

**Optimisation de la production de spiruline dans une
ferme à Madagascar afin de lutter contre la malnutrition
infantile**

**Maître de stage : Philippe THIRION
Tuteur de stage : Joëlle GRUA**

**LECOINTRE Robin
Promotion 2014 – 2017**

**MEMOIRE INGENIEUR
Septembre 2017**



Tuteur responsable de l'étudiant Nom / Département / Service d'ONIRIS	Coordonnées du maître de stage et de l'entreprise d'accueil
Joëlle GRUA - Département BPSA UMR GEPEA CNRS 6144	Philippe THIRION – Président de l'association « Esperanza Joie des Enfants » Email : esperanzajoiedesenfants@yahoo.fr Association « Esperanza Joie des Enfants » 34 rue de Turenne, 75003 PARIS

Auteur : Robin LECOINTRE

Année : 2017

Titre de l'étude : Optimisation de la production de spiruline dans une ferme à Madagascar afin de lutter contre la malnutrition infantile.

Confidentialité : OUI NON

IMPORTANT : Si oui indiquer la durée :

Résumé :

Etant donné le nombre d'enfants toujours malnutris dans le monde, la spiruline de par sa composition nutritionnelle exceptionnelle est désignée comme l'aliment miracle du XXI^{ème} siècle qui pourrait résoudre ce fléau.

Afin d'optimiser la production d'une ferme de spiruline à Madagascar, il est indispensable d'acquérir des nouvelles données et de comprendre l'ensemble des paramètres qui peuvent influencer sur la production. L'objectif de ce mémoire est d'identifier les paramètres limitants du site de production de spiruline présent à Madagascar et de trouver les solutions les plus adéquates à ces problèmes. Cela a permis de mettre en évidence une température trop basse et un éclairage très inférieur aux conditions optimales de production. Ces deux paramètres seront bientôt maîtrisés avec l'installation de serres sur les bassins à la place des toits rigides actuels.

L'autre enjeu est d'appréhender certains freins au développement que présente la culture malgache et d'apporter des connaissances et des capacités à l'équipe en place. Certaines méthodes d'implication de tous les acteurs, de responsabilisation et d'initiative au changement ont permis à l'ensemble de l'équipe de monter en compétences techniques.

Mots clés significatifs par rapport à l'étude : Spiruline, Nutrition, Paramètres de culture, Démarche qualité, Optimisation du site, Management d'équipe

	Excellent	Bien	Assez bien	Moyen	Médiocre
FOND					
FORME					
RESUME					
BIBLIOGRAPHIE					

Appréciation du mémoire

ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Je soussigné/e,

Robin LECOINTRE

déclare être pleinement conscient/e que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publié sur toutes formes de support, y compris l'Internet, constitue une violation des droits d'auteur/e ainsi qu'une fraude caractérisée (articles L.335-2 et L.335-3 du Code de la propriété intellectuelle).

En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour la rédaction de ce/s document/s conformément à la Charte anti-plagiat d'Oniris.

A ANTSIRABE;
MADAGASCAR

le, 30/09/17

Signature,



Remerciements

Mes premiers remerciements s'adressent à Philippe THIRION, Président de l'association « Esperanza Joie des Enfants » et maître de stage sans lequel rien n'aurait été possible. Merci aussi à tout le bureau de l'association pour la confiance accordée et tout particulièrement à André LHUILIER pour le suivi et l'aide apportés. Un grand merci à Chloé pour m'avoir accompagné et supporté durant plus de 4 mois dans ce stage ainsi qu'à Justine pour sa bonne humeur et ses anecdotes quotidiennes. Merci également à toute l'équipe sur place et aux sœurs du collège Picot de Clorivière, les pizzas faites maison resteront un très bon souvenir. Merci pour l'accueil chaleureux et le travail effectué ensemble, je ne suis pas prêt d'oublier cette aventure qui restera le stage le plus complet que j'ai réalisé !

Je remercie aussi toutes les personnes qui nous ont apporté leur soutien et leurs connaissances : Jean-Paul JOURDAN, spécialiste français de la spiruline ; Christian à qui je souhaite bon courage pour le développement de son nouveau projet ; Yoland pour m'avoir fait participer au trail organisé par sa ferme de spiruline d'Ibity. Le Père Pedro pour nous avoir ouvert les portes de sa ferme de spiruline qui reste un modèle à suivre. Je n'oublie pas toutes les personnes croisées lors de nos nombreux allers et venues aux hôtels « Flower Palace » et « Diamant ». Cette vie calme et saine me manquera.

Un grand merci à mes proches qui m'ont aidé dans l'élaboration et la correction de ce mémoire. Votre déplacement à Madagascar pour visiter ce magnifique pays à mes côtés m'a touché énormément.

Ce stage de 6 mois marque la fin de 5 ans d'études au sein de l'école ONIRIS qui est devenue pour moi une seconde famille et signifie l'entrée dans le vaste monde de l'agroalimentaire. Bien que la biochimie n'ait jamais été mon domaine de prédilection et restera l'unique rattrapage de mon cursus, je tiens néanmoins à remercier tout particulièrement Madame Joëlle GRUA, professeur de biochimie, pour m'avoir guidé au cours de ce stage.

Merci aux différents professeurs pour leur patience et pour avoir partagé avec nous leurs connaissances.

Table des matières

Introduction	1
Présentation du cadre de l'étude	2
1. La spiruline, qu'est-ce que c'est ?	3
1.1. Historique et description de la spiruline	3
1.2. Caractéristiques nutritionnelles	4
1.3. Atouts de la spiruline pour les populations en malnutrition	6
1.4. Que vaut la spiruline comparée aux autres aliments ?	8
2. Fonctionnement d'une unité de production	11
2.1. Bassins de culture	11
2.2. Répartition des tâches et process de fabrication	12
3. Problématique et démarche générale	14
4. Matière et Milieu	16
4.1 Intrants et nettoyage	16
4.2. Résistance des souches	18
4.3. Analyses microbiologiques et physico-chimiques de la spiruline	18
5. Piloter la production à l'aide des paramètres clefs	21
5.1 Eclairage	22
5.2. CO2 et pH	23
5.3. Température, pH et productivité	23
5.4. Salinité	27
5.5. Agitation	27
6. Main d'œuvre et Méthodes	29
6.1. Management de l'équipe et communication	29
6.2. Gestion de production	31
7. Matériel	32
7.1. Installation électrique	32
7.2. Bassin de rétention	32
7.3. Isolation par les serres	33
7.4. Four à vide	34
Discussion générale et perspectives	36
Conclusion	43
Références bibliographiques	44
Table des tableaux	46
Table des figures	47
Table des annexes	48

Lexique

Antenna Technologies : Fondation suisse à but non lucratif engagée dans la recherche scientifique et la diffusion de solutions technologiques, médicales et économiques pour « répondre aux besoins essentiels des communautés les plus vulnérables »

AJR : Les apports journaliers recommandés (AJR) sont des valeurs-repères utilisées en tant que référence pour fournir une indication sur les apports journaliers en micronutriments (vitamines et minéraux) nécessaires à un adulte-type moyen.

Esperanza Joie des Enfants : Association française dont le but principal est de contribuer à lutter contre la faim en apportant un soutien à des centres nutritionnels ou des cantines scolaires à Madagascar. Elle gère et soutient le site de spiruline depuis la France.

Fanantenana (qui signifie ESPOIR) : Nom donné au site de production de spiruline.

FAO : « *Food and Agriculture Organization* » est une organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Son objectif est « Aider à construire un monde libéré de la faim » en permettant aux pays pauvres et riches de mieux maîtriser leurs ressources et d'avoir une vision prospective.

Filles du Cœur de Marie : Nom de la communauté des sœurs qui gèrent le site de spiruline à Madagascar

GMS : Grandes et moyennes surfaces

NPU : Fraction de l'azote retenu par rapport à l'azote ingéré. Elle se résume au produit de la digestibilité qui est la proportion d'azote protéique absorbée par l'indice chimique, qui dépend de la composition en acides aminés.

OMS : L'Organisation Mondiale de la Santé est une institution spécialisée de l'Organisation des Nations Unies (ONU). Elle a pour objectif d'amener tous les peuples du monde au niveau de *santé* le plus élevé possible, la *santé* étant définie dans ce même document comme un « état de complet bien-être physique, mental et social et ne consistant pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité ».

UNICEF : « *United Nations of International Children's Emergency Fund* » est une agence de l'Organisation des Nations Unies (ONU) qui agit dans les domaines : de la santé, de la nutrition, de l'éducation et de la protection des enfants.

Introduction

La malnutrition est un fléau qui existe depuis longtemps. L'OMS et Planetoscope indiquent que la malnutrition tue chaque année 3,1 millions d'enfants dans le monde et touche plus de 30% de la population mondiale. En effet, 74 % des décès des enfants de moins de 5 ans sont dus à la malnutrition infantile légère et modérée. Si la malnutrition n'est pas toujours mortelle, une malnutrition chronique entraîne de lourdes conséquences irréversibles sur le développement physique et mental de l'enfant. Malheureusement, ces chiffres sont toujours d'actualité.

Madagascar est un pays particulièrement touché par ce problème puisque plus de la moitié des enfants de moins de 5 ans, soit environ deux millions de personnes, souffrent de malnutrition chronique (Hervieu S., 2013). En 2014, Madagascar faisait partie des six pays dans le monde avec le taux de malnutrition chronique le plus élevé.

Afin de combattre ce fléau, il est primordial de bien le comprendre : la malnutrition chronique provient généralement d'un manque en apport énergétique, protéique et de micronutriments qui entraîne des carences en acides aminés essentiels, acides gras essentiels et en vitamines. Cela conduit au développement de maladies tel que le marasme, la kwashiorkor, ainsi qu'à des problèmes d'anémie. Dans ce cas-là, il semble important de rappeler que la raison principale à la malnutrition chronique n'est pas la quantité mais la qualité de l'alimentation qui se doit d'être plus riche et plus diversifiée. A Madagascar, l'aliment de base est le riz blanc. D'après la FAO, « La consommation de riz par habitant au cours de l'année 2000 s'est élevée à 140 kg de riz cargo », soit près de 400 g par jour et par personne. L'UNICEF l'a bien compris puisqu'elle milite contre la malnutrition et inclut le changement de comportement en enseignant aux mères comment bien préparer des repas équilibrés et nutritifs.

Quelles alternatives offre la spiruline ? Est-elle une solution adaptée pour la lutte contre la malnutrition à Madagascar ?

La spiruline est une « micro algue » complexe qui connaît, depuis peu de temps, un fort essor dans les pays développés, notamment auprès des sportifs. Cependant, la spiruline n'a pas été baptisée « super aliment » pour cela, mais bien pour son potentiel élevé dans la lutte contre la malnutrition. Il existe de nombreux témoignages sur l'efficacité de la spiruline à lutter contre la malnutrition : « A Madagascar, avec une demi-cuillère à café par jour pendant deux mois, un enfant présentant une carence alimentaire grave retrouve son poids idéal » déclare Vololonavalona RAVELO, Maître de conférences à l'université et Chercheur à l'Institut halieutique et des sciences marines. L'ambition de ce mémoire est d'offrir un aperçu des vertus de la spiruline, d'exposer les rouages de sa production et de proposer des solutions adaptées à l'amélioration de la gestion d'une ferme de spiruline à Madagascar. Pour cela, nous nous appuyons sur le projet mis en place par l'association « Esperanza Joie des Enfants » et concluons ce rapport par une critique constructive des points forts et des limites de la spiruline.

Présentation du cadre de l'étude

Le stage s'est déroulé dans une ferme de spiruline à Madagascar à 200 km au sud d'Antananarivo, dans la ville d'Antsirabe située sur les hauts plateaux. Le pays est soumis à deux saisons : la saison humide et chaude d'octobre à mars et la saison sèche et froide pendant laquelle j'ai réalisé mon stage d'avril à septembre. La situation géographique particulière de la ville d'Antsirabe qui culmine à 1 400m d'altitude entraîne une température constante d'environ 25°C l'après-midi en période froide, mais la nuit et le matin les températures chutent drastiquement pour s'approcher de 0°C en juin-juillet.

Sur place, la ferme de spiruline de « Fanantenana » est supervisée par la congrégation des « Filles du Cœur de Marie » depuis sa création en 2014. Avec 14 bassins de 60 m², c'est la deuxième ferme de spiruline la plus importante de Madagascar. La ferme est autonome énergétiquement puisqu'elle fonctionne entièrement avec des panneaux solaires, ce qui entraîne par la même occasion des contraintes énergétiques. L'équipe est constituée de 11 salariés à plein temps comprenant la sœur responsable du site, la sœur en charge de la comptabilité, le responsable de production, le responsable de maintenance, six récoltants et un gardien de sécurité pour la nuit. Un étudiant en master 1 travaille également à mi-temps en dehors des périodes de cours. Cette aide est précieuse car l'équipe n'a pas fait d'études ce qui est un frein au développement de la ferme. Seul les trois responsables et l'étudiant en master parlent le français correctement de manière à pouvoir communiquer et exprimer ses idées clairement.

Chaque année, la spiruline produite est distribuée en priorité à des centres scolaires afin de réaliser trois cures, d'environ 6 semaines chacune, par an. Cela représente 800 kg de spiruline pour 2 650 enfants scolarisés. Cette spiruline est vendue à un tarif préférentiel qui couvre uniquement les coûts de production et ne permet pas à la ferme de subvenir à ses besoins financiers. Il est donc indispensable de produire plus de 800 kg pour vendre la production excédentaire à des clients publics et privés à un prix plus élevé. Afin d'atteindre cet équilibre économique durable à partir duquel l'association « Esperanza Joie des Enfants » n'aurait plus à intervenir financièrement, l'objectif de production annuelle fixé est de 1 200 kg de spiruline sèche. Cela représente un rendement de 4 g/jour/m². En 2015, la qualité de la culture neuve a permis d'atteindre un rendement de 3,3 g/jour/m². Cependant la productivité a chuté à 2,7 g/jour/m² en 2016, ce qui représente uniquement les 800 kg de spiruline nécessaire aux enfants. Aucun bénéfice n'a été réalisé cette année-là, seuls les coûts directs de production ont été couverts par cette production.

L'année 2017 est donc primordiale puisqu'il est indispensable de stabiliser la production afin de s'approcher de l'objectif tout en augmentant la maîtrise de la qualité nutritionnelle du produit fini. Pour cela, un travail important doit s'effectuer avec l'équipe afin d'inculquer un esprit de maintenance, de rigueur dans le travail, ainsi que le sens des responsabilités et le souci du résultat. Enfin, une augmentation de la production doit être suivie par une hausse des ventes pour ne pas avoir des

stocks trop importants. Il est alors nécessaire de valoriser le produit fini afin de lui donner une valeur ajoutée importante et de faciliter sa commercialisation auprès des différents clients.

1. La spiruline, qu'est-ce que c'est ?

1.1. Historique et description de la spiruline

La spiruline est une algue bleue présente sur terre depuis environ 3,5 milliards d'années et consommée par les hommes depuis des siècles. Des traces écrites de leur consommation par les Aztèques et les Mayas au Mexique ainsi que par le peuple des Kanembous au Tchad le prouvent encore. La spiruline était leur principale source de protéines tout en leur permettant d'éviter les carences. Cependant la spiruline fut longtemps oubliée et redécouverte uniquement dans les années 1960 par des chercheurs en expédition au Lac Tchad intrigués par la nourriture de la population locale. C'est uniquement dans les années 1970 que l'américain Ripley D. FOX s'intéresse réellement à cette micro algue au travers de laquelle il voit un super aliment qui pourrait résoudre les problèmes de malnutrition et de faim dans le monde. (Vidal J.L., 2016)

Le biotope de la spiruline n'est pas commun. En effet, celle-ci pousse à l'état naturel dans des lacs aux eaux natronées et alcalines, ce qui inhibe presque toute concurrence par d'autres bactéries, levures, champignons ou algues. L'algue bleue appartient à l'embranchement des cyanobactéries, mais ce qui la rend si spéciale, c'est qu'elle possède à la fois des caractéristiques des algues et des microorganismes procaryotes. Comme les algues, la spiruline effectue la photosynthèse à l'aide de ses membranes chlorophylliennes et de ses pigments. Elle peut donc produire de l'oxygène et de la matière organique à partir de la lumière et d'une nutrition minérale.

Cependant, elle est aussi procaryote et ne présente pas de paroi cellulaire contrairement aux algues vertes eucaryotes. Elle ne possède pas d'appareil de Golgi (synthèse des polysaccharides), de mitochondries (respiration et métabolisme des acides gras) ou de noyau, mais quatre couches minces de muco-polymères et polysaccharides qui lui servent de barrière osmotique et d'un ADN et ARN non liés à des histones qui sont distribués au hasard dans la cellule. C'est cette absence de barrière qui rend les nutriments présents dans la spiruline si facilement assimilables. (Ripley D. Fox, La Spiruline : Technique pratique et promesse, p18-30)

Le nom scientifique de cette algue bleue est *Arthrospira platensis* bien qu'elle soit communément appelée Spiruline. Il existe différentes sous-espèces de spiruline généralement nommées en fonction de son lieu de découverte. A Madagascar, les trois principales sous-espèces exploitées sont :

- Platensis variété Toliara, endémique du pays, découvert en 1994 par Ripley D. FOX.
- Platensis variété Paracas, découvert pour la première fois en 1993 au Pérou.
- Platensis variété Lonar, découvert pour la première fois en 1984 dans le lac Lonar en Inde et utilisé sur le lieu du stage à Antsirabe.

1.2. Caractéristiques nutritionnelles

La composition nutritionnelle de la spiruline est remarquable. Celle-ci nous permet de réaliser le potentiel de cet aliment encore méconnu. Bien qu'elle puisse varier en fonction de la souche, de la provenance ainsi que des méthodes de production mises en place par le responsable de production, le schéma suivant nous donne un aperçu de la composition type de la spiruline.



