

Hybrid Power

COMMENT RÉPONDRE, DE MANIÈRE ÉCONOMIQUEMENT VIABLE, AUX BESOINS EN ÉNERGIE
RENOUVELABLE GRÂCE À LA THERMOÉLECTRICITÉ EN VALORISANT L'ÉNERGIE SOLAIRE

PROMOTEURS

MÉMOIRE RÉALISÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU
GRADE DE MASTER 120 À FINALITÉ SPÉCIALISÉE EN

Prof. Pascal Jacques
Prof. Magali Bodart
LOCI

EPL

Ingénieur Civil - Construction - GCE2M
Jérémie Denis

Prof. Yves De Cordt

DRT

Droit - DROI2M
Julien Spedale - Scarlata

Prof. Régis Coeurderoy

LSM

Sciences de Gestion – GEST2M
Janet Bailey

Année académique 2013-2014



*Pour ce qui est de l'avenir, il ne s'agit pas de le
prévoir mais de le rendre possible.*

Antoine de Saint-Exupéry

Remerciements

La réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible sans la contribution de plusieurs personnes à qui nous voudrions témoigner toute notre reconnaissance.

Nous tenons, en priorité, à remercier Monsieur Pascal Jacques, professeur en Sciences des matériaux et promoteur de Jérémie Denis et Monsieur Geoffrey Roy, doctorant, sans qui ce projet n'aurait jamais vu le jour. Ces derniers nous ont permis de bénéficier de leurs savoir et expérience, tant dans le domaine technique du projet que dans le domaine de l'énergie. Nous leur souhaitons d'ores et déjà beaucoup de succès dans les futures recherches et développements des matériaux thermoélectriques.

Nos vifs remerciements vont également à Madame Magali Bodart et Messieurs Régis Coeurderoy, Yves De Cordt et Pascal Jacques, promoteurs en gestion, droit et ingénierie, pour leur disponibilité et conseils avisés.

Nous voudrions également témoigner notre gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce projet et à la concrétisation de ce mémoire. Ainsi, nous adressons un grand merci à Monsieur Frédéric Chomé, coach de 1, 2, 3 GO, pour ses enseignements en termes de marché et pour son aide précieuse quant au choix de l'application ainsi qu'à Frédéric Ooms, responsable de la cellule Propriété Intellectuelle de la Sopartec, pour son accompagnement dans le projet. Notre reconnaissance s'étend également aux membres du BECI et au jury de la Start Academy et du forum Mind&Market pour nous avoir permis de réajuster notre projet en fonction de leurs feedbacks judicieux.

Jérémie Denis tient personnellement à remercier toutes les personnes du pôle IMMC et IMAP qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration du projet. Sa reconnaissance s'adresse tout particulièrement à Messieurs Marc Sinnaeve, Jonathan Lorfevre et Geoffrey Roy, pour leur enthousiasme et aide précieuse. Il remercie également les Professeurs Ernest Matagne et Christian Eugène.

Julien Spedale-Scarlata tient à remercier tout particulièrement Yves De Cordt pour ses conseils avisés et Laurent Van den Hove, juriste à la Sopartec, pour la clarté et la pertinence des informations fournies sur certains aspects juridiques et notamment sur les questions de la propriété intellectuelle dans nos relations avec l'Université et la Sopartec.

Janet Bailey, souhaite remercier, quant à elle, Régis Coeurderoy pour ses précieux conseils en Stratégie, Monsieur Laraki de la société Blancatex pour son implication dans notre projet, mais également Jérémie Denis pour sa mise sur pied du prototype d'application et ses nombreuses explications théoriques sur le sujet du mémoire.

Nous tenons aussi à exprimer notre reconnaissance à nos professeurs Frank Janssen, Marine Falize, Roxane De Hoe, notre coordinatrice Valérie Eeckout et la promotion CPME15 pour leur encadrement et soutien dans la construction de notre projet.

Qu'il nous soit enfin autorisé d'avoir une pensée spéciale envers nos familles et nos amis, dont les encouragements et les petites attentions nous ont permis de garder confiance en nous et en notre projet Hybrid Power.

Table des matières

1.	Executive summary.....	1
2.	L'équipe de management et la genèse du projet.....	3
2.1.	Description de l'équipe.....	3
2.2.	Nos valeurs.....	4
3.	Opportunité.....	5
3.1.	Demande pour l'énergie verte.....	6
4.	Présentation du projet Hybrid Power.....	7
4.1.	Fonctionnement du produit.....	7
4.2.	Proposition de valeur.....	8
5.	Positionnement - Belgique.....	11
5.1.	Marché de l'électricité.....	11
5.2.	Marché de l'énergie thermique.....	13
5.3.	Cheminement de notre projet.....	14
5.4.	Conclusion.....	15
6.	Analyse du macroenvironnement.....	17
6.1.	Méthodologie.....	17
6.2.	Analyse par continents.....	18
6.2.1.	Asie.....	18
6.2.2.	Afrique.....	19
6.2.3.	Europe.....	20
6.2.4.	Amérique.....	21
6.3.	Résultats de la prospection.....	23
6.4.	Choix d'un continent africain.....	24
6.4.1.	Pourquoi l'énergie renouvelable en Afrique ?.....	25
6.4.2.	Les obstacles.....	26
6.4.3.	Un choix pertinent.....	27
6.5.	Analyse de différents pays africains.....	27
6.5.1.	Choix d'un pays : le Maroc.....	28
7.	Analyse du microenvironnement.....	33
7.1.	Cible.....	33
7.2.	Cœur de cible.....	34
7.3.	Marché.....	37
7.4.	Etude de cas.....	38
7.5.	Concurrence.....	39
7.5.1.	Concurrence directe.....	39
7.5.2.	Concurrence indirecte.....	47
7.5.3.	Conclusion.....	49
7.6.	Fournisseurs.....	50
7.7.	Distributeurs.....	50
8.	Analyse SWOT.....	51
8.1.	Analyse de la compétitivité.....	51
8.2.	Analyse de l'attractivité.....	52

9.	Milestones	55
10.	Stratégie	57
10.1.	Mission.....	57
10.2.	Vision.....	57
10.3.	Stratégie marketing	58
11.	Aspects techniques.....	61
11.1.	Module thermoélectrique	61
11.1.1.	Principe de la thermoélectricité	61
11.1.2.	Les matériaux thermoélectriques utilisés.....	63
11.2.	Positionnement technologique	66
11.2.1.	Les systèmes solaires non-concentrés.....	66
11.2.2.	Les systèmes solaires concentrés	69
11.2.3.	Rendements des technologies	69
11.3.	Evolution de la production d'énergie thermique et électrique.....	71
12.	Etude de cas	73
12.1.	Mise en contexte	73
12.1.1.	Disposition des concentrateurs sur le toit	74
12.2.	Premier estimatif	75
13.	Plan Marketing.....	81
13.1.	Politique de produit.....	81
13.2.	Politique de prix.....	81
13.2.1.	L'étude de cout	81
13.2.2.	La concurrence.....	82
13.2.3.	La valeur perçue.....	83
13.3.	Politique de distribution.....	84
13.3.1.	Notre site internet.....	84
13.3.2.	Distribution via les agents commerciaux	85
13.3.3.	Schématisation	85
13.4.	Politique de communication et promotion.....	86
13.4.1.	Communication avec les industries	86
14.	Plan d'action	89
14.1.	Vision de l'entreprise.....	89
14.1.1.	Phase de lancement.....	89
14.1.2.	Phase de croissance.....	90
14.1.3.	Phase d'expansion.....	90
14.2.	Les droits d'exploitation de la technologie.....	92
14.2.1.	Titularité des droits de l'invention	92
14.2.2.	Une Application brevetable ?.....	94
14.2.3.	Le comité de brevetabilité.....	97
14.3.	Relation avec L'université	98
14.3.1.	La Sopartec	98
14.3.2.	Le droit d'exploiter les recherches.....	99
14.3.3.	Schématisation	100
14.4.	Structure.....	101

14.4.1.	La dénomination sociale	101
14.4.2.	Le nom commercial	101
14.4.3.	Société anonyme	102
14.4.4.	Siège social	104
14.5.	Les contrats de Hybrid Power	105
14.5.1.	Relation avec nos clients.....	105
14.5.2.	Le contrat d'étude préliminaire.....	105
14.5.3.	Le contrat de vente	106
14.5.4.	Le contrat de vente d'unité d'énergie	109
14.6.	Aides au lancement	111
14.6.1.	FIRST spin-off	111
14.6.2.	La bourse de préactivité	112
14.6.3.	La bourse innovation développement durable	112
14.6.4.	Primes aux services de conseil.....	113
14.6.5.	AWEX.....	115
14.6.6.	Le Maroc et les fonds.....	115
14.7.	Gestion des ressources humaines.....	117
14.7.1.	Les co-fondateurs.....	117
14.7.2.	Les organes de gestions	117
14.7.3.	Le capital humain : les employés.....	120
14.7.4.	L'agent commercial	123
14.8.	Plan de production	127
14.8.1.	Conception des plans d'implantation.....	127
14.8.2.	Commande et usinage des pièces.....	128
14.8.3.	Assemblage	128
14.8.4.	Maintenance	128
14.8.5.	Conclusion	129
15.	Gestion des risques	131
15.1.	Le risque technologique	131
15.2.	Sécurité du produit.....	132
15.2.1.	Régime de sécurité du produit	132
15.2.2.	Champ d'application de la directive	133
15.2.3.	Obligations dictées par la directive.....	134
15.2.4.	Le marquage CE	135
15.2.5.	Les autres normes et certifications.....	136
15.3.	L'entreprise face à ses responsabilités	137
15.3.1.	La société en formation.....	137
15.3.2.	L'entreprise face à ses responsabilités une fois créée.....	138
16.	Plan financier	146
16.1.	Hypothèses du plan financier.....	146
16.2.	Début des activités et vision	146
16.3.	Chiffre d'affaires.....	147
16.3.1.	Volume de vente	147
16.3.2.	Prix de vente	148

16.3.3.	Récapitulatif des revenus	149
16.4.	Couts	150
16.4.1.	Couts liés à la vente	150
16.4.2.	Couts des ressources humaines.....	150
16.4.3.	Couts liés à l'installation.....	151
16.4.4.	Couts du démantèlement.....	151
16.4.5.	Récapitulatif des couts	152
16.5.	Aides et subsides.....	153
16.6.	Capitaux propres	153
16.7.	Dettes financières.....	154
16.8.	Trésorerie	154
16.9.	Le bilan	156
16.9.1.	L'actif.....	156
16.9.2.	Le passif	157
16.10.	Analyse financière	158
16.10.1.	Ratios de rentabilité	158
16.11.	Conclusion du plan financier	160
16.12.	Responsabilité du plan financier.....	161
16.13.	La fiscalité à l'aide de la société	162
16.13.1.	Déduction fiscale des revenus de brevets	162
16.13.2.	Dispense de paiement de précompte professionnel	162
17.	Conclusion	165
18.	Bibliographie.....	169
18.1.	Législations nationales.....	169
18.2.	Législations internationales	170
18.3.	Articles et Ouvrages.....	171
18.4.	Webographies	174
18.4.1.	Articles.....	174
18.4.2.	Consultations.....	177
18.5.	Jurisprudence	178

1. Executive summary

Hier, aujourd'hui et pour l'avenir, il existe un défi universel que le genre humain essaye de relever : produire de l'énergie. Ces dernières années, deux éléments ont bouleversé l'équation : la rareté de l'énergie fossile et l'augmentation des prix. Par conséquent, le secteur énergétique s'est tourné vers un autre modèle de production : le renouvelable. *Hybrid Power* va bouleverser le marché de l'énergie solaire en le faisant passer à la prochaine étape de son évolution.

Pour atteindre notre objectif, nous allons exploiter le rayonnement solaire à l'aide d'un nouveau procédé mis au point dans les laboratoires de l'Université. Ce procédé repose sur la thermoélectricité, une technologie améliorée grâce aux recherches réalisées notamment par le professeur Pascal Jacques et le doctorant Geoffrey Roy.

Concrètement, *Hybrid Power* est un concentrateur solaire qui utilise un capteur thermoélectrique. En captant l'énergie du soleil sous forme de chaleur, il produit à la fois de l'électricité et de l'énergie thermique, ce qui fait de lui un module hybride. *Hybrid Power*, c'est aussi la conception d'une solution solaire visant de nombreux industriels, et à plus long terme, tous les secteurs ayant des besoins énergétiques.

Le moteur entrepreneurial du projet est actionné par une équipe interdisciplinaire, composée de trois étudiants en deuxième master à l'Université Catholique de Louvain, respectivement en science de gestion, en ingénierie civile et en droit. L'équipe est persuadée que l'énergie est la base du développement et qu'il est essentiel de la rendre accessible.

C'est pourquoi, nous voulons que notre énergie soit vendue à un prix le plus réduit possible. Pour le grand public, plusieurs solutions solaires existent déjà, notamment les panneaux photovoltaïques, les panneaux thermiques et les panneaux solaires hybrides. Celles-ci apportent de relativement bons rendements, cependant elles restent onéreuses et requièrent souvent des aides financières pour être exploitées. Le but d'*Hybrid Power* est de proposer une formule intéressante pour l'utilisateur : celui-ci ne paie qu'une unique fois la combinaison de solutions solaires électriques et thermiques, et il n'est soumis à aucune aide étatique pour régler son énergie verte.

