
  - Le circuit basse température dans le sol
  - Le circuit secondaire avec aérotherme

- L'électricité comprenant :
  - Régulation du système et « control command » du chauffage
  - Ouverture de la serre (déshumidification et maintien des températures)
  - Eclairage (va-et-vient)
  - Compteur d'énergie

- Un local sanitaire.

L'ensemble est chiffré à 75 k€ pour 1 000m² de serre tunnel, et à 120 k€ pour 4 400m².

Les bassins

L'aménagement des bassins comprendra quelques rangées de parpaing, une bâche, et une ou plusieurs roues à aube. Le coût serait de 35€/m² à ce jour. Le coût serait réduit de 20% pour un doublement de surface.

Il faut ajouter 15 000€ si l'ensemble n'est pas auto construit.

Figure 27 : Bassins de culture
(Spiruline de la Beauce – Photo ESETA)

Système de récolte

Depuis deux ans, on voit apparaitre dans les nouvelles installations des systèmes de récolte automatisée qui facilite ce travail. C'est cette option que nous retenons.

Figure 28 : Système de récolte automatisé - (Spiruline de la Beauce – Photo ESETA)

Système de séchage - pressage
Il comprend :
- Une table de pressage
- Un déshumidificateur
- Des planches et casiers de séchage
- Une extrudeuse

Laboratoire
Le coût du laboratoire inclut le matériel nécessaire au suivie biologique de production :
- La verrerie
- Les sondes et le matériel de mesure
- Les souches d'algues
- Le matériel d'analyse (microscope, lamelle)
- Une paillasse
- Une enceinte thermostatée et régulée en CO^2
- Mesure du Ph, électro conductivité du bassin….

Le coût total de ces éléments a été estimé par ARMINES et RICHEL à 25k€.

4.1.1.Dimensions des installations

Scénario		Poitou 105 kWe	Lorraine 400 kWe	Lorraine + Open Buffer
Terrassement, tranchées	m3	1 800	6 600	7 200
Réseau de chaleur	m.l.	150	250	250
Gros œuvre	m²	300	1 100	1 200
Construction des bassins	m²	800	3 200	3 520
Serre tunnel	m²	1 056	4 032	4 410

Tableau 23 : Principales dimensions des installations retenues.

4.1.2.Montant de l'investissement

Scénario En milliers d'euros	Poitou 105 kWe 800 m² bassin	Lorraine 400 kWe 3 200 m² bassin	400 kWe +Open Buffer 3 520 m² bassin
Terrassement, tranchées	11	40	43
Réseau de chaleur	11	18	18
Gros œuvre	11	39	42
Construction des bassins (matériaux + installation)	49	135	146
Serre tunnel (matériel + installation)	53	120	130
Equipement intérieur	75	120	125
Open buffer & control command			120
Système de récolte (tables, pressage, séchage)	40	120	120
Laboratoire	25	25	25
TOTAL (k€)	**274**	**616**	**769**
Kw thermique cogé	128	445	490
Rapport invest/kwth	2 142	1 384	1 569

Tableau 24 : Montant de l'investissement des différents scénarios

Les petites installations ont un coût d'investissement au KWh de 54% supérieure, et que ce ratio s'élève encore si on prend en compte la thermique disponible.
A l'inverse la production est par contre presque proportionnelle à la surface.

Intérêt économique de l'Open Buffer
L'Open Buffer et son logiciel représentent un investissement supplémentaire de 153 k€, soit 25% de plus que l'installation de base. Ils laissent espérer un gain de production de 409 kg environ sur 8 mois, soit 10% (Tableau 20) sur 8 mois (il n'y a pas de différence sur 12 mois, car l'Open buffer ne fonctionne pas en hiver faute de chaleur à stocker).

Investissement (k€)	153 000			
Marge (€/kg)	20	30	40	50
Nombre de kilo à produire (kg)	7 650	5 100	3 825	3 060
Gain de production annuel (kg)				409
Temps de retour (an)	18,70	12,47	9,35	7,48

Tableau 25 : Temps de retour sur investissement d'un Open buffer selon la marge réalisée par kilo

En faisant différentes hypothèses de marge et sans prendre les frais financiers, il faut une marge d'au moins 40 €/kg pour avoir un retour sur investissement de moins de 10 ans. Une analyse équivalente en prenant les coûts marginaux est plus incitative.
A ce stade, il nous semble que l'investissement dans un open buffer n'est pas forcément justifié. Cette option n'est donc pas retenue dans le cadre de notre configuration. Cependant sur des installations plus importantes, il sera essentiel de ne pas la négliger car elle peut s'envisager dans un second temps.

4.2. Coût d'exploitation

4.2.1. Hypothèses par poste

Maintenance
Le plastique des serres courantes a une durée de vie limitée. Selon que l'on se trouve au Sud ou au Nord de la France, la durée de vie sera différente. Il faudra changer les plastiques tous les 3 ans dans le Sud, et tous les 4 ans dans le Nord.
Il existe un nouveau plastique de 300 micron qui a une durée de vie d'au moins le double. Son remplacement revient à 5€ par m² de serre. On peut prévoir son remplacement tous les 6 ans si on considère que l'on emploiera ce nouveau matériau de préférence.

Bassins
La maintenance est très limitée, elle se résume à un entretien sommaire et à la gestion de petits incidents techniques.

Energie et eau
C'est un poste important. Les pompes sont alimentées régulièrement de même que les roues à aube. Le matériel de récolte et de séchage représente également une consommation énergétique. Il est considéré dans la profession une dépense de 10W par m² de bassin. Le système d'agitation fonctionne à 20% pendant la période nocturne, on peut considérer que la dépense se fait donc sur 14.5h par jour. Nous prenons 9 mois de fonctionnement avec la mise en culture.
Nous avons donc une dépense électrique pour l'installation de 105 kWe (1000 m²) :
10 x 800 x 14.5 x 270 = 31 320 kWhel à 12 centimes, soit 3 758€ arrondis à 4k€.

La dépense est quasi proportionnelle à la surface et donc 4 fois plus importante en Lorraine avec 4 000 m².

La consommation d'eau est un poste important, même si le fait d'être sous serre réduit fortement l'évaporation. Il est en effet fortement déconseillé d'utiliser des eaux de forages non traitées, au risque de contaminer la culture. La bibliographie donne une consommation d'eau de 0.5m3 par m² de bassin de spiruline, à condition d'avoir un système de recyclage de l'eau. Avec un fonctionnement à « eaux perdues », la consommation peut monter jusqu'à 3 m³.
Nous avons retenu après consultation du comité technique le prix de 1€ par m³.

Nourriture de la spiruline
Les éléments nutritifs de la spiruline sont parmi les plus courants: le sucre, le nitrate de potassium (KNO_3) phosphate de sodium ($Na3PO_4$), sulfate de fer ($FeSO_4$) sulfate de magnésium ($MgSO_4$), hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) urée (CH4N2O)… Cette liste non exhaustive et dont certains produits peuvent être remplacés par d'autres forment les nutriments de la spiruline. La bibliographie est abondante à ce sujet et son coût bien maitrisé.

Il revient à 3 €/kg produit.

CO_2
L'aliment principal de la spiruline est le carbone dont la source normale est le gaz carbonique. Les gaz d'échappement ne pouvant être utilisé il est nécessaire d'acheter le CO^2. L'alternative étant l'utilisation du bicarbonate, qui nécessite un nettoyage régulier des bassins.
Nous préconisons donc l'utilisation de CO^2 en bouteille dont le prix ne devrait pas être supérieur à 1 000 € la tonne.
La consommation est de 2 t de CO^2 pour une tonne produite.

Conditionnement
Il est nécessaire de conditionner la spiruline en fonction de l'axe de commercialisation choisi.
Le coût sera faible pour une livraison en gros, mais assez important pour un conditionnement sous sachet de 100g.
Nous considérerons ici que la commercialisation sera sous sachet de 100g pour une meilleure valorisation, soit 2 €/kg.

Main d'œuvre
Les deux projets sont à considérer différemment. Le projet du Poitou Charente est un complément d'activité avec une activité dédiée à un des exploitants ou son conjoint. Nous considérons donc un poste de travail à temps complet pour une valeur de 1500€ par mois chargé à 1,5 soit 19 k€ pour 8 mois et demi.

Le projet lorrain est un projet d'entreprise, il nécessite une personne à temps complet et 2 saisonniers. On va donc considérer trois emplois pour un montant chargé de 65 k€.

Ces coûts ne comprennent pas le temps de commercialisation.

Charges diverses d'exploitation
Bien que l'installation soit le plus souvent partie intégrante de l'activité agricole, certaines charges vont être générées directement par cette activité (dont téléphone, déplacement, site internet, etc…). Nous les chiffrons pour un budget de l'ordre de 2 000€/an pour le petite serre et 6 000€/an pour la grande.
Il faut également prévoir des campagnes d'analyses pour valider l'innocuité des produits mis en vente. Ceci représente 1 000€ pour la première installation et 2 000€ pour la Lorraine.

Figure 29 : Echantillon des lots pour analyse (Spiruline de la Beauce) - photo ESETA

Amortissements et frais financiers
Après discussion avec le comité technique il a été prévu un amortissement du matériel complet (structure serre et matériel) sur dix ans. Bien que certains postes le seront sur des périodes supérieures (serres) et d'autres (pompes, presse..) inférieures, une moyenne de 10 ans a été jugée cohérente.
Nous avons pris en compte des frais financiers pour un investissement avec 20% d'apports personnels et d'un prêt à 4%.

4.2.2. Coûts d'exploitation (hors chaleur)

Scénario	Poitou 105 kWe 800 m² bassin	Lorraine 400 kWe 3 200 m² bassin
Maintenance serre	0,88	3,4
Maintenance bassins	0,30	0,5
Main d'œuvre	19,0	65,0
Energie (pompes, récolte, séchage)	4,0	15,6
Eau	0,5	2,0
Intrants	3,0	12,5
CO_2	2,0	8,3
Conditionnement	2,0	8,3
Charges diverses	3,0	8,0
TOTAL (k€)	**34,68**	**123,61**
Amortissement (10 ans)	27,4	65,6
Total avec amortissement	62,1	189,2
Frais financiers	4,5	10,6
Coût global	**66,6**	**199,8**

Tableau 26 : Coûts d'exploitation annuels par poste de dépense (k€)

(*) Avec ou sans Open buffer, nous faisons l'hypothèse qu'il n'y a pas d'incidence sur les coûts.

Pour les deux projets, l'amortissement et la main d'œuvre constituent les postes les plus importants et 70% du coût globlal pour le Poitou et 65% en Lorraine.

4.2.3. Coûts fixes et proportionnels

Si on étudie la structure de ces coûts, les intrants, le CO^2 et le conditionnement sont proportionnels à la production. La main d'œuvre, l'énergie et l'eau ont une composante fixe et une autre variable. En première approche, on la considèrera à 50% fixe et 50% proportionnelle. Les autres coûts sont fixes. Pour des projets à 105 kWe, la partie fixe représente environ 72% de notre coût de référence. Cette proportion diminue avec la taille. On dilue les frais fixes. Nous l'estimons à 65% pour le projet lorrain de 400 kWe.
Quelques soit la stratégie d'achat retenue, la chaleur vient augmenter le poids relatif des coûts fixes. Elle dépend de l'installation et non de la production. Pour la suite nous ne l'avons pas intégrée.
Ce poids des coûts fixes est important, mais normal au regard de l'importance des installations. Il s'ensuit une sensibilité significative du résultat au rendement.