Figure 1: Secteur de la composition nutritionnelle de la spiruline

Outre une concentration en protéines très importante, la spiruline contient énormément de micronutriments tels que des vitamines, des minéraux et des pigments fortement antioxydants. Voici la composition en micronutriment présents dans la spiruline :

- ✚ Des protéines végétales complètes hautement assimilables.
- ✚ 12 vitamines : Béta-carotène, D, E, K, B1, B2, B3, B5, B6, Inositol (B7), B8, B9, B12,
- ✚ 11 minéraux et oligoéléments : Calcium, Fer, Magnésium, Phosphore, Potassium, Zinc, Cuivre, Manganèse, Sodium, Chlore, Sélénium.
- ✚ 18 acides aminés dont 8 essentiels : Isoleucine, Leucine, Lysine, Méthionine, Alanine, Arginine, Ac. Aspartique, Cystéine, Ac. Glutamique, Phénylalanine, Ac. Thréonine, Tryptophane, Valine, Glycine, Histidine, Proline, Sérine, Tyrosine.
- ✚ 3 pigments : Phycocyanine, Chlorophylle, Caroténoïde.
- ✚ Des enzymes dont la superoxyde dismutase.
- ✚ 7 acides gras essentiels : ac. palmitique, ac. palmitoléique, ac. stéarique, ac. oléique, ac. linoléique, ac. gamma linoléique, ac. di homo gamma linoléique.
- ✚ Des glucides.

On est alors en droit de se demander quelle est la dose journalière recommandée et s'il existe ou non des risques de surconsommation ? Le tableau de Ripley D. FOX sur l'évolution du dosage journalier de spiruline en fonction de l'âge et des besoins nutritionnels nous permet d'appréhender l'importance de cet apport nutritionnel pour un enfant. (Fox R.D., p48, 1999)

Tableau 1: Dose journalière de spiruline que nous recommandons et rations journalières recommandées (RDA) par les USA des principaux nutriments

Age de l'enfant (année)	Dose journalière de spiruline recommandée (g)	RDA Protéine (g)	Dans une dose (g)	RDA Vitamine A (UI)	Carotène dans la dose (UI)	RDA Vitamine E (UI)	Dans une dose (UI)	RDA Vitamine B1 (mg)	Dans une dose (mg)
0 - 1/2	3	kg * 2,2	1,95	1400	5100	4	0,57	0,3	0,16
1/2 - 1	5	kg * 2,0	3,25	2000	8500	5	0,95	0,5	0,26
1 - 3	10	23	6,5	2000	17000	7	1,9	0,7	0,53
4 - 6	10	30	6,5	2500	17000	9	1,9	0,9	0,53
7 - 10	10	36	6,5	3300	17000	10	1,9	1,2	0,53

Age de l'enfant (année)	RDA Fer (g)	Dans une dose (mg)	RDA Magnésium (mg)	Dans une dose (mg)	RDA Calcium (mg)	Dans une dose (mg)
0 - 1/2	10	1,5	60	4,8	360	3,1
1/2 - 1	15	2,5	70	8,0	540	5,2
1 - 3	15	5	150	16	800	10,4
4 - 6	10	5	200	16	800	10,4
7 - 10	10	5	250	16	800	10,4

Nota bene :

La spiruline contient du bêta-carotène, mais pas de vitamine A. Une Unité Internationale de bêta-carotène est égale à une Unité Internationale de vitamine A. Contrairement au dosage de la vitamine A, il ne peut pas y avoir d'overdose avec le bêta-carotène pendant une période de temps donné.

On remarque alors qu'à partir de l'âge d'un an, la dose journalière de spiruline recommandée est de 10 g. Cette dose ne couvre bien évidemment pas tous les besoins mais contribue grandement au rééquilibrage alimentaire afin de pallier des carences potentielles. Il ne peut cependant pas y avoir de surdosage de la spiruline ou de l'un de ses composants. Bien évidemment, si la spiruline est l'unique aliment consommé, cela entraînera des carences notamment de vitamine C qui n'est pas présente dans la spiruline.

1.3. Atouts de la spiruline pour les populations en malnutrition

La spiruline a la propriété d'avoir une utilisation protéique nette (NPU) très élevée. Cela explique la très forte digestibilité de ses protéines (83 à 90 %) proche de la caséine pure (95,1 %) qui est la protéine de référence (Dillon JC et Phan PA, 1993). La présence d'une enveloppe de muréine relativement fragile contrairement aux végétaux qui possèdent une paroi cellulosique justifie cette digestibilité des protéines.

La composition riche et complète de la spiruline semble favorable à la lutte contre la malnutrition, cependant rien ne vaut des exemples concrets à grande échelle. Dans son livre, le docteur Jean-Louis VIDALO énumère nombre de cas de malnutrition infantile soignés par la spiruline à travers le monde. Les résultats constatés sont tous semblables et les enfants souffrant de malnutrition peuvent se rétablir avec une prise quotidienne de spiruline pendant 4 à 6 semaines. (Vidal Jean Louis, 2016)

L'intérêt de la spiruline ne se réduit pas à sa forte concentration en protéines mais peut réellement être utilisé comme un alicament. De manière générale, elle permet d'améliorer le système immunitaire mais celle-ci possède bien d'autres effets thérapeutiques qui permettent d'améliorer le quotidien y compris dans les pays les plus défavorisés.

VIH

Il est connu que le virus du sida est très présent en Afrique du fait du coût et du manque d'accès aux moyens de contraception. La spiruline, de par ses propriétés immunostimulantes, est très intéressante pour les personnes séropositives. En effet, il a été prouvé que la spiruline multiplie et active les macrophages tout en stimulant la production d'anticorps.

Plus incroyable encore, en 1996, des chercheurs américains ont mis en évidence en laboratoire que 10 g de spiruline ont permis d'inhiber la réplication du VIH-1 dans les lymphocytes T d'origine humaine et dans les cellules sanguines mononucléaires périphériques (Ayehunie S., Belay A., Hu Y., Baba T., Ruprecht R., 1996).

Un exemple probant de la lutte du VIH par la spiruline est le faible taux de séropositivité des populations des rives du Tchad en comparaison avec les pays voisins. Ceci n'est pas surprenant puisque ces populations se nourrissent parfois exclusivement de spiruline.

Pathologies digestives

Nous savons que la composition de la flore intestinale est propre à chacun mais qu'elle varie aussi en fonction de notre consommation alimentaire. La spiruline peut donc être considérée comme un probiotique d'après la définition donnée par l'OMS et la FAO en 2001.

Probiotique :

Regroupe tous les « micro-organismes vivants qui, lorsqu'ils sont ingérés en quantité suffisante, exercent des effets positifs sur la santé, au-delà des effets nutritionnels traditionnels ».

Les probiotiques ont des effets antimicrobiens qui inhibent l'invasion des bactéries pathogènes et leur adhésion aux parois intestinales. En outre, la spiruline stimule la digestion et lutte contre les bactéries pathogènes telle que E.coli très présent dans les pays en voie de développement. Elle stimule les bactéries salutaires telles que le lactobacille et la bifido-bactérie qui participe à la digestion et à l'absorption des vitamines dans la nourriture tout en prévenant les infections. De ce fait, la spiruline est efficace dans le cas de diarrhée grâce à son rôle de barrière vis-à-vis des bactéries.

Ce rôle protecteur est très important dans les pays pauvres où l'accès aux médicaments est difficile. Une bactérie telle que E.coli peut être mortelle notamment chez des personnes fragiles telles les enfants malnutris.

Outre ses vertus protectrices, la spiruline peut aussi servir d'agent détoxifiant. En effet, elle possède un polysaccharide présent dans les membranes celluloses des micro algues qui favorise la fixation et l'élimination des pesticides dans les intestins.

Allergies

Les allergies sont des maladies qui touchent l'ensemble de la population mondiale et qui sont en hausse constante. Ce sont des réactions immunitaires anormales de l'organisme au contact de certaines protéines étrangères. Il semblerait que la spiruline aide à lutter contre les réactions allergiques. Les immunoglobulines IgE sont responsables des allergies immédiates. Il a été démontré en Russie qu'une dose quotidienne de spiruline pendant 45 jours avait permis de traiter les enfants atteints de réactions allergiques, conséquence des radiations ionisantes de Tchernobyl. Leur taux d'IgE a donc baissé ce qui ne permet pas de soigner définitivement mais de diminuer les réactions allergiques en inhibant la production d'histamine.

Vue

Dans les pays pauvres comme Madagascar, l'accès aux correcteurs de vue tel que les lunettes et les lentilles sont un luxe inaccessible pour la majorité de la population. Il est alors encore plus important de soigner et protéger sa vue par tous les moyens possibles. La spiruline a la particularité d'être un aliment extrêmement riche en bêta carotène, le précurseur de la vitamine A, indispensable à une bonne vision notamment nocturne. La spiruline possède également de la vitamine B12, des acides gamma linoléiques et des antioxydants qui favorisent une bonne vue.

Sommeil et fatigue

Pour les enfants, avoir un bon sommeil est primordial. La spiruline est riche en tryptophane (acide gras essentiel précurseur de la mélatonine) et en phénylalanine. Cela permet de favoriser l'endormissement, de réguler le sommeil et d'éviter « la fatigue matinale ». Bien qu'anodin, cela permet aux enfants de rester concentrés et attentifs toute la journée, ce qui est essentiel pour eux afin d'assimiler les informations. Le développement des pays pauvres passe aussi par une augmentation du niveau d'étude et donc une meilleure attention quotidienne à l'école.

1.4. Que vaut la spiruline comparée aux autres aliments ?

Consommation d'eau et rendement protéique

Au XXIème siècle, il est impensable de ne pas comparer les aliments en fonction de leur impact écologique et notamment la demande en eau qui est l'or blanc de demain. Ripley D. FOX nous donne cet élément de réponse dans son livre p93 :

Pour info...

A masse équivalente, la spiruline sèche contient plus de protéines, de fer, de bêta-carotène, de vitamine B12 et d'acide gamma-linoléique qu'aucun autre aliment connu.

Tableau 2 : Eau nécessaire pour produire un kilogramme de protéine

ALIMENT	LITRES	QUALITE DE L'EAU
SPIRULINE (65% DE PROTEINE)	2 498	Saumâtre
SOJA (34% DE PROTEINE)	8 858	Douce
MAIS (9% DE PROTEINE)	12 414	Douce
BŒUF NOURRI AU GRAIN (20% DE PROTEINE)	104 096	Douce

Voici les mêmes données analysées sous une approche plus visuelle:

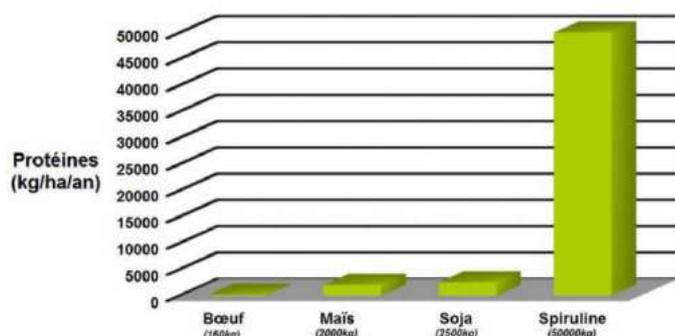


Figure 3 : Rendement en kilogramme de protéine à l'hectare

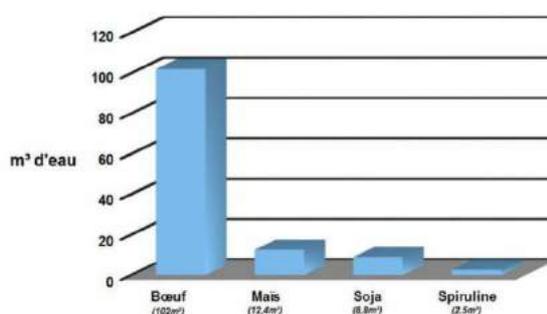


Figure 2 : Quantité d'eau nécessaire à la production d'un kilogramme de protéine

Les chiffres démontrent sans ambiguïté la faible consommation en eau de la spiruline par rapport aux rendements en protéines qu'elle propose. La spiruline est donc 3,5 fois moins consommatrice d'eau que le soja et plus de 40 fois moins que le bœuf pour un rendement en protéines équivalent. Sans oublier que la spiruline requiert vingt fois moins d'espace que la culture du soja.

Notons que la spiruline croît naturellement en eau saumâtre. Cependant, Marie Gabrielle CAPODANO, dans sa société « Spiru'breizh », a réussi à produire de la spiruline dans de l'eau de mer, ce qui rend alors la consommation en eau douce égale à zéro pour un rendement en protéines très important.

Comme nous avons pu le voir précédemment, la spiruline est donc un aliment riche en protéines et extrêmement complet qui permet d'apporter la plus grande quantité des oligo-éléments indispensables au maintien d'une bonne santé. La spiruline est aussi un alicament et a l'avantage d'augmenter les défenses immunitaires ce qui est non négligeable pour des populations pauvres qui n'ont pas accès aux médicaments. Bien d'autres vertus lui sont imputées comme nous l'avons constaté dans la liste non exhaustive précédente (Cf. « 1.3. Atouts de la spiruline pour les populations en malnutrition »

R.D. FOX nous rappelait en 1999 que près de 40 000 enfants mouraient chaque jour de malnutrition ou de maladies entraînées par la malnutrition, et qu'un ajout de 10 grammes de spiruline par jour à leur alimentation carencée pendant 3 mois suffirait à les guérir. Aujourd'hui, ce chiffre s'élève toujours à 8 500 enfants par jour, soit 3,1 millions d'enfants chaque année.

La production mondiale de spiruline tourne autour de 5 000 tonnes par an actuellement (Planetoscope). On peut constater l'évolution de la production mondiale de spiruline en ANNEXE 1. Fournir 10 grammes de spiruline par jour à 165 000 000 enfants malnutris (chiffres de l'UNICEF) demanderait une production annuelle d'environ 602 000 tonnes pour une superficie de 16 400 hectares de bassins de culture. En comparaison, cela représente 1,34% de la superficie de l'Ile-de-France en bassins de spiruline pour régler les problèmes de malnutrition dans le monde.

Cependant, l'eau serait le premier problème puisque le remplissage de 16 400 hectares à 20 centimètres de profondeur demanderait 32 800 000 m³ d'eau douce et encore 164 000 à 1 640 000 m³ d'eau pour compenser chaque jour l'évaporation. Pour résoudre ce problème, R.D. FOX préconisait déjà en 1999 la création de fermes géantes sur eau de mer.

Bien que les chiffres évoqués précédemment semblent considérables, il est nécessaire de prendre du recul et de les replacer dans leur contexte alimentaire. A rendement protéique équivalent, la production de spiruline reste 40 fois moins consommatrice d'eau et 300 fois moins demandeuse de surface que la production de bœufs nourris au grain.

Regardons à présent de plus près la manière de produire de la spiruline en bassin.

2. Fonctionnement d'une unité de production

2.1. Bassins de culture

Le site possède donc 14 bassins de 60 m² (environ 25 mètres de long et 2,50 mètres de large) construits à partir de ciment avec un muret au milieu afin de favoriser un courant circulaire. Chaque bassin possède un toit en plastique rigide blanc et quatre ouvertures afin d'apporter du CO₂ dans le milieu de culture et permettre la récolte quotidienne des bassins. Tous les bassins sont agités par des pales à l'aide d'un moteur qui alimente deux bassins à la fois. Les bassins possèdent tous une pente afin que la hauteur du milieu de culture soit plus importante du côté des pales de l'agitation. Cela permet aussi une décantation naturelle des boues vers ce côté-ci.

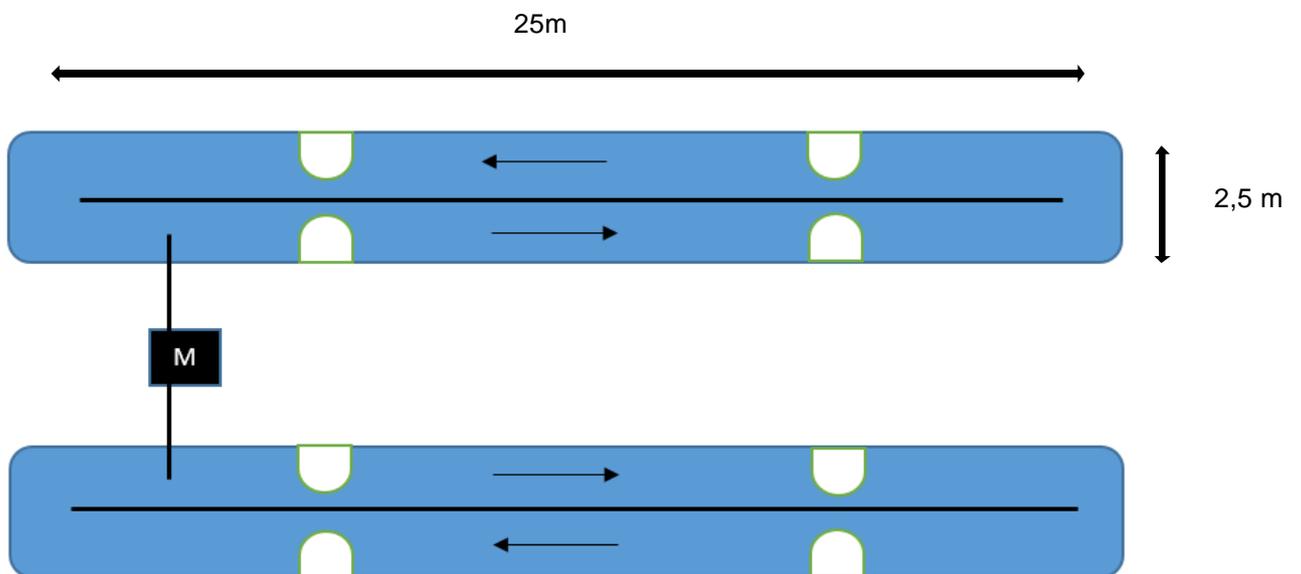


Figure 4 : Schéma de deux bassins de spiruline

Ces types de bassins appelés « Race Way » sont très couramment utilisés pour la culture de spiruline et ne prennent pas beaucoup de place au vu de leur superficie. Il est facile de mettre plusieurs bassins en parallèle sur un petit site.

Cependant il existe aussi d'autres types de bassins notamment circulaires, qui permettent une meilleure agitation. Cela évite les zones mortes où le courant n'est pas présent comme cela peut-être le cas dans les coins des bassins en long.