La finalité n'est pas uniquement de produire de l'énergie à bas prix, il faut également que cette production ait un impact réduit sur l'environnement. Pour ce faire, nous souhaitons utiliser des matériaux moins polluants que ceux employés dans les solutions solaires classiques. L'écologie est un des fers de lance de notre projet.

Le rôle de notre société, à long terme, est de devenir un producteur majeur et un fournisseur d'énergie solaire à destination des industriels. Nous visons en premier lieu

le marché marocain mais l'application peut s'étendre à toutes les zones géographiques à fort ensoleillement.

Afin de financer cette entreprise, notre besoin en capital, pour les quatre premières années, est estimé à 261 500 €. En 2030, selon nos estimations, le taux de pénétration sera de 1,33% pour le secteur de l'énergie thermique dans le textile au Maroc. La future spin-off réalisera des bénéfices nets dès l'année 2024 avec un chiffre d'affaires de 4 500 000 €.

2. L'équipe de management et la genèse du projet

2.1. Description de l'équipe

Hybrid Power est le fruit d'un travail fourni par trois étudiants venant d'horizons différents tant sur le plan académique que sur le plan humain. Cette diversité constitue une richesse en soi. En effet, chaque membre apporte au projet, de par ses compétences et ses expériences, un regard critique constructif. Cette alliance est animée par un seul but : entreprendre. Entreprendre pour apprendre mais aussi pour performer et s'investir dans un projet porteur des valeurs du groupe.

Le moteur entrepreneurial de Hybrid Power est activé par trois étudiants.

Julien Spedale-Scarlata : étudiant en Droit, il fait preuve d'une créativité débordante. Il est détenteur d'une formation en Science Politique Internationale et termine actuellement son Master en Droit. Grâce à ses nombreuses expériences dans la gestion de projets, il a été le garant de la cohésion entre tous les partenaires.

Janet Bailey est la gestionnaire du groupe. Elle a suivi une formation en Marketing. Actuellement, elle termine son master en Sciences de Gestion à la Louvain School of Management. Grâce à son expérience dans une société de recrutement, elle a facilité la recherche de nouveaux partenaires.

Jérémy Denis, quant à lui, jouit d'une expérience entrepreneuriale non négligeable. En effet, il possède déjà sa propre société dans le milieu de l'événementiel. Parmi les trois associés, sa formation est la plus technique; il termine une maîtrise en ingénierie civile en construction. Passionné par le domaine de l'énergie, il a porté et assuré l'avancement du projet.

Cette équipe soudée a fourni un travail quotidien pour valoriser Hybrid Power.

Par ailleurs, c'est le professeur Pascal Jacques qui a insufflé l'idée de départ et a encadré le développement du projet en y apportant son expertise. Avec l'aide de ses collaborateurs, il a permis au projet de se réaliser. Le doctorant Geoffrey Roy a suivi de très près le développement de la partie technique et la construction du démonstrateur a été entièrement financée et réalisée par le laboratoire de l'UCL.

2.2. Nos valeurs

En tant que jeunes entrepreneurs et étudiants universitaires, nous avons une vision commune de notre monde futur. Celui-ci consiste en un bien commun que nous devons protéger. Cette démarche protectrice commence dès maintenant. C'est pourquoi, dans notre création d'entreprise, nous essayons de combiner les aspects économique, écologique et social. Le but étant que, dès le départ, notre spin-off soit durable.

Cette durabilité se retrouve à la base de notre produit. En effet, la conception de la solution solaire que propose Hybrid Power est pensée et créée avec des matériaux les moins polluants possibles. Dans une vision à long terme, nous pensons déjà à l'avenir de notre produit et à la manière de le recycler.

La genèse du projet était de créer de l'énergie qui devait, d'une part, être renouvelable en utilisant l'énergie solaire et d'autre part, être produite à prix réduit. Nous sommes persuadés que l'énergie est la base du développement et que celle-ci se doit de rester abordable. Cette guerre du petit prix doit permettre l'accès à l'énergie propre et renouvelable tant aux grands projets industriels qu'aux petites et moyennes entreprises. Ces PME se battent pour réduire l'ensemble de leurs coûts et rester compétitives.

Cette constatation est d'autant plus vraie dans les pays émergents, notamment en Afrique où le continent est en pleine croissance économique. Nous espérons supporter cette croissance en favorisant une émulsion économique grâce à la réduction des coûts de l'énergie. Le but est de permettre de réduire la facture énergétique finale de nos futurs utilisateurs.

Le développement d'une nouvelle technologie s'élabore avec l'aide de spécialistes, de chercheurs et de stakeholders motivés. C'est pourquoi nous travaillons étroitement avec l'Université Catholique de Louvain, avec qui nous avons découvert et développé notre solution solaire. Nous devons préserver cette relation privilégiée avec l'université afin de valoriser toujours plus la recherche scientifique effectuée. Nous continuons à être inventifs quotidiennement en restant à l'écoute des demandes de nos futurs utilisateurs

3. Opportunité

Dans la recherche du sujet de mémoire, notre projet s'est construit autour de Jérémie Denis qui est le scientifique de l'équipe. Suite à un contact avec la Sopartec S.A., il nous a été proposé de travailler au départ du projet du professeur Pascal Jacques. Celui-ci développe un moyen innovant pour transformer de l'énergie thermique en électricité ou pour faire plus simple, transformer de la chaleur en électricité. C'est ce que l'on appelle la thermoélectricité.

L'innovation réside, en fait, dans l'alliage utilisé par la technologie. En effet, la thermoélectricité est utilisée depuis longtemps, mais les composants actuels sont onéreux et polluants, tel que le tellure de bismuth Bi_2Te_3 . Le coût de ces matériaux thermoélectriques rares était jusqu'alors le principal frein à l'élaboration de solutions solaires thermoélectriques. Le nouvel alliage, proposé par le professeur Pascal Jacques, est quant à lui composé essentiellement de métaux abondants, notamment le Fer et l'Aluminium, qui sont des minerais présents en grande quantité sur terre.

Etant donné que le rendement de ce procédé thermoélectrique est faible, l'objectif est de trouver une source de chaleur à coût très réduit, voire nul, afin que la production d'électricité soit rentable. Le soleil correspond parfaitement à la définition d'une source d'énergie gratuite et inépuisable. La technologie ressemble donc fortement aux panneaux solaires que l'on connaît actuellement, mais la physique qui se cache derrière la production d'électricité est fondamentalement différente. En effet, dans notre cas, il faut concentrer les rayons du soleil afin de chauffer les matériaux thermoélectriques. Il nous faut donc mettre en place un système de concentration solaire qui agira comme une loupe.

Nous nous plaçons donc comme une alternative directe aux panneaux photovoltaïques. Ainsi, nous exploitons également le rayonnement solaire, mais d'une manière différente à celle utilisée dans la conception des panneaux photovoltaïques.

L'opportunité se situe réellement dans le coût de production de ce type de solution solaire. En effet, la réalisation des panneaux photovoltaïques est onéreuse, car elle nécessite l'emploi de matériaux coûteux tel que le silicium purifié. Grâce à cette nouvelle technologie thermoélectrique, les matériaux constitutifs sont peu chers et la production de solution solaire présente ainsi une valeur abordable. Le prix de l'énergie engendrée par ce procédé serait donc tout à fait compétitif par rapport aux autres sources d'énergie.

3.1. Demande pour l'énergie verte

L'opportunité du projet se base sur une constatation importante, il existe une réelle demande pour l'énergie verte. En France, différentes sources d'énergie sont à disposition pour produire de l'électricité. De manière générale, les énergies renouvelables ont un coût de production plus important que les sources d'énergie fossiles¹. L'énergie hydraulique restant une exception, son potentiel étant déjà quasiment complètement exploité. Les énergies renouvelables éoliennes et photovoltaïques, bien que nécessitant des dépenses plus conséquentes au niveau de leur production, constituent cependant, sur le marché de l'énergie, une véritable demande des producteurs.

L'Europe s'est engagée à réduire fortement, d'ici 2030, ses émissions de gaz à effet de serre². Cet objectif sera atteint en partie par le développement des énergies renouvelables³. Ainsi, la part de celles-ci devrait atteindre au minimum 27% en Europe d'ici 2030, ce qui suggère leur croissance importante. Conjointement à cet objectif, des politiques d'investissements dans les énergies renouvelables sont mises en œuvre. On citera par exemple la France, où le secteur de l'énergie solaire a réellement décollé en 2007, grâce notamment à des avantages fiscaux comme le crédit d'impôt développement durable⁴. Depuis, la filière photovoltaïque connaît une croissance très rapide. On constate que le développement de l'industrie solaire, encore émergente, dépend fortement de l'environnement législatif et économique. De nombreux pays, comme la Belgique, requiert un cadre législatif plus clair et plus favorable pour le secteur des énergies renouvelables. En effet, certains marchés sont totalement artificiels et réglementés par les mécanismes d'aides. Le manque de clarté et de cohérence dans les politiques sont de véritables freins à l'investissement.

¹ EDF (2013). « Les coûts de production des différentes sources d'énergie en France ». Disponible sur <https://www.lenergieenquestions.fr/les-couts-de-production-des-differentes-sources-denergie-en-france-infographie/>. (Consulté le 27/02/2014).

² A. SINAÏ (2014). « Un paquet climat-énergie européen sans audace ». Disponible sur <http://www.actu-environnement.com/ae/news/paquet-climat-energie-europe-20508.php4>. (Consulté le 27/02/2014).

³X (2009). « L'initiative européenne pour l'énergie solaire, moteur du progrès technique ». Disponible sur http://ec.europa.eu/environment/ecoap/about-eco-innovation/policies-matters/eu/261_fr.htm. (Consulté le 27/02/2014).

⁴Groupement français des professionnels du solaire photovoltaïque. « Le marché des panneaux solaires ». Disponible sur <http://www.businesscoot.com/le-march-des-panneaux-solaires-40/>. (Consulté le 27/02/2014).

4. Présentation du projet Hybrid Power

4.1. Fonctionnement du produit

Notre projet consiste à développer des solutions solaires hybrides, produisant à la fois de l'énergie thermique (sous forme d'eau chaude par exemple) et de l'électricité. Ces solutions solaires pourraient être utilisées par tout type d'utilisateur ayant des besoins en chaleur et en électricité, mais nous développons plus spécifiquement une solution à destination de l'industrie ayant des besoins considérables en chaleur.

Afin de mieux comprendre le produit, le schéma de principe ci-dessous illustre la transformation de l'énergie solaire en énergie thermique et électrique.

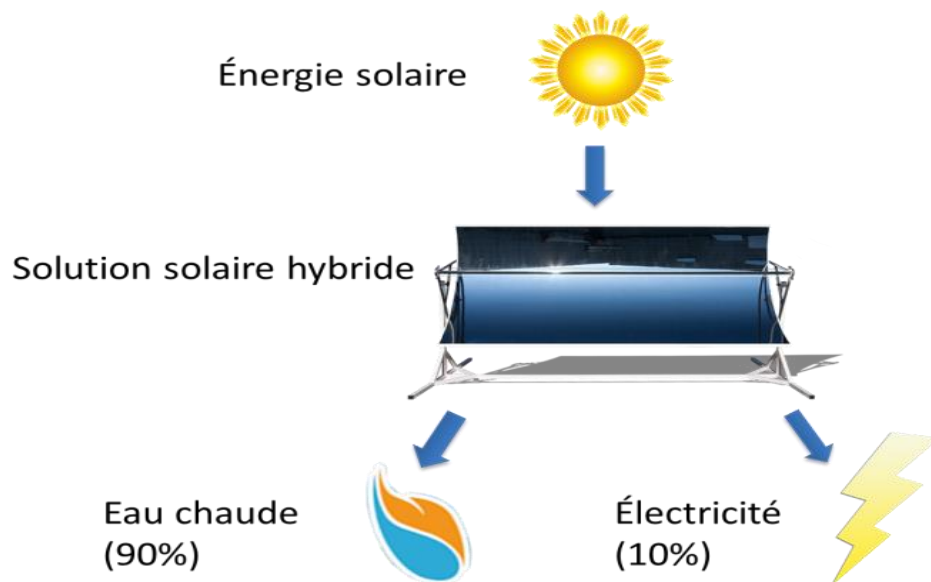


Figure 1 : Schéma de principe d'un concentrateur solaire hybride thermoélectrique

Cette application fonctionne grâce au rayonnement solaire direct, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas de nuages. Les rayons du soleil sont concentrés grâce à un concentrateur solaire, comme par exemple un miroir cylindro-parabolique. Cette énergie est concentrée sur un matériau thermoélectrique afin de le faire monter en température. La particularité de ce type de matériau est de produire de l'électricité lorsqu'il est soumis à un gradient de température. Ce matériau thermoélectrique est donc chauffé sur une de ses faces par le rayonnement solaire, et est en même temps refroidi par un liquide – tel que l'eau – sur son autre face. L'eau qui refroidit le matériau thermoélectrique s'échauffe à son tour et peut ensuite être utilisée dans un processus industriel. Au final, les proportions entre eau chaude et électricité produites sont approximativement de 90% - 10%.