			Ventilation agrégée	
	Poitou 105 kWe	Lorraine 400 kWe	Poitou 105 kWe	Lorraine 400 kWe
fixe	54%	44%	72%	65%
proportionnel	11%	15%	28%	35%
50% - 50%	35%	41%		

Tableau 27 : Poids des coûts fixes et des coûts proportionnels hors chaleur

4.2.4. Origine des économies d'échelle

Pour identifier les postes qui permettent des économies d'échelle, nous comparons les coûts par kg MS produite.

Production de référence (tonne MS/ unité)	1 000	4 164	
Coût au kg de spiruline produite (€ / kg)	**Poitou 105 kWe**	**Lorraine 400 kWe**	**Ecart 105 kWe 400 kWe**
Maintenance serre	0,88	0,81	0,07
Maintenance bassins	0,30	0,12	0,18
Main d'œuvre	19,00	15,61	3,39
Energie (pompes, récolte, séchage)	4,00	3,75	0,25
Eau	0,50	0,48	0,02
Intrants	3,00	3,00	-
CO_2	2,00	2,00	-
Conditionnement	2,00	2,00	-
Charges diverses	3,00	1,92	1,08
TOTAL Exploitation	**34,68**	**29,68**	**5,00**
Amortissement (10 ans)	27,42	15,74	11,68
Frais financiers	4,47	2,55	1,92
Coût global	**66,57**	**47,98**	**18,59**

Tableau 28 : Coût par kg produit et sources d'économies d'échelle

Avec les hypothèses retenues, nous constatons un écart de coût de production de 18,6 euros par kg. Plus de 66% de cette différence vient des amortissements et donc des économies d'échelles réalisées sur la construction et l'équipement des serres. Cet impact est amplifié par les frais financiers qui se greffent sur l'investissement.
Le second poste tient à la main d'œuvre. Elle représente plus de la moitié du coût d'exploitation. Les gains de productivité sur des installations importantes se répercutent sur le coût final. Plus généralement, le poids de la main d'œuvre peut justifier d'automatiser l'installation à condition de ne pas alourdir excessivement les investissements (et donc l'amortissement).
Enfin, les autres postes permettent aussi de faire quelques économies d'échelle.
De ce point de vue, il faut veiller aux charges diverses (gestion, internet, téléphone, …) qui peuvent donner lieu à des dépassements importants.
Les petites installations et/ou celles qui sont fortement intégrées à la méthanisation ou à une exploitation agricole auront plus de facilités à faire appel à l'autoconstruction ou à mutualiser les coûts que les unités de taille plus importante.

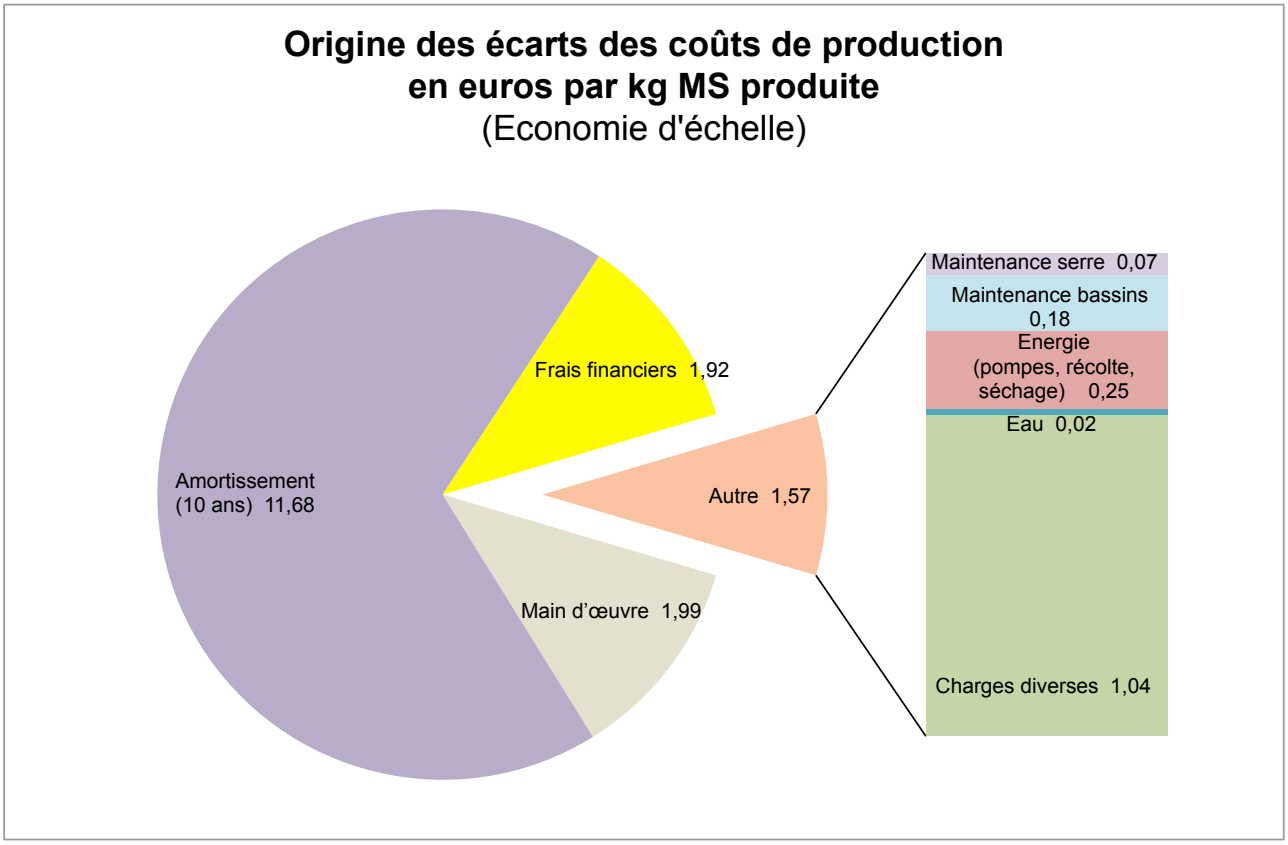


Figure 30 : Origine des écarts des coûts de production entre les projets à 105 kWe et à 400 kWe

4.3. Intégration du coût de la chaleur dans le prix de revient de la spiruline

Jusqu'à présent, les coûts d'exploitation ne tiennent pas compte de l'achat de chaleur par l'exploitant :

Nous avons retenu deux scénarios :

4.3.1.Scénario 1 : Achat de toute la chaleur

La totalité de la chaleur est achetée à un prix bas (10€ le MWh) ce qui aurait permis l'obtention de la prime à l'efficacité énergétique lors de son existence.
Pendant les heures des mois de printemps et d'été, les ouvertures latérales et de toiture doivent être ouvertes et les thermies seront dispersées dans l'atmosphère.

La livraison de la chaleur est de 786 MWhth dans le Poitou et de 3046 MWhth par an en Lorraine et respectivement, un coût de chaleur de 7860€ pour le projet de Poitou et de 30 460€ pour le projet Lorrain.

4.3.2.Scénario 2 : Achat selon les besoins

La chaleur est achetée selon les besoins pendant les 8 mois de production les plus importantes seulement. Les mois de Novembre à Février seront sans activité. On analysera trois valeurs de prix de vente.

- 10€ le MWh thermique
- 20€ le MWh thermique
- 30€ le MWh thermique

Le besoin en chaleur pour l'installation se situe pendant les heures où l'énergie solaire est insuffisante pour assurer le maintien en température en rapport des déperditions. Cela représente 55% de la consommation totale des mois concernés.
En Poitou la consommation sera donc de 269 MWh et de 1021 MWh pour le projet lorrain et environ 1/3 de la totalité de la chaleur disponible.

4.4. Sensibilité des résultats au prix de la chaleur

Sans être neutre, ce coût n'est pas déterminant dans le coût de revient de la spiruline.
Avec ces conditions d'achat, la chaleur représente entre 4% et 11% du coût de production pour le projet de 105 kWe et légèrement plus pour celui à 400kWe.

4.4.1. Deux niveaux de prix de revient pour 2 modèles d'activités différents

Ces résultats montrent qu'il y aurait bien 2 modèles de couplage à envisager. Le premier sur de petites puissances amène à produire une spiruline à des coûts équivalents à ceux des Spiruliniers sans chauffage. La chaleur va permettre de développer cette activité dans des régions moins favorables, mais sans changer fondamentalement de modèle en termes de mode de production ou de taille d'exploitation.
En revanche, un deuxième modèle peut émerger grâce à de la méthanisation avec des tailles d'exploitations plus importantes et une activité dédiée, éventuellement distincte. Quatre tonnes seraient produites par an, d'où un impact significatif sur le marché et un enjeu fort au niveau de la commercialisation. Le coût de production final décroche de 70 à moins de 50-55 euros par kilo, ce qui permet de se positionner sur des marchés de gros et de déléguer la commercialisation à une structure spécialisée.

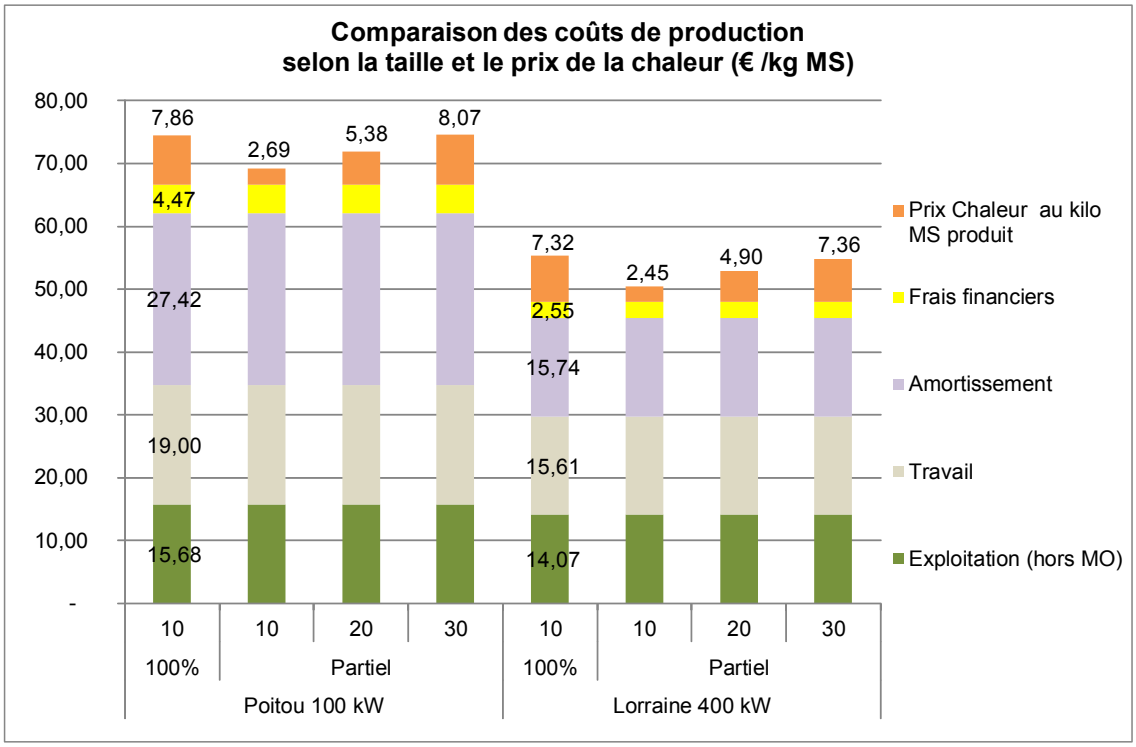


Figure 31 : Comparaison de la structure de coût de production

Il faut maintenant prendre en compte le coût de la commercialisation. Il sera bien entendu très différent selon le mode choisi. La marge de commercialisation en gros est faible, si on s'en réfère au prix indiqué dans le dossier économique de la Fédération des Spiruliniers de France qui l'indique à 80€ le Kg.
Dans tous les cas de figure, avec cette quantité d'énergie disponible, il est nécessaire d'avoir une commercialisation bien étudiée, car le prix de revient de la spiruline est au-delà du prix de gros constaté auprès des intermédiaires (Algae Green Value, Canopy, Hyes, ..) et proche de celui de la Fédération des Spiruliniers de France (2014).