Figure 5 : Photo d'un bassin circulaire

Source : ecospirulinetogo

2.2. Répartition des tâches et process de fabrication

La culture de la spiruline demande une attention de tous les jours afin de réagir vite en cas de problème dans la culture. En quelques heures, il est possible de perdre la culture dans les conditions les plus sévères : forte intensité lumineuse, sursaturation en oxygène et faible température ...

Afin d'obtenir la meilleure productivité possible, il est recommandé de récolter la spiruline tous les jours si les conditions sont favorables. De ce fait, les employés travaillent tous les jours sauf le dimanche. Voici le déroulement d'une journée habituelle sur le site de production.

Tableau 3 : Emploi du temps typique d'une journée à la ferme

Horaire	Tâches réalisées
6h30 - 10h30	Récolte de la spiruline / Conditionnement de la récolte de la veille
10h30 - 11h	Pause
11h - 12h30	Pressage / Extrusion / Mise en route du séchage
12h30 - 14h	Pause repas
14h - 15h30	Nettoyage des bassins et du matériel / Apport d'intrants / Maintenance

Avec les 14 bassins présents sur le site, il est nécessaire d'avoir au moins 7 récoltants dans l'hypothèse où chacun récolte deux bassins simultanément comme c'est le cas actuellement. Le responsable du site s'occupe lui de répartir les tâches de chacun, de conditionner la récolte de la veille et de réaliser les relevés quotidiens des paramètres de culture.

Bien que la culture soit exigeante et nécessite de bien maîtriser les différents paramètres de production, le processus de production est lui assez simple et demande peu de moyens.



Récolte par filtration : Celle-ci est réalisée le matin puisque c'est le moment où la spiruline surnage. Les filaments de spiruline possèdent une longueur de 200 à 500 μm et le diamètre n'excède pas 10 μm . On utilise donc un filtre ayant un diamètre d'ouverture de l'ordre de 30 μm .



Pressage : Il est réalisé à l'aide de presses mécaniques. Le pressage permet d'évacuer le maximum d'eau possible avant le séchage. Tout comme le séchage, il a une influence sur le goût final de la spiruline. Si le pressage est suffisant, l'odeur de la spiruline séchée ne sera pas désagréable. Cette étape a aussi pour objectif de rendre la spiruline modelable pour l'extrusion et d'accélérer par la suite le séchage.



Extrudage : La spiruline est **extrudée** sous forme de spaghettis appelés "paillettes". Ceci a pour but d'augmenter la surface d'échange entre la spiruline et l'air afin d'accélérer le séchage. Réalisée à l'aide d'un poussoir à saucisses ou d'un pistolet SIKA si la production est faible.



Séchage : Le séchage **qui est la phase la plus délicate** est réalisé dans des fours chauffés au charbon de bois. C'est une méthode économique qui apporte un bon goût de fumé à la spiruline. Cependant cela ne permet pas de maîtriser la température interne des fours et le taux d'humidité de la spiruline en sortie. Il faut atteindre une eau résiduelle de 10 % ou moins de préférence.



Conditionnement : La spiruline en paillettes ou en poudre est conditionnée dans des sachets en plastique bleu thermosoudés. Il est envisagé un conditionnement en sachets refermables afin de protéger la spiruline de la lumière, de l'humidité, de la chaleur et de l'oxydation. Une fois un sachet ouvert, il est conseillé de le consommer dans les 15 jours afin de conserver le bêta carotène qui est un puissant antioxydant.

Figure 6 : Processus de fabrication de la Spiruline à Fanantenana

3. Problématique et démarche générale

Dans le cadre de ce stage, ma mission est de mettre en évidence les principales causes d'une production inférieure à celle attendue. Comme nous pouvons le voir sur la figure 7, l'objectif de productivité annuelle de 4 g/m²/jour permet d'atteindre une production annuelle supérieure à 1,2 tonne. Or, la production de 830 kg de spiruline sur l'année 2016 ne représente qu'une productivité de 2,7g/m²/jour

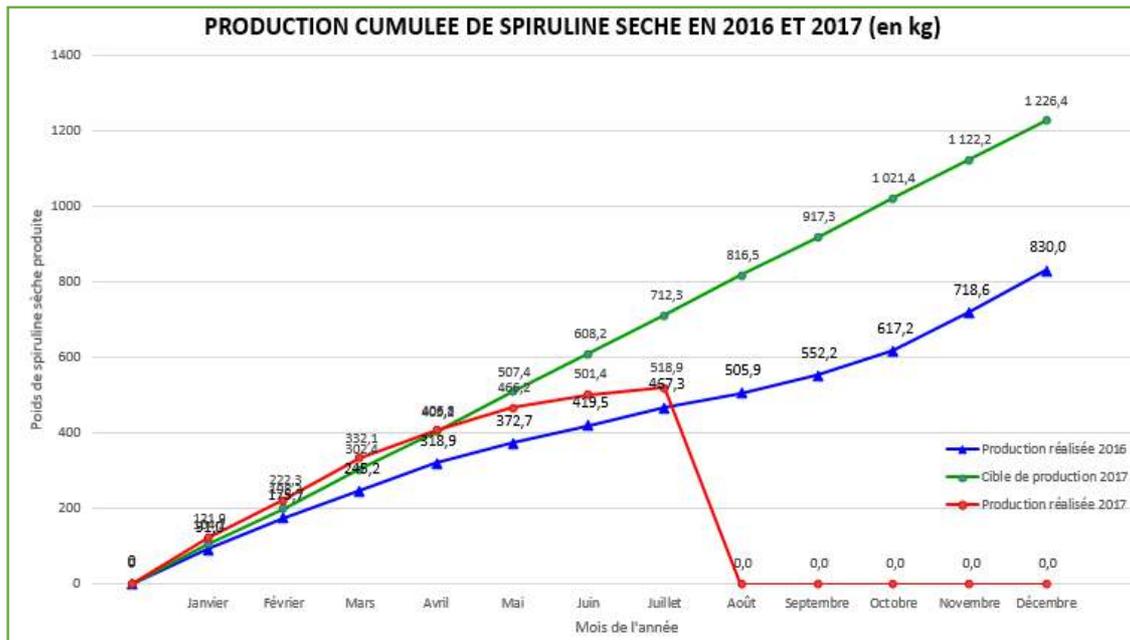


Figure 7 : Courbe comparative des productions cumulées de spiruline sèche des années 2016 et 2017 de Janvier à Juillet par rapport à l'objectif annuel.

De ce fait, le choix d'une méthode d'analyse complète permettant d'examiner toutes les causes possibles est déterminant. Mon choix s'est porté sur la méthode des 5M qui sert à rechercher et à représenter de manière synthétique les différentes causes possibles d'un problème.

Pour ce faire, j'ai utilisé le diagramme d'Ishikawa qui permet une représentation graphique et synthétique des causes, sous forme d'arêtes de poisson. Le diagramme est structuré de façon à classer les différentes causes d'un problème en 5 grandes familles : les 5M.

- **Matière** : les différents consommables utilisés, matières premières ...
- **Milieu** : le lieu de travail, son aspect, son organisation physique ...
- **Méthodes** : les procédures, le flux d'information ...
- **Matériel** : les équipements, machines, outillages, pièces de rechange ...
- **Main d'œuvre** : les ressources humaines, les qualifications du personnel

Le diagramme d'Ishikawa fait état de la démarche de travail effectuée et développée dans la suite du mémoire. Certaines familles ont été regroupées pour des raisons de simplicité de traitement et de raisonnement

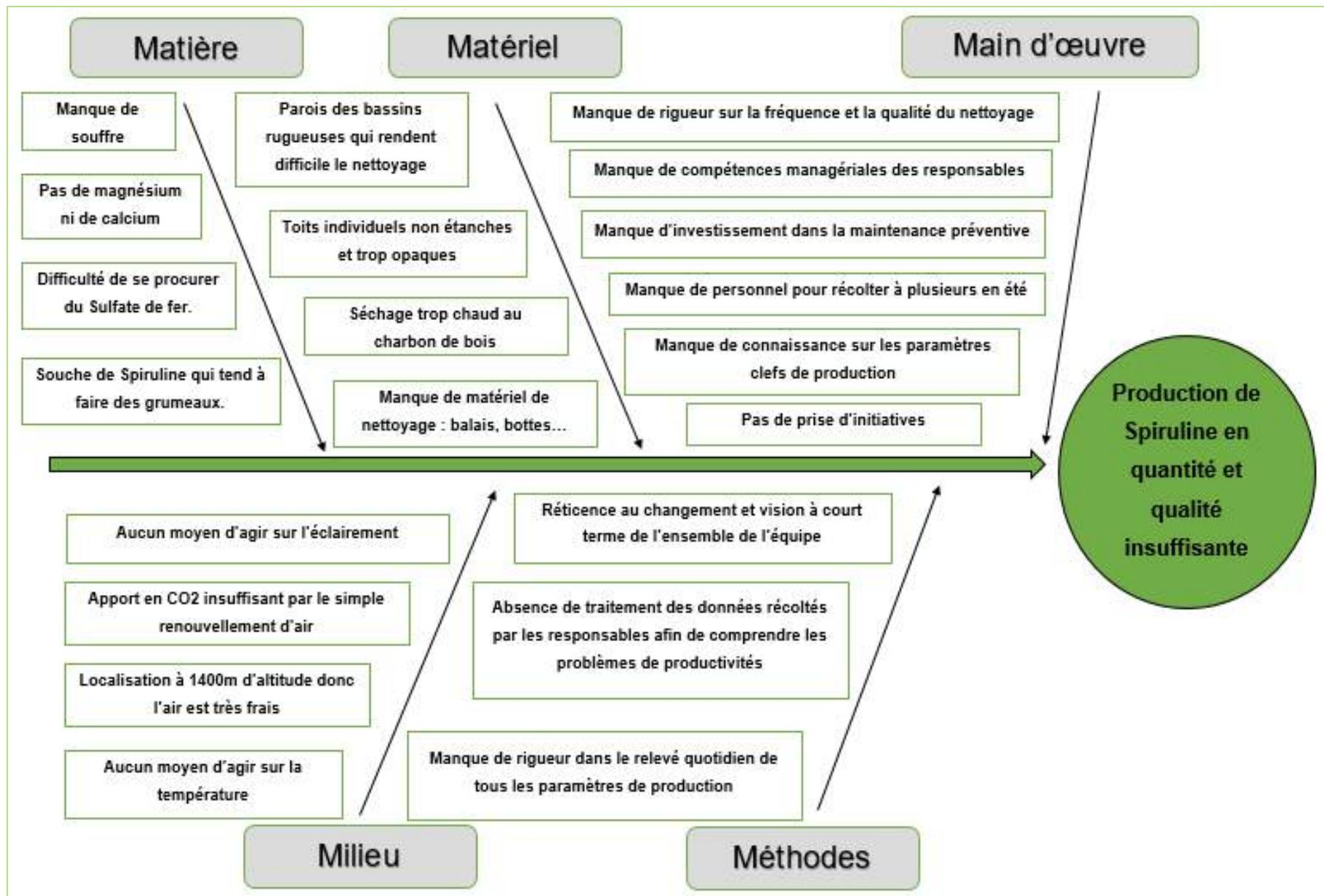


Figure 8 : Diagramme des causes : Ishikawa

4. Matière et Milieu

4.1. Intrants et nettoyage

Les intrants sont ajoutés quotidiennement après la récolte en fonction de la masse de spiruline prélevée dans un bassin. Ils sont nécessaires pour le renouvellement de la spiruline et permettent de conserver les paramètres physico-chimiques du milieu. Le calcul se fait sur la masse de spiruline sèche prélevée ce qui oblige à faire un calcul théorique car le séchage est réalisé pendant la nuit. La masse de spiruline sèche est donc connue le lendemain de la récolte alors que les intrants sont ajoutés en début d'après-midi. Nos calculs sont faits à partir du poids sec théorique (« appelé PST »), qui représente 20 % de la masse de la spiruline après l'étape du pressage mécanique.

Nous utilisons actuellement cinq types d'intrants différents sur notre site de production. Les intrants ne sont pas les mêmes pour toutes les fermes de spiruline et peuvent différer en fonction des préférences du responsable de production. Certaines fermes peuvent ajouter des intrants supplémentaires afin d'augmenter la richesse nutritionnelle du produit fini et donc sa valeur ajoutée.

Pour chaque kilo d'algue sèche récolté, il faut remplacer environ :

Tableau 4 : Apports par kilogramme de spiruline prélevé (R.D. Fox, p153, 1999)

MOLECULE	MASSE (GRAMMES)
CARBONE (C)	470
AZOTE (N)	120
POTASSIUM (K)	13,3
PHOSPHORE (P)	7,6
SOUFRE (S)	5,25
CHLORE (Cl)	4,0
MAGNESIUM (Mg)	1,4
CALCIUM (Ca)	1,0
FER (Fe)	0,47
SODIUM (Na)	0,3

Voici à présent nos intrants et les proportions apportées :

Tableau 5 : Intrants utilisés à la ferme et leur rôle

INTRANT	UTILITE
Bicarbonate de Sodium (NaHCO_3) = PST x 2	Apport du Carbone et du Sodium. <u>Conséquence</u> : Augmente la salinité et abaisse le pH.
NPK = PST x 0,165	Seule source de Phosphore. Apporte aussi de l'Azote et du Potassium. Proportion de NPK 15/15/15 et matières organiques. <u>Conséquence</u> : Attention le rapport K/N doit toujours rester inférieur à 5/1.
Urée $[(\text{NH}_2)_2\text{CO}] = \text{PST} \times 0,309$	Apport de l'Azote très présente dans la Phycocyanine. Se dissocie en Acide carbonique et apporte ainsi du Carbone. <u>Conséquence</u> : Abaisse le pH. Les nitrates augmentent la salinité. Attention au sur dosage car libère des ions ammoniac NH_4^+ toxiques en excès.
Sulfate de Fer (FeSO_4) = PST x 0,06	Apport du Fer et un peu de Soufre.
Eau de cendre = PST x 0,19	Apport du Potassium et des oligoéléments.
Sel (NaCl)	Apport du chlore et de la salinité nécessaire.

Comparons à présent les apports de chaque intrant avec la liste des molécules à apporter pour chaque kilo de spiruline sèche récolté. (Cf. tableau 4 et 5)

On remarque qu'il n'y a pas d'apport de Magnésium ni de Calcium et que le Soufre provenant du Sulfate de fer est en quantité négligeable. Afin d'avoir un apport optimal, il faudrait ajouter du Sulfate de Magnésium et du Chlorure de Calcium. Le Sulfate de Magnésium permet l'apport de Soufre et surtout de Magnésium que l'on retrouve dans la structure de la Chlorophylle.

Il est difficile de trouver ces deux intrants à Madagascar et nous n'avons pas réussi à les remplacer à ce jour. De la même manière, le sulfate de fer est parfois en rupture de stock pendant plusieurs mois.

Ces problèmes d'approvisionnement entraînent des carences dans les apports quotidiens de la spiruline. Cela a pour conséquence de diminuer la productivité de la spiruline, comme par exemple avec le Magnésium essentiel pour synthétiser la Chlorophylle. Cela peut aussi diminuer la qualité nutritionnelle du produit fini. Exemple : baisse du taux de Fer, de Magnésium et de Calcium dans la spiruline vendue.

4.2. Résistance des souches

Actuellement nous utilisons la souche « Lonar » pour produire la spiruline. Cependant les deux sous-espèces « Paracas » et « Lonar » sont exploitées à Antsirabe par différentes fermes de spiruline. Il existe une troisième sous-espèce appelée « Toliara » endémique de Madagascar principalement utilisée dans le sud du pays.

En comparant les rendements entre les différentes fermes de spiruline d'Antsirabe, il semblerait que la souche « Lonar » produise plus que la « Paracas » lorsqu'elle est dans des conditions optimales mais que cette deuxième souche résiste mieux aux variations de température.

Des études ont déjà été menées pour comparer l'adaptation des souches « Paracas » et « Toliara » entre elles. Les essais de culture des deux souches montrent que la souche « Paracas » se développe mieux que la souche « Toliara » aux conditions de température, de pH et de salinité égales. La souche « Paracas » semble présenter de meilleures capacités d'adaptation au nouveau milieu de culture (Institut océanographique Paul Ricard, 2004).

Des essais de comparaison de productivité et de résistance seront réalisés afin de comparer la souche « Lonar » actuellement utilisée avec la souche « Paracas ». Cela permettra d'identifier laquelle des deux est la mieux adaptée aux conditions climatiques d'Antsirabe. Leur plage de résistance aux températures étant différente, nous étudions actuellement la possibilité de mixer les deux souches. Cela pourrait rendre les bassins moins sujets aux morts subites induites par des conditions climatiques trop extrêmes.

4.3. Analyses microbiologiques et physico-chimiques de la spiruline

La spiruline créée à Madagascar étant principalement destinée aux enfants, il est extrêmement important de surveiller la qualité microbiologique de la spiruline. Cela se fait au travers des analyses microscopiques du milieu de culture par les responsables de production. Ces analyses régulières permettent d'identifier des contaminations par d'autres algues invasives telles que le Phormidium. Cette algue n'est pas dangereuse à la consommation mais diminue les rendements de la spiruline. Si le niveau de Phormidium est maintenu à un faible niveau par sa récolte quotidienne, on peut s'en accommoder. Cependant si la contamination est trop importante, il n'y a pas d'autres solutions que de vider le bassin entièrement et de recommencer la culture après un nettoyage approfondi.

A savoir :

Un bassin de 60 m² contient environ 9 à 10 m³ de milieu de culture.

Si on remplit un bassin à partir de 150 g de culture à 1 g/l de concentration, il va falloir faire au moins 4 cultures successives, en multipliant chaque fois le volume par 5, ce qui demande environ trois semaines au total (avec un taux de croissance de 35 % par jour).



Figure 9 : Spiruline fortement contaminée par du Phormidium.



Figure 10: Spiruline faiblement contaminée par du Phormidium.