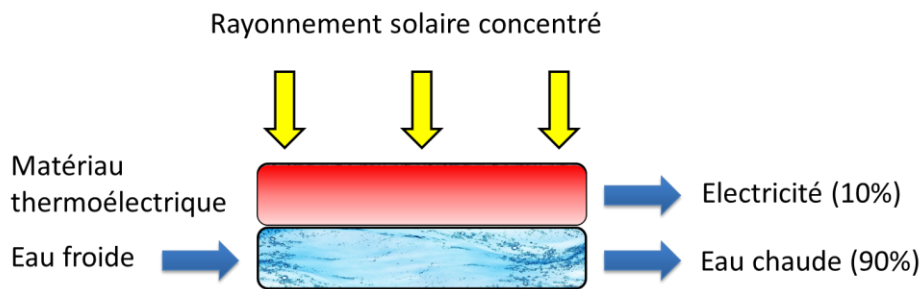


Figure 2 : Schéma de principe du module thermoélectrique

4.2. Proposition de valeur

La grande particularité de ce système est l'utilisation d'un composant thermoélectrique. En effet, actuellement il existe trois grands types de solutions solaires : le photovoltaïque, le thermique et la thermodynamique⁵. Le photovoltaïque produit de l'électricité en se basant sur des composants au silicium dont le processus de purification est onéreux et polluant ; en revanche les rendements et les prix ne cessent de s'améliorer. Le solaire thermique se décline sous un grand nombre d'applications qui, pour la grande majorité, produit de l'eau chaude de basse à moyenne température. Enfin, le solaire thermodynamique est composé de systèmes à haute concentration et à haute température dans le but d'actionner une turbine à vapeur et de produire ainsi de l'électricité.

Au contraire de ces trois grands types, notre solution se base sur le principe des matériaux thermoélectriques qui produisent de l'électricité lorsqu'ils sont soumis à un gradient de température. Le phénomène thermoélectrique est connu depuis très longtemps, cependant les matériaux habituellement utilisés sont onéreux. Les matériaux thermoélectriques étudiés par l'UCL sont prometteurs car, malgré leur rendement très faible, ils sont issus de métaux courants, ce qui réduit fortement leur coût de production.

La véritable innovation de notre projet réside dans plusieurs points distincts.

Tout d'abord, nos panneaux sont hybrides c'est-à-dire qu'ils produisent simultanément de l'énergie thermique et de l'électricité. Ensuite, les composants thermoélectriques sont peu onéreux et permettent de produire de l'énergie électrique d'une nouvelle façon.

⁵ Voir partie technique – Exploitation de l'énergie solaire

Enfin, notre énergie est renouvelable et propre. En effet, les matériaux thermoélectriques constituant nos panneaux sont bien moins polluants que ceux utilisés dans les panneaux photovoltaïques. Notre solution se démarque donc principalement par son côté hybride et par ses nouveaux matériaux, qui nous l'espérons rendront l'énergie produite moins chère.

5. Positionnement - Belgique

Cette section a pour unique but de présenter la manière dont le projet s'est développé entre mai 2013 et janvier 2014. En effet, nous verrons par la suite que la Belgique constitue une région peu opportune pour lancer notre application solaire. Nous présentons donc la manière de penser et les hypothèses qui nous ont conduits à une telle conclusion lors de notre positionnement en Belgique. Bien évidemment, avec l'avancement du mémoire, de nombreuses hypothèses se sont levées, rendant ainsi le positionnement en Belgique moins cohérent par rapport à la suite du travail présenté.

Avant de débiter le positionnement, rappelons que notre solution solaire hybride produit de la chaleur et de l'électricité. Par conséquent, nous nous positionnons sur deux marchés distincts : le marché de l'énergie avec d'une part l'électricité et d'autre part l'énergie thermique.

5.1. Marché de l'électricité

Nous nous positionnons sur le marché de l'électricité composé d'acteurs redoutables. Bien que l'énergie électrique coûte chère à produire, notre solution est amenée à concurrencer des dispositifs tels que le photovoltaïque, l'éolien, les turbines à gaz, les centrales au charbon, et même le nucléaire.

Nous nous positionnons également face à deux grands acteurs. Premièrement, les grands producteurs d'électricité tels qu'Electrabel, Luminus, Eni, EDF Belgique etc. Deuxièmement, les utilisateurs finaux qui décident d'autoproduire leur énergie en utilisant des panneaux photovoltaïques.

Nous avons analysé les prix de l'électricité pour ces deux grands acteurs.

Les grands producteurs d'électricité vendent leur électricité à 0,24€/kWh en moyenne⁶. Ce prix est celui auquel un utilisateur final achète son électricité.

En ce qui concerne les panneaux photovoltaïques, le coût de production se situe entre 0,229 et à 0,37€/ kWh en fonction d'une petite ou grande installation⁷.

Il est possible de comparer notre système hybride par rapport à ces deux prix (grand producteur d'électricité et panneaux photovoltaïques) (cf. figure 5 p. 12).

⁶ Apere ASBL, « L'énergie photovoltaïque ou thermique », *Renouvelle ; l'actualité de l'énergie renouvelable*, juin 2013, n°55, p.12.

⁷ X (2013). « Coût de l'électricité photovoltaïque: 2014-2020-2030 ». Disponible sur http://energeia.voila.net/solaire/prix_moyen.htm . (Consulté le 2/03/14)

Pour ce faire, nous avons réalisé une première analyse théorique des coûts pour l'électricité de notre système, nous arrivons à un coût approximatif de 0,04€/kWh.

Si nous faisons l'hypothèse que nous arrivons à produire de l'énergie à ce coût (0,04€/kWh), nous sommes compétitifs par rapport à ces deux systèmes et nous pouvons prendre une marge de minimum 0,16€/kWh tout en restant compétitif.

En ce qui concerne notre production d'électricité, nous optons pour une stratégie de prix. Il convient de faire savoir que nous ne disposons pas de toutes les informations nécessaires à l'étude de coût. En effet, le coût de l'installation est trop approximatif car l'implémentation au processus industriel dépend de plusieurs facteurs. Le coût de 0,04€/KWh est donc plus qu'une estimation.

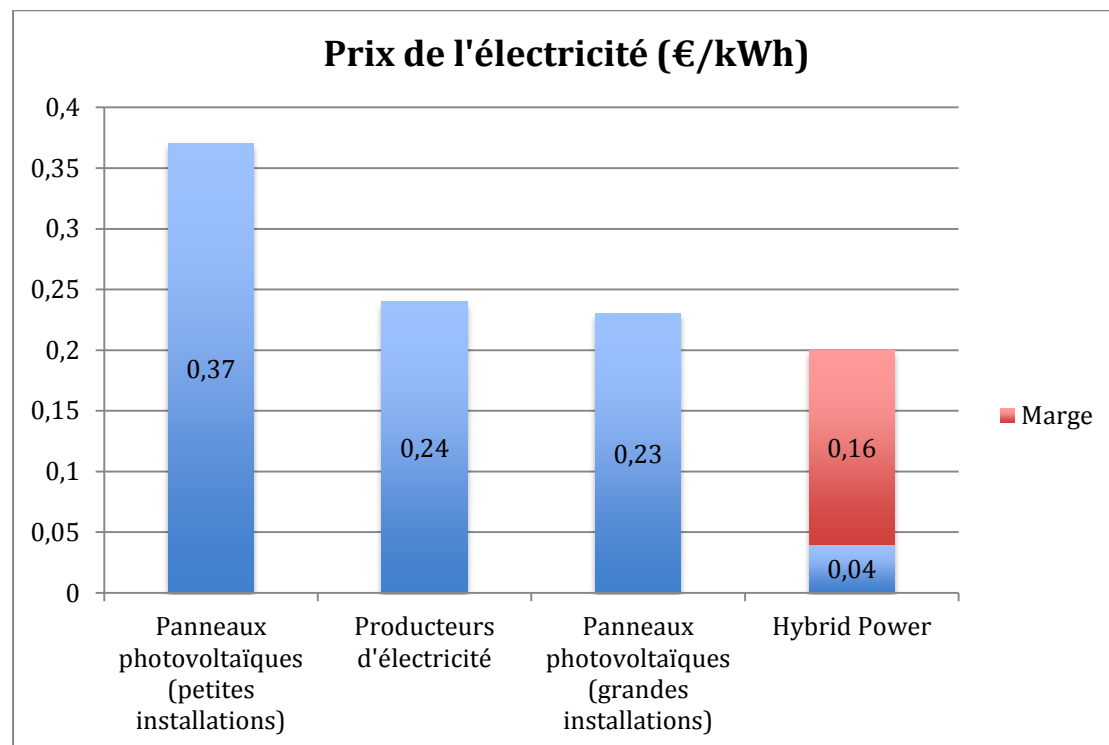


Figure 3 : Prix de l'électricité en Belgique pour différentes technologies (€/kWh)

5.2. Marché de l'énergie thermique

Nous positionnons comme étant plus cher que les panneaux solaires thermiques bénéficiant de primes. En effet, un auto-producteur d'énergie utilisant des panneaux solaires thermiques paye en moyenne 0,024€/kWh (avec les primes)⁸. Sans ce système de primes, le prix des panneaux solaires thermiques se situe entre 0,04€/KWh à 0,07€/KWh (moyenne de 0,055€/KWh)⁹, en fonction de la taille de l'installation. Nous remarquons donc que sans les primes, ce système de panneaux solaires thermiques est nettement moins rentable.

En considérant que notre technologie est fortement similaire aux panneaux solaires thermiques (absorbeur de chaleur), nous pouvons estimer, en première approximation, que notre cout est de 0,04€/kWh en Belgique.

Cependant, nous pourrions concurrencer les sources d'énergie suivantes qui produisent également du chauffage : le mazout, le propane, et l'électricité si nous vendons notre énergie thermique à moins de 0,08€ (marge de 0,04€) (cf. figure 6, p. 13)¹⁰.

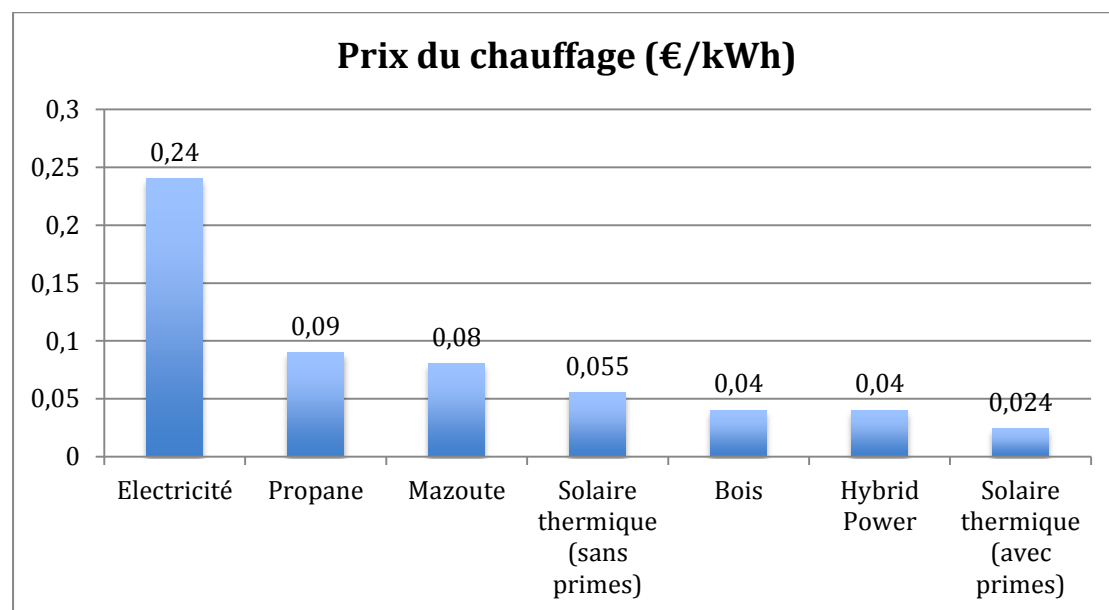


Figure 4 : Prix du chauffage pour différentes sources d'énergie (€/kWh)

⁸Apere ASBL (2010). « L'énergie solaire photovoltaïque ou thermique, que choisir? ». Disponible sur www.apere.org. (Consulté le 2/03/14)

⁹Région wallonne. « Un chauffe-eau solaire chez vous! ». Disponible sur <http://energie.wallonie.be/servlet/Repository/brochure-grand-public---8-questions--8-raisons-et-les-systemes-combines.PDF?IDR=7831>. (Consulté le 4/03/14)

¹⁰Apere ASBL, « L'énergie photovoltaïque ou thermique », *Renouvelle ; l'actualité de l'énergie renouvelable*, juin 2013, n°55, p. 12.

5.3. Cheminement de notre projet

Nous avons tout d'abord commencé à prospecter le marché de l'énergie en Belgique.