Pas de bouleversement avec les petites unités, attention aux grandes
Avec des prix de revient équivalents, les spiruliniers méthaniseurs ne peuvent pas peser fortement sur les prix de marché. Cette observation est plutôt rassurante.
A l'inverse, des unités plus importantes relèvent un défi pour commercialiser des volumes 4 à 8 fois plus importants qu'une exploitation traditionnelle de spiruline. Elles bénéficient d'un atout prix, mais d'un déficit d'image artisanale et de notoriété. Elles peuvent avoir la tentation de vendre moins cher.
Par suite, tout le marché pourrait être déstabilisé.

4.4.2. Un complément de revenu intéressant pour le méthaniseur

Pour l'unité de 105 kWe, la vente de chaleur représente un revenu de 2500 € (achat partiel à 10 €/MWh) à 8000 euros en cas d'achat total ou d'achat partiel à 30 €/MWh. Ces revenus passent respectivement à 10 et 30 k€ pour l'unité de 400 kWe. La vente de chaleur peut-être un complément de revenu non négligeable.

Coût au kg de spiruline produite (€ / kg)	Poitou 105 kWe				Lorraine 400 kWe			
Stratégie d'achat	100%	Partiel			100%	Partiel		
Quantité de Chaleur achetée	786	269	269	269	3 046	1021	1021	1021
Prix par MWh	10	10	20	30	10	10	20	30
Revenu Chaleur (Euros par an)	7 860	2 690	5 380	8 070	30 460	10 210	20 420	30 630

Tableau 29 : Revenu pour le méthaniseur

Ce bilan est à moduler en regardant l'efficacité énergétique des 2 stratégies.
Un exploitant qui possède une unité de méthanisation peut choisir de valoriser sa chaleur par la culture de spiruline. S'il choisit cette option, on voit qu'il aurait intérêt à privilégier une autre destination pour sa chaleur pendant les 4 à 5 mois les plus froids. A cette période les besoins sont importants, et sauf en cas d'isolement de l'installation, il serait judicieux d'analyser la possibilité de réaliser un réseau de chaleur vers des bâtiments privés ou publics.
Pendant les périodes de printemps, été et début d'automne, il pourrait être intéressant d'envisager en complément une activité de séchage pour utiliser la chaleur pendant les heures diurnes. L'activité de séchage pouvant s'interrompre dès que la spiruline nécessite les apports de chaleur.
Dans notre scénario culture sur 8 mois on voit que l'on utilise un tiers de la chaleur du scénario 1 (achat de 80% de la chaleur totale) avec une production quasiment identique. L'utilisation de la totalité de la chaleur pour la spiruline, revient à en gaspiller plus de la moitié.

4.4.3. Calcul de V selon les modes choisis

Projet Poitou	Energie totale MWh	Energie électrique MWh	Energie Thermique MWh	Vmax
Chaleur totale sur 12 mois	2391	919.8	786	73.54
Chaleur sur 8 mois	2391	919.8	269	51.26
Chaleur vendable			517	Jusqu'à 73.5

Tableau 30 : Coefficient V - Poitou 105 kWe

On voit que le scénario de vente de chaleur réellement utile apporte déjà une valeur de V supérieure à 50 bien que le rendement électrique soit de 38.5% ce qui est assez faible aujourd'hui, mais normal pour un moteur de cette gamme. Dès qu'il sera possible de vendre des compléments de chaleur en hiver ou avoir une activité de séchage pendant la journée en été le V pourra monter assez rapidement. Nous sommes d'ores et déjà proches des exigences de l'ADEME pour obtenir une subvention d'équipement pour un projet de méthanisation, d'autant plus si il y a d'autres possibilités de la valorisation de la chaleur. Compte tenu des déperditions dans l'atmosphère, le coefficient seait plutôt de l'ordre de 65.

Projet Lorraine	Energie totale MWh	Energie électrique MWh	Energie Thermique MWh	Vmax
Chaleur totale sur 12 mois	8 738	3 504	3 046	77.27
Chaleur sur 8 mois	8 738	3 504	1 021	53.38
Chaleur vendable			2 025	Jusqu'à 77

Tableau 31 : Coefficient V - Lorraine - 400 kWe

Dans ce cas de figure, la valeur V est un peu plus importante, du fait de :

- Un meilleur rendement électrique du moteur
- Une moindre consommation thermique en % de l'unité de cogénération.

Cet exemple nous montre que l'on peut atteindre des V importants en valorisant bien la chaleur pendant l'hiver et en ayant une activité de séchage en été. Un V de 65 pourrait être obtenu, voire plus en démarrant la production de spiruline un peu plus tard (15 avril au 15 octobre) avec une vente de chaleur limitée aux autres utilisateurs à partir de ces dates.

Force est de constater que le V calculé en utilisation totale de la chaleur ne peut être réalisé qu'en dissipant énormément de chaleur en journée dès avril par les ouvrants de la serre et en cultivant à des saisons très peu productives, donc économiquement non rentables.

4.5. Risque économique et financier

4.5.1. Risque économique et financier du projet de 105 kWe

Pour l'installation du Poitou, si on considère un prix de référence de 70€/kg et une production espérée de 1000 kg, les charges techniques et financières s'élèveront à 39 k€ majoré de l'amortissement et du coût de la chaleur.
Si le producteur a un coût de production de référence différent, les charges sont à ajuster en conséquence. Comme nous l'avons vu, ce sont les amortissements et en amont l'investissement qu'il faut essayer de minorer La recherche d'une subvention d'installation peut être une piste de réduction de coût. Sinon seule la main d'œuvre et ici la rémunération de l'exploitant offre une marge de manœuvre significative. Pour le projet de 105 kWe, on peut espérer faire 30 k€ d'économie d'investissement sur une installation neuve, soit environ 3 k€/an.
A l'inverse, un accroissement des charges peut arriver avec une gestion pas assez rigoureuse.

Si la production est meilleure qu'espérée, les charges vont augmenter du fait des consommations variables d'environ 6 k€ pour 30% de mieux (axe vertical Figure 28 : Sensibilité des résultats selon le coût de production de référence et le rendement réalisé -). Et inversement si le rendement est moins bon. Ce sera notamment le cas si il y a des accidents de production sévères. Une baisse de 20 à 30% peut s'envisager lors d'une année noire (Les aléas normaux de production sont pris en compte dans notre calcul).

La combinaison des 2 facteurs permet d'évaluer premièrement le dérapage du coût de revient, puis le manque à gagner. L'amélioration des performances techniques permet de compenser une augmentation du prix de revient (les couleurs identifient des tranches de 10 en 10 euros). Le cadre rouge délimite les variations qui apparaissent usuelles au regard des incertitudes sur nos hypothèses.

Le manque à gagner atteint un seuil difficile quand il représente la moitié de la rémunération escomptée (soit 10 k€). Il devient critique au-dessus de ce montant. Le travail n'est plus rémunéré et l'exploitant ne finance plus ses amortissements. Nous pouvons constater que ces seuils sont assez rapidement franchis : le premier avec une baisse de 20% du rendement ou un dérapage de 10% des charges. La combinaison de 10% de charges en plus et d'une baisse de 10% du rendement conduit à dépasser le seuil critique. La rentabilité de la spiruline apparait donc relativement fragile, au moins en phase de démarrage quand le process est encore mal maitrisé.
Une bonne valorisation est d'autant plus nécessaire pour sécuriser le résultat final (10 € correspondent à un déplacement de 3 colonnes du cadre rouge vers la gauche). Le non-paiement de la chaleur donne une petite marge de sécurité (équivalent d'une à deux colonnes).

Par ailleurs, il se confirme qu'un coût de production complet à moins de 60 euros apparait difficile à atteindre (rendement de 25% supérieur à la référence) et un coût à 50 euros passe par une maîtrise technique et un contrôle des coûts drastiques (cumul de 30% de rendement en plus et de 15% de charges en moins).

Coût de revient (euro/kg MS)
selon le coût de référence et le rendement réalisé

Production en kg	Indice	Prix par kg	52,5	56,0	59,5	63,0	66,5	70	73,5	77,0	80,5	84,0	87,5	91,0
			75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130
		en euros												
1 450	145%		41	44	46	49	52	55	57	60	63	65	68	71
1 400	140%		42	45	47	50	53	56	59	61	64	67	70	73
1 350	135%		43	46	49	51	54	57	60	63	66	69	71	74
1 300	130%		44	47	50	53	56	59	61	64	67	70	73	76
1 250	125%		45	48	51	54	57	60	63	66	69	72	75	78
1 200	120%		46	49	52	56	59	62	65	68	71	74	77	80
1 150	115%		48	51	54	57	60	64	67	70	73	76	79	83
1 100	110%		49	52	56	59	62	65	69	72	75	79	82	85
1 050	105%		51	54	57	61	64	68	71	74	78	81	85	88
1 000	**100%**		**53**	**56**	**60**	**63**	**67**	**70**	**74**	**77**	**81**	**84**	**88**	**91**
950	95%		54	58	62	65	69	73	76	80	84	87	91	94
900	90%		57	60	64	68	72	76	79	83	87	91	94	98
850	85%		59	63	67	71	75	79	83	87	91	95	98	102
800	80%		62	66	70	74	78	82	87	91	95	99	103	107
750	75%		65	69	74	78	82	87	91	95	100	104	108	113
700	70%		68	73	78	82	87	91	96	100	105	110	114	119
650	65%		73	77	82	87	92	97	102	106	111	116	121	126
600	60%		77	83	88	93	98	103	108	113	119	124	129	134
550	55%		83	89	94	100	105	111	116	122	127	133	138	144