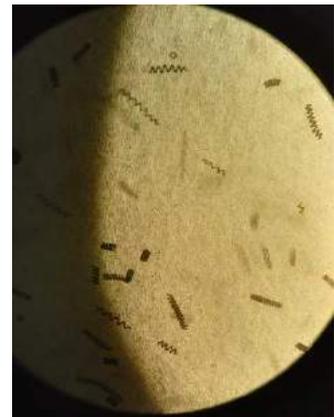


Figure 11 : Spiruline saine.

Grâce à l'expertise de Jean-Paul JOURDAN (spécialiste français de la spiruline), nous avons aussi pu identifier au microscope deux types de microorganismes mobiles présents dans la majorité des bassins :

Protozoaire :

Protistes (eucaryotes unicellulaires) hétérotrophes mobiles qui ingèrent leur nourriture par phagocytose, ce sont toujours de petits organismes.

- Des zooplanctons très mobiles qui sont probablement des protozoaires. Ceux-ci sont utiles en éliminant les bactéries et ajoutent du CO₂ et de l'azote fixé au milieu à la fois par des produits respiratoires et en mourants (Fox R.D.,1999. p.175). Les protozoaires ne nuisent pas à la culture et aident à tenir la culture propre.



- Des rotifères sont des microorganismes plus gros mais aussi plus lents. Ils se nourrissent essentiellement de microorganismes en suspension dans l'eau. Ils peuvent cependant se nourrir de spiruline ce qui diminue la productivité des bassins.

Figure 12 : Photo d'un rotifère prise au microscope sur le site de Fanantenana

Ces deux microorganismes ne sont pas pathogènes pour l'homme dans la majorité des cas. Seules quelques sous-espèces de protozoaires peuvent être des vecteurs de maladie mais ils meurent s'ils sont soumis à une température de 40-43°C pendant 2 heures ou plus. Le traitement thermique auquel ils sont soumis lors du séchage suffit donc à écarter tout risque pour le consommateur.

D'autres analyses plus approfondies sont réalisées par des laboratoires extérieurs. Celles-ci permettent de déterminer les paramètres physico-chimiques (pourcentage d'humidité, protides, glucides et lipides) et microbiologiques de l'échantillon de spiruline. Les principaux microorganismes pathogènes sont donc dénombrés (Coliformes totaux, Staphylocoque, E.coli, B.cereus, Levures, ASR ou « dénombrement en anaérobiose des bactéries sulfito-réductrices » et Salmonella sp) et un certificat de consommabilité est délivré par le laboratoire si les résultats sont satisfaisants. (Cf. ANNEXE 2 et 3)

Ces analyses en laboratoire sont réalisées 3 à 4 fois par an pour la ferme de Fanantenana, cependant la fréquence des analyses reste à l'appréciation du producteur. Aucune obligation de moyens n'est exigée, seule l'obligation de résultats est prise en compte.

5. Piloter la production à l'aide des paramètres clefs

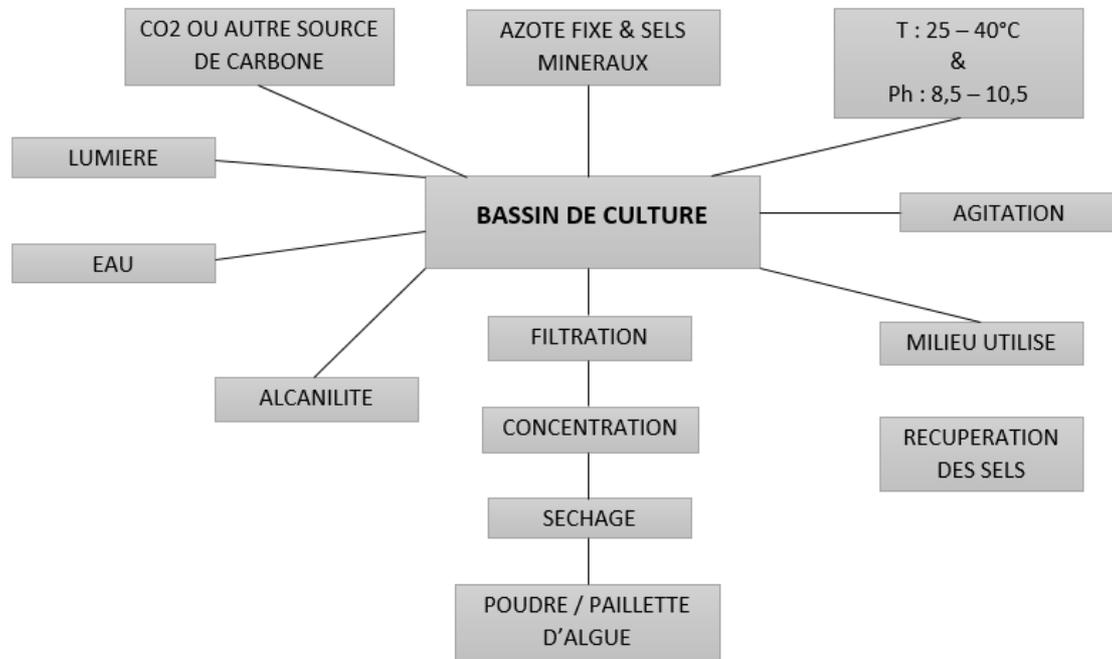


Figure 13 : Diagramme des flux pour la culture et le traitement de la spiruline

Sources : R.D. Fox, 1999

Le diagramme des flux de R.D. FOX représenté dans la figure 13 montre bien qu'il y a plusieurs paramètres clefs à maîtriser afin de pouvoir piloter convenablement une exploitation de spiruline. Plusieurs auteurs ont conclu que la lumière est le facteur limitant principal pour la croissance de la spiruline en extérieur en été, tandis que la température limite la croissance en hiver (Vonshak, 1997b). Cependant, une étude scientifique réalisée en Espagne (Carlos Jimenez, Belen R. Cossio, F. Xavier Niell en 2003) démontre que l'excès d'O₂ dissous et de pH a considérablement réduit la concentration et la productivité de la biomasse, en particulier durant le milieu de l'été.

Jean-Paul JOURDAN propose dans son manuel des graphiques prévisionnels de la productivité en fonction de différents paramètres inspirés de la thèse de Zarrouk datant des années 1960. Nous allons alors analyser nos paramètres de production afin d'essayer de déterminer les facteurs limitants de notre exploitation.

5.1. Eclairage

Photolyse :

La spiruline est tuée en quelques secondes si elle est exposée à un fort ensoleillement (120 klux). Sa forme en spirale est un mécanisme d'autodéfense afin de créer plus de zone d'ombre.

Afin de mesurer l'intensité du rayonnement solaire, il est couramment utilisé un luxmètre. D'après Ripley D. FOX, « l'indication d'un luxmètre en plein soleil est d'environ 95 klux. Ceci est un rayonnement fréquent à une altitude de 1 500 mètres ou plus. Antsirabe se situe à 1 400 mètres d'altitude et l'intensité du rayonnement en plein soleil devrait donc être proche de cette valeur.

Les nouvelles cultures qui ont une concentration faible en spiruline sont beaucoup plus sensibles à la photolyse et demandent à être ombragées. Comme nous le montre le modèle de Zarrouk dans la figure 14, le meilleur éclairage se trouve entre 30 et 50 klux pour atteindre la plus forte productivité.

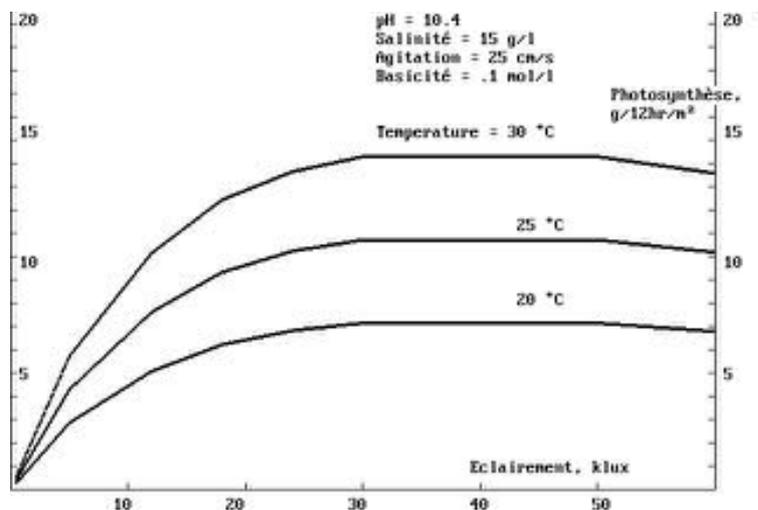


Figure 14 : Vitesse photosynthèse de la spiruline en fonction de l'éclairage d'après la thèse de Zarrouk

Après mesure de l'intensité lumineuse, nous avons remarqué que la spiruline n'est pas assez éclairée. Les relevés ont montré que sous les toits en polyesters anti-UV présents sur la ferme, l'éclairage n'est que de 10 klux à midi lorsque le ciel est dégagé. Cela s'explique par l'opacité des toits présents qui ne laisse passer que peu de lumière. Ce manque de lumière est un véritable problème qui est un facteur limitant pour que la photosynthèse et donc la productivité soit optimale.

Si nous admettons l'hypothèse que la température du milieu de culture est de 20°C avec des conditions optimales de pH, salinité, agitation et basicité comme c'est le cas pour la fonction de la figure 14, nous pourrions tout juste atteindre notre objectif de productivité de 4g/jour/m² de spiruline avec notre éclairage de 10 klux.

A savoir :

Chacune des expériences de la thèse de Zarrouk est réalisée dans des conditions physico-chimiques fixes optimales.

5.2. CO₂ et pH

Dans son livre dédié à la spiruline, Ripley D. FOX explique les mécanismes de l'absorption du CO₂ et son influence sur le pH du milieu de culture. (Fox R.D.1999, p94-96).

Il est dit que les molécules de CO₂ réagissent avec l'eau pour former de l'acide carbonique H₂CO₃. Cet acide se dissocie en ions bicarboniques HCO₃⁻ et ions H⁺. Les ions bicarboniques peuvent eux-mêmes se dissocier pour redonner du CO₂ ou des ions carboniques CO₃⁻ selon le pH de la solution. En prélevant du CO₂ dans la solution, la spiruline tend à produire des ions OH⁻ et ainsi à élever le pH. Ainsi, la photosynthèse augmente le pH pendant le jour, et le matin le pH sera plus bas que le soir à cause du CO₂ libéré la nuit par la respiration.

Si le pH se stabilise autour de 10,9, cela signifie que le CO₂ atmosphérique est dissous dans l'eau à la même vitesse que celle à laquelle la spiruline le prélève. La culture est alors dite limitée par l'apport de CO₂ à environ 3g/m²/jour.

5.3. Température, pH et productivité

La température du milieu de culture et le pH des 14 bassins ont été suivis quotidiennement (à l'exception des dimanches et des jours fériés) afin de donner une valeur moyenne journalière sur 840 m² de culture extérieure entre le 6 avril 2017 et le 17 juillet 2017. La figure 15 montre l'évolution de la température et du pH sur cette période relevée le matin à 9h30 heure locale.

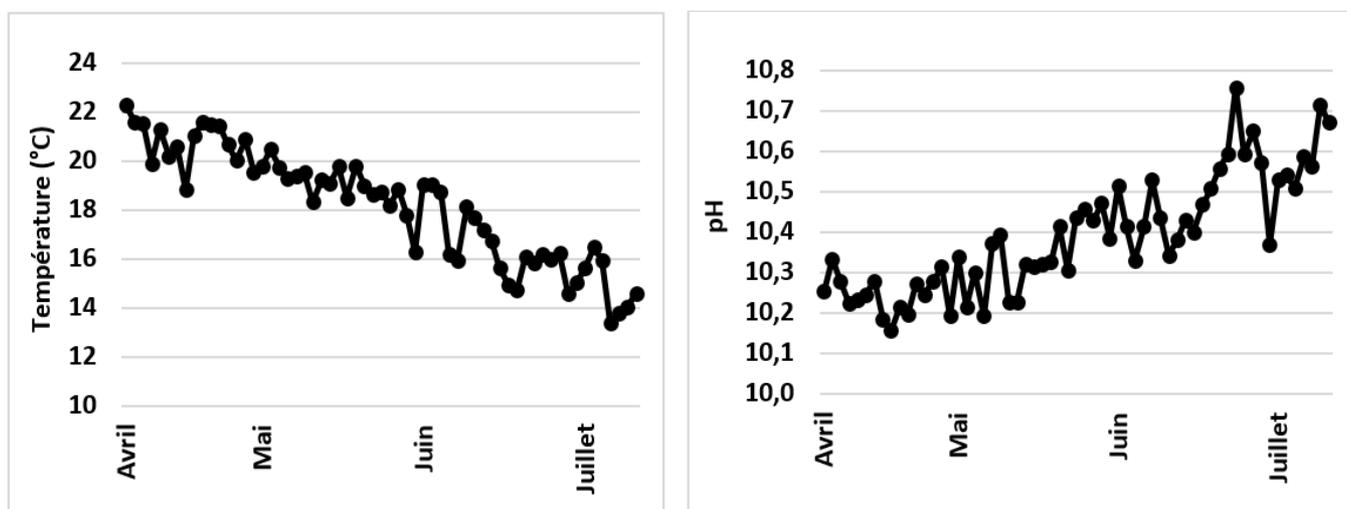


Figure 15 : Evolution de la température et du pH moyen sur une superficie de 840m² de bassin de spiruline durant la période d'étude (Du 6 avril 2017 au 17 juillet 2017)

La température moyenne la plus élevée de la culture à 9h30 fut de 22,3°C le premier jour de l'étude, alors que la température la plus basse fut de 13,4°C le 10 juillet. La température moyenne était de 20,7°C en avril, 19°C en mai, 16,5°C en juin et seulement 14,6°C après les deux premières semaines de juillet. On note donc une forte baisse des températures avec la sortie de la saison chaude et humide et l'entrée dans la saison froide et sèche fin mai / début juin. Ce changement de saison n'est

pas négligeable puisque l'humidité joue un rôle important (notamment l'hiver à Antsirabe où la saison sèche correspond aussi à la saison froide). En effet, dans un climat désertique, l'eau est de 6°C à 8°C plus froide que l'air.

Le pH initial de la culture au début de l'étude était de 10,25. Il est resté relativement stable et en dessous de 10,4 jusqu'au 19 mai ce qui correspond à la première baisse significative de température avec une diminution supérieure à 3°C en 10 jours. Aucun système de contrôle du pH n'est établi, seuls les intrants quotidiens nous permettent de faire varier ce paramètre. Des relevés ponctuels fin juillet et début août nous ont montré que le pH était redescendu aux alentours de 10,5-10,6 après une légère remontée en température (16-17°C).

Afin de résumer cette expérience, voici un tableau récapitulatif des trois paramètres étudiés sur la période du 6 avril 2017 au 17 juillet 2017 :

Tableau 6 : Tableau de synthèse de la température, pH et productivité réalisé sur les moyennes mensuelles

MOIS	T°C	pH	Prod (g/m²/jour)
Avril	20,7	10,2	3,0
Mai	19,0	10,4	2,3
Juin	16,5	10,5	1,4
Juillet	14,6	10,6	0,8

On observe très clairement une baisse de la température ainsi qu'une augmentation du pH qui entraîne une forte diminution de la productivité des bassins.

La température

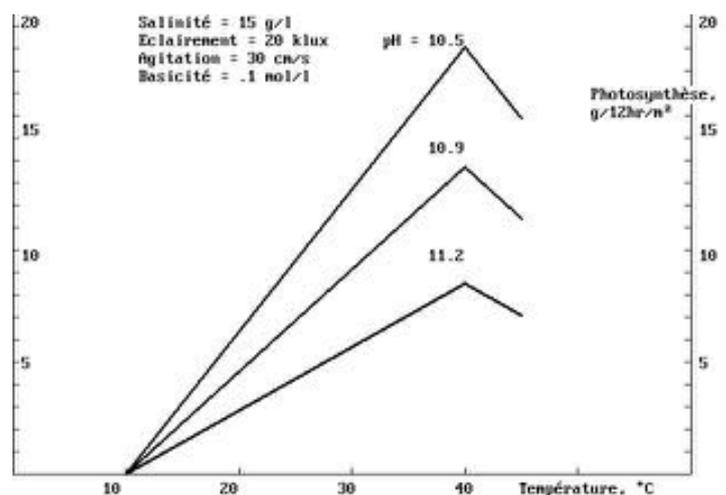


Figure 16 : Vitesse de photosynthèse de la spiruline en fonction de la température de la culture d'après la thèse de Zarrouk

Le pH

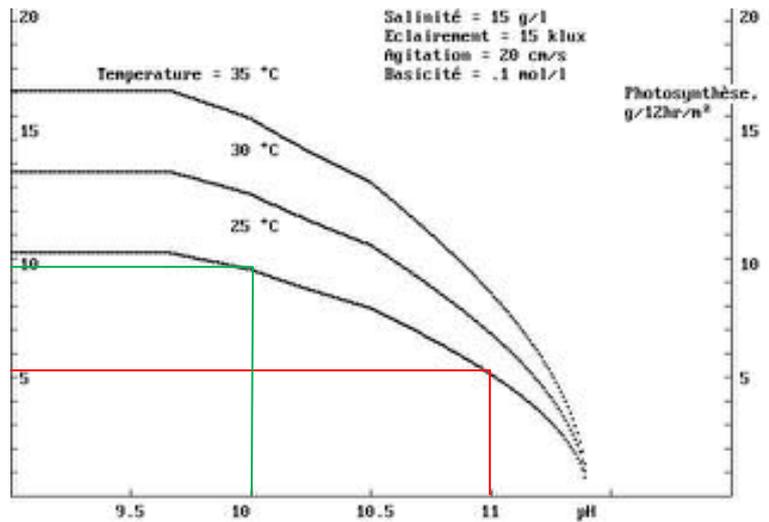


Figure 18 : Vitesse de photosynthèse de la spiruline en fonction du pH d'après la thèse de Zarrouk

Comme nous pouvons l'observer sur la figure précédente, le pH optimal d'une culture florissante se situe entre 9,5 à 10,5. Nos relevés quotidiens montrent que nos bassins possèdent un pH moyen compris entre 10,2 et 10,6 ce qui est dans la fourchette haute des recommandations. Bien que la croissance de la spiruline ralentisse quand le pH augmente, un pH élevé a l'avantage d'inhiber les autres algues ou protozoaires dans le milieu de culture.