En Wallonie, la crise des certificats verts a énormément fait souffrir le secteur du photovoltaïque. L'idée était la suivante : le client s'engage à verser les certificats verts à l'entreprise d'installation de panneaux photovoltaïques et en échange, cette dernière s'engage à verser une rente couvrant le montant à rembourser à la banque. Cette solution est donc très attractive pour le client qui reçoit une installation gratuite et ne doit plus payer de factures d'électricité.

Par conséquent, le système a connu énormément de succès, ce qui a entraîné une diminution des coûts d'installation tandis que le montant du subside est resté identique. Ces subsides n'ont pas été adaptés à l'évolution des coûts et il s'est avéré que certains producteurs et fournisseurs d'énergie n'avaient plus réellement besoin de ces certificats verts. Le soutien public via les certificats verts a donc diminué, ce qui a entraîné une diminution de leur prix et ce qui signifierait, à terme, la fin des aides publiques pour les installations futures de panneaux photovoltaïques. La problématique provient donc de la baisse de ces subventions. Actuellement, les gens sont devenus très frileux à l'idée d'installer des panneaux photovoltaïques¹¹.

En outre, le dumping en Chine (exporter un produit à un prix inférieur à celui d'origine afin de prendre place de manière offensive sur le marché extérieur) est une problématique au marché de l'énergie. En effet, les entreprises belges ne savent plus concurrencer les entreprises chinoises. Celles-ci parviennent, en effet, à proposer des panneaux à très faible prix, le coût du travail étant moins élevé qu'en Europe.

En Belgique, le marché de l'énergie est saturé et en déclin. En outre, il y a très peu de gisement solaire¹², ce qui ne favorise pas la valorisation de l'énergie solaire.

C'est pour ces raisons majeures que nous sommes convaincus que l'implantation de notre projet en Belgique ne présente guère d'intérêt. Nous nous sommes rendu compte que notre produit s'adapte à un problème énergétique global. En outre, nous sommes conscients qu'il est très important de s'introduire sur un marché partiellement réglementé par l'Etat afin de ne pas être totalement dépendant de celui-ci et d'éviter la problématique que le photovoltaïque a connu en Wallonie.

¹¹ C. DU BLED (2013). « Certificats verts: On a trop subsidié le système ». Disponible sur <http://www.lesoir.be/211433/article/economie/2013-03-20/certificats-verts-«on-trop-subsidie-systeme»>. (Consulté le 03/03/2014) et Apere ASBL, « Le marché des certificats verts inquiète », *Renouvelle ; l'actualité de l'énergie renouvelable*, janvier 2012, n°40, p.4.

¹² Cf. Partie technique – Source solaire

5.4. Conclusion

Au vu des précédentes analyses, notre prospection du marché de l'énergie doit donc être mondiale. Néanmoins, nous pouvons tirer quelques enseignements de nos recherches qui nous guideront durant la suite du travail.

Le choix de notre solution hybride serait moins coûteux que d'ajouter un panneau photovoltaïque à un panneau thermique. En effet, en supposant l'absence de primes, le coût de notre énergie serait équivalent aux panneaux solaires thermiques, mais avec une production électrique supplémentaire. Notre solution semble donc posséder un avantage par rapport à ces deux grands concurrents.

La stratégie que nous avons donc décidé de suivre est celle de la stratégie de prix. Pour rappel, cette stratégie ne s'applique que si notre hypothèse de coût est vérifiée (nous n'avons à présent qu'une étude théorique et approximative des coûts).

Pour plus d'informations concernant la stratégie de prix, nous vous renvoyons à la section Stratégie marketing à la page 58.

	Electricité	Chauffage	Coût de l'énergie
Photovoltaïque	√		Elevé
Thermique		√	Faible
Hybrid Power	√	√	Faible

Tableau 1 : Comparaison des énergies produites pour le photovoltaïque, le thermique et Hybrid Power

6. Analyse du macroenvironnement

Dans la section précédente Positionnement - Belgique, nous avons expliqué pourquoi nous ne nous implantions pas en Belgique. La raison majeure est la réglementation du marché par l'Etat. Tant pour les panneaux photovoltaïques que thermiques, la rentabilité dépend fortement des incitants fiscaux (réduction d'impôt) et certificats verts. Or, nous ne souhaitons pas dépendre des aides de l'Etat, ou être en concurrence avec des produits subsidiés. Par ailleurs, le gisement solaire belge ne correspond pas au meilleur emplacement pour notre solution, qui nécessite un ensoleillement direct important.

Ci-dessous, nous avons prospecté quatre continents afin de connaître le pays possédant le plus de potentiel pour notre future application.

6.1. Méthodologie

D'après Fréry, on peut définir le *macroenvironnement* comme étant « *la strate environnementale la plus générale. Il s'agit de facteurs globaux qui – dans une plus ou moins large mesure- ont un impact sur pratiquement toutes les organisations* »¹³.

Le modèle PESTEL est un outil de stratégie d'entreprise qui va nous permettre d'analyser les six facteurs du macroenvironnement : l'environnement politique, économique, socio-culturel (sociologique), technologique, écologique et légale¹⁴.

Notre projet exige de ne pas s'arrêter à l'analyse du macroenvironnement en Belgique. En effet, nous avons analysé plusieurs pays afin de connaître le pays dans lequel il y a le plus de potentiel pour notre future application.

Comment avons-nous réalisé notre prospection? Nous sommes partis du monde entier, et avons choisis plusieurs continents : l'Asie, l'Afrique du Nord, l'Europe, et l'Amérique. Nous avons décidé de ne pas prospecter l'Océanie et l'Afrique du Sud pour une question d'éloignement et de manque de ressources. Ces quatre continents ont été analysés selon le modèle PESTEL et leurs analyses se trouvent en annexe¹⁵.

¹³ F. FRÉRY, G. JOHNSON, K. SCHOLES, R. WHITTINGTON, « La stratégie de prix ». *Stratégie*, 9ème éd., Paris, Pearson Education, 2011, p55

¹⁴ *Op. cit*, p.57.

¹⁵ Annexe : Analyse PESTEL : Asie, Afrique, Europe, Amérique.

6.2. Analyse par continents

Le choix du continent va s'opérer par rapport à l'analyse PESTEL mais aussi par rapport à quatre autres critères supplémentaires que nous avons établis: l'évolution de la demande en énergie, la provenance de l'énergie, l'évolution de l'énergie renouvelable, et enfin le niveau d'investissement dans l'énergie renouvelable.

6.2.1. Asie¹⁶

6.2.1.1. Evolution de la demande en énergie

L'évolution de la demande en énergie va s'accroître en Asie, et principalement en Inde et en Chine. Ce sont les pays asiatiques en voie de développement qui vont voir leur demande s'accroître de près de 3,7% par an. La consommation d'énergie quant à elle se verra plus que doubler dans les vingt prochaines années¹⁷.

6.2.1.2. Provenance de l'énergie

L'Asie est fortement dépendante des énergies fossiles tant sur le plan énergétique qu'électrique. Si « *la trajectoire actuelle se maintient, la consommation de charbon, très polluante, va s'accroître de 81%, avec pour conséquence un doublement des émissions de dioxyde de carbone, qui atteindront plus de 20 milliards de tonnes en 2035* »¹⁸. L'Asie deviendrait donc le continent qui émettrait plus de la moitié des gaz à effet de serre dans le monde. Les questions environnementales, et d'approvisionnement en matières premières sont donc plus que nécessaires.

La consommation intérieure brute en Chine est d'environ « *2000 MTep (mégatonne équivalent pétrole) dont 2/3 en charbon, 22% en pétrole, 7% en hydraulique, 3% en gaz et 1,5% en nucléaire* ». Le Japon, a pour sa part une consommation en énergie de « *520 MTep en 2008 dont 85% en énergies thermiques: 45% pétrole, 23% charbon, 17% gaz* ». Enfin, l'Inde consomme « *500 MTep, dont 54% charbon, 33% pétrole, 9% gaz, 3% hydraulique et 1 % nucléaire est le 3ème pays consommateur de la zone*

¹⁶Voir détails et sources en annexe : Analyse PESTEL Asie.

¹⁷ Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, « Les forêts et l'énergie, questions principales », *Etude FAO: Forêts 154*, 2008, pp 5-19.

¹⁸ Y. Vinh (2013). « L'Asie face aux défis énergétiques ». Disponible sur <https://www.futuribles.com/base/article/lasie-face-aux-defis-energetiques-2/>. (Consulté le 03/03/2014)

Asie-Pacifique »¹⁹. La Chine et le Japon importent énormément de pétrole. C'est pourquoi ces deux pays sont vulnérables à toute nouvelle crise pétrolière.

Un autre facteur clé est le pourcentage des importations et exportations d'énergie²⁰. L'Asie importe plus de deux fois ce qu'elle n'exporte. Elle est donc fort dépendante de ses importations.

6.2.1.3. Evolution de l'énergie renouvelable

Dans les pays en développement asiatiques, il existe une forte hausse des ressources renouvelables. Cependant, cette tendance s'appuie surtout sur une forte hausse de la consommation énergétique plutôt que l'accent mis sur les ressources renouvelables²¹.

Nous remarquons que la consommation d'énergie renouvelable commercialisée devrait fortement progresser dans les années à venir pour l'Asie non-OCDE, c'est-à-dire pour les pays asiatiques en voie de développement. Pour sa part, l'Asie OCDE (pays asiatiques développés) devrait voir sa consommation d'énergie renouvelable commercialisée très légèrement progresser²².

6.2.1.4. Niveau d'investissement dans l'énergie renouvelable

Ce sont les énergies hydrauliques, nucléaires, et dans une moindre mesure l'éolien que voudraient développer le gouvernement chinois. Néanmoins, la Chine ne remettra pas en cause ses installations nucléaires de 80 GWe à 2020, et 200GWe à l'horizon 2030²³.

6.2.2. Afrique²⁴

Evolution de la demande en énergie

Le continent africain est en pleine expansion démographique, la demande va augmenter de façon croissante en suivant l'évolution de la population. Un autre facteur de cette augmentation est l'industrialisation et la modernisation du continent.

¹⁹ D. CHAVARDED (2010). «Enjeux énergétiques des trois géants d'Asie: Japon, Chine, Inde». Disponible sur http://www.janus.co.jp/essays/chavardes/energie_d'asie-f.html. (Consulté le 04/03/2014).

²⁰ Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, « Les forêts et l'énergie, questions principales », *Etude FAO: Forêts 154*, 2008, p. 22.

²¹ *Op.cit.*, p8

²² *Op.cit.*, Pp 9-10 + Annexe : Analyse Pestel Asie

²³ C. MANDIL, J. PERCEBOIS, « Rapport énergies 2050 ». *Ministère de l'économie des finances et de l'industrie*, 2012, p.26.

²⁴ Voir détails et sources en annexe : Analyse PESTEL Afrique

6.2.2.1. Provenance de l'énergie

Le continent africain dépend majoritairement des importations en énergies notamment en pétrole bien que certain pays d'Afrique détiennent des puits de pétrole. En ce qui concerne les autres ressources énergétiques, il y en a aussi énormément mais elles sont dissipées de manière inégale sur le continent.

6.2.2.2. Evolution de l'énergie renouvelable

Le continent africain a énormément de ressources à exploiter tels que le soleil ou l'eau. Sur le continent il y a une augmentation du nombre de barrages hydrauliques ainsi que les projets utilisant l'énergie solaire. Dans un bon nombre de pays africains les gouvernements créent des agences gouvernementales qui ne s'intéressent qu'aux énergies renouvelables.

6.2.2.3. Niveau d'investissement dans l'énergie renouvelable

Les investissements dans l'énergie renouvelable sont souvent très importants et doivent être amortis sur des décennies. Certains gouvernements font l'effort politique d'investir une partie de la somme mais des organisations internationales font aussi un pas pour aider le continent africain²⁵. Les investisseurs sont souvent frileux de réaliser des investissements dans certains pays africains dans lesquels la stabilité politique est parfois précaire.

6.2.3. Europe²⁶

6.2.3.1. Evolution de la demande en énergie

Les objectifs européens en termes d'énergie sont assez clairs : il faut réduire les émissions de gaz à effet de serre. Plusieurs grands axes sont donc envisagés à moyens et longs termes. Premièrement une meilleure efficacité énergétique, tant pour les particuliers que pour les industries, ce qui réduira forcément la consommation d'énergie. Deuxièmement, une réduction simple de la consommation énergétique, ce qui passe par une activité économique plus réduite.

²⁵ Notamment La Banque mondiale

²⁶ Voir détails et sources en annexe : Analyse PESTEL Europe

6.2.3.2. Evolution de l'énergie renouvelable

Un troisième axe d'évolution envisagé par l'Europe est bien évidemment le développement massif des énergies renouvelables, dont le solaire fait partie intégrante. En effet, si l'Europe veut atteindre ses objectifs d'ici 2050, les sources d'énergies renouvelables intermittentes comme le solaire et l'éolien vont augmenter de manière considérable.

6.2.3.3. Provenance de l'énergie

L'approvisionnement d'énergie en Europe est déjà entièrement établi, un coût de transfert est donc nécessaire pour accéder à une autre technologie. Cependant, des modifications importantes sont prévues, tant au niveau du réseau d'énergie qu'au niveau des technologies employées, des investissements seront donc engagés dans ce sens.