Montant du manque à gagner (en milliers d'euros)

n	Indice		52,5	56,0	59,5	63,0	66,5	70	73,5	77,0	80,5	84,0	87,5	91,0
			75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130
		en milliers d'euros												
1 450	145%		29	26	24	21	18	15	13	10	7	5	2	-1
1 400	140%		28	25	23	20	17	14	11	9	6	3	0	-3
1 350	135%		27	24	21	19	16	13	10	7	4	1	-1	-4
1 300	130%		26	23	20	17	14	11	9	6	3	0	-3	-6
1 250	125%		25	22	19	16	13	10	7	4	1	-2	-5	-8
1 200	120%		24	21	18	14	11	8	5	2	-1	-4	-7	-10
1 150	115%		22	19	16	13	10	6	3	0	-3	-6	-9	-13
1 100	110%		21	18	14	11	8	5	1	-2	-5	-9	-12	-15
1 050	105%		19	16	13	9	6	2	-1	-4	-8	-11	-15	-18
1 000	**100%**		**18**	**14**	**11**	**7**	**4**	**0**	**-4**	**-7**	**-11**	**-14**	**-18**	**-21**
950	95%		16	12	8	5	1	-3	-6	-10	-14	-17	-21	-24
900	90%		13	10	6	2	-2	-6	-9	-13	-17	-21	-24	-28
850	85%		11	7	3	-1	-5	-9	-13	-17	-21	-25	-28	-32
800	80%		8	4	0	-4	-8	-12	-17	-21	-25	-29	-33	-37
750	75%		5	1	-4	-8	-12	-17	-21	-25	-30	-34	-38	-43
700	70%		2	-3	-8	-12	-17	-21	-26	-30	-35	-40	-44	-49
650	65%		-3	-7	-12	-17	-22	-27	-32	-36	-41	-46	-51	-56
600	60%		-7	-13	-18	-23	-28	-33	-38	-43	-49	-54	-59	-64
550	55%		-13	-19	-24	-30	-35	-41	-46	-52	-57	-63	-68	-74

Avec 30% de rendement en plus, le coût de production est de 59 €/kg

Baisser le coût de revient à 50 €/kg conjugue une baisse de 15% des charges et un rendement moyen de 130%

Coût de revient de référence avec 100% du rendement de référence

+ ou – 15% de charges se traduisent par une variation de 10euros sur le coût de revient

Ecart entre le CA espéré et le CA réalisé (Coût de revient X volume produit)

La rémunération réduite de moitié

Absence de rémunération

Figure 32 : Sensibilité des résultats selon le coût de production de référence et le rendement réalisé - 105 kWe

4.5.2 Sensibilité du résultat économique du projet de 400 kWe

Pour le projet de 400 kWe, nous sommes amenés à modifier les seuils. Le prix de référence est de 50 €/kg.
Avec des de variations équivalentes en pourcentage, la zone de fluctuations du prix de revient apparait légèrement plus large.
En revanche, du fait des volumes en jeu, le manque à gagner est beaucoup plus sensible. Nous situons 2 seuils : le premier à 20 000 euros qui correspond à un emploi. Le second à 40 000 euros où le 2ième emploi est en jeu. Dans ce projet qui représente un investissement financier substantiel, les difficultés seront d'abord liées à l'organisation du travail.
Avec un équilibre économique à 50 €/kg, les équilibres apparaissent encore fragiles. En prévoyant 10 €/kg de marge commerciale, la zone de risque se réduit fortement (elle équivaut à un déplacement de 4 colonne vers la gauche).

Coût de revient (euro/kg MS)
selon le coût de référence et le rendement réalisé

Production en kg	Indice	Prix par kg	37,5	40,0	42,5	45,0	47,5	50	52,5	55,0	57,5	60,0	62,5	65,0
			75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130
		en euros												
6 038	145%		30	32	34	36	38	**40**	42	44	46	48	50	52
5 830	140%		31	33	35	37	39	**41**	43	45	47	49	51	53
5 621	135%		31	33	36	38	40	**42**	44	46	48	50	52	54
5 413	130%		32	34	36	38	41	**43**	45	47	49	51	53	55
5 205	125%		33	35	37	39	41	**44**	46	48	50	52	55	57
4 997	120%		34	36	38	40	42	**45**	47	49	51	54	56	58
4 789	115%		34	37	39	41	44	**46**	48	50	53	55	57	60
4 580	110%		35	38	40	42	45	**47**	49	52	54	57	59	61
4 372	105%		36	39	41	44	46	**48**	51	53	56	58	61	63
4 164	**100%**		**38**	**40**	**43**	**45**	**48**	**50**	**53**	**55**	**58**	**60**	**63**	**65**
3 956	95%		39	41	44	47	49	**52**	54	57	59	62	65	67
3 748	90%		40	43	45	48	51	**54**	56	59	62	64	67	70
3 539	85%		42	44	47	50	53	**56**	58	61	64	67	69	72
3 331	80%		43	46	49	52	55	**58**	61	64	67	70	72	75
3 123	75%		45	48	51	55	58	**61**	64	67	70	73	76	79
2 915	70%		48	51	54	57	60	**64**	67	70	73	76	79	83
2 707	65%		50	54	57	60	64	**67**	70	74	77	80	84	87
2 498	60%		53	57	60	64	68	**71**	75	78	82	85	89	92
2 290	55%		57	61	65	68	72	**76**	80	84	87	91	95	99

Montant du manque à gagner (en milliers d'euros)

n	Indice		37,5	40,0	42,5	45,0	47,5	50	52,5	55,0	57,5	60,0	62,5	65,0
			75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130
		en milliers d'euros												
6 038	145%		83	74	66	58	49	**41**	33	24	16	7	-1	-9
5 830	140%		80	72	63	55	46	**38**	29	21	12	4	-5	-13
5 621	135%		78	69	60	52	43	**34**	25	17	8	-1	-9	-18
5 413	130%		75	66	57	48	39	**30**	22	13	4	-5	-14	-23
5 205	125%		72	63	54	45	35	**26**	17	8	-1	-10	-19	-28
4 997	120%		69	59	50	41	31	**22**	13	3	-6	-15	-25	-34
4 789	115%		65	55	46	36	27	**17**	8	-2	-11	-21	-31	-40
4 580	110%		61	51	41	32	22	**12**	2	-8	-17	-27	-37	-47
4 372	105%		57	47	37	26	16	**6**	-4	-14	-24	-34	-44	-54
4 164	**100%**		**52**	**42**	**31**	**21**	**10**	**0**	**-10**	**-21**	**-31**	**-42**	**-52**	**-62**
3 956	95%		47	36	25	15	4	**-7**	-18	-28	-39	-50	-61	-71
3 748	90%		41	30	19	8	-4	**-15**	-26	-37	-48	-59	-70	-82
3 539	85%		35	23	11	0	-12	**-23**	-35	-46	-58	-70	-81	-93
3 331	80%		27	15	3	-9	-21	**-33**	-45	-57	-69	-81	-93	-105
3 123	75%		19	6	-6	-19	-31	**-44**	-57	-69	-82	-94	-107	-120
2 915	70%		10	-4	-17	-30	-43	**-57**	-70	-83	-96	-109	-123	-136
2 707	65%		-1	-15	-29	-43	-57	**-71**	-85	-99	-113	-127	-141	-155
2 498	60%		-14	-29	-43	-58	-73	**-88**	-103	-118	-132	-147	-162	-177
2 290	55%		-29	-45	-60	-76	-92	**-108**	-124	-140	-155	-171	-187	-203

Figure 33 : Sensibilité des résultats selon le coût de production de référence et le rendement réalisé - 400 kWe

Ces résultats appellent à la vigilance et à l'exigence : les équilibres sont fragiles et la rémunération du travail est le premier poste d'ajustement. Le second est de ne plus payer la chaleur. Le méthaniseur peut alors perdre le revenu escompté.

N'oublions pas les aléas de la culture de spiruline (intégrés aux calculs) et ceux de la méthanisation (acidose, accidents techniques…) qui peuvent contrarier la livraison de chaleur et donc réduire la productivité. Il est donc important que le méthaniseur possède une chaudière de secours comme défini.
L'exigence portera sur l'investissement qui détermine durablement le prix de revient et sur les prix de vente. Le spirulinier doit s'assurer d'une marge commerciale suffisante pour se sécuriser.

5. Faisabilité humaine

L'étude de la faisabilité technique et économique met en exergue la fragilité des résultats économiques. Le premier facteur tient au rendement et donc à la maîtrise technique. L'adossement à la méthanisation facilite l'atteinte de résultats techniques notamment dans des régions qui ne sont pas naturellement propices. Pour autant, elle ne met pas à l'abri d'accidents de production et ou de performances faibles. Les qualités professionnelles apparaissent importantes.

5.1. Compétences

En amont, la réduction de l'investissement passe par de l'autoconstruction. Il faut donc mobiliser les énergies et les compétences d'autant plus qu'elles apparaissent assez accessibles.
L'exploitant doit avoir une bonne compréhension des dynamiques biologiques en cours. Faute de références clairement établies, il doit faire preuve d'attention et de vigilance pour détecter les déséquilibres du milieu et de la croissance de la spiruline. Une formation au suivi biochimique de l'eau des bassins et à l'évaluation des performances de croissance est incontournable.

Biologie et normes alimentaires
Par ailleurs, les manipulations de la spiruline et sa vocation alimentaire exigent une connaissance et un respect des normes sanitaires. Le milieu de culture est naturellement sélectif, mais les algues récoltées sont sujettes à des contaminations, notamment d'origine humaine.

Se faire accompagner
Ces constats justifient de se faire accompagner techniquement. Des offres de conseil existent. Cependant elles sont souvent couplées à des propositions de rachats de spiruline ce qui pose la question du prix réel de ces services. Comme en approvisionnement agricole, le prix du conseil est intégré au prix du produit.
La question se pose d'autant plus que les prix évoqués sont éloignés des coûts de production calculés.

Sécuriser son projet suppose de sécuriser sa marge au moins sur les premiers kilos produits. Comme dans toute activité, il faut avoir un suivi fin des coûts de production, pour identifier ce qui tient du manque de performance (ou de meilleures performances) ou d'une dérive des coûts.
La variable d'ajustement spontanée est la rémunération du travail. Il convient donc d'être vigilant.

5.2.Disponibilité, spécialisation et saisonnalité

En période de production, la spiruline exige un travail régulier, pour la récolte et le conditionnement, mais aussi pour une surveillance de la croissance et du milieu. Un des principaux facteurs naturels est la lumière ce qui se répercute par une pointe de production et donc un accroissement de travail en été, au même moment que la charge des travaux agricoles classiques.
Il y a plutôt un cumul des saisonnalités. En hiver, une question importante est de savoir s'il faut continuer à produire. La production attendue ne le justifie pas forcément.

La culture de la spiruline est plus le fruit d'un savoir-faire que d'un itinéraire technique précisément défini. La montée en compétence et les spécificités justifient donc une spécialisation relative des postes. Il faut être vigilant et réactif en cas de problèmes ou d'alertes.
Enfin, cette spécialisation des fonctions apparait comme une des clés de l'amélioration de la production initiée par le couplage avec la méthanisation. Elle ouvre la voie à la culture d'autres microalgues plus exigeantes mais offrant une meilleure rentabilité.

5.3.Commercialisation et savoir-être

La préservation et la sécurisation de la marge passe par la commercialisation. Deux voies ressortent : la vente directe et la vente en gros.

Vente directe
La vente directe est la solution traditionnelle sur les salons spécialisés et les marchés et, ensuite, par Internet qui est un relais incontournable . Elle suppose des aptitudes commerciales, une disponibilité et une implication forte. Il faut vendre 30 ou 50 euros par kg de plus pour rémunérer 1 ETP, les frais commerciaux et se doter d'une marge de sécurité. Dans ces conditions, c'est un choix intéressant et sécurisant.