D'après la figure tirée de la thèse de Zarrouk, dans les conditions données qui sont réalisables (bien que nous ayons vu que notre éclairage soit inférieur à celui utilisé) et avec un pH compris entre 10 et 11, nous pourrions tout de même atteindre une productivité comprise entre 5 et 9,5 g/jour/m² si la température atteignait 25°C. On peut donc en conclure que ce paramètre n'est pas l'unique facteur limitant pour atteindre notre objectif de 4g/jour/m².

La productivité

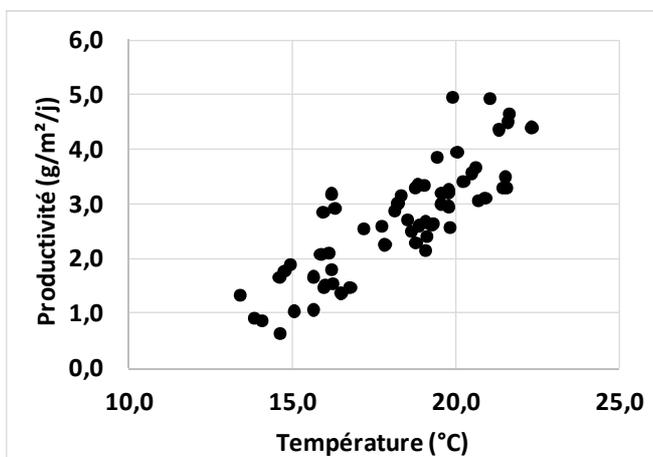


Figure 19 : Suivi de la productivité en fonction de la température des bassins

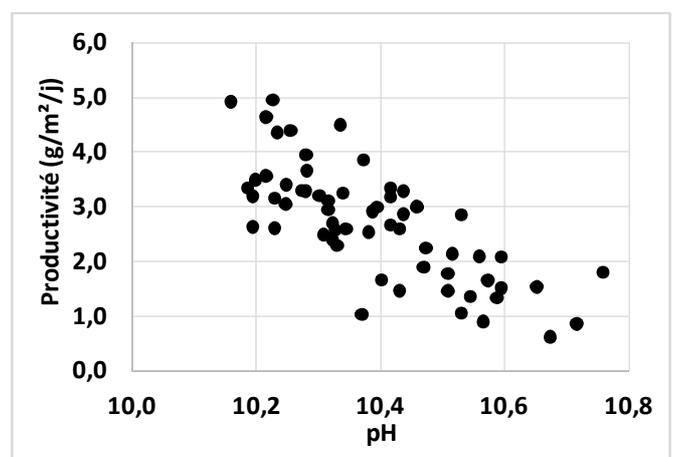


Figure 20 : Suivi de la productivité en fonction du pH des bassins

Les figures 19 et 20 nous montrent un lien de causalité entre la température, la productivité et le pH. Une hausse de la température entraîne indéniablement une hausse de la productivité. Comme vu précédemment, on sait que le pH influence directement la productivité avec un optimum entre 9,5 et 10 puis une diminution de la productivité avec l'augmentation du pH. On remarque alors que la productivité diminue avec la hausse du pH sur une plage de 10,2 à 10,7.

5.4. Salinité

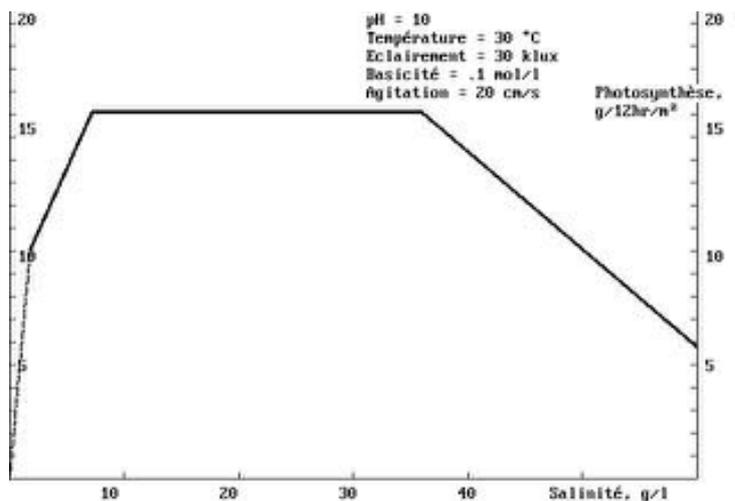


Figure 21 : Vitesse de photosynthèse de la spiruline en fonction de la salinité du milieu d'après la thèse de Zarrouk

La spiruline pousse bien dans un milieu à salinité totale de 30 grammes par litre et tolère même 200g/l (R.D. Fox, 1999). Seul un milieu avec une salinité trop faible pourrait entraîner la mort de la culture comme nous le montre la fonction précédente. Cependant une salinité élevée a un intérêt non négligeable ! La diversité des espèces vivant dans un environnement alcalin décroît quand la salinité et l'alcalinité augmentent (Iltis A., 1974).

Pour information, la densité de nos bassins est stable aux alentours de 1,020 ce qui correspond à une salinité de 27,2 g/l d'après la table de conversion de Zerbe&Taylor. (R.D. Fox, 1999, p220) La salinité n'est donc en aucun cas un paramètre qui pourrait expliquer la faible productivité de nos bassins.

5.5. Agitation

On observe que dans des conditions optimales, l'agitation a très peu d'influence sur la productivité.

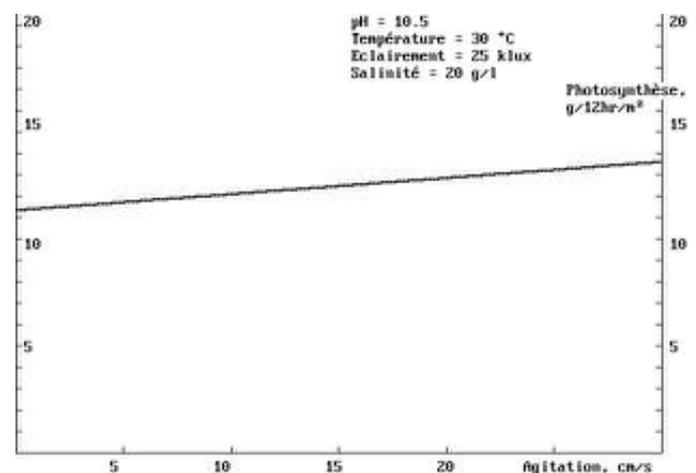


Figure 22 : Vitesse de photosynthèse en fonction de l'agitation

Cependant, il est important de posséder un moyen d'agitation des bassins même faible lorsque la luminosité est importante ou lorsque la concentration des bassins en spiruline est trop faible afin que les filaments éclairés passent rapidement dans une zone ombragée, ce qui donne aux photosystèmes le temps de « digérer » les quanta de lumière reçus et d'être prêts pour une nouvelle exposition au soleil. (R.D. Fox, 1999)

L'agitation a donc un rôle vital pour éviter la photolyse de la spiruline mais les variations de vitesse d'agitation ont un faible impact sur la productivité.

Ce qu'il faut retenir

Il est important de prendre du recul par rapport aux différents liens de causalité. En effet, les tests n'ont pas été réalisés en laboratoire mais dans une ferme de production grandeur nature. Les paramètres n'ont pas pu être fixés puis modifiés séparément un par un. Il est donc possible qu'une journée nuageuse entraîne à la fois une diminution de l'éclairement et de la température des bassins. Ces mêmes variations météorologiques peuvent elles-mêmes influencer le pH et provoquer une baisse de la productivité. Il est donc nécessaire de regarder cette expérience dans sa globalité. Bien que nous ne puissions pas augmenter l'éclairement dans les conditions de production artisanales d'une ferme de spiruline à Madagascar, il est possible de maîtriser partiellement les autres paramètres de production si le site de production est bien équipé.

La comparaison de nos valeurs avec les différents modèles prédictifs de production a montré que l'éclairement et la température étaient, dans notre cas précis, les paramètres clefs limitants de notre production. Notre éclairement et notre température sont bien en dessous des recommandations et des plages de valeur optimales pour avoir une productivité élevée. Ce sont donc sur eux que nous allons devoir travailler en priorité.

6. Main d'œuvre et Méthodes

6.1. Management de l'équipe et communication

Il est important de connaître les traditions et les normes d'une culture lorsqu'on arrive dans un nouveau pays. Les malgaches ont un sens de la hiérarchie très fort ce qui a l'avantage de simplifier le processus de prise de décision par le responsable. Cependant cela devient un réel problème lorsque l'on souhaite répartir les responsabilités et donner plus d'autonomie à l'équipe afin d'être plus efficace. Le style de management est donc très directif alors que nous souhaiterions qu'il soit plus participatif pour impliquer tout le monde, et surtout que les employés gagnent en compétences et que la motivation de l'équipe reste présente.

Pour amener petit à petit un style de management plus participatif, différentes actions ont été mises en place :

- Tout d'abord, l'affichage du plus grand nombre d'informations possible afin que chacun puisse avoir une réflexion personnelle et se tenir informé par lui-même. Dans cette optique, nous avons affiché les objectifs mensuels de production ainsi que le planning du rôle de chaque employé : ce planning change de manière quotidienne afin de ne pas rendre le travail trop répétitif. Cela a permis à chacun de se rendre compte du travail à fournir, facilitant l'anticipation du travail après la récolte matinale de la spiruline, sans avoir à attendre que le responsable de production répartisse les rôles.
- Dans le but d'avoir des responsabilités mieux réparties et de mener à bien plus de projets en parallèle, un récoltant a été nommé « Responsable de Maintenance ». Ceci ne lui donnant à l'origine qu'un titre supplémentaire, la décision a été prise de lui accorder le mercredi de 11h à 15h30 pour qu'il puisse travailler sur d'autres tâches que la réalisation du processus de transformation de la spiruline. Cette demi-journée est essentielle pour qu'il puisse prendre la pleine possession de ses nouvelles fonctions. Nous avons alors immédiatement constaté un réel effort et investissement dans la réalisation de ses nouvelles responsabilités au travers de l'entretien du site ainsi que de la maintenance préventive et curative.

Comme nous avons pu le voir précédemment (Cf. « 5.3. Température, pH et productivité »), la productivité a beaucoup diminué à partir du mois de juin à la suite de la baisse de la température.

- Afin de laisser les bassins de spiruline se régénérer, la récolte a été arrêtée sur la journée du jeudi. Cette journée a alors été dédiée à la maintenance du site et aux travaux qui peuvent être effectués par les employés. Cela a tout de même soulevé des questions auprès des employés qui ont une vision à très court terme et qui voyaient uniquement une récolte en moins par semaine et donc une baisse de la production de spiruline mensuelle. Il a donc été

expliqué à tous les employés la raison de cette décision qui permet d'atteindre des objectifs fixés à plus long terme. C'est dans cette optique-là et avant le retour d'une plus forte productivité que les rénovations du site sont réalisées.

- A la suite d'une réunion mensuelle de plusieurs heures animée par le responsable du site, il a été constaté l'inefficacité de ces réunions. Celles-ci sont réalisées en présence de tous les employés sous la forme d'un grand débat mais restent néanmoins utiles pour maintenir informée toute l'équipe de l'avancement des différents projets.

Cependant, il a été mis en place des réunions hebdomadaires avec les différents responsables afin de prendre des décisions et d'être plus réactif. Une formation sur la manière de préparer et de conduire une réunion efficacement a été dispensée au responsable de production. Le responsable de production est donc en charge d'animer ces nouvelles réunions ce qui lui permet d'avoir plus de légitimité auprès de l'équipe. Le but est d'apprendre aux différents responsables à déléguer des tâches et à communiquer plus fréquemment entre eux, ceci dans la continuité de notre objectif de faire monter en compétence l'ensemble des acteurs de la ferme de spiruline.

- Un cas de gestion de crise a aussi été observé à la ferme de spiruline à la suite d'un vol impliquant deux employés. Des réunions ont eu lieu entre les différents responsables afin de faire la lumière sur cet acte et prendre une décision en pleine connaissance de cause. Les responsabilités et l'implication dans le vol n'étant pas les mêmes entre les deux employés concernés, il a été décidé de ne licencier qu'un seul des employés. Le second employé a été gardé à la ferme mais a été sanctionné financièrement tout en perdant son rôle de gardien du site.

Cette décision a entraîné une réunion de crise afin d'expliquer à toute l'équipe les raisons des différentes sanctions entre les deux employés impliqués dans le vol. Cela montre une fois de plus l'importance de communiquer et d'expliquer les décisions à tous les acteurs.

- Un deuxième vol a été commis deux mois plus tard par des individus extérieurs. Afin que l'équipe prenne conscience de l'importance d'agir pour préserver la sécurité de leur site, il leur a été demandé de réaliser un petit dossier sur le vol. Celui-ci doit déboucher sur des solutions pour que cela ne puisse pas se reproduire.

Si on applique les méthodes du management du changement, on s'aperçoit qu'une décision est plus facilement acceptée lorsqu'elle est comprise par tous. De la même manière, il y a moins de réticence au changement lorsqu'un acteur est impliqué dans celui-ci. Ce fut le cas lorsqu'il a été question de mettre en place des réunions hebdomadaires pour favoriser la communication des responsables. Le responsable a apprécié la confiance qui lui a été accordée afin de préparer et d'animer ces nouvelles réunions. Aucune réticence à ces nouvelles réunions n'a été observée puisqu'un temps de parole

équilibré est donné à tous les responsables pour qu'ils puissent s'exprimer dans leur domaine de prédilection.

6.2. Gestion de production

La gestion de la production intervient à plusieurs niveaux. Le premier aspect est la maîtrise de la production en elle-même avec le processus de récolte et l'apport d'intrants pour pérenniser la culture. C'est la base de la production de spiruline. Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, la culture de spiruline nécessite de surveiller plusieurs paramètres de culture relevés quotidiennement. Ces paramètres doivent être traités après coup pour que le suivi soit efficace. Cela permet d'avoir une vue générale sur l'évolution de la culture et d'expliquer certaines baisses de productivité.

Cependant la gestion de la production ne s'arrête pas là puisqu'elle englobe aussi la gestion des intrants, des combustibles, du conditionnement et des différentes ventes de spiruline. Cet aspect-là plus logistique et économique est parfois délaissé dans les petites structures du pays au profit de la simple production. Elle reste toutefois très importante afin de calculer ses coûts de production et donc le prix de revient de la spiruline. Il a donc été nécessaire de revoir la manière donc les stocks sont gérés afin d'avoir un véritable suivi de la consommation des intrants.

Le traitement de données ainsi que le suivi des stocks ne pouvant se faire presque exclusivement que par informatique, nous avons été confrontés au problème de manque de connaissances informatiques à Madagascar.

Pour cette même raison, l'équipe calculait les quantités quotidiennes d'intrants à apporter aux bassins à l'aide d'une calculette. A raison de cinq intrants différents pour 14 bassins, cela revenait à réaliser 70 calculs quotidiennement. Des fichiers Excel étaient à leur disposition mais en trop grand nombre ce qui compliquait cette tâche. J'ai donc pris l'initiative de fusionner et de simplifier au maximum les fichiers Excel. De cette manière, il suffit à présent de saisir le poids de spiruline récoltée dans un bassin pour que le fichier calcule automatiquement les intrants à apporter et la consommation mensuelle de chaque intrant.

Il est donc important que les responsables aient un minimum de connaissances du logiciel Excel afin de pouvoir faire du traitement de données ou tout du moins remplir convenablement des tableaux sans en modifier les fichiers. De ce fait, j'ai essayé de transmettre au maximum mes connaissances informatiques et de rester disponible à tout type de question. Je pense tout de même qu'une véritable formation Excel pour les responsables est à envisager.

7. Matériel et Milieu

7.1. Installation électrique

A la suite d'un court-circuit qui est survenu au mois d'avril, lors de la fin de la saison des pluies et qui a endommagé un disjoncteur, un moteur ainsi qu'une pompe, il a été décidé de revoir l'installation électrique dans son ensemble.

Afin de procéder méthodiquement et régler le problème une fois pour toutes, nous avons dressé un état des lieux de l'installation électrique et réalisé un plan électrique du site (cf. ANNEXE 4).

Après identification de tous les défauts sur l'installation électrique : fils dénudés, mauvais raccords, surtension des fils...), nous avons fait appel à une personne de confiance afin de réaliser les travaux de manière durable. Cela semble anodin mais ne pas se précipiter et s'assurer que la personne en charge des travaux soit compétente est primordial dans un pays comme Madagascar où il n'y a pas de garantie sur les travaux finis.

La gestion des différents devis fut très intéressante car elle a nécessité de la rigueur et de l'anticipation afin de ne rien laisser au hasard et d'obtenir une installation finale pratique, durable et sécurisée (cf. ANNEXE 5). Nous avons donc réalisé les travaux au mois de septembre pendant que la productivité était encore faible, juste avant le retour de la saison des pluies et des courts-circuits éventuels.

7.2. Bassin de rétention

Chacun des 14 bassins est équipé d'une vanne latérale permettant de réaliser des vidanges pour évacuer les boues et renouveler le milieu de culture en cas de besoin. Cependant, nous nous sommes aperçus que l'ouverture de la vanne entraîne principalement l'évacuation du milieu de culture mais pas des boues. Cela a donc pour conséquence de concentrer davantage le milieu en boues. Afin d'éviter ce problème, il aurait été préférable de réaliser un trou de vidange afin d'y accumuler les boues pour s'assurer de leur bonne évacuation.