6.2.3.4. Niveau d'investissement dans l'énergie renouvelable

Les investissements dans les énergies renouvelables seront conséquents dans les années à venir, et notamment dans la filière solaire.

6.2.4. Amérique²⁷

6.2.4.1. Evolution de la demande en énergie

L'évolution de la demande en énergie va s'accroître en Amérique du Sud et Centrale ainsi qu'en Amérique du Nord OCDE.²⁸

6.2.4.2. Provenance de l'énergie

Le pétrole, le charbon et le gaz naturel sont les principales sources d'énergie aux États-Unis. Les États-Unis est le deuxième pays le plus gros consommateur d'énergie après la Chine en 2010 et est le second émetteur de dioxyde de carbone après la Chine

²⁷ Voir détails et sources en annexe : Analyse PESTEL Amérique

²⁸ Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, « Les forêts et l'énergie, questions principales », *Etude FAO: Forêts 154*, 2008, pp 5-19.

également. Cependant, en 2008 ils sont les premiers mondiaux à investir dans les énergies renouvelables (24 millions de dollars).²⁹

Un autre facteur clé est le pourcentage des importations et exportations d'énergie. L'Amérique du Nord importe plus qu'elle n'exporte (11,7% d'importations pour 7,1% d'exportations) tandis que l'Amérique du Sud et centrale exporte plus qu'elle n'importe (20,2% d'exportations pour 15,6% d'importations)³⁰.

6.2.4.3. Evolution de l'énergie renouvelable³¹

C'est en Amérique latine et plus précisément au Brésil que les énergies renouvelables jouent un rôle très important. En effet, 45% de l'énergie consommée provient des sources renouvelables telles que l'hydroélectricité ainsi que le bois et l'éthanol tiré de la canne à sucre.

Tant pour l'Amérique du Nord OCDE que pour l'Amérique du Sud et centrale, la consommation d'énergie renouvelable commercialisée devrait fortement progresser dans les années à venir. Contrairement au pays en développement d'Asie, l'Amérique du Sud et centrale a mis l'accent sur les ressources renouvelables. En effet, leurs sources de combustibles non fossiles sont déjà très compétitives.

6.2.4.4. Niveau d'investissement dans l'énergie renouvelable

C'est en Amérique latine qu'il y a le plus d'investissement dans l'énergie renouvelable. Le Mexique, le Chili, l'Uruguay, et le Pérou affichent des croissances extrêmes. La biomasse est l'activité dans laquelle les investissements sont les plus importants (822 millions de dollars en 2012) devant les biocarburants et la géothermie.³²

²⁹ GreenUnivers (2009). « L'énergie mondiale poursuit sa mutation malgré la crise ». Disponible sur <http://www.greenunivers.com/2009/05/rapport-ren21-energies-renouvelables-monde-2008-6617/> (Consulté le 02/03/2014).

³⁰ Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, « Les forêts et l'énergie, questions principales », *Etude FAO: Forêts 154*, 2008, p. 22.

³¹ *Op. cit* p13.

³² X (2013). « Boum des énergies renouvelables en Amérique latine ». Disponible sur <http://www.mobilite-durable.org/innover-pour-demain/energies/boum-des-energies-renouvelables-en-amerique-latine.html>. (Consulté le 05/03/2014).

6.3. Résultats de la prospection

L'analyse des quatre continents selon les critères déterminés ci-dessus³³ nous donne une vue d'ensemble suivante :

Les notations suivantes ont été arbitrées :

++	Facteur très favorable
+	Facteur favorable
0	Facteur neutre
-	Facteur défavorable
--	Facteur très défavorable

	Evolution de la demande en énergie	Provenance de l'énergie (coût de transfert)	Evolution de l'énergie renouvelable	Investissement dans l'énergie renouvelable
Asie	++	--	+	-
Afrique	+	+	++	++
Europe	--	0	++	++
Amérique du Nord	++	0	+	+
Amérique du Sud	++	++	++	++

Tableau 2 : Analyse des quatre continents choisis

³³A savoir: l'évolution de la demande en énergie, la provenance de l'énergie, l'évolution de l'énergie renouvelable, et enfin le niveau d'investissement dans l'énergie renouvelable.

6.4. Choix d'un continent africain

Après l'analyse détaillée des quatre continents, nous avons choisi l'Afrique pour plusieurs raisons majeures.

Tout d'abord, nous pouvons remarquer dans le tableau récapitulatif que l'Afrique possède le plus de potentiel par rapport aux trois autres continents. En effet, sa demande en énergie augmente ainsi que ses investissements dans l'énergie renouvelable. En outre, les coûts de transfert sont peu élevés, c'est-à-dire que de manière générale le coût que doit supporter le client est peu élevé s'il change de fournisseur en faisant appel à notre solution hybride. En effet, les réseaux de distribution en énergie ne sont pas aussi développés que dans les autres régions du monde.

L'Amérique a également énormément de potentiel. Cependant, nous avons décidé de ne pas se lancer sur ce marché pour deux raisons majeures : la barrière de la langue et l'éloignement géographique.

Le continent africain est donc un sujet d'étude intéressant sous plusieurs aspects. Tout d'abord, la demande en énergie est en constante augmentation. Le défi de l'énergie englobe celui du développement. En effet, c'est grâce à l'énergie qu'un pays se développe car il pourra créer des industries.

Cette demande croissante est différente en fonction des pays. Cette différence est surtout marquée entre les pays du Nord (Maghreb) et les pays du Sud. Elle est due notamment à leur niveau d'industrialisation, à la stabilité politique, à l'émergence du marché etc. Ainsi les pays d'Afrique du Nord prennent conscience de l'importance de l'énergie verte et essayent de la promouvoir. Cependant, ils ne sont pas tous au même niveau de conscience « verte ». Ils ont comme chef de file le Maroc qui organise notamment des salons internationaux sur l'énergie renouvelable³⁴.

Le continent africain a un potentiel de croissance immense. Tout d'abord au niveau de sa population, celle-ci devrait atteindre deux milliards d'habitants d'ici 2050, soit deux fois plus qu'actuellement³⁵. Plus de la moitié de sa population n'a pas accès à l'électricité. Cette réalité devrait toujours être d'actualité lors du boum démographique que connaîtra le continent en 2050. Ensuite le continent note une croissance de PIB de 4% annuellement, celle-ci indique que la croissance économique est assez importante en Afrique. Cette croissance économique va de pair avec la

³⁴ Tel que le salon des ENR à Casablanca.

³⁵ X, « L'Afrique et les énergies renouvelables: la voie vers la croissance durable », *International Renewable Energy Agency*, 2013.

croissance industrielle qui elle-même est liée aux facteurs de production qui sont énergivores.

Il est important de connaître les principales sources d'énergie utilisées sur le continent. La principale source est l'énergie fossile : notamment le charbon, le pétrole et le kérosène. Dans les villages et contrées éloignées des grands pôles commerciaux, c'est le bois et le charbon qui sont les plus utilisés comme source d'énergie. En ce qui concerne l'électricité, 60% de sa production provient de la combustion d'énergie fossile. Bien que l'électricité ne semble pas être actuellement un des principaux vecteurs d'énergie, il semble bien que pour les années à venir, il existera une véritable demande en électricité³⁶.

En ce qui concerne la production d'électricité, celle-ci peut être produite avec la combustion d'énergie fossile présente sur le continent mais les ressources de celle-ci sont disséminées sur le territoire de manière disparate et inégale entre les différents pays. Elles sont évidemment épuisables et leurs extractions, en plus d'être extrêmement polluante, coutent de plus en plus chères.

Il faut donc se tourner vers des ressources inépuisables dont regorge l'Afrique : l'énergie éolienne, hydraulique et solaire. Là encore, les sources sont éparpillées sur le territoire africain. Certaines régions ont des gisements solaires plus importants que les autres³⁷. Ainsi toute la région du Sahara produit chaque jour entre 5 et 7 kWh/m². A titre d'exemple la Belgique a un potentiel solaire de 1kWh/m² lors des journées ensoleillées³⁸. Il existe donc un réel potentiel dans certaines régions précises.

6.4.1. Pourquoi l'énergie renouvelable en Afrique ?

Il existe plusieurs raisons de promouvoir l'énergie renouvelable sur le continent africain. Trois raisons nous semblent essentielles.

Tout d'abord, en se servant de l'énergie renouvelable et en utilisant ses propres ressources, l'Afrique ne sera plus dans l'obligation d'importer la majorité de l'énergie fossile qu'elle consomme. Elle ne sera plus dépendante des fluctuations et de la volatilité du marché de l'énergie. Elle pourra jouir d'une économie plus stable ce qui lui permettra une croissance plus saine.

³⁶ X, « L'Afrique et les énergies renouvelables: la voie vers la croissance durable », *International Renewable Energy Agency*, 2013

³⁷ Annexe : Carte répartition d'énergie en Afrique

³⁸ X, « Energie solaire : l'Afrique a perdu la bataille mais peut gagner la guerre ». *L'Afrique s'éveille*. 17 septembre 2010.

Ensuite, l'Afrique jouit d'un potentiel énergétique incroyable qu'il soit éolien ou solaire. Cependant son exploitation n'est qu'à ces balbutiements. En effet, plusieurs pays africains développent des politiques en matière d'énergie renouvelable grâce par exemple à des incitations fiscales comme au Ghana. Les opportunités pour les entrepreneurs sont donc nombreuses car la demande ne va faire que croître.

Enfin, il convient de parler des couts. L'IRENA a réalisé une comparaison entre un générateur diesel et un panneau solaire³⁹. Pour produire une énergie équivalente sur une période de vingt ans, l'énergie solaire est moins couteuse. Le seul inconvénient est que l'investissement de départ est plus important. Dans le cas du générateur, le cout direct est moins conséquent mais il est constant. Une autre inconnue dans le cas du générateur est le prix du carburant qui est fluctuant. La conclusion de cette rapide illustration est que sur le long terme, le solaire est bien moins couteux et finalement plus fiable.

6.4.2. Les obstacles

S'implanter ou vendre des produits sur le continent africain pour une entreprise européenne n'est pas sans difficultés.

Tout d'abord, certains pays sont dans une incertitude politique presque constante. Ce qui a évidemment des conséquences sur la politique menée par l'état au niveau de l'énergie. Il en résulte également une insécurité notamment due à de possibles conflits entre les opposants politiques. Ce qui peut pousser les expatriés à quitter le pays et y laisser leurs différents investissements comme ce fut le cas lors du printemps arabe en Egypte.

Ensuite, il y a un énorme problème de corruption qui est un frein à l'entrepreneuriat. En effet, selon le classement de l'ONG *Transparency International*, la plupart des pays où il y a un « sentiment » de corruption sont des pays africains, à titre d'exemple le Maroc obtient une note de 3.4/10 et se classe à la 85^{ème} place sur 178. La République Démocratique du Congo obtient une note de 2/10 et se classe à la 164^{ème} place sur 178. Tandis que la Belgique obtient une note de 7.1/10 et se classe 22^{ème} place⁴⁰.

Une autre difficulté est l'accès à l'information. En effet, dans certains cas, il est très difficile et parfois impossible d'identifier d'où vient une étude et de connaître l'organisme qui l'a publié. Ce problème récurrent ralentit les recherches, puisqu'il est

³⁹ INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (2013). « L'Afrique et les énergies renouvelable : la voie vers la croissance durable ». Disponible sur www.irena.org. (Consulté le 15/03/2014)

⁴⁰ Classement 2010 publié par l'ONG *Transparency International*.

nécessaire de croiser les informations. La récolte d'informations pertinentes en Afrique est donc difficile.

Enfin l'éloignement entre la Belgique et le continent africain peut poser des problèmes logistiques et engendrer des coûts supplémentaires. En effet, il y a des difficultés à traverser certains pays ou certaines régions en raison du manque d'infrastructure ou d'un paiement d'un droit de douane important.

6.4.3. Un choix pertinent

Il semble que l'Afrique va vers le développement d'une énergie durable sur son territoire. C'est ce qui lui permettra d'avoir un essor économique moins dépendant des énergies fossiles. Il s'agit pourtant d'un défi de taille dans certaines régions d'Afrique. Il y a dix ans, les habitants de ces régions regardaient les entrepreneurs qui posaient des panneaux solaires comme des sorciers car ils parvenaient à produire de l'électricité avec le soleil.

Malgré tout, l'Afrique a un potentiel incroyable et certains pays développent des projets autour de l'énergie renouvelable⁴¹. Pour réaliser l'ensemble de ces projets, il faut des entreprises capables de relever le défi et proposer des solutions qui répondent à la demande croissante du continent.

6.5. Analyse de différents pays africains

Tout d'abord, le continent africain fait 30 415 873 km² et contient 54 pays indépendants⁴². Pour étudier le continent, il a fallu faire des choix arbitraires pour rester le plus cohérent possible dans nos recherches, et se concentrer sur quelques pays cibles. Le but étant d'obtenir un échantillon du marché africain et d'en connaître les possibilités. Le premier critère établi (arbitrairement) est qu'au moins une des langues officielles soit le français. Le deuxième est qu'il faut au moins un pays d'Afrique centrale et/ou du Maghreb. Enfin, un critère auxiliaire est que le pays doit avoir un rapport privilégié avec la Belgique.