En préalable, le porteur de projet doit être clair sur sa volonté et sa capacité à s'investir dans la vente directe.
SI c'est le cas, il devra investir dans la construction de son image et la maîtrise de la qualité de sa production. Des investissements marketing sont nécessaires en amont, puis de la promotion ensuite. L'association des images de la méthanisation, activité industrielle de traitement de déchet (ou processus biologique naturel de dégradation de la matière organique) et de celle de la spiruline n'est pas évidente. Il s'agit d'un point clé du positionnement. Techniquement, il est important de rapprocher les installations pour limiter le transport de la chaleur. La préservation du côté naturel de la spiruline pousserait à les éloigner. Difficile de trouver le bon compromis.

Enfin, signalons que la vente directe ne permet d'écouler que des volumes limités. Elle convient donc aux petits projets qui joueront sur leur marché de proximité, sauf à se trouver dans une zone touristique.

Commercialisation déléguée
L'alternative est de déléguer la commercialisation. C'est la solution que privilégient le plus souvent les porteurs de projet de couplage. Cette solution s'avère sécurisante à condition d'avoir une vision juste de son coût de production, en intégrant la rémunération du travail, celle de la chaleur et les aléas.
Les prix évoqués sont situés autour de 50 €/kg pour des unités dont nous apprécions le coût de revient vers 70 €/ kg. De fait, soit une partie des charges n'est pas intégrée, soit elle est supportée par la méthanisation au travers notamment de la prime à l'efficacité énergétique, ou de l'exploitation agricole.

L'autonomie du méthaniseur – spirulinier se paye par la maîtrise de la commercialisation. Ce faisant, la part de risques pris augmente. Elle est importante car, d'une part, le métier est nouveau et, d'autre part, la production de chaleur apportée par la méthanisation amène rapidement à produire une quantité de spiruline qui sera au moins le double du spirulinier traditionnel.

5.4. Quatre clés d'une cohabitation réussie des métiers

Un couplage de méthanisation et de spiruline fait cohabiter 3 métiers : Agriculteur, Méthaniseur, Spirulinier. La réussite de cette cohabitation exige de préciser 4 aspects déterminants :
Niveau de rémunération nécessaire
La rémunération du travail est le principal coût hors investissement. C'est aussi la principale variable d'ajustement. Pour éviter les mauvaises surprises, il faut être clair sur le niveau de rémunération espéré et la capacité financière et symbolique à s'en passer.

Taille de l'installation – Travail
La mise à disposition de chaleur offre la possibilité d'une unité de taille rapidement importante, 3 à 4 fois supérieure à la production annuelle des spiruliniers actuelles. La spiruline n'est pas une activité annexe et intermittente et ses périodes de travail se surajoutent à la charge de travail nécessaire pour la méthanisation et l'exploitation agricole. Une partie du travail de suivi et de récolte est incompressible quelques soit la taille de l'exploitation.
Si la vente directe est envisagée, ses exigences doivent être intégrées.

Montée en compétence et accompagnement
Comme tout nouveau métier, la méthanisation et la spiruline supposent une formation, un apprentissage pour assurer une montée en compétence. Les deux métiers ont leurs spécificités.
Le porteur de projet doit veiller à sa capacité d'apprentissage en parallèle ou non.
Le choix de l'accompagnement est un des moyens d'alléger ou d'étaler son investissement et de se sécuriser.

Organisation, Spécialisation des fonctions ou non
Ces différents aspects renvoient à des questions d'organisation et de répartition des rôles en ajustant correctement l'affectation des aptitudes aux activités traditionnelles et nouvelles.
Notre préconisation est d'aller vers une spécialisation de suivi. Apprécier la bonne santé d'un bassin est un exercice subtil et le diagnostic passe par une bonne capacité d'analyse et de savoir-faire.
Après les questions propres à la montée en charge, il est nécessaire de mettre en place des alertes, si possible automatisées, afin de réagir au mieux pour éviter les accidents et optimiser la production.

PARTIE 3 : SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

1. Enseignements

1.1. Observations à partir des unités à 105 et 400 kWe

1.1.1. Incertitudes sur le développement du marché

L'offre de spiruline va progresser. Si les projets de couplage à la méthanisation en cours se concrétisent, nous serons confrontés à une brusque accélération de la croissance de l'offre. La disparition de la prime à l'efficacité énergétique poussera cependant les porteurs de projets à envisager des mises en œuvre plus progressives. Avec la prime à l'efficacité énergétique les projets devaient être menés en même temps.
La capacité du marché à absorber la nouvelle offre constitue la principale inconnue. C'est possible à condition de développer des produits transformés et de faire des efforts de promotion et de communication.
Cette dynamique passe par une structuration accélérée du marché à 2020, avec l'apparition d'agrégateurs capables de proposer 20% des volumes actuels à des prix légèrement inférieurs aux prix de gros de la FSF.

Les différents acteurs perçoivent ces évolutions de façon différentes :

- Certains spiruliniers croient aux possibilités de développement rapide du marché, ce qui est bon signe.
- D'autres algoculteurs font de la spiruline la porte d'entrée vers le développement de l'algoculture.
- Des porteurs de projet, plutôt issus de la méthanisation, y trouvent une solution facile de valorisation de chaleur, sans avoir une connaissance approfondie du marché.

Dans tous les cas, notons que ce sont les agriculteurs qui investissent, rarement leurs partenaires commerciaux (agrégateurs ou industriels).

1.1.2. Spiruline : atelier principal ou secondaire, autonome ou non

La spiruline ne permet pas de valoriser toute la chaleur en été, sauf à développer des surfaces de bassins très importantes. A ce jour, il n'y a pas de technologies qui le permettent à un coût raisonnable.

En hiver la disponibilité de chaleur est rapidement un facteur limitant au même titre que la lumière. L'opportunité de produire en hiver n'est pas évidente, d'autant plus si on se situe au nord de la Loire.
L'intérêt du couplage est manifeste sur les intersaisons, pendant lesquelles le chauffage va faciliter la croissance des microalgues. Un ordre de grandeur est de prévoir environ 1000 m² de serres pour 100 kWe (à ajuster selon le climat local et l'autoconsommation par le digesteur).

La production de spiruline doit donc plutôt s'envisager comme un élément dans un ensemble de solutions de valorisation de la chaleur.
Pour la chaleur restante, le choix est alors d'en faire un atelier principal ou secondaire.
Une autre entrée est de raisonner selon la main d'œuvre disponible. La spiruline est une production saisonnière mais à temps complet. Si une partie des travaux reste simple, la conduite de l'unité nécessite à minima une personne compétente.

1.1.3. Efficacité énergétique à améliorer

La comparaison de nos calculs et des projets laisse penser que l'unité de méthanisation pourrait avoir une meilleure valorisation de la chaleur disponible soit en augmentant la surface de bassin soit en trouvant d'autres valorisations. Une condition est de trouver ces valorisations complémentaires.
Par ailleurs, la chaleur n'apparait pas comme un coût de production suffisamment important pour pousser à son optimisation, sauf si c'est la condition pour obtenir une subvention ou un tarif préférentiel.

1.1.4. Le chauffage ne suffit pas à l'intensification

L'apport de chaleur va permettre d'élargir la période de production et d'agrandir les surfaces en production. Pour autant, les rendements sont rapidement plafonnés par les autres facteurs limitants : l'enrichissement en CO^2 apparait incontournable. La lumière représente un frein plus difficile à lever aujourd'hui, mais qui pourrait être rapidement contourné avec les LED. A ce moment, les schémas techniques pourraient fortement se différencier.

1.1.5. Des modèles différenciés

L'étude de faisabilité permet de distinguer clairement 2 modèles de couplage :

- Un atelier à 1 ETP dédié, correspondant à une cogénération de 105 kWe (ou à une partie d'une unité plus importante), avec 1000 m² de bassins pour un coût de production équivalent à celui des méthaniseurs traditionnels (autour de 70 €/kg MS) et donc un mode de valorisation équivalent, basé sur la vente directe pour garder la valeur ajoutée.

- Une unité autonome de 4 à 500 kW – 4 à 5000 m² de serre, avec 1 ETP et des saisonniers, dont un qualifié, qui visera une production de 4/5 tonnes/an entre 45 et 55 €/kg. L'enjeu est alors de trouver les débouchés auprès de la distribution spécialisé. Sauf à envisager une organisation commerciale interne, la vente en gros apparait incontournable. Il existe aussi une possibilité de vente vers l'industrie à identifier avant de s'engager (pharmaceutique, cosmétique…).

Tels qu'ils apparaissent conçus, les projets actuels ne sont pas complètement cohérents avec chacun des modèles : sur les petites unités, le prix de vente de 50 €/kg est insuffisant pour leur assurer un équilibre économique indépendamment de la méthanisation (via prime à l'efficacité énergétique) ou de l'exploitation agricole (investissement). Sur des unités plus importantes (qui n'existent pas encore à notre connaissance), la place de l'intermédiaire reste à discuter.

1.2. Montée en charge entre 105 et 400 kWe

La production croît avec la puissance de façon quasi-linéaire. Techniquement, la montée en charge sera contrainte par les dimensions des bassins.

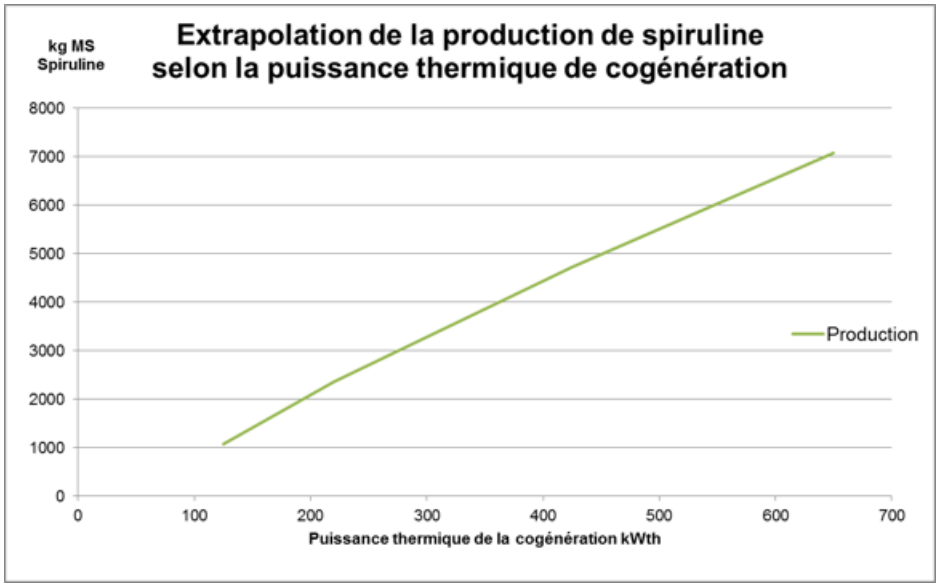


Figure 34 : Extrapolation de la production de spiruline selon la puissance thermique de cogénération

Concernant le travail, et en envisageant d'avoir automatisé la récolte, la saisonnalité de la production conduit à envisager des emplois saisonniers pour seconder le responsable des manipulations simples.
En revanche, la dimension financière du projet s'accroit rapidement ce qui peut constituer le véritable point bloquant. La clé reste cependant la commercialisation avec un équilibre entre vente directe et vente en gros qui n'est pas évident.