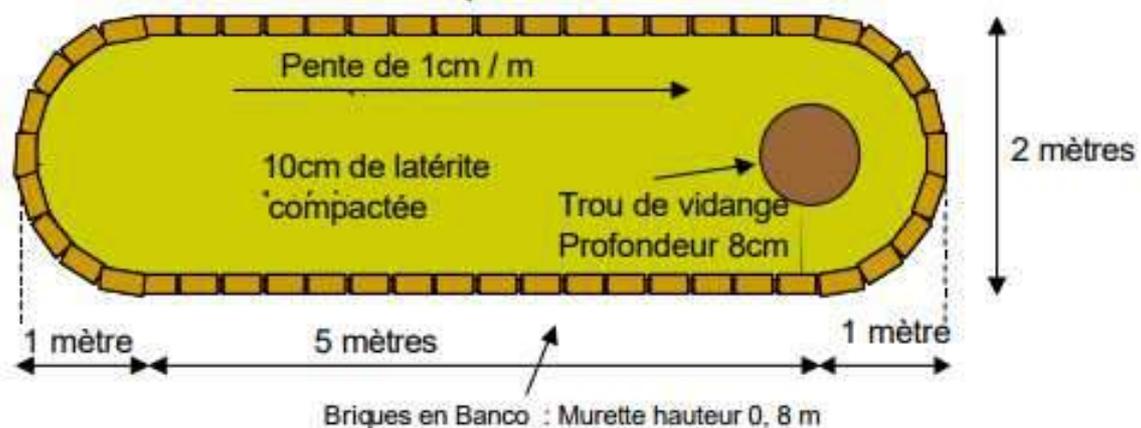


Figure 23 : Plan d'un bassin de spiruline proposé par le projet nigérien Agharous (Sales et Ancel, 2002)

Dans le but de résoudre ce problème de mauvaise évacuation des boues, nous avons opté pour le transvasement du milieu de culture des bassins. Ceci permet de récupérer le fond des bassins manuellement avant d'y réintroduire le milieu de culture. Nous préférons ne pas réaliser ce transvasement entre nos bassins pour ne pas favoriser les inter-contaminations. De plus, cela pourrait entraîner des chocs osmotiques et la mort de la spiruline si les caractéristiques physico-chimiques des bassins sont trop différentes.

Cela demande donc un investissement conséquent (cf. ANNEXE 6) afin de construire un bassin de rétention et de se procurer une pompe. Les bassins de production mesurant environ 25 m de long et 2,50 m de large avec une hauteur moyenne du milieu de culture de 15 cm, le volume à transvaser est donc de 9 m³.

La contenance de ce nouveau bassin devra alors être supérieure à ce volume pour contenir l'ensemble de la culture pendant le temps du nettoyage de chacun des bassins de production.

Cependant, la place sur le site est limitée. Un bassin de 5 mètre de long, 1,5 mètre de large et 1,2 mètre de hauteur pourrait accueillir les 9 m³ tout en prenant une place raisonnable. Après l'élaboration d'un devis par une entreprise malgache de confiance, cette solution coûterait environ 1 100 € auquel il faudrait ajouter le prix d'une pompe.

Cela montre l'importance de la conception avant la réalisation des travaux pour anticiper tous les besoins et problèmes potentiels.

7.3. Isolation par les serres

Comme nous avons pu l'identifier auparavant, les deux principaux facteurs limitants actuels pour atteindre notre objectif de production de 4 g/m²/jour sont la luminosité et la température. Dans le cas actuel de notre installation, il nous est impossible de maîtriser ou d'influencer ces deux facteurs. Les bassins sont équipés d'un toit individuel en polyesters anti-UV rigide blanc qui ne laisse pas passer assez de lumière à cause de son opacité. De plus, il n'est pas assez étanche pour conserver la chaleur et créer un effet de serre.

Nous étudions actuellement la possibilité de mettre des serres recouvrant deux bassins à la fois. Les serres seraient recouvertes de bâches plastiques transparentes qui laisseraient passer la lumière. Des tissus plus opaques pourraient également être ajoutés afin d'ombrager certains endroits et éviter la photolyse de la spiruline en cas de trop forte luminosité. De cette manière, nous pourrions maîtriser l'éclairement pour que la productivité soit maximale et que ce paramètre ne soit plus limitant.

Un autre intérêt des serres est la possibilité de faire monter la température la journée et que celle-ci ne chute pas trop la nuit, surtout en hiver. Si les serres sont équipées de fenêtres, il sera possible d'aérer pour ne pas monter trop haut en température tout en renouvelant l'air pour apporter du CO₂ à la culture. Ainsi, l'installation de serres à la place des toits en plastiques rigides réglerait le problème des températures trop basses en hiver.

Enfin, le fait d'englober deux bassins à la fois sous une serre permettrait une meilleure accessibilité aux bassins et faciliterait grandement la récolte et le nettoyage. Cela donnerait la possibilité de récolter chaque bassin par plusieurs récoltants et de récupérer une plus grande quantité de spiruline en période propice. Les serres ont aussi l'avantage de diminuer la pénibilité du travail en améliorant l'ergonomie puisqu'actuellement il est nécessaire d'être courbé sous les toits des bassins pour effectuer le nettoyage.



Figure 24 : Photo des toits actuels



Figure 25 : Photo de la serre en place à la ferme d'Ibity

J'ai eu l'occasion de visiter plusieurs fermes de spiruline possédant des serres pour les comparer entre elles et sélectionner le modèle qui s'adapterait le mieux à notre site. Nous nous sommes basés sur les serres d'Ibity, gérées par « Antenna Technologies », car elles sont faciles à mettre en place, robustes et efficaces. L'objectif est donc de changer nos toits blancs (cf. figure 24) par des serres (cf. figure 25). Cependant les serres d'Ibity mesurent plus de 3 m de hauteur. Dans le but de rendre nos serres plus performantes, nous limiterons leur hauteur à 2 m. Cela permettra de conserver un maximum de chaleur et limiter la prise au vent.

Un devis par un entrepreneur malgache est en cours de mise au point. Les 14 bassins seront recouverts petit à petit par des serres car le coût d'investissement est trop important pour installer les 7 serres nécessaires en même temps.

Un entretien annuel des serres avec le remplacement probable des bâches sera nécessaire. Cet investissement devrait rapidement être rentabilisé par la hausse de la production de spiruline espérée. Si comme prévu, il permet d'atteindre l'objectif de productivité fixé à 4g/m²/jour, cela représentera une hausse de production annuelle d'environ 200 kg pour les 14 bassins. Au prix de 100 €/kg sur le marché français, cela correspond potentiellement à un apport financier de 20 000 €.

7.4. Four à vide

Grâce au don de matériels par deux français qui cessent leur activité de production de spiruline par photo-bioréacteur à Madagascar, nous avons à notre disposition, depuis la fin du mois d'août, un four à vide.

Le vide correspond à toute pression inférieure à la pression atmosphérique. Les effets du vide permettent de traiter des composants avec peu ou sans oxydation de la surface. Cela présente un intérêt pour conserver les pigments (caroténoïde, phycocyanine, chlorophylle) présents dans la spiruline et très fortement oxydables.

Le séchage par « séchage sous vide » permet aussi d'abaisser considérablement les températures d'évaporation des liquides et de traiter la spiruline à basse température (inférieure à 50°C). Cela permet à la fois de réduire l'énergie à apporter, et de réaliser l'action de séchage à des températures qui sont compatibles avec les composants thermosensibles de la spiruline tels que les vitamines.

Cette expérience sera réalisée par l'équipe de Fanantenana afin de comparer les qualités organoleptique et nutritionnelle de la spiruline séchée habituellement dans un séchoir à charbon et celle séchée dans le four à vide.

Discussion générale et perspectives

L'année 2017 semblait avoir bien commencé avec une productivité correcte qui laissait à penser que l'on approcherait l'objectif annuel de 1,2 tonne. Cependant, le froid qui accompagne les mois de juin, juillet et août a augmenté progressivement la durée de croissance de la spiruline. La volonté de l'équipe de vouloir produire plus s'est traduite par la poursuite de la récolte quotidienne, ce qui a entraîné l'appauvrissement des bassins en spiruline. Le temps de doublement de la spiruline étant de 38 h à 72 h en fonction des conditions auxquelles elle est soumise, il est important de conserver tout au long de l'année une concentration élevée dans les bassins.

La conséquence de cette récolte trop poussée a été une diminution de la concentration en spiruline ce qui ne permet pas d'avoir des récoltes quotidiennes importantes. La baisse de la concentration de spiruline dans les bassins a également laissé de la place pour d'autres algues ou micro-organismes non désirés qui diminuent les rendements en spiruline et peuvent s'avérer dangereux pour la santé s'ils sont toxiques.

Finalement, la récolte a donc dû être arrêtée mi-août afin de laisser le temps à la spiruline de se multiplier et de se concentrer. Certains bassins trop touchés par des micro-organismes étrangers ont dû être vidés, nettoyés, stérilisés et réensemencés. Tout est mis en œuvre pour que la productivité retrouve son niveau habituel au mois de septembre dans des conditions de températures plus favorables.

Bien que cet incident soit déplorable, l'essentiel est que l'équipe apprenne de ses erreurs. De ce fait, il est bien plus important d'avoir une vision sur le long terme avec un objectif annuel qu'un objectif quotidien qui pousse à faire des choix ayant d'éventuelles conséquences négatives par la suite.

Quel futur pour la spiruline ? Est-ce possible d'atteindre l'équilibre budgétaire ?

Par la suite, il me semble aussi important de connaître le coût de revient de la spiruline et donc le coût de tous les consommables utilisés. J'ai pris comme mois de référence le mois de mai car la production n'est pas à son maximum mais reste convenable. C'est donc un mois représentatif de la moyenne sur l'année. Les coûts ci-dessous sont les coûts fixes. Il faut prévoir une marge de manœuvre confortable en cas de problème majeur comme une catastrophe naturelle qui peut casser les toits et des vols de matériels comme c'est fréquemment le cas à Madagascar.

Tableau 7 : Evaluation du coût annuel des charges fixes.

DEPENSES	NPK	BICARBONATE	UREE	SEL	CHARBON DE BOIS	CHARGE SALARIALE ET DEPENSES DIVERSE
Prix	0,50€/kg	0,41€/kg	0,45€/kg	0,07€/kg	3,40€/sac	
Quantité consommée au mois de mai (kg)	32	235	17	213	10	
Coût mensuel	16€	96€	8€	15	34€	570€
Coût annuel	192€	1152€	96€	180€	408€	6 840€
Coût total annuel	8 870€					

Le coût des charges fixes s'élève donc à environ 8 870 €. Pour conserver une marge de manœuvre, il est préférable de compter 10 000 € par an s'il n'y a pas de travaux majeurs à réaliser mais uniquement de la maintenance préventive.

Dans l'hypothèse où la ferme arrive à produire 400 kg de spiruline excédentaire en atteignant l'objectif de 1,2 tonne par an, deux possibilités s'offrent à nous :

- Soit la totalité est vendue à Madagascar au prix de 30 €/kg, ce qui rapporterait environ 12 000 €.
- Soit une partie de la production excédentaire est commercialisée en France au prix de 100 €/kg.

L'hypothèse « a » est peu probable, la demande intérieure étant limitée par le faible pouvoir d'achat de la population (le revenu minimum malgache est d'environ 43 €/mois).

Dans l'hypothèse « b », si 50 % de la production excédentaire était vendue en France, cela permettrait de dégager 26 000 € par an (200 x 100 € + 200 x 30 €) et donc de couvrir tous les frais potentiels.

L'objectif de production de 1,2 tonne n'est pas encore atteint mais une production d'une tonne est tout à fait réalisable pour la fin de l'année 2017. On peut donc estimer que l'autosuffisance financière sera assurée lorsque la ferme produira une tonne de spiruline sèche par an. L'ANNEXE 7 tirée du manuel de Jean-Paul JOURDAN montre également que plus une ferme de spiruline est grande en superficie et plus elle est rentable. On constate aussi qu'une ferme ayant la superficie de notre site (840 m²) devrait posséder 13 employés à plein temps pour fonctionner de manière optimale, alors qu'elle n'en compte que 11 à l'heure actuelle.

Comme nous avons pu le voir dans le paragraphe « 7. Matériel et Milieu », beaucoup de modifications et de changements sont en cours afin de maîtriser les paramètres clefs de la production de la spiruline et de se donner les moyens d'atteindre les objectifs demandés.

Lorsque la production sera plus importante, des problèmes que nous avons pu observer dans d'autres fermes de spiruline vont apparaître. La spiruline étant un produit de « luxe », il est parfois difficile de l'écouler sur le marché malgache. Par ailleurs, les quantités produites sont souvent trop faibles pour trouver des partenaires durables en France qui achètent de manière régulière.

C'est pourquoi je recommande de faire dans le futur un regroupement avec les autres spiruliniers d'Antsirabe qui ont une vocation humanitaire, notamment « Antenna Technologies ». Les raisons et objectifs seront multiples. :

- L'achat d'intrants en plus grande quantité pour plusieurs fermes de spiruline permettrait de diminuer le coût de ces charges fixes. Le même principe s'applique au coût des différents packagings de conditionnement.
- La création d'un cahier des charges commun afin d'avoir une qualité nutritionnelle et sanitaire comparable entre tous les sites. Cela permettrait un rapprochement entre les différents acteurs de la ville et de partager les bonnes pratiques de production pour que cela profite à tout le monde.
- La vente en commun afin de diminuer la concurrence sur le marché local d'Antsirabe et de pouvoir proposer de la spiruline toute l'année aux différents points de vente (GMS, pharmacies, salles de sport).
Actuellement, la spiruline est conditionnée dans des sacs plastiques bleus thermosoudables. « Antenna Technologies » conditionne déjà dans des sachets aluminium refermables afin de protéger la spiruline de la lumière, de l'humidité, de la chaleur et de l'oxydation. Une vente en commun permettrait aussi d'apporter une vraie plus-value au produit fini afin de le commercialiser sur le marché local.
- La mise en commun des productions afin d'homogénéiser la qualité de la spiruline vendue sur le marché.
- La vente en commun afin de toucher d'autres marchés locaux (comme par exemple la capitale qui se trouve seulement à 3 h de route d'Antsirabe) mais aussi pour développer des partenariats commerciaux en France et écouler la production excédentaire.

Quelles critiques face à la spiruline ?

La culture de la spiruline a aussi ses limites et il est important de les souligner. Comme on vient de le voir, le coût annuel de production est important puisqu'il avoisine 10 000 € pour 14 bassins. Bien que la spiruline ait un intérêt tout particulier dans les pays les plus pauvres, ce montant est un frein à son développement. Il est impensable pour un malgache qui possède un salaire de 43 €/mois de produire de la spiruline. L'achat de spiruline reste lui aussi un acte très exceptionnel. Le développement et la

distribution de la spiruline dans les pays pauvres, pour les populations atteintes de malnutrition, sont donc totalement dépendants des politiques et des aides internationales.

Il est aussi regrettable de devoir exporter une partie de la production dans les pays occidentalisés pour faire vivre le site. Si les voyages des différents acteurs et partenaires commerciaux sont utilisés à bon escient pour le transport de la spiruline, cela ne pose pas de problème. Cependant, certains acteurs à but uniquement lucratif pourraient profiter du faible coût de la vie et de la main-d'œuvre africaine pour produire dans les pays pauvres et exporter l'ensemble de la production. Voici un passage de l'article de MOREAU B. (assistant ingénieur biologie, Le Mans Université) et TREMBLIN G. (Professeur de biologie végétale émérite, Le Mans Université) datant du 27 juillet 2017, qui résume bien la situation :

« Il est navrant de constater que tout le travail de mise au point des cultures, effectué dans les années 1970 par l'humanitaire et scientifique américain Ripley D. FOX et ses collègues, profite davantage aux producteurs occidentaux qu'aux populations mal nourries auxquelles il était initialement destiné. Heureusement, quelques ONG comme Antenna Technologies, Technap, Targuinca, Uni Vers la Vie - Spirumanne, Les carrefours de la spiruline, etc., ont pris le relais. »

Comment valoriser la spiruline ?

Il existe énormément de déclinaisons de produits à base de spiruline, cependant notre objectif est double. Apporter plus de valeur ajoutée à notre produit fini et proposer un produit encore plus complet que la seule spiruline. Pour cela, l'association « Esperanza Joie des Enfants » a opté pour un mélange Moringa Oleifera/Spiruline.



Figure 26 : Feuilles de Moringa Oleifera

Si on compare les feuilles de moringa avec d'autres aliments, on constate qu'elles ont un réel potentiel nutritionnel : en équivalent de poids, les feuilles fraîches contiennent plus de protéines et de calcium que le lait de vache frais, plus de vitamines C que les oranges, autant de potassium que la banane, autant de magnésium que le chocolat, presque autant de fer que les lentilles, et de vitamines A que les carottes. En revanche, elles contiennent moins de protéines que la viande, et moins de phosphores que le poisson. Ces comparaisons sont très vagues mais permettent d'imager la richesse des feuilles de moringa.

Il va sans dire que cette plante riche en micronutriments est idéale pour lutter contre la malnutrition mais ne couvre cependant pas à elle seule tous les besoins nutritionnels. Cependant le moringa est un aliment qui est très complémentaire de la spiruline. La richesse des feuilles notamment en

protéines, en calcium et en fer a conduit à introduire les produits du Moringa Oleifera dans des programmes de lutte contre la malnutrition.

Nous allons à présent comparer la composition nutritionnelle de la spiruline et du moringa. Des analyses de la spiruline produite sur le site ont été réalisées par Nirina (étudiant en master 1 à l'université d'Antsirabe). Le tableau nutritionnel suivant est donc complété avec toutes les valeurs dont nous disposons. Les valeurs manquantes sont complétées par des valeurs moyennes de la spiruline.

Tableau 8 : Comparaison des nutriments entre Moringa Oleifera et Spiruline (pour 100g)

Eléments	Spiruline Platensis (Madagascar)	Moringa Oleifera	Eléments	Spiruline Platensis (Madagascar)	Moringa Oleifera	Eléments	Spiruline Platensis (Madagascar)	Moringa Oleifera
Composition générale (g)			Isoleucine	5800		ac.palmitoléique	400	
Protéines digestibles	61,5	25	Méthionine	1400	370	ac.stéarique	176	70
Glucides	17	40	Phénylalanine	2800	1400	ac.oléique	216	60
Lipides	7	8	Thréonine	3200	1080	ac.linoléique	1096	170
Minéraux	8,5	12	Tryptophane	900	580	ac.gamma linoléique	1888	1140
Fibres	-	8	Valine	4000	1400	ac.di gamma linoléique	224	
Humidité	6	7	Ac.Aspartique	6100	1670	Vitamines		
Minéraux (mg)			Ac.Glutamique	9100	2470	Vit A (UI)	0	14300
Calcium	700	2100	Sérine	3200	840	Vit D (UI)	12000	
Phosphore	800	310	Glycine	3200	960	Vit C (mg)	0	850
Fer	100	27	Alanine	4700	1260	Vit E (mg)	12	
Magnésium	400	405	Proline	2700	1230	Bêta-Carotène (mg)	140	
Potassium	1400	1300	Tyrosine	3000	910	Vit B12 (mg)	3	
Acides aminés (mg)			Cystéine	600	360	Vit K (mg)	2	
Arginine	4300	1600	Acides gras essentiels (mg)			Vit B2 (mg)	3,5	88
Histidine	1000	530	ac.palmitique	2368	530	Vit B3 ou PP (mg)	15	10

(Tiré des analyses de spirulines réalisées sur la spiruline Fanantenana, Antsirabe par Nirina, ainsi que l'étude de Broin M. et les tables nutritionnelles de « Nutrition and you » sur le Moringa.)