Nous avons retenu quatre pays du continent africain: la Côte d'Ivoire, le Burkina Faso, le Sénégal et le Maroc.

⁴¹Notamment le projet Desertec.

⁴² Informations disponibles sur <http://www.mem.gov.ma>.

Afin de mesurer le potentiel de ces quatre pays pour notre future organisation, nous avons décidé d'utiliser le modèle PESTEL. Les analyses PESTEL de ces quatre pays se trouvent en annexe⁴³.

Par ailleurs, nous avons réalisé un tableau comparatif reprenant quatre caractéristiques supplémentaires qui nous ont semblées pertinentes à analyser afin de choisir le pays qui présente le plus de potentiel pour l'implantation de notre projet.

	Stabilité politique	Economie	Croissance	PIB (m ^d USD)	Gouvernement
Sénégal	+	-	3,5%	14,16	-
Côte d'Ivoire	-	-	9,8%	24,68	+
Burkina Faso	0	-	9%	10,44	0
Maroc	+	+	2,7%	96,73	++

Tableau 3 : Tableau comparatif pour les quatre pays analysés

En ce qui concerne la croissance, nous nous sommes basés sur le taux de croissance économique en 2012⁴⁴. Le PIB de chaque pays est exprimé en milliard d'USD⁴⁵.

En ce qui concerne le gouvernement, nous avons tenu compte de trois facteurs :

- Initiative de politique d'investissement (entrepreneurial)
- Fiscalité
- Aides au renouvelable

6.5.1. Choix d'un pays : le Maroc

Sur base des quatre caractéristiques analysées auparavant et des analyses PESTEL, nous avons choisi un pays cible : le Maroc.

Pour synthétiser ce choix, nous avons décidé d'utiliser l'outil CAGE. Cet outil va nous permettre de mesurer la compatibilité entre notre entreprise et le Maroc. D'après Johnson, *«le modèle CAGE distingue la distance Culturelle, la distance Administrative, la distance Géographique et la distance Economique »*⁴⁶.

Les analyses précédentes nous ont permis de compléter l'analyse CAGE.

⁴³ Annexe : Analyse PESTEL Afrique

⁴⁴ Le taux de croissance 2012 est calculé à partir de l'année précédente. Les informations sur ces quatre pays se trouvent sur : http://www.statistiques-mondiales.com/burkina_faso.htm

⁴⁵ Informations disponibles sur <http://www.banquemondiale.org/>

⁴⁶ F. FRÉRY, G. JOHNSON, K. SCHOLES, R. WHITTINGTON, « La stratégie de prix ». *Stratégie*, 9ème éd., Paris, Pearson Education, 2011, p342

6.5.1.1. La distance culturelle

Le Maroc est un pays à majorité musulmane, il s'agit d'ailleurs de la religion d'Etat⁴⁷. Le pays prône un islam moderne et modéré, plus ouvert sur le monde occidental. Il y a plusieurs langues officielles au Maroc, dont le français, ce qui facilite les interactions avec le pays.

Le Maroc est un endroit d'échanges internationaux, notamment à cause de la venue de nombreuses sociétés occidentales. Celles-ci ne sont pas venues uniquement pour la main d'œuvre ouvrière bon marché, mais également pour les compétences en matière de services qu'offrent les marocains. Le Maroc compte de nombreux expatriés occidentaux qui sont, soit chefs d'entreprise, soit employés par une société internationale.

Il existe également un certain nombre d'associations de professionnels, des clusters ou des agences créées par le gouvernement qui ont pour but de promouvoir et d'être des acteurs en matière d'énergie renouvelable (Aderee, Ines, Enerplan, etc.)⁴⁸. L'ensemble de ces acteurs ne sont pas seulement actifs dans l'énergie solaire mais également dans l'énergie éolienne ou hydraulique. Cette véritable envie d'offrir une politique énergétique verte est un incontestable avantage pour notre entreprise ayant l'envie d'investir au Maroc.

6.5.1.2. La distance administrative et politique

Le Maroc est une monarchie constitutionnelle, tout comme la Belgique. Le chef de l'état est un roi. Le Maroc jouit d'une politique stable et démocratique.

Le Maroc bénéficie d'un statut avancé avec l'Union Européenne, ce qui signifierait à long terme de faire entrer le Maroc dans l'espace économique européen pour ainsi favoriser les libres échanges commerciaux⁴⁹.

En outre, il s'agit d'un des seuls pays du Maghreb à être aussi ouvert à l'énergie renouvelable. En effet, son ministère est très actif dans les politiques énergétiques. D'une part, celui-ci organise des salons internationaux qui traitent de l'énergie renouvelable et des efficacités énergétiques en général. D'autre part, le pays a une véritable conscience environnementale. En effet, le gouvernement marocain a mis en

⁴⁷ Art. 175 de la Constitution Marocaine.

⁴⁸ EnR (2013). *Partenaires*. Disponible sur <http://maroc.energie-ren.com/partenaires/partenaires>. (Consulté le 08/03/2014).

⁴⁹ Royaume du Maroc ministère des affaires étrangères et de la coopération, « Statut avancé », Disponible sur www.diplomatie.ma.

place un programme « initiative Maroc innovation »⁵⁰. L'un des objectifs est de développer et de stimuler des projets dans l'énergie renouvelable mais surtout dans l'exploitation du secteur solaire. Le programme PROMASOL est un exemple concret, il vise l'installation de 440 000 m² de capteurs solaires thermiques en 2012, et 1 700 000 m² en 2020. Pour ce faire, il existe des fonds d'investissement qui supportent divers projets afin de développer l'économie au Maroc.

6.5.1.3. La distance géographique

La superficie totale du Maroc (n'incluant pas le Sahara occidental) est de 446 55 km². La distance géographique entre Bruxelles et Casablanca est de 2151 km.

Le transport aérien depuis Bruxelles vers le Maroc est sûr.

Le Maroc profite de sa façade maritime double. En effet, le plus grand port de commerce se situe entre Tanger et l'enclave espagnole de Ceuta. Le port est donc à seulement 15 km de l'Espagne continentale. Il est le plus grand port africain en termes de transport. Le transport par voie maritime est réduit à la traversée d'Espagne ou de France vers le Maroc et inversement.

Le réseau routier au Maroc est considéré comme un des meilleurs d'Afrique. Cependant, le taux d'accident est élevé.

En ce qui concerne le transport ferroviaire, la compagnie ferroviaire nationale ne dessert pas toutes les villes du Maroc. Pour ces villes non desservies, différentes possibilités s'offrent aux voyageurs comme le bus, les autocars, les taxis mais ces derniers ne sont pas de très bonne qualité⁵¹.

6.5.1.4. La distance économique

Le Maroc est un pays dit émergent, c'est-à-dire qu'il connaît une forte croissance mais que le PIB par habitant est inférieur à celui des pays développés.

Bien que le Maroc a le taux de croissance économique le plus faible par rapport aux trois autres pays analysés (Côte d'Ivoire, Sénégal, Burkina Faso), il vit actuellement un véritable boom économique et industriel, entraînant un besoin croissant en énergie.

⁵⁰ Informations disponibles <http://www.mcinet.gov.ma/>

⁵¹ SPF affaires étrangères (2012). « Conseil aux voyageurs Maroc ». Disponible sur http://diplomatie.belgium.be/fr/Services/voyager_a_letranger/conseils_par_destination/afrique/maroc/r_a_marokko.jsp?referer=tcn:313-75105-64. (Consulté le 05/03/2014).

Deux solutions s'offrent à lui : l'utilisation des énergies fossiles ou la combinaison des énergies fossiles et renouvelables. En 2013, le pays veut investir jusqu'à 9 milliards de dollars à Ouarzazate pour son plan solaire⁵².

En outre, le pays s'est fixé un objectif pour le cap 2020 : parvenir à ce que 47% de l'énergie marocaine provienne de l'énergie renouvelable⁵³. Tendre vers ce cap est important pour le Royaume du Maroc car il est actuellement trop dépendant des fluctuations des énergies fossiles. Ce qui l'oblige à faire des économies en matière d'énergie⁵⁴.

Le cout salarial est nettement plus bas qu'en Europe, il tournerait autour des 300 dollars mensuellement⁵⁵, ce qui est un gros avantage pour notre entreprise. Cependant, il ne faut pas perdre de vue le cout salarial unitaire. En effet, si un ouvrier qualifié en Europe effectue un travail en deux heures tandis qu'au Maroc un ouvrier en mettra douze heures, il faut vérifier si la productivité n'est pas affaiblie. C'est pourquoi nous voulons mettre en place un système de formation d'ouvriers sur place, Nous vous renvoyons à la section Gestion des ressources humaines.

6.5.1.5. La dynamique marocaine

Il y a énormément de projets et d'investissements dans les énergies renouvelables, et particulièrement dans l'énergie solaire au Maroc. Le projet marocain de l'énergie solaire reprend plusieurs projets (la centrale thermo-solaire à cycle combiné intégré d'Aïn Béni Mathar, le complexe solaire « Noor », le parc de Ouarzazate etc.) dans le but de faire face à une demande énergétique en croissance et au réchauffement climatique⁵⁶. Comme expliqué dans la section « Choix d'un pays : le Maroc », le Royaume marocain voudrait couvrir 47% de ses besoins énergétiques en énergies renouvelables d'ici 2020.

En outre, d'autres projets ont compris le potentiel du Maroc, notamment le projet Desertec dont l'objectif est d'exploiter les gisements solaires du désert afin de pouvoir un jour alimenter le Maroc et l'Europe en énergie verte.

⁵² A. MIGNOT, « Ouarzazate, capitale du Plan solaire marocain », *La tribune*, 2 Aout 2013.

⁵³ Map (2013). « Les objectifs du Maroc très ambitieux ». Disponible sur http://www.lematin.ma/express/energies-renouvelables_les-objectifs-du-maroc-tres-ambitieux/189919.html. (Consulté le 05/03/2014) et Agence Ecofin (2012). « Le Maroc veut investir jusqu'à 9 milliards \$ dans le solaire ». Disponible sur <http://www.agenceecofin.com/>

⁵⁴ J. CHAUDIER. « Le Maroc prévoit de faire 12% d'économie d'énergie d'ici 2020 », *Econostrum*, 3 décembre 2013.

⁵⁵ Informations disponibles sur <http://www.invest.gov.ma/>

⁵⁶ Map (2014). « Le Maroc en passe de devenir un acteur de référence ». Disponible sur http://www.lematin.ma/express/2014/energie-solaire_-le-maroc-en-passe-de-devenir-un-acteur-de-reference/198792.html. (Consulté le 24/03/14).

Des entreprises de panneaux photovoltaïques se sont également implantées au Maroc telles que Tenesol, société française à Rabbat et Isofoton, société espagnole à Casablanca. GDF Suez a déclaré la construction du parc éolien de Tarfaya d'une puissance de 300MW pour fin 2014⁵⁷. Quant à EDF Energies Nouvelles, le projet éolien de Taza de 150MW⁵⁸.

⁵⁷GDF Suez (2013). « GDF SUEZ va construire et exploiter le plus grand par éolien d'Afrique ». Disponible sur <http://www.gdfsuez.com/journalistes/communiqués-de-presse/gdf-suez-va-construire-et-exploiter-le-plus-grand-parc-eolien-dafrique/>. (Consulté le 24/03/14).

⁵⁸EDF Energies Nouvelles (2014). « EDF Energies Nouvelles prend position sur le marché marocain ». Disponible sur <http://www.edf-energies-nouvelles.com/communiqués-de-presse/edf-energies-nouvelles-prend-position-sur-le-marche-marocain/>. (Consulté le 24/03/14).

7. Analyse du microenvironnement

7.1. Cible

Nous ne nous tournons pas vers les particuliers pour commencer notre activité mais vers des industries nécessitant d'un besoin important en eau chaude et un besoin en électricité.

L'objectif est de commencer à grande échelle afin de minimiser les coûts. Idéalement, notre cible doit se rapprocher de la proportion d'énergie électrique et thermique que propose notre solution solaire (10% et 90%). Les besoins en énergie thermique des industries sont bien souvent liés à la consommation d'électricité (machines, infrastructures, etc.).

En d'autres termes, nous sommes à la recherche d'industries ayant des besoins importants en chaleur. En outre, ces clients doivent avoir un espace au sol important et à proximité de leur processus industriel pour que l'on puisse facilement installer nos concentrateurs solaires.

7.2. Cœur de cible

Le profil des industries faisant partie de notre cœur de cible se rapproche des secteurs qui consomment une part importante de chaleur dans leurs processus industriels au **Maroc**. Leur objectif principal est de réduire le coût de leur facture énergétique. Ils sont également soucieux de s'engager écologiquement pour la planète (énergie renouvelable), ainsi que d'acquérir un produit innovant.

Le tableau ci-dessous présente la consommation d'énergie finale par secteur d'industrie en 1000 Tep (Tonne équivalent pétrole) dans un scénario économique « Bas Maîtrise d'énergie »⁵⁹. Les symboles AMC + BTP représentent les matériaux de construction, bâtiments et travaux publics. Le symbole CP représente Chimique et Para-chimique. Enfin, les lettres IMME représentent Industrie Mécaniques, Métalliques et Electroniques.