1.3. Pistes de progrès

1.3.1. Coût de production et économies d'échelle

La chaleur a un poids secondaire dans le coût de production : le premier poste est représenté par les amortissements et donc les investissements. Vient ensuite le travail, la chaleur, puis les frais financiers.

Poids de l'investissement

L'influence des amortissements fait que le coût de revient est donc largement déterminé au démarrage (entre 60 et 70% des coûts sont fixes). L'autoconstruction est source d'économies. Cette structure de coûts laisse la place à des économies d'échelle au niveau des serres, des équipements et du laboratoire indispensables à la production.
Un enjeu est de déterminer correctement le coût de revient incompressible de chaque projet afin de négocier en conséquence le prix de vente de la spiruline.

Dimension standard des serres

La mise en place des installations et la valorisation et le pilotage de la chaleur sont largement contraints par la dimension standard des serres. Il serait trop coûteux de s'en écarter sauf à inventer de nouveaux modèles. Le déploiement se fait par modules avec des effets de seuils importants.
L'arbitrage entre surface et température est à optimiser pour chaque site.

Travail – automatisations

Les pratiques sont en train d'évoluer et de se professionnaliser. L'automatisation de la récolte allège la charge de travail. On peut parier sur des progrès significatifs en matière d'outils de pilotage. Le recours au chauffage devrait y participer. L'enrichissement en CO^2 est nécessaire, demain l'éclairage, …
L'intensification est en marche et elle sera accélérée et incontournable si de grandes installations voient le jour. La réduction du coût de la main d'œuvre et l'augmentation de la productivité par salarié seront les clés de la réussite économique.
Au vu des pratiques artisanales, des gains importants sont envisageables pour tous les types d'installations.

1.3.2. Risques et opportunités

Sur des projets innovants, nous distinguons classiquement des risques de natures différentes, car les solutions qu'ils appellent sont différentes. A chaque fois, le risque ne doit pas se lire que de façon négative mais comme une opportunité de s'améliorer.

Apprentissages et accompagnement

Il n'existe aujourd'hui pas de références formelles sur la production de spiruline. Pour preuve, signalons la difficulté que nous avons eu à définir des valeurs de référence et l'incertitude qui est attachée autour de chacune d'entre-elles.
Au-delà de la formation au CFA d'Hyères, l'apprentissage se fait par les pairs.
A chacun de se construire son savoir-faire. Chaque porteur de projet doit faire preuve d'une implication forte et d'une capacité à monter en compétences et à gagner en autonomie, avec en premier lieu le suivi et l'analyse de ses propres performances.
Les accompagnements proposés par certains acheteurs ne pourront s'y substituer complètement. Rester dans une dynamique d'apprentissage sera important pour limiter progressivement le risque inhérent à la production.

Articulations et perturbations

L'association des activités de méthanisation et de spiruline supposent des articulations pour limiter les perturbations et les concurrences entre les activités telles que l'attention au suivi des cultures ou la gestion des ruptures d'alimentation de chaleur.

Plusieurs stratégies de pilotage et d'achat de la chaleur sont envisageables. Elles doivent être raisonnées pour assurer une continuité des flux de chaleurs sous peine d'altérer fortement les productions de spiruline.
Plus les activités seront intégrées et impliqueront les mêmes personnes, plus il faut veiller à l'organisation du travail. Les enjeux sont d'avoir une bonne disponibilité pour effectuer les manipulations, mais surtout le suivi indispensable des fonctionnements biologiques sur la spiruline comme sur la méthanisation. Une attention particulière est à apporter aux périodes de pointe.

Enfin, le choix du positionnement commercial et la délégation plus ou moins poussée de la vente sont à définir selon les envies, les aptitudes et les possibilités de partenariats.

Accidents
La physiologie de la spiruline laisse place à des surprises mal expliquées, avec notamment des dégénérescences et la « mort de bassins », ce qui est partiellement intégré dans nos hypothèses de rendement. Ce risque justifie de sécuriser sa capacité à réensemencer et à assumer financièrement le manque à gagner pendant cette période.

Il est également très important de suivre avec attention les règles d'hygiène. Un projet de méthanisation est souvent à proximité d'un élevage, son couplage avec une unité de production de spiruline nécessite des règles strictes lors du passage d'un des sites à l'unité de spiruline et encore plus lors de l'entrée dans le laboratoire de récolte et de conditionnement.
Plus difficile à gérer sont les évolutions de réglementation et d'incitation en matière d'efficacité énergétique. La révision tarifaire en cours en est un exemple. Pour les unités en place, la veille reste incontournable.

Inconnues
Enfin, ces projets doivent gérer plusieurs inconnues. Il est difficile de prévoir l'image d'une proximité forte entre Méthanisation – Spiruline. S'agit-il d'une industrialisation d'une production naturelle ? Qui plus est en valorisant une énergie provenant des effluents d'élevage ? Ou au contraire, un exemple précurseur d'une économie circulaire de plus en plus nécessaire ?

La deuxième inconnue largement documentée tient au développement du marché et à la place des agrégateurs. Ces derniers ouvrent la possibilité de s'adresser à un public plus large, en démocratisant le produit via la distribution spécialisée. C'est la voie empruntée par nombre d'aliments (à commencer par le bio) avec des succès divers. A court terme, ces démarches peuvent être plutôt bien accueillies. Mais elles restent à la merci de la 3ième inconnue décrite ci-dessous.

Celle-ci est constituée par l'émergence de géants, qui débarqueraient sur le marché avec 10 à 20 tonnes voire plus. Des projets en ce sens existent. Même si leur vocation initiale n'est pas la spiruline, la facilité relative de cette algoculture et de sa valorisation sont à même de susciter des intérêts. Avec de tels projets, la spiruline perdrait son statut de produit de niche et surtout de prix de référence.

2. Impacts de la révision tarifaire

La révision tarifaire en cours va avoir un impact très direct par la suppression de la prime à l'efficacité énergétique. Les méthaniseurs auront moins besoin de valoriser leur chaleur et d'investir en conséquence. La spiruline apparaissait comme une solution accessible.
La vente de la chaleur sur les unités décrites aurait l'impact suivant (hypothèses d'une prime effluent d'élevage maximale et moteur fonctionnant 8 000h au régime nominal selon le tarif à venir).

Projet	Moteur	Gain électrique	Vente de la chaleur	% du CA
Poitou	105 kWe + 128 kWth	193 200 €	8 070 €	4.01%
Lorraine	400 kWe + 445 kWth	691 200 €	30 630 €	4.24%

Tableau 32 : Rémunération du méthaniseur

Il ressort de ces données que la part du CA est faible mais procure néanmoins un complément de marge non négligeable sur une unité de méthanisation, car cela représente un gain marginal (seule obligation d'investir dans une chaudière de secours dimensionné à la taille de la chaleur de la cogénération, et non aux seuls besoins de l'unité de méthanisation).
Il faut ajouter que ce complément de revenu peut être fortement augmenté par la vente de chaleur en hiver et une activité de séchage en été.

2.1. Coût de revient et prix de vente

Nombre de projets de spiruline visaient à sécuriser la prime d'efficacité énergétique à hauteur d'environ 35 €/MWh. La rémunération complémentaire de la chaleur apparaissait secondaire. Il y avait parfois la tentation de la donner, voire de la livrer à un coût négatif.
En dissociant la valorisation de la chaleur de celle de l'électricité, la chaleur peut être perdue. Elle doit donc être valorisée sans investissement lourd pour le méthaniseur et si possible, constituer un revenu annexe.
Ce changement se traduit par un transfert de charge de la méthanisation vers l'atelier de spiruline, qui prend la forme d'un réseau de chaleur et/ou d'un prix d'achat des thermies livrées. Le coût de revient de la spiruline s'en trouve pénalisé ce qui doit se répercuter sur son prix de vente ou sur la rentabilité de cette production.

2.2. Niveaux d'exigence revus à la hausse

Les deux acteurs vont revoir leurs exigences à la hausse : le méthaniseur qui a moins intérêt à investir et plus à vendre ; le spirulinier qui va chercher une meilleure efficacité énergétique de la chaleur achetée et à sécuriser sa production.
La prime d'efficacité énergétique créait une interdépendance et un bénéfice à se partager. Sa disparition ramène à des relations plus classiques de client-fournisseur. Le spirulinier se posera la question de l'intérêt du chauffage ; le méthaniseur celui du prix de vente.

Pour l'ADEME
Comme on le voit, les encouragements à l'efficacité énergétique auront un impact fort. Les besoins thermiques de la spiruline restent très saisonniers. Il y a sans doute de meilleures valorisations possibles en hiver et peu de besoins réels en été ce qui renvoie à la question du mix de solutions à envisager pour réellement valoriser la chaleur de la cogénération.

2.3. Sélection et étalement des investissements et des projets

La conséquence la plus immédiate de l'abandon de la prime à l'efficacité énergétique sera sans doute un report de la mise en place des ateliers de spiruline à côté des méthaniseurs. Les porteurs de projets interrogés l'ont spontanément tous signalés. L'enjeu est d'étaler les risques, de se donner le temps de maîtriser la méthanisation avant de s'impliquer dans la 3ième activité qu'est l'algoculture.
Les unités au-dessus de 300 kW devront privilégier l'injection de biométhane. Elles seront moins nombreuses à faire de la cogénération, ce qui limite le nombre de couplages de grandes dimensions à même de perturber rapidement et fortement le marché. Cependant force est de constater que la méthanisation étant une activité agricole, et que souvent les projets sont sur des sites éloignés des réseaux de distribution du gaz naturel, dans ce cas, la seule valorisation possible restera la cogénération.
L'augmentation de la production de spiruline devrait être moins rapide et plus conforme au rythme observé jusqu'à présent. L'insertion sur le marché de nouveaux volumes produit sur la base de méthanisation serait en conséquence plus facile.

2.4. Effet structurant ou mortifère

Au final, la révision tarifaire devrait avoir un effet structurant avec un renforcement des exigences et une plus forte sélection des projets de couplage. Poussé à l'extrême, ce serait un effet mortifère pour les couplages, les conditions techniques et économiques n'étant plus réunies pour qu'il y ait un réel intérêt.
Cependant, les unités couplées ont un coefficient V supérieur à 50, pouvant atteindre 70 en cas de complément de valorisation ce qui les rendraient éligibles à des subventions d'investissement sur l'unité de méthanisation.

Ceci est cependant très intéressant, car, dans le contexte de la prime à l'efficacité énergétique, il était nécessaire de créer l'unité de valorisation de la chaleur en même temps que la cogénération. Les porteurs de projet se trouvaient obliger de démarrer en même temps deux nouvelles activités. Aujourd'hui le porteur de projet pourra attendre de bien maitriser son unité de méthanisation et par la suite créer sa culture de spiruline beaucoup plus sereinement. Plus simplement encore, il vendra sa chaleur à une exploitation spécialisée en lui proposant de l'installer à proximité.

3. Synthèse : 4 modèles de couplage

En synthèse, nous pouvons identifier 4 modèles de couplage que nous positionnons par rapport à une exploitation « fermière » de spiruline.