L'étude de « Zheng Yi, Zhu Fan, Lin Dan, Wu Jun, Zhou Yichao, Mark Bohn - Optimization of formulation and processing of *Moringa Oleifera* and spirulina complex tablets » a permis la détermination d'un ratio optimal de 70 % de M.Oleifera pour 30 % de spiruline dans une nouvelle formulation. Cela permet de couvrir au mieux les AJR et d'optimiser la complémentarité entre le M.Oleifera et la spiruline. Il faut tout de même relier le fait que l'étude a été menée sur de la spiruline produite en Chine avec une composition nutritionnelle légèrement différente de celle produite à Madagascar.

L'association « Esperanza Joie des Enfants » va donc continuer ses recherches dans l'optique de distribuer par la suite un mélange de spiruline et de moringa aux centres scolaires. Outre l'apport nutritionnel tout aussi riche mais plus équilibré, cette nouvelle formulation a aussi un intérêt économique. Le moringa étant un arbre, il n'a pas besoin d'intrants quotidiens. Le coût de fabrication de la poudre de moringa est donc bien inférieur à celui de la poudre de spiruline. Un ratio de 7 de moringa pour 3 de spiruline serait donc beaucoup moins onéreux que de la spiruline pure.



Figure 27 : Photo d'une plantation de Moringa Oleifera

Notons que l'association soutient déjà en parallèle une action de valorisation de la spiruline au travers d'une nouvelle formulation. Quelques centaines de grammes ont été donnés à un partenaire malgache pour qu'il réalise des tests de spiruline mélangée à du moringa et de la banane. Le produit fini serait alors une pâte de fruit au goût banane extrêmement riche nutritionnellement grâce aux apports de la spiruline et du moringa. Cette formulation aurait aussi l'avantage d'un goût plus agréable pour la majorité des enfants et serait facile à manger, ce qui n'est pas toujours le cas avec la spiruline.

L'ONG « Esperanza Joie des Enfants » présidée par Philippe THIRION parraine de nombreux projets de solidarité à Madagascar. Elle participe à la création d'écoles et à l'électrification de celles-ci par des panneaux solaires. Elle travaille également sur la problématique de la malnutrition infantile au travers de la production de spiruline. Ses actions ne sont pas une fin

en soi ; elles ont pour but d'être gérées et pérennisées par les acteurs locaux. Bien que l'ONG n'ait pas de solution parfaite, elle tente de combiner au mieux les volets environnementaux et sociaux pour venir en aide aux populations dans le besoin.

Conclusion

L'utilisation de la méthode des 5M à travers le diagramme d'Ishikawa a permis de mettre en évidence plusieurs facteurs qui ont un impact direct sur la quantité et la qualité de la spiruline produite.

La **Matière** est la base de la production. En possession de toute la nourriture nécessaire, la spiruline se développera normalement et délivrera tout son potentiel nutritionnel. Dans le cas contraire, la quantité et la qualité de la spiruline en seront diminuées.

Le **Milieu** est très largement responsable de la faible productivité ici puisqu'il influe directement sur les conditions de culture fondamentales que sont la température et l'éclairage des bassins. La localisation d'un site de production de spiruline est donc primordiale et impacte grandement la productivité finale.

L'aspect **Matériel** est incontournable lorsque le Milieu n'est pas optimal toute l'année. Il permet de maîtriser des paramètres tels que la température et l'éclairage simplement à l'aide de serres. Sans cela, la productivité maximale dépend uniquement de la météo sans aucun moyen d'action pour l'équipe en place. Au travers des différentes étapes du processus de fabrication comme le pressage ou le séchage, le Matériel agit directement sur la qualité organoleptique et nutritionnelle du produit fini.

La **Main-d'œuvre** et les **Méthodes** sont quant à eux les piliers de la production. Même en possession de tous les outils nécessaires à une bonne production de spiruline, si l'équipe en place n'applique pas les recommandations et n'entretient pas le matériel à sa disposition, la production ne pourra pas se pérenniser dans le temps. Un management participatif entraînera l'implication de l'équipe dans le travail quotidien ainsi que plus de rigueur dans le nettoyage et le suivi des paramètres de production. Il est primordial que les responsables aient une démarche scientifique dans la résolution des problèmes de production et que les prises d'initiatives soient valorisées afin d'aller vers une optique d'amélioration continue de la production.

Il est important de laisser à chacun l'opportunité de s'exprimer et d'apporter son savoir dans son domaine de compétence. Un bon management saura faire ressortir le meilleur de chacun afin d'avancer tous ensemble dans le même sens.

L'identification des causes de la faible productivité est encourageante puisque l'association « Esperanza Joie des Enfants » a su prendre les mesures correctives nécessaires pour pallier ces difficultés. Les travaux d'optimisation en cours donneront à l'équipe la possibilité d'atteindre les objectifs de productivité fixés. Les différentes expériences permettront de déterminer l'impact du séchage sur la qualité nutritionnelle finale de la spiruline. L'utilisation de différentes sous-espèces de spiruline pourrait aussi rendre les cultures plus résistantes puisqu'elles présentent des sensibilités différentes aux paramètres physico-chimiques auxquels elles sont soumises.

Références bibliographiques

Ayehunie S., Belay A., Hu Y., Baba T., Ruprecht R. (1996). Inhibition of HIV-1 replication by an aqueous extract of *Spirulina* (*arthrospira platensis*).

Broin M. Composition nutritionnelle des feuilles de *Moringa Oleifera*, [En ligne]. <http://www.moringanews.org> (Page consulté le 19 mai 2017).

Charlemagne D., (2008). La spiruline : aliment santé ? Mémoire DIU Alimentation Santé et Micronutrition de la faculté de pharmacie de Dijon.

Dansou Delali Kokou, (2002). Développement de la culture de la spiruline (*spirulina platensis*) et valorisation de celle-ci au Burkina Faso, Mémoire université de Ouagadougou unité de formation et de recherche en sciences de la vie et de la terre.

Dillon JC.,Phan PA., (1993). *Spirulina* as a source of proteins in human nutrition, Bull. Inst. Oceano, Monaco, n°special 12, pp.103-107.

Elyah A., (2003). Quel avenir pour la spiruline ? Mémoire bibliographique. Montpellier : Université de Montpellier.

FAO. (2004). Le riz, c'est la vie. Année internationale du riz. [En ligne]. <http://www.fao.org/rice2004/fr/p9.htm> (Page consulté le 19 mai 2017).

Fox R.D., (1999). La spiruline : technique, pratique et promesse. Traduction de Hubert Latham. Editions Edisud. 2^{ème} édition.

Hervieu S., (2013). A Madagascar le fléau de la malnutrition chronique, Le Monde, 26.11.2013. [En ligne]. http://www.lemonde.fr/planete/article/2013/11/26/a-madagascar-le-fleau-de-la-malnutrition-chronique_3520327_3244.html (Page consulté le 19 mai 2017).

Iltis A., (1974). Le phytoplancton des eaux natronées du Kanem (Tchad). Influence de la teneur en sels dissous sur le peuplement algal. Thèse, Université de Paris VI. ORSTOM, Paris.

Institut océanographique Paul Ricard. (2004) Colloque international sur les cyanobactéries pour la santé, la science et le développement, pp.32.

Jourdan J.P., (2016). Manuel de Culture Artisanale de Spiruline. pp.84-87, 90, 146.

Lecointre C., (2012). La compensation carbone, un levier pour la lutte contre le changement climatique. Mémoire, Nancy : ENSAIA.

Moreau B., Tremblin G., (25/07/2017). La spiruline sera-t-elle l'aliment miracle du XXI^e siècle ? [En ligne]. <http://www.latribune.fr/opinions/tribunes/la-spiruline-sera-t-elle-l-aliment-miracle-du-xxi-siecle-745031.html> (Page consulté le 25 août 2017).

Nutrition and you. [En ligne]. <http://www.nutrition-and-you.com> (Page consulté le 15 mai 2017).

OMS (Septembre 2016). Enfants : réduire la mortalité. [En ligne]. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs178/fr/> (Page consulté le 8 août 2017).

Planetoscope, Nombre de décès dus à la malnutrition dans le monde. [En ligne]. <http://www.planetoscope.com/mortalite/32-nombre-de-deces-dus-a-la-malnutrition-dans-le-monde.html> (Page consulté le 8 août 2017).

Planetoscope, Production mondiale de spiruline. [En ligne]. www.planetoscope.com/Autre/1027-production-mondiale-de-spiruline.html (Page consulté le 7 août 2017).

Richmond A., (1986). Outdoor mass cultures of microalgae. In: Richmond, A. (Ed.), Handbook of Algal Mass Culture. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 285–330.

UNICEF, (2014). Madagascar/2014. [En ligne]. <http://www.unicef.org/madagascar/fr/nutrition.html>, (Page consulté le 13 juin 2017).

UNICEF, Nutrition, [En ligne]. <http://www.unicef.fr/dossier/nutrition> (Page consulté le 7 août 2017).

Vidalo J.L., (2016). Spiruline l'algue bleue de santé et de prévention, pp.78-89

Yi Z., Fan Z., Dan L., Jun W., Yichao Z., Bohn M., (2017). Optimization of formulation and processing of *Moringa Oleifera* and spirulina complex tablets - Saudi Journal of Biological Sciences. pp.24, 122-126.

Zarrouk, C., (1966). Contribution à l'étude d'une cyanobactérie : influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de *Spirulina maxima* (Setchell et Gardner) Geitler. PhD thesis, University of Paris, France.

Table des tableaux

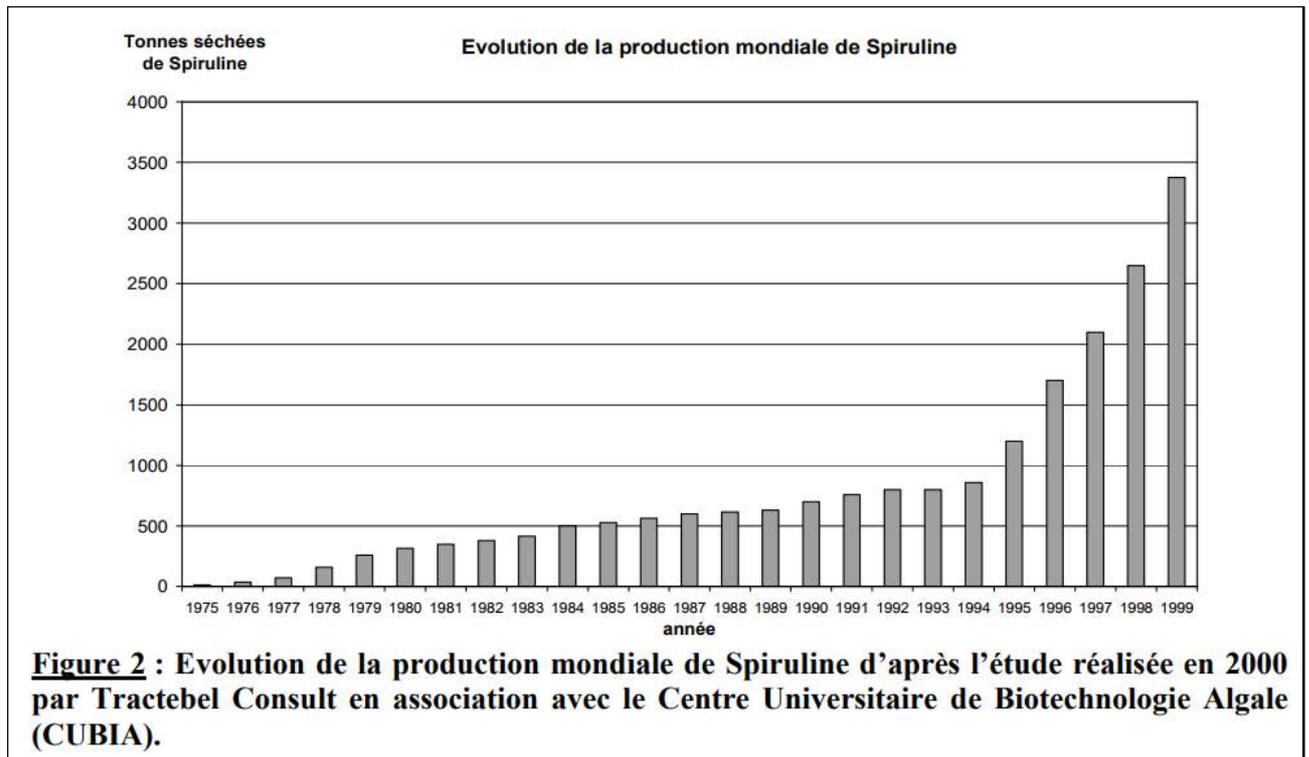
TABLEAU 1 : DOSE JOURNALIERE DE SPIRULINE QUE NOUS RECOMMANDONS ET RATIONS JOURNALIERES RECOMMANDEES (RDA) PAR LES USA DES PRINCIPAUX NUTRIMENTS.....	6
TABLEAU 2 : EAU NECESSAIRE POUR PRODUIRE UN KILOGRAMME DE PROTEINE.....	9
TABLEAU 3 : EMPLOI DU TEMPS TYPIQUE D'UNE JOURNEE A LA FERME.....	13
TABLEAU 4 : APPORTS PAR KILOGRAMME DE SPIRULINE PRELEVE (R.D. FOX, P153,1999)	16
TABLEAU 5 : INTRANTS UTILISES A LA FERME ET LEUR ROLE.....	17
TABLEAU 6 : TABLEAU DE SYNTHESE DE LA TEMPERATURE, PH ET PRODUCTIVITE REALISE SUR LES MOYENNES MENSUELLES.....	24
TABLEAU 7 : EVALUATION DU COUT ANNUEL DES CHARGES FIXES.	37
TABLEAU 8 : COMPARAISON DES NUTRIMENTS ENTRE MORINGA OLEIFERA ET SPIRULINE (POUR 100G)	40

Table des figures

FIGURE 1: SECTEUR DE LA COMPOSITION NUTRITIONNELLE DE LA SPIRULINE	5
FIGURE 2 : QUANTITE D'EAU NECESSAIRE A LA PRODUCTION D'UN KILOGRAMME DE PROTEINE.....	9
FIGURE 3 : RENDEMENT EN KILOGRAMME DE PROTEINE A L'HECTARE	9
FIGURE 4 : SCHEMA DE DEUX BASSINS DE SPIRULINE.....	12
FIGURE 5 : PHOTO D'UN BASSIN CIRCULAIRE.....	13
FIGURE 6 : PROCESSUS DE FABRICATION DE LA SPIRULINE A FANANTENANA	14
FIGURE 7 : COURBE COMPARATIVE DES PRODUCTIONS CUMULEES DE SPIRULINE SECHE DES ANNEES 2016 ET 2017 DE JANVIER A JUILLET PAR RAPPORT A L'OBJECTIF ANNUEL.....	15
FIGURE 8 : DIAGRAMME DES CAUSES : ISHIKAWA.....	15
FIGURE 9 : SPIRULINE FORTEMENT CONTAMINE PAR DU PHORMIDIUM.....	19
FIGURE 10: SPIRULINE FAIBLEMENT CONTAMINE PAR DU PHORMIDIUM.....	19
FIGURE 11 : SPIRULINE SAINE.....	19
FIGURE 12 : PHOTO D'UN ROTIFERE PRISE AU MICROSCOPE SUR LE SITE DE FANANTENANA.....	19
FIGURE 13 : DIAGRAMME DES FLUX POUR LA CULTURE ET LE TRAITEMENT DE LA SPIRULINE	21
FIGURE 14 : VITESSE PHOTOSYNTHESE DE LA SPIRULINE EN FONCTION DE L'ECLAIREMENT D'APRES LA THESE DE ZARROUK.....	22
FIGURE 15 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE ET DU PH MOYEN SUR UNE SUPERFICIE DE 840M ² DE BASSIN DE SPIRULINE DURANT LA PERIODE D'ETUDE (DU 6 AVRIL 2017 AU 17 JUILLET 2017)	23
FIGURE 16 : VITESSE DE PHOTOSYNTHESE DE LA SPIRULINE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE LA CULTURE D'APRES LA THESE DE ZARROUK.....	24
FIGURE 17 : EVOLUTION DE LA PRODUCTIVITE DES BASSINS DE SPIRULINE AU COURS DE L'ETUDE REALISEE.....	25
FIGURE 18 : VITESSE DE PHOTOSYNTHESE DE LA SPIRULINE EN FONCTION DU PH D'APRES LA THESE DE ZARROUK.....	26
FIGURE 19 : SUIVI DE LA PRODUCTIVITE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DES BASSINS	26
FIGURE 20 : SUIVI DE LA PRODUCTIVITE EN FONCTION DU PH DES BASSINS.....	26
FIGURE 21 : VITESSE DE PHOTOSYNTHESE DE LA SPIRULINE EN FONCTION DE LA SALINITE DU MILIEU D'APRES LA THESE DE ZARROUK..	27
FIGURE 22 : VITESSE DE PHOTOSYNTHESE EN FONCTION DE L'AGITATION	27
FIGURE 23 : PLAN D'UN BASSIN DE SPIRULINE PROPOSE PAR LE PROJET NIGERIEEN AGHAROUS (SALES ET ANCEL, 2002)	32
FIGURE 24 : PHOTO DES TOITS ACTUELS	34
FIGURE 25 : PHOTO DE LA SERRE EN PLACE A LA FERME D'IBITY.....	34
FIGURE 26 : FEUILLES DE MORINGA OLEIFERA	39
FIGURE 27 : PHOTO D'UNE PLANTATION DE MORINGA OLEIFERA.....	41

Table des annexes

ANNEXE 1 : EVOLUTION DE LA PRODUCTION MONDIALE DE SPIRULINE ENTRE 1975 ET 1999.....	I
ANNEXE 2 : ANALYSE DE LA SPIRULINE PAR UN LABORATOIRE INDEPENDANT.....	II
ANNEXE 3 : CERTIFICAT DE CONSOMMABILITE DELIVRE PAR LE MINISTERE DE LA SANTE PUBLIQUE DE MADAGASCAR.....	III
ANNEXE 4 : PLAN ELECTRIQUE DU SITE DE FANANTENANA.....	IV
ANNEXE 5 : DEVIS DE RENOVATION DU RESEAU ELECTRIQUE AVEC REMPLACEMENT D'UN MOTEUR ET D'UNE POMPE IMMERGEE.	V
ANNEXE 6 : DEVIS DE CONSTRUCTION D'UN BASSIN DE RETENTION AVEC POMPE.....	VI
ANNEXE 7 : PRIX DE REVIENT D'UNE FERME DE SPIRULINE EN FONCTION DE SA SUPERFICIE ET DU NOMBRE D'EMPLOYES CORRESPONDANT.....	VII



Annexe 2 : Analyse de la spiruline par un laboratoire indépendant

MINISTÈRE
DE LA SANTÉ PUBLIQUE

SECRETARIAT GÉNÉRAL

AGENCE DE CONTRÔLE DE LA SÉCURITÉ
SANITAIRE ET DE LA QUALITÉ DES DENRÉES
ALIMENTAIRES

REPOBLIKAN'I MADAGASIKARA
Fitiavana - Tanindrazana-Fandrosoana

Secur RAZAFINIRINA Jeannie SITE
FANANTENANA « SPIRFAN »

BULLETIN D'ANALYSE N°5022/17

DENOMINATION ET IDENTIFICATION DE L'ECHANTILLON

Echantillon de **Spiruline**, Lot N° : TRIM II/2017/FAN-ESP, nous adressé par Secur RAZAFINIRINA Jeannie, SITE FANANTENANA « SPIRFAN », Date de production : Mai 2017, Date de péremption : Mai 2019, sous N°5022/17 du 14/06/17.