Industrie	Année			
	2000	2012	2020	2030
Sucre	170	172	176	232
Ciment	486	530	531	687
Papier	38	30	31	37
Pâte à papier	28	29	30	32
Phosphates	228	242	250	346
Acide et engrais	51	62	68	96
Agro-Alimentaire	7	15	15	18
Textile et Cuir	74	86	108	140
AMC + BTB	230	257	257	337
CP	12	14	15	23
IMME	60	79	83	146

Tableau 4 : Consommation finale d'énergie par secteur industriel en 1000 Tep

Outre l'évolution des besoins en énergie, il est également important de tout d'abord connaître la répartition entre besoin en électricité et besoin en énergie thermique. Par ailleurs, il est intéressant de connaître les niveaux de température requis pour ces processus industriels.

⁵⁹ P. PAPILLON (2012). « Plateforme Technologique de l'AIE: Atelier Solaire thermique ». Disponible sur www.ines.org. (Consulté le 25/03/14).

Il s'avère que les secteurs **de l'agro-alimentaire et du textile** ont des besoins en énergie thermique croissants avec des niveaux de température pouvant convenir à notre solution solaire. Les industries d'acide et engrais ainsi que de phosphate ont également une demande en énergie thermique intéressante, mais leurs évolutions sont moins importantes.

Le tableau ci-dessous représente les niveaux de températures requis pour l'industrie du textile et de l'agro-alimentaire, secteurs qui nous semblent opportuns⁶⁰.

Secteur industriel	Processus	Niveau de température (°C)
Agro-alimentaire	Séchage	30 - 90
	Lavage	40 - 80
	Pasteurisation	80 - 110
	Ebullition	95 - 105
	Stérilisation	140 - 150
	Traitement thermique	40 - 60
Industrie textile	Lavage	40 - 80
	Blanchiment	60 - 100
	Teinture	100 - 160

Tableau 5 : Niveau de température par processus (°C)

Notre technologie peut fournir de la chaleur à relativement haute température, cependant, plus la température de l'eau est chaude, plus la production d'électricité diminue. En effet, le rendement électrique des générateurs thermoélectriques dépend du carré de la différence de température.

Idéalement, afin d'optimiser les rendements, notre solution solaire est intégrée dans le processus industriel tout en essayant de limiter au maximum le niveau de température, comme par exemple pour du préchauffage. Dans la pratique, la solution solaire est dimensionnée pour s'adapter au processus industriel.

Nous visons dans un premier temps le secteur du textile, car la demande en énergie est plus importante que pour l'agroalimentaire, et la croissance espérée de ce secteur est aussi plus forte.

⁶⁰ *Op. cit.*

Le graphique ci-dessous présente l'évolution du nombre de GWh consommés dans le secteur du textile et du cuir au Maroc.

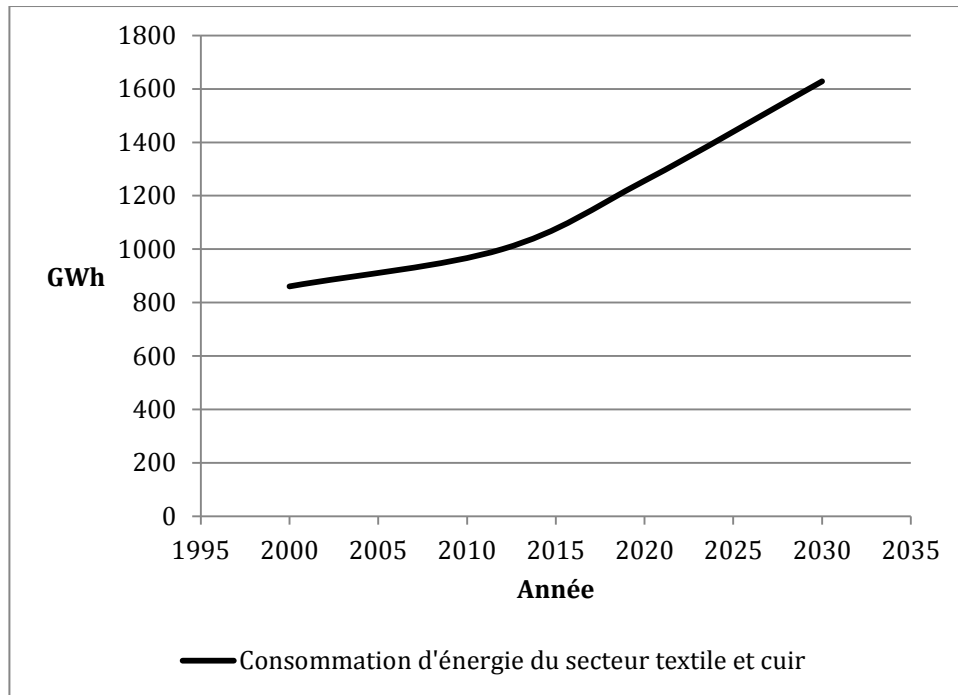


Figure 5 - Consommation d'énergie [GWh] dans le secteur du textile et du cuir au Maroc

7.3. Marché

Le Maroc a de nouveaux projets économiques, ce qui veut dire que la demande en énergie va augmenter. Pour ce faire, et pour pouvoir développer à bien ces projets, le Maroc a mis en place une stratégie énergétique dite « Stratégie énergétique Marocaine »⁶¹.

Comme expliqué en (section Analyse SWOT à la page 51) le Maroc est très dépendant de ses importations énergétiques. C'est pourquoi, il est indispensable pour le pays de tirer profit de ses ressources en énergie solaire et éolienne.

Le marché est très attractif « *compte tenu des avancées législatives et économiques favorables aux investissements en matière énergétique* ».

La législation va offrir des incitants qui vont permettre de sécuriser le financement du projet :

- *Le mécanisme de la cession de créances (fortement inspirée par la cession Dailly de droit français), le nantissement de comptes bancaires, le nantissement d'actions, ainsi que le transfert des indemnités de polices d'assurance par cession de créances ou par délégation.*
- *Les sûretés immobilières, notamment les hypothèques (dans la mesure où un droit réel est consenti sur le site concerné), le nantissement d'outillage et du matériel d'équipement (garantissant prioritairement les turbines) ainsi qu'un nantissement sur le fonds de commerce*⁶².

Dans ce plan stratégique, ils parlent principalement de créer de grosses centrales de production électriques.

A titre d'exemple, le Projet Ouarzazate consiste en la construction d'une centrale thermodynamique (production d'électricité)⁶³ « *d'une capacité de 160 MW produisant de l'énergie solaire concentrée (CSP), qui devrait conduire à une baisse d'émissions de CO2 équivalente à 240.000 tonnes par an* »⁶⁴.

⁶¹B. ANDRIANI, M. BARGES, A. BENNIS, P. LIGNIÈRES, G. MOKHTARI. (2013). « L'énergie au Royaume du Maroc: Stratégie énergétique et développements récents ». Disponible sur <http://www.linklaters.com> (Consulté le 05/04/2014).

⁶² *Op.cit* p7.

⁶³ Plus de détails dans la partie technique: exploitation de l'énergie solaire, les centrales thermodynamiques.

⁶⁴ *Op.cit* p4.

Le marché de l'énergie thermique y est encore très peu développé, ce qui est une réelle opportunité pour notre solution solaire *Hybrid Power*. Par conséquent, nous voulons créer des centrales d'énergie thermique d'une capacité d'environ 120kW (environ mille fois plus petites que l'exemple donné ci-dessus) à destination de plus petites entreprises.

7.4. Etude de cas

Dans le chapitre sur l'Etude de cas, nous analyserons les besoins thermiques de l'entreprise textile Blancatex, située à Casablanca (Maroc).

Grâce aux informations fournies par l'entreprise sur des débits d'eau chaude utilisés pour ces machines, nous allons calculer les besoins de l'entreprise en énergie thermique.

Néanmoins, il existe des contraintes comme son emplacement géographique. En effet, la fabrique textile se situe en plein centre-ville et l'espace est limité ce qui nous contraint à utiliser l'espace disponible sur le toit.

Nous tenterons dès lors d'optimiser notre solution solaire en fonction de ces différentes contraintes.

7.5. Concurrence

Tout d'abord, l'attractivité des marchés a été analysée dans la partie Analyse du macroenvironnement via les modèles PESTEL et CAGE. Nous avons décidé de choisir le Maroc pour de nombreuses raisons. Celles-ci sont expliquées dans le chapitre Analyse de différents pays africains.

La concurrence est un second point à analyser. Nos concurrents sont toutes les sources d'énergie qui sont directement ou indirectement substituables à notre solution solaire hybride. Pour ce faire, nous avons distingué la concurrence directe de la concurrence indirecte.

7.5.1. Concurrence directe

D'après Fréry, on peut définir les *concurrents directs* comme étant « *les organisations qui proposent des produits ou services semblables à de même clients* »⁶⁵.

Si nous adaptons la définition à notre entreprise, nos concurrents directs sont ceux qui proposent un produit similaire, c'est-à-dire une solution qui capte les rayons du soleil. Ils sont également ceux qui répondent aux besoins des mêmes clients, c'est-à-dire des clients désirant de l'énergie thermique et/ou électrique.

Bien qu'il existe de nombreuses solutions solaires, nous allons nous comparer aux technologies les plus matures qui sont actuellement sur le marché : les panneaux solaires photovoltaïques, thermiques et hybrides.

7.5.1.1. Le photovoltaïque⁶⁶

Le photovoltaïque est une technologie qui capte l'énergie solaire pour créer de l'énergie électrique.

L'importation de cellules photovoltaïques a diminué au Maroc depuis 2010. Les prix ont donc fortement baissé. Le marché marocain du photovoltaïque est aujourd'hui sinistré et la réglementation marocaine n'arrange pas les choses. L'article 5 spécifie que « *les installations de production d'énergie électrique à partir de sources d'énergies renouvelables ne peuvent être connectées qu'au réseau électrique national* ».

⁶⁵ F. FRÉRY, G. JOHNSON, K. SCHOLES, R. WHITTINGTON, « La stratégie de prix ». *Stratégie*, 9ème éd., Paris, Pearson Education, 2011, p72

⁶⁶ A.S MARTIN (2013). « Photovoltaïque: le marché marocain en perte de vitesse depuis 2010 ». Disponible sur <http://www.lavieeco.com/news/economie/photovoltaïque-le-marche-marocain-en-perte-de-vitesse-depuis-2010-24279.html>. (Consulté le 10/04/2014).

*de moyenne tension, haute tension ou très haute tension*⁶⁷ ». Ce qui ne convient pas à une énergie solaire qui est instable.

Très peu d'entreprises sérieuses opèrent dans le photovoltaïque au Maroc. En outre, il y a énormément de très petites entreprises et même des électriciens qui se sont spécialisés dans l'installation de panneaux. Ce ne sont donc pas toujours des personnes très compétentes et fiables. Pour notre entreprise, c'est une bonne opportunité de s'implanter au Maroc et de proposer un service de qualité tant dans l'installation, que dans la maintenance et le service après-vente.

En ce qui concerne les couts, une installation de moins de 100 kWh aura un cout d'approximativement 20 000 DH/kWh et 15 000DH/kWh pour une installation de plus de 100 kWh.

Les gros acteurs du marché photovoltaïque sont peu nombreux au Maroc. AS solar Maroc et Atlas solaire semblent être les deux plus grosses entreprises de panneaux solaires photovoltaïques au Maroc.

7.5.1.2. Les panneaux solaires thermiques

Le thermique est une technologie qui capte l'énergie solaire pour produire de la chaleur.

Le marché du thermique au Maroc se porte mieux que le photovoltaïque. Le cout d'une installation thermique est moindre qu'une installation photovoltaïque.

Atlas solaire est une grosse entreprise de panneaux solaires photovoltaïques au Maroc mais aussi de panneaux thermiques.

7.5.1.3. Les panneaux solaires hybrides

Ils sont nos concurrents les plus directs. Ces panneaux sont constitués de capteurs photovoltaïques et thermiques qui vont capter les rayons du soleil et produire à la fois de l'eau chaude (thermique) et de l'électricité (photovoltaïque). L'idée de cette technologie part d'un constat simple : les panneaux photovoltaïques chauffent de trop, ce qui diminue leur rendement. Pour ce faire, la technologie hybride va récupérer cette énergie inutilisée (produite par l'échauffement des cellules photovoltaïques) afin de chauffer de l'eau. Ainsi, le rendement de la production électrique sera plus élevé

⁶⁷ Loi n° 13-09 relative aux énergies renouvelables, promulguée par Dahir n° 1-10-16 du 26 Safar 1431, le 11 février 2010, *Bulletin officiel* n° 5822, du 1er rabii ii 1431 (18 mars 2010). (Maroc)

grâce au refroidissement des cellules. Au final, ce sont des panneaux solaires photovoltaïques possédant un « bonus » comparés aux panneaux photovoltaïques normaux qui perdent cette énergie thermique.

En outre, l'avantage de ces panneaux est l'économie d'espace. En effet, ils prennent moins de place que l'addition de panneaux solaires thermiques et photovoltaïques.