3.1. Modèles de couplage

3.1.1. Méthaniseur, fournisseur d'énergies

Le méthaniseur fournit sa chaleur à un exploitant de spiruline. Les deux entités sont indépendantes juridiquement et fonctionnellement. Elles sont liées par un contrat qui intègre des clauses de livraison, de comptabilisation des thermies et de tarifs. Le point le plus difficile tient à la gestion des interruptions totales de production de biogaz (ce qui est rare) et aux répercussions qu'elles peuvent avoir sur la production de spiruline. Il y a une dépendance du spirulinier. La réciproque n'est vraie que si le méthaniseur y trouve une rémunération directe ou indirecte (via la vente de chaleur ou des subventions) et qu'il a pas ou peu d'alternatives en termes de valorisation de chaleur.
De fait, nous serons sur des unités de petites ou de moyenne taille.

3.1.2. MéthaSpiruline : Méthanisation et Spiruline artisanale (105 kWe)

Ce modèle correspond à celui de 105 kWe étudié. L'intégration est plus poussée avec une petite méthanisation associée à un atelier de spiruline d'environ 1000 m², en complément d'une activité agricole. Les enjeux tiennent la maîtrise des 3 métiers et à la vente directe de spiruline. Cette intégration permet de mutualiser certaines charges, notamment en démarrage. Elle garde une capacité de développement en conjuguant amélioration de l'efficacité énergétique et optimisation de la production de spiruline.
En revanche, l'accroissement de puissance en cogénération pourrait obliger à explorer de nouvelles voies de valorisation faute d'avoir la capacité à écouler toute la spiruline.

3.1.3. Algoculture portée AES : Agricoles - Energie – Spiruline (250- 500 kWe)

Ce modèle correspond plus à l'exemple à 400 kWe. Le financement et l'organisation du travail en sont les facteurs clés du succès. Ils apportent la sécurité et la souplesse pour gérer les incertitudes techniques. La commercialisation passe par des agrégateurs, des industriels ou le développement d'une démarche de commercialisation auprès de la distribution spécialisée.
De par sa taille, ce modèle est sensible aux évolutions réglementaires et aux exigences en termes d'efficacité énergétique. A l'inverse, il offre des possibilités d'optimisation pour développer d'autres voies de valorisation.

3.1.4. Projets industriels

Ces projets visent un potentiel de plus de 10 tonnes de spiruline. Il n'y a pas de références aujourd'hui. La méthanisation est une source de chaleur mais d'autres chaleurs fatales pourraient s'envisager. Il s'agit clairement de mettre en place des synergies au sein d'un projet plus large. En symétrique, la spiruline est retenue pour sa relative simplicité. Le développement est porté par un acteur industriel capable de s'impliquer dans la construction d'une filière. Les molécules d'intérêt (phycocyanines, par exemple) sont des débouchés privilégiés, mais la vente de la spiruline séchée reste la plus accessible. La maîtrise technique de la production est l'enjeu majeur.

3.2. Caractéristiques des différents modèles

	Existant en France	Méthaspiruline	AES	Projets industriels
		Valorisation de la chaleur par la spiruline		
Méthanisation	-	Cogénération 105 kWe	Cogénération 200 – 500 kW	Cogénération ou autres + de 500 kWe
Production en France	150 exploitations artisanales (200 à 4000 m² de bassins)	10 projets par an à 1 t 1000 m²	3 projets par an entre 4 et 6 t 4 - 5000 m²	Plus de 10 t/an mini
Abris	Abris froids, production limitée et saisonnière Séchage et transformation artisanale	Bassins sous Serres plastiques chauffées Arrêt partiel Hiver	Bassins sous serres plastiques chauffées Production en continue	Bassins + PBR sous Serres (plastiques ou verres) chauffées
Itinéraire technique	Extensif	Simple sous contrainte de saisonnalité	Technique avec une intensification	Technique
Productivité	-	Sécurisée et légèrement améliorée sur une période élargie		
Positionnement Produit	Complément alimentaire Santé - Bien-être - Nature Sport - Musculation			
Image	Terroir – Naturel artisanal	A définir selon les projets	Spiruline de méthanisation	Spiruline industrielle
Positionnement Qualité	Haut de gamme	Incertain	Incertain	Molécules d'intérêt
Distribution	Vente directe à 100% ou majoritaire	Agrégateur (vente directe minoritaire au démarrage)	Agrégateur Circuits spécialisés Industriels	Industriels Chimie verte
Temps commercial	Important	Selon le poids de la vente directe	Faible (débouché structuré)	Faible
Coût – installation	Limité	Significatif du fait de la taille		Investissements lourds avec effets d'échelle
Coût – Exploitation	70 – 80 €/kg	Autour de 75 €/kg	Autour de 50 €/kg	
Prix Objectif	100 – 150 €/kg	A minima 10-20 €/kg au-dessus du coût de production, hors temps et frais de commercialisation		20 – 40 € ? pour une substitution avec des produits industriels ou des importations
Nouveaux producteurs	5 à 10 par an	5 à 10 par an	1 à 3 par an	
Production additionnelle	+ 2 t/an ?	+ 7 t/an	+ 10 t/an	
Offre en 2020	30 t/an	30 - 40 t /an	40 t/an	+ 20 à 300 t/an
en 2025	40 t/an	70 t/an	80 t/an	
Enjeux techniques	Maîtrise technique	Maîtrise de l'itinéraire technique Rentabilité indépendante de la Prime Chaleur	Maîtrise technique Rentabilité	Maîtrise technique Rentabilité
Enjeux commerciaux	Maintien de l'image	Création de nouveaux débouchés Positionnement sur le marché industriel		Création de débouchés industriels
Facteurs clés de succès	Portefeuille Client Capacité à valoriser sa production	Prix de vente contractualisé	Maîtrise technique Rentabilité	Maitrise technique
Ressources clés	Implantation	Temps disponible	Technicité	Financement
Compétences clés	Commerciales	Capacité d'apprentissage	Suivi et pilotage	Organisation

Tableau 33 : Tableau récapitulatif caractéristiques des différents modèles de production de spiruline (avec et sans méthanisation)

3.3. Recommandations techniques

Actions à entreprendre pour réaliser un projet :

- Il est préférable d'avoir à disposition un terrain plat et non ombragé.
- Il faudra prévoir, si elle n'existe pas, de créer une haie coupe-vent dominant.
- Prévoir sur l'installation de méthanisation une chaudière de secours dimensionnée à la production d'énergie thermique de la cogénération. Ainsi lors des arrêts de maintenance ou de panne, le biogaz non utilisé sera dans un premier temps envoyé à la chaudière. Cela permet de maintenir la livraison de thermie, et minimise l'utilisation de la torchère.
- Isoler les fondations de la serre et des bassins.
- Construire les différentes serres proches les unes des autres.
- Privilégier une serre carrée, à une serre peu large et de grande longueur.
- Le film plastique utilisé doit avoir le potentiel de transmission lumineuse le plus important possible.
- Installer un écran thermique.
- Lors de la commande des serres, demander à utiliser les services du bureau d'étude thermique pour valider le bon dimensionnement.

Par ailleurs, 3 sources d'informations méritent d'être signalées :

- http://spirulina.online.fr/
- Le site de la CFPPA de Yerres, présente les principaux aléas de la production, les consignes d'hygiène les principaux problèmes et également le contenu des formations qu'il propose ;
- Le site de Mr JOURDAN,
- Les Petites Nouvelles de la spiruline (à l'adresse : http://spirulinefrance.free.fr/lespetitesnouvel.html) éditées par Jean-Paul JOURDAN, sur lesquelles est aussi disponible le Manuel de Culture Artisanal de Spiruline et le logiciel Spirpac-f qui permet de faire des calculs de production en jouant sur les différents paramètres.

Actions à entreprendre pendant l'exploitation.

- Vérifier régulièrement la bonne étanchéité de la serre, des ouvrants et des joints.
- Nettoyer les plastiques si besoin pour assurer une meilleure transmission lumineuse.
- Isoler les parois de la serre en contact avec des sources froides (compartiment non chauffé par ex).

Conclusion

La production couplée de méthanisation et de spiruline n'est pas une solution aussi simple qu'espérée pour valoriser la chaleur de cogénération.
Certes, le schéma de l'infrastructure est clairement établi, avec des bassins sous serres plastiques double parois de dimensions standards. La nutrition nécessaire se déduit de la composition de la spiruline et de la production. Les facteurs d'intensification sont clairement identifiés. Après la maîtrise de la température, du pH du milieu, le chauffage va permettre de sécuriser le développement. L'enrichissement en CO^2 (non issu de la méthanisation) est alors nécessaire. Les prochains progrès tiendront à l'éclairage et à l'automatisation croissante des opérations de récolte et de séchage.
Réunir tous ces facteurs n'apparaît cependant pas suffisant pour assurer un rendement et un revenu. Au regard des débats sur les hypothèses à retenir, la spiruline semble exposée à des aléas de production importants, parfois inexpliqués. Dès lors, il ne faut pas se tromper sur l'estimation de son coût de revient pour vendre à un prix suffisant pour rémunérer le travail, l'investissement et la chaleur. Le coût de revient en couplage ressort au même niveau que celui des installations traditionnelles. Il décroît grâce à des économies d'échelle sur certains investissements qui sont mieux rentabilisés sur des unités de tailles importantes. Mais, avec la taille, le producteur doit changer de modèle de commercialisation.

Le couplage autorise un élargissement de la période de production et un agrandissement important des surfaces, il permet de produire dans des régions nouvelles plus au nord de la France. La production de spiruline est alors entre 5 et 10 fois supérieures aux exploitations actuelles. C'est une différence majeure, car la vente directe ne peut plus suffire et le producteur devra trouver des valorisations sur le marché de gros au-dessus de 70 €/kg.

La révision tarifaire et la disparition de la prime à l'efficacité énergétique vont amener à recalculer les équilibres économiques en distinguant la rentabilité de l'unité de méthanisation et celle de l'atelier de spiruline. L'exploitant de l'unité de méthanisation avait pour principale motivation l'obtention d'une prime maximale d'efficacité énergétique soit un complément de revenu pouvant aller jusqu'à 35€/MWh sur toute sa production électrique. A raison d'un peu moins d'une tonne produite par MWh, la prime peut être répercutée sous forme d'une baisse de prix de 30€ kg MS de spiruline. Le méthaniseur pouvait être enclin à en abandonner une partie au spirulinier. Désormais, les méthaniseurs seront amenés à minimiser leurs investissements et à différer ceux qui portent sur la valorisation de la chaleur. De son côté, le spirulinier optimisera ses achats de chaleur selon ses besoins et les conditions tarifaires qui lui seront faites. En été, il peut se passer d'apports de thermies externes pendant la journée, le soleil suffisant. En hiver, l'apport de chaleur de cogénération reste insuffisant pour maintenir une production significative. Il peut y avoir la place pour d'autres formes de valorisations de la chaleur.

L'existence et l'évolution des modalités de soutien à la valorisation de la chaleur fatale constitueront des incitations déterminantes. La spiruline permet d'atteindre des coefficients d'efficacité énergetique compris entre 50 et 65%. Selon les exigences, ces installations pourraient bénéficier de subvention a l'investissement et peser positivement sur les couts de revient.
De façon induite, ces choix détermineront le rythme d'accroissement de la capacité de production et les modèles de couplages possibles. Le développement de la demande est une incertitude forte. Les risques d'une offre excédentaire s'éloignent à court terme avec la révision tarifaire qui va a *minima* différer les projets. Cette crainte pourrait ressurgir avec la multiplication de projets à la ferme ou l'émergence d'un projet industriel.