DESCRIPTION ET CARACTERES ORGANOLEPTIQUES

Aspect	Solide
Texture	Poudre
Couleur	Verte
Saveur	Caractéristique
Odeur	Caractéristique
Emballage	Conforme
Denomination	Spiruline SPIRFAN
Date de fabrication	05/2017
Date limite de consommation	05/2019
Lot	TRIM II/2017/FAN-ESP
Origine	Madagascar
Quantité	100g
Scellage	DRCC VAKINANKARATRA

CARACTERES PHYSICO-CHIMIQUES

Humidité %	9,5
Acidité % en H ₂ SO ₄	0,12
Matières protéiques %	63,53
Matières grasses %	1,9
Matières hydrocarbonées %	19,1

CARACTERES MICROBIOLOGIQUES

	Résultats	Critères
N.A.M. à 30°C	< 1	3.10 ⁵ UFC/g
Coliformes totaux	< 1	1.0.10 ² UFC/g
Staphylocoque coagulase +	< 1	< 1 UFC/g
<i>Escherichia coli</i>	< 1	10 UFC/g
<i>Bacillus cereus</i>	< 1	1.0.10 ³ UFC/g
Levures	< 1	1.0.10 ³ UFC/g
ASR à 46°C	< 1	1.0.10 ² UFC/g
<i>Salmonella sp</i>	Absence	Absence dans 25g

INTERPRETATION ET CONCLUSION

Echantillon de produit satisfaisant par ses caractères déterminés.
Echantillon de produit propre et sain pour la mise à la consommation humaine.

Communiqué le : 21 JUIN 2017



Annexe 3 : Certificat de consommabilité délivré par le ministère de la santé publique de Madagascar.



MINISTRE DE LA SANTE PUBLIQUE

SECRETARIAT GENERAL

AGENCE DE CONTROLE DE LA SECURITE
SANITAIRE ET DE LA QUALITE DES DENREES
ALIMENTAIRES

N° 0038-17/MSANP/SG/ACSQDA/CC

CERTIFICAT DE CONSOMMABILITE

Je, soussigné le Directeur de l'Agence de Contrôle de la Sécurité Sanitaire et de la Qualité des Denrées Alimentaires (ACSQDA), certifie que :

Echantillon : **SPIRULINE** Quantité : **59,382kgs**
Lot* : **TRIM II/2017/FAN-ESP** Date de production : **Mai 2017**
Date de péremption : **Mai 2019**
Acte de prélèvement : **N°30/2017-MCC/SG/DRCC-VAK du 13/06/2017**
Société / Etablissement: **Sœur RAZAFINIRINA Jeannie, Site FANANTENANA « SPIRFAN »**
Intervention : **Analyse Physico-chimique et Microbiologique**
Référence ACSQDA: **N° 5022/17 du 14/06/2017**
est déclaré **propre et sain** à la consommation humaine.

En foi de quoi, le présent certificat est délivré pour servir et valoir ce que de droit.

Fait à Antananarivo, le **21 JUIN 2017**

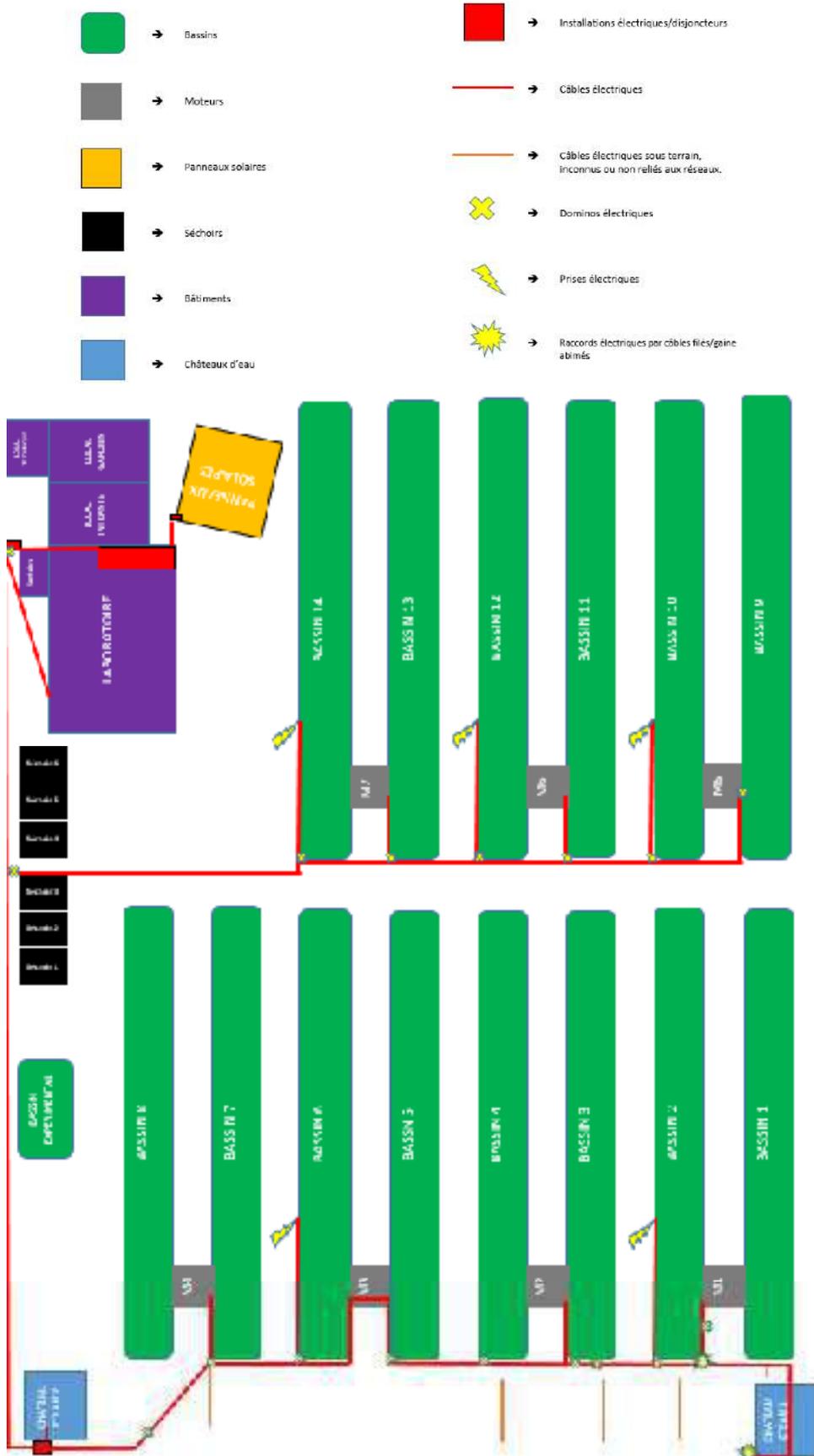
Le Directeur,



RAKOTOVAO RAVAHATRA Joely Nirina

* Ce certificat n'est valable que pour le LOT ayant fait l'objet d'analyse mentionnée ci-dessus.

Annexe 4 : Plan électrique du site de Fanantenana



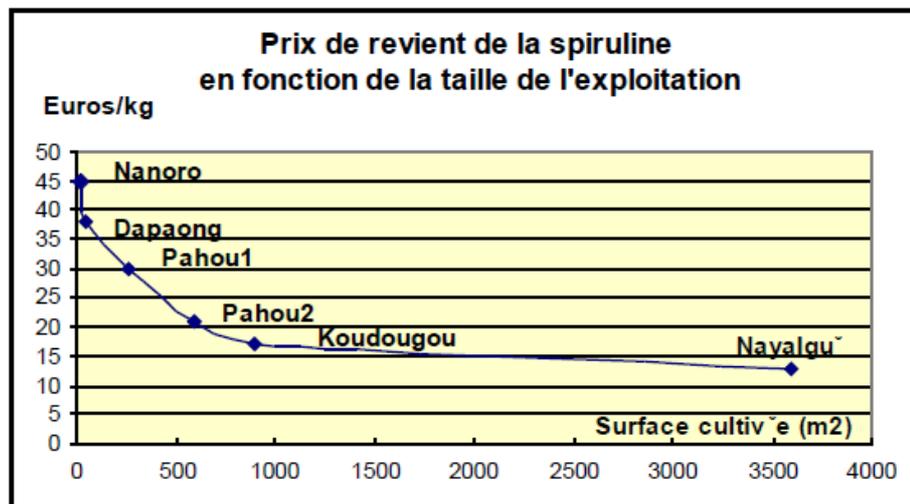
Annexe 5 : Devis de rénovation du réseau électrique avec remplacement d'un moteur et d'une pompe immergée.

DESIGNATION DES MATERIAUX	Utés	Qtés	PU	Montant en Ar
Chevilles de 08 +vis	Btes	2	9 500	19 000
Colliers atlas	Utés	200	820	164 000
Dominos (16)2	Bttes	7	7 500	52 500
Dominos (25)2	Bttes	2	11 200	22 400
Boîtes de dérivation étanches	Utés	10	8 300	83 000
Tubes orange dim21	MI	200	3 300	660 000
Coffret 6 modules	Utés	1	25 000	25 000
Disjoncteurs C20	Utés	4	80 000	320 000
Câbles isolés V/J(1*1,5) pour les deux pompes	MI	85	700	59 500
Câbles isolés V/J(16) ² pour la mise à la terre des moteurs	MI	9	6 100	54 900
Câbles pour alimentations des moteurs	MI	194	8 300	1 610 200
Remplacement moteur électrique				
Moteur électrique Asynchrone 0,37Kw 4 P 230/400V 50/60HZ	Utés	1	1 200 000	1 200 000
Pompe Immergée				
Pompe immergée y compris câblage et accessoire de pose.	Utés	1	1 300 000	1 300 000
Main d'œuvre	Fft	1		900 000
Total				6 470 500
Arrêté le présent devis pour la somme de six millions quatre cent soixante-dix mille cinq cent ariary (6 470 500 Ar) Durée des travaux cinq jours				

Annexe 6 : Devis de construction d'un bassin de rétention avec pompe

CONSTRUCTION D'UN BASSIN DANS UN CENTRE DE SPIRULINE SISE A VOHIJANAHARY				
CHEZ LES SŒURS FILLES DU CŒUR DE MARIE ANTSIRABE				
Volume d'eau dans le bassin : 9m3(5*2*0,90)				
DESIGNATION DES MATERIAUX	Utés	Quantités	Prix	Montant en Ar
Installation de chantier et amener de personnel	Fft			250 000
TERRASSEMENT				
Démolition	Fft	-	-	85 000
Fouille en rigole :				
Fouille pour fondation et excavation de terre y compris arrosage, réglage et compactage.	m3	10	12 300	123 000
TOTAL TERRASSEMENT				208 000
BETON ET OUVRAGE EN INFRASTRUCTURE				
Pose couche anti contaminant.	m3	0,5	7 500	3 750
HERISSONNAGE	m3	0,5	45 000	22 500
Pose de pierres sèches sur la surface horizontale intérieure.				
Béton armé dosé 400kg/m3 de CPA: béton armé coulé entre le coffrage e=0,15 et le fond e= 0,20 y compris chlorure d'hydrofuge.	m3	3,89	380 000	1 478 200
Acier pour armature : Armature en acier tor de tout diamètre y compris façonnage ligaturage en fil recuit.	kg	210	6 500	1 365 000
Coffrage : Fourniture, confection et mise en place de coffrage.	m2	25,2	15 000	378 000
TOTAL BETON ET OUVRAGE EN INFRASTRUCTURE				3 247 450
RAVALEMENT				
Enduit dosé à 350k/m3 de CPA : Paroi intérieure et extérieure	m2	25,2	13 600	342 720
TOTAL RAVALEMENT				342 720
RECAPITULATION GENERALE				MONTANT(ariary)
INSTALLATION DE CHANTIER				250 000
TERRASSEMENT				208 000
BETON ET OUVRAGES EN INFRASTRUCTURE				3 247 450
RAVALEMENT				342 720
TOTAL GENERAL				4 048 170
Arrêté le présent devis à la somme de : Quatre millions quarante-huit mille cent soixante-dix ariary (4 048 170 Ar)				

Annexe 7 : Prix de revient d'une ferme de spiruline en fonction de sa superficie et du nombre d'employés correspondant.



A titre d'exemple, le graphique suivant donne l'ordre de grandeur des prix de revient sur différentes exploitations africaines.

Type	Surface exploitation (m²)	Productivité (g/j/m²)	Production annuelle (kg)	Personnel temps plein	kg/personne/an	Prix de revient (Euro au kg)
Nanoro, Davougon	20	3	22	1	22	45
Dapaong	50	4	73	2	37	38
Pahou1	260	5	475	5	95	30
Pahou2	600	5,5	1 205	9	134	21
Koudougou	900	5,5	1 807	13	139	17
Nayalgu	3600	6	7 884	40	197	13

Pour une ferme de 900 m² (840 m² à Fanantenana), il est nécessaire d'avoir 13 personnes à plein temps.

 <p><i>Esperanza</i> <i>Joie des Enfants</i></p>	Diplôme : Ingénieur Oniris Biotechnologies de la santé / Agroalimentaire Parcours personnalisé de l'orientation de 3 ^{ème} année : PEPS – « Process Eco-conception et Produits »
Auteur/e : Robin LECOINTRE	Structure d'accueil : Association « Esperanza Joie des Enfants »
Nombre de pages : 43 Annexes : 7	Adresse : 34 rue de Turenne, 75003 PARIS
Année de soutenance : 2017	Maître de stage : Philippe THIRION
Titre : Optimisation de la production de spiruline dans une ferme à Madagascar afin de lutter contre la malnutrition infantile. Title : Optimization of spirulina production in Madagascar to combat child malnutrition.	
Résumé : Etant donné le nombre d'enfants toujours en malnutrition dans le monde, la spiruline de par sa composition nutritionnelle exceptionnelle est désignée comme l'aliment miracle du XXI ^{ème} siècle qui pourrait résoudre ce fléau. Afin d'optimiser la production d'une ferme de spiruline à Madagascar, il est indispensable d'acquérir des nouvelles données et de comprendre l'ensemble des paramètres qui peuvent influencer sur la production. L'objectif de ce mémoire est d'identifier les paramètres limitants du site de production de spiruline présent à Madagascar et de trouver les solutions les plus adéquates à ces problèmes. Cela a permis de mettre en évidence une température trop basse et un éclairage très inférieur aux conditions optimales de production. Ces deux paramètres seront bientôt maîtrisés avec l'installation de serres sur les bassins à la place des toits rigides actuels. L'autre enjeu est d'appréhender certains freins au développement que présente la culture Malgache et d'apporter des connaissances et des capacités à l'équipe en place. Certaines méthodes d'implication de tous les acteurs, de responsabilisation et d'initiative au changement ont permis à l'ensemble de l'équipe de monter en compétences techniques.	
Abstract : Given the number of children still malnourished worldwide, spirulina with its exceptional nutritional composition is designated as the miracle food of the 21st century that could solve this scourge. In order to optimize the production of a spirulina farm in Madagascar, it is essential to acquire new data and to understand the set of parameters that can influence production. The objective of this thesis is to identify production issues and to find the most suitable solutions to these problems. This highlighted a low temperature and an illumination much lower than the optimum conditions of production. These two parameters will soon be mastered with the installation of greenhouses instead of the current rigid roofs. Another challenge is to understand certain obstacles due to Malagasy culture and to bring knowledge and skills to the team in place. Some methods such as involvement, responsibilities and initiative have allowed the whole team to climb into technical skills.	
Mots-clés : Spiruline, Nutrition, Paramètres de culture, Démarche qualité, Optimisation du site, Management d'équipe Key Words : Spirulina, Nutrition, Crop parameters, Quality approach, Site optimization, Team management	