En ce qui concerne le prix des panneaux solaires hybrides, il est plus élevé que celui des panneaux solaires classiques⁶⁸ étant donné que la technologie est récente (coût du matériel) cependant l'installation est moins chère par rapport à des systèmes photovoltaïques et thermiques séparés étant donné qu'on installe deux énergies en une. De plus, l'étude n'est faite que pour un système ce qui réduit le temps de travail associé⁶⁹.

Il n'existe pas d'entreprises de panneaux solaires hybrides au Maroc. Néanmoins, il en existe sur d'autres marchés. Ces acteurs ne sont pas à négliger. En effet, ils pourraient vendre leurs solutions au Maroc ou même y implanter leurs entreprises.

Les acteurs français sont nombreux et à la base de cette innovation. En voici quelques exemples : Solar 2G avec son panneau DualSun⁷⁰, Atacama Solar avec son kit solaire SILLIA SUNHYBRID (cette entreprise distribue en France et en Europe)⁷¹, ABCD Intl avec ses panneaux hybrides photovoltaïques/thermiques⁷², Cogen'air avec ses panneaux solaires hybrides⁷³.

D'autres acteurs existent également en dehors de la France: la start-up israélienne Zenith Solar avec son concentrateur solaire hybride⁷⁴, la société turque Solimpeks avec son panneau solaire hybride Powervolt⁷⁵ (elle exporte au Maroc), la société canadienne Conserva Engineering avec son Solarduct PV/T.

⁶⁸ Deux sortes de panneaux solaires : panneaux solaires photovoltaïques et panneaux solaires thermiques.

⁶⁹ Informations disponibles sur <http://www.solaire-guide.fr/02/panneaux-solaires-hybrides/>

⁷⁰ DualSun, in <http://dualsun.fr/produit/panneau-solaire-photovoltaïque-thermique/>

⁷¹ Atacama Solar, in <http://www.atacama-solar.com/fr/sillia/70-kit-solaire-sillia-sunhybrid.html>

⁷² Informations disponibles sur http://www.greenvivo.com/fr/fournisseur/abcd-international_582

⁷³ Informations disponibles sur <http://www.base-innovation.com/index.php/produits-et-services/solaire-hybride-pvt-cogenair>

⁷⁴ Zenith Solar, in <http://www.zenithsolar.com/solar-engineering.aspx>

⁷⁵ Solimpeks, in <http://www.solimpeks.com/business-locations/>

7.5.1.4. Les autres solutions solaires

Actuellement, le développement de nouvelles solutions solaires est en plein essor. Notamment des solutions se basant sur les technologies de la concentration solaire thermodynamique. En réalité, notre solution solaire s'insère dans cette mouvance, et il est certain que de nouveaux concurrents rentreront sur le marché avec des solutions solaires concentrées.

7.5.1.5. Les panneaux solaires hybrides versus Hybrid Power

Afin de bien comprendre comment nous nous positionnons par rapport à notre concurrent le plus direct (les panneaux solaires hybrides), voici un tableau reprenant les caractéristiques principales des deux technologies.

	Panneaux solaires hybrides	Hybrid Power
Energie	Production d'électricité et chauffage	
Technologie	Capteurs photovoltaïques et thermiques (PV/T)	Thermoélectricité
Design	Panneaux solaires	Système optique de concentration solaire
Chaleur	Eau chaude à basse température – production d'eau chaude moins importante par an	Eau chaude à basse ou haute température – production d'eau chaude plus importante par an
Rendement Electrique	20 %	5 %

Tableau 6 : tableau comparatif panneaux solaires hybrides et Hybrid Power

7.5.1.6. Comparaison panneaux photovoltaïques vs panneaux solaires hybrides vs Hybrid Power

Comme vous pouvez le constater sur la Figure 6, notre solution produit approximativement un quart d'électricité en moins que les panneaux photovoltaïques standard et les panneaux solaires hybrides. Cependant, nous produisons de l'eau chaude tandis que les panneaux photovoltaïques n'en produisent pas. Nous produisons approximativement 35% d'eau chaude en plus que les panneaux solaires hybrides. Par ailleurs, notre solution solaire est capable de produire de l'eau chaude à plus haute température que ces derniers.

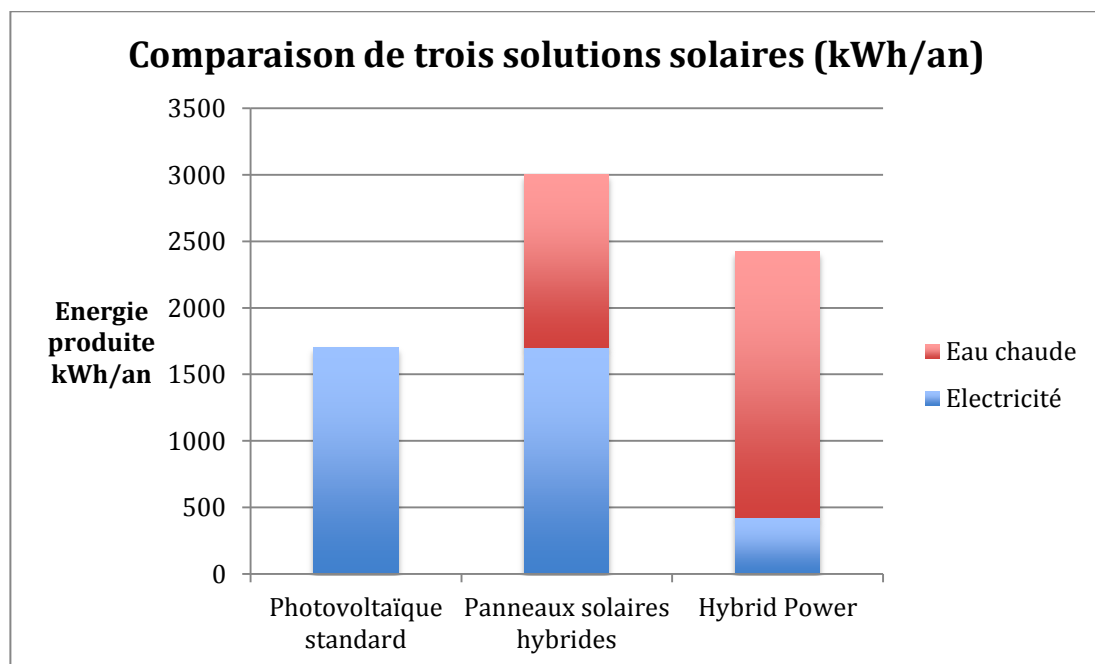


Figure 6 : Comparaison de l'énergie produite par trois solutions solaires (kWh/an)

7.5.1.7. Analyse des caractéristiques des concurrents

L'analyse des principales sociétés concurrentes⁷⁶, point important de l'analyse du microenvironnement, est effectuée ci-dessous au Tableau 7 page 44 **Error! Reference source not found.** Ces entreprises sont comparées à notre solution solaire hybride sur différents points : leurs tailles, les produits qu'ils proposent ainsi que leurs points forts et points faibles.

Tout d'abord, nous faisons l'hypothèse que ce descriptif de concurrents ainsi que ce tableau récapitulatif reflètent l'état de ces technologies solaires à long terme.

	AS solar Maroc	Solimpeks	Solar 2G	Hybrid Power
Produits	Panneaux photovoltaïques et thermiques	Panneaux solaires hybrides, photovoltaïques et thermiques	Panneaux solaires hybrides	Concentrateur solaire hybride
Date de création	2004	1973	2010	/
Pays d'origine	Maroc	Turquie	France	Belgique
Pays visés	Maroc	Maroc et autres	France	Maroc
Personnel	Non connu	>150	7 (<20)	3 (<20)
Chiffres d'affaires	Non connu	Non connu	Non connu	
Technologie	Capteurs PV/T	Capteurs PV/T	Capteurs PV/T	Thermoélectricité
Etendue de la gamme	Large gamme	Large gamme	Réduite	Produit adapté
Prix	€€€	€€	€€	€
Clientèle visée	Particuliers, professionnels et industries	Particuliers, professionnels et industries	Particuliers et professionnels	Industries
Canaux de distribution	Internet et représentants commerciaux	Internet et représentants commerciaux	Internet et représentants commerciaux	Internet et représentants commerciaux
Points forts	/	Economie d'espace et un bilan énergétique élevé	Economie d'espace et un bilan énergétique élevé	Adaptation aux besoins industriels. Bilan énergétique élevé
Points faibles	Cout de l'installation et besoin d'espace	Production non égale d'électricité et eau chaude	Production non égale d'électricité et eau chaude	Encombrement en hauteur (concentrateur et tracker) et en surface
Facteur de différenciation	/	Hybride	Hybride	Hybride et produit adapté

Tableau 7 : Analyse des concurrents

⁷⁶ G.BARNOUX, *L'audit Marketing : analyse des risques marketing et démarches d'audit*, Paris, McGraw-Hill, 1990, p. 36.

*AS Solar Maroc*⁷⁷

Cette entreprise marocaine propose des panneaux photovoltaïques et thermiques. Elle a été créée en 2004. Elle vend ses produits au Maroc. D'un point de vue purement énergétique, à terme, le prix de ces derniers sera plus élevé que ses trois sociétés concurrentes. En effet, l'installation d'un panneau thermique et d'un panneau photovoltaïque aura un coût d'installation plus élevé que la solution « 2 en 1 » que proposent les solutions hybrides et notre solution Hybrid Power.

Aujourd'hui, les points forts de ces panneaux sont des rendements meilleurs tant en électricité qu'en chauffage par rapport aux solutions hybrides. Sur le long terme, ces panneaux n'auront plus vraiment d'avantages. En effet, les solutions hybrides seront matures et auront un meilleur rendement. Cependant, les panneaux solaires photovoltaïques seront toujours d'actualité dans certaines applications où seule l'électricité est nécessaire, malgré un bilan énergétique global plus faible que leur concurrent hybride.

*Solimpeks*⁷⁸

Cette entreprise turque propose des panneaux solaires hybrides, photovoltaïques et thermiques. Elle a été créée en 1973 et est leader en Turquie. Elle exporte dans plus de 70 pays, dont le Maroc (Solimpeks Africa existe aussi). Elle dispose de plus de 150 membres dans ses entreprises en Turquie, Allemagne et Espagne.

Le coût de l'installation d'un panneau hybride est moins important que l'installation d'un panneau photovoltaïque et thermique séparé. A terme, quand la technologie sera mature, cette dernière proposera des rendements plus élevés comparés aux panneaux solaires thermiques et photovoltaïques pris séparément.

Ses points forts sont donc l'économie d'espace, la récupération de chaleur, le coût de l'installation (2 en 1) et surtout un bilan énergétique (kWh produits) plus élevé que les solutions d'énergie solaire présentes sur le marché⁷⁹.

Son point faible est la proportion non égale de production d'électricité et eau chaude.

⁷⁷ AS Solar Maroc, in <http://www.as-maroc.com/fr/>

⁷⁸ Solimpeks, in <http://www.solimpeks.com>

⁷⁹ Plein Soleil (2014). «Larivière: Partenariat avec Sonnenkraft et Dualsun pour la distribution de solutions solaires thermiques et hybrides». Disponible sur <http://www.plein-soleil.info/actualites/lariviere-partenariat-avec-sonnenkraft-et-dualsun-pour-la-distribution-de-solutions-solaires-thermiques-et-hybrides/>. (Consulté le 05/04/2014).

Solar 2G⁸⁰

Solar 2G est une entreprise française créée en 2014. Cette dernière propose un panneau solaire hybride nommé «DualSun».

Comme pour l'entreprise Solimpeks (expliqué ci-dessus), ses points forts et ses points faibles sont similaires.

Son bilan énergétique (kWh produits) est plus élevé que les solutions d'énergie solaire présentes sur le marché. En outre, Solar 2G propose un logiciel de simulation énergétique avec son panneau solaire hybride.

Hybrid Power

Les points forts de ce système résident tout d'abord dans la production d'une grande quantité d'eau chaude et dans la température de celle-ci qui peut monter plus haut que des panneaux solaires thermiques. Cela permet donc de s'adapter aux exigences d'industriels qui ont des grands besoins en énergie. Notre concentrateur produit également de l'électricité mais en plus petite quantité.

A terme, le bilan énergétique c'est à dire le rendement (kWh/an) sera sans doute plus bas que les panneaux hybrides (PV/T), mais plus haut que les panneaux solaires thermiques et photovoltaïques pris séparément.

Cependant, notre solution sera moins chère (€/kWh) que les panneaux hybrides grâce à l'utilisation de composants thermoélectriques peu coûteux (même si le système de concentration rajoute des coûts considérables). Elle sera également moins chère que les panneaux solaires thermiques et photovoltaïques pris séparément grâce à un coût d'installation plus bas (système 2 en 1). A terme, nous pensons donc pouvoir nous démarquer par rapport à ces autres technologies.

Nos points faibles sont l'utilisation d'un tracker et d'un concentrateur qui rend la solution solaire très peu esthétique et encombrante. En outre, nous avons besoin de beaucoup de place au sol afin de mettre en place notre dispositif et pouvoir y accéder aisément lors des maintenances.

⁸⁰ Solar 2G, in <http://dualsun.fr>

7.5.2. Concurrence indirecte

Les concurrents