Le couplage méthanisation-spiruline n'est pas une association simple, rustique et systématiquement performante. Cette étude rassemble des références et des alertes qui seront autant de points de repères pour les porteurs de projets intéressés par un couplage. Elle distingue différents modèles qui les aideront à se positionner. Pour autant, cette association ouvre des perspectives intéressantes pour valoriser la chaleur de la cogénération. Leur concrétisation dépendra des modalités de soutien en la matière.

4. Références bibliographiques

- ADEME – ENEA – INRIA, Evaluation du gisement potentiel de ressources algales pour l'énergie et la chimie en France à horizon 2030, juillet 2014
- ADEME, Thual Julien, Bilan National des projets Biogaz au 1er juillet 2013, 2013, 60 pp
- ADEME Pays de Loire, Boucher Luc, Analyse du risque porté par des projets de méthanisation et proposition de bonnes pratiques préventives, décembre 2014
- Agreste Conjoncture, 1989-2013 : concentration et relocalisation des productions légumières françaises, mars 2015
- Amha Belay, Yoshimischi Ota, Kazuyuki Miyakawa et Hidenori Shimamatsu Current knowledge on potential health benefits of Spirulina. », Journal of applied phycology V. 5 ; p. 235-241 ; 1993
- Antenna Technologies, Un module d'apprentissage pour la production de spiruline, 1999
- BELAIR Viviane, Aspects technologique et commercial de la valorisation industrielle des microalgues dans les secteurs nutraceutique et énergétique, CRIBIQ, 2013
- EVOLI Conseil, Etude de faisabilité – Culture et vente de la Spiruline, Projet Réussir en Sambre, sept 2014
- FAO, A review on culture, production and use of spirulina as food for humans and feeds for domestic animals ans fish, circular 1034, 2008
- INRS, Valeur Limite d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France, 2011
- Jiménez Carlos, Cossí o Belén R, Labellab Diego, Niella F Xavier, The Feasibility of industrial production of Spirulina (Arthrospira) in Southern Spain, 2003
- JOURDAN Jean-Paul, Manuel de culture artisanale de spiruline, mai 2014
- La culture de la spiruline en PBR : ECLS – ESA (projet Melissa)
- LCD Algae, Dossier de demande d'autorisation d'exploiter une ferme de cultures hydroponiques, Résumé non technique – ICPE, août 2013
- LEJARS Laurent, Coûts de production de la Spiruline, Chambre d'Agriculture de la Région Centre, 2013
- LUCCHETTI Aurélie, Modélisation et conception d'un système de culture de microalgues, Thèse Energétique et Procédés, MinesParisTech, avril 2014
- Munoz-Tamayoa Rafael, Francis Maireta,b, Olivier Bernarda,c , Optimizing microalgal production in raceway systems, 2013
- Novak Alessandra Cristine, Evaluation of the Cosmetic Potential of the Cyanobacterium Spirulina platensis, 2010
- PERSON Julie, Livre Turquoise,Colloque Algues, Filières du futur, Adebiotech, novembre 2010
- Rapport d'étude documentaire du marché de la spiruline. (Alkaest 2014)
- Shanga H., Scotta J.A.,Shepherdb S.H.,Rossc G.M., A dynamic thermal model for heating microalgae incubator ponds using off-gas, 2010
- Société de développement de l'industrie maricole, Étude d'opportunité des biotechnologies marines sur la production et l'utilisation des Microalgues, 2006
- Spitulina Platensis et des constituants intérêts nutritionnels et activités thérapeutiques (thèse Sébastien SGUERA UNIVERSITE HENRI POINCARE - NANCY 1 2008)
- SYNADIET, Chiffres clés 2013 du marché des compléments alimentaires, mars 2014
- TecKnowMetrix, Marché des microalgues, AlgaSud – Trimatec, novembre 2010
- Zarrouk C., Contribution à l'étude d'une cyanophycée. Influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de Spirulina maxima Geitler, Thèse Université Sciences Appliquées, Paris, 1966

5. Index des tableaux et figures

Tableaux

Tableau 1 : Principales micro-algues commercialisées (cité dans «Potentiel algal 2030») 14
Tableau 2 : Atouts et difficultés des marchés des microalgues (d'après le Livre turquoise) 17
Tableau 3 : Taille des marchés potentiels en 2030 (Source : Potentiel Algal 2030) 18
Tableau 4 : Comparaison des systèmes et modes de spiruline
(d'après National algal biofuels technology roadmap – CRIBIQ) 20
Tableau 5 : Rendement et données économiques 21
Tableau 6 : Esquisse de la taille du marché français 22
Tableau 7 : Relevé de prix de vente de la spiruline 25
Tableau 8 : Potentiel et freins au développement du marché 25
Tableau 9 : Intérêts et contraintes du couplage Méthanisation-Spiruline 29
Tableau 10 : Aperçu des principales exigences de culture de la spiruline 33
Tableau 11 : Valeur limite d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France - INRS 2011 36
Tableau 12 : Déperdition moyenne sur une journée en (kWh/m²/jour) 42
Tableau 13: Surfaces théoriques de bassins en m² 43
Tableau 14 : Apports solaires heure par heure et tenant en compte l'évolution de surface des serres pendant l'année ... 45
Tableau 15 : Energie solaire – énergie de la cogénération selon la période de la journée mois par mois 45
Tableau 16 : Apport de chaleur thermique et solaire 48
Tableau 17 : Comparaison des apports solaires et thermiques (kWh) 50
Tableau 18 : Surface supplémentaire exploitable grâce à l'Open Buffer (m²) 51
Tableau 19 : Production avec tous les bassins à température variable 53
Tableau 20 : Volumes produits selon la durée et la surface mise en production 53
Tableau 21 : Comparaison de performances des unités à 105 et 400 kWe 54
Tableau 22 : Références pour les coûts d'installation 55
Tableau 23 : Dimension des installations 57
Tableau 24 : Montant de l'investissement 58
Tableau 25 : Temps de retour d'un Open buffer selon la marge réalisée par kilo 58
Tableau 26 : Coûts d'exploitation annuels par poste de dépense (k€) 61
Tableau 27 : Poids des coûts fixes et des coûts proportionnels hors chaleur 61
Tableau 28 : Coût par kg produit et sources d'économies d'échelle 62
Tableau 29 : Revenu pour le méthaniseur 65
Tableau 30 : Coefficient V - Poitou 105 kWe 65
Tableau 31 : Coefficient V - Lorraine - 400 kWe 65
Tableau 32 : Rémunération du méthaniseur 75
Tableau 33 : Caractéristiques des 4 modèles 78

Figures

Figure 1 : Démarche de calcul des études de faisabilité 11
Figure 2 : Répartition des marchés mondiaux actuels en volumes (cité dans «Potentiel algal 2030») 14
Figure 3 : Microalgues, le champ des applications possibles (source: Etude TechKnowMetrix pour Algasud - 2010) 16
Figure 4 : Exemple d'un «Raceway» de laboratoire 19
Figure 5 : Carte des exploitations de spiruline (source FSF) 20
Figure 6 : Carte d'implantation des Spiruliniers de France 20
Figure 7 : Exemples d'utilisation de spiruline 22-23
Figure 8 : Exemples de signes de qualité 23
Figure 9: Les phases de croissance des microorganismes (D'après FAO,1996) 31
Figure 10 : Rendements observés au Sud de l'Espagne 32
Figure 11 : Vitesse de croissance de la spiruline selon la température 36
Figure 12 : Hypothèses de rendement mois par mois 37
Figure 13 : Circulation de la chaleur au sein du couplage méthanisation - spiruline Jour Nuit en hiver 39
Figure 14 : Puissance thermique disponible par mois sur le projet Lorrain 39
Figure 15 : Circulation de la chaleur au sein du couplage méthanisation - spiruline Jour Nuit en été 40
Figure 16 : Comparaison des surfaces maximale et installée 40
Figure 17 : Fonctionnement du stockage de chaleur (Open buffer) 41
Figure 18 : Puissance thermique disponible - Cogénération 105 kWe - Poitiers 41
Figure 19 : Température mensuelle moyenne sur une journée en janvier à Poitiers et Nancy 44
Figure 20 : Energie reçue par la serre sur une journée selon les mois 46
Figure 21 : Surface de bassin installée - Projet Poitou - 105 kWe 47
Figure 22 : Surfaces maximale et installée – Lorraine – 400 kWe 49
Figure 23 : Exemple de stockage tampon de chaleur (= Open Buffer) 49
Figure 24 : Contribution thermique de l'open buffer par mois 51
Figure 25 : Production mensuelle de spiruline - Poitou – 105 kW 52
Figure 26 : Production de spiruline avec et sans stockage de chaleur 54
Figure 27 : Bassins de culture 56
Figure 28 : Système de récolte automatisé 56
Figure 29 : Echantillon des lots pour analyse 60
Figure 30 : Origine des écarts de coûts de production (en euros/kg MS) 63
Figure 31 : Comparaison de la structure de coût de production 64
Figure 32 : Sensibilité des résultats selon le coût de production de référence et le rendement réalisé - 105 kWe 67
Figure 33 : Sensibilité des résultats selon le coût de production de référence et le rendement réalisé - 400 kWe 68
Figure 34 : Extrapolation de la production de spiruline selon la puissance thermique de cogénération 73

6. Sigles et acronymes

€ ..... Euros
ADEME ..... Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ETP..... Equivalent Temps Plein
FSF..... Fédération des Spiruliniers de France
k€ ..... Milliers d'euros
kWe ..... kiloWatt électrique
kWh ..... kiloWatt heure
kWth ..... kiloWatt thermique
m..... mètre
m² ..... mètre carré
ml ..... mètre linéaire
MS ..... Matière sèche
MW..... MégaWatt
PBR ..... PhotoBioRéacteur
V ..... Coefficient d'Efficacité Energétique

Annexe :

Annexe 1 : Sensibilité à la chaleur des rendements (Zarrouk, 1966)

Temp. °C	T°K	$\frac{1}{T} \cdot 10^{-3}$	Δ_{Max} D.O.J^{-1} *	V_{Max} = mg.a.s.l^{-1}.j^{-1} **	log V_{Max}	Arrêt croissance au bout de
18	291	3,44	0,07	49	1,690	48 h (1)
20	293	3,41	0,15	105	2,021	90 h (1)
22	295	3,39	0,27	189	2,276	
25	298	3,36	0,36	252	2,401	
28	301	3,32	0,42	294	2,468	
30	303	3,30	0,49	343	2,535	
32	305	3,28	0,58	406	2,608	
33	306	3,27	0,59	413	2,616	
35	308	3,25	0,59	413	2,616	
40	313	3,19	0,58	406	2,608	96 h (2)
43	316	3,16	0,52	364	2,561	75 - 80 h
45	318	3,14	0,38	266	2,425	30 - 35 h
47	320	3,13	0,00	-	-	20 - 25 h
50	323	3,09	0,00	-	-	1 h

* Vitesse de croissance maximale exprimée en ΔD.O. par jour.

** Vitesse de croissance maximale exprimée en mg.a.s.l^{-1} par jour.

(1) Remises à 30°C les cultures repartent progressivement.

(2) Vers 40°C les spires de l'algue se resserrent excessivement et finissent vers

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

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

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE
MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

WWW.ademe.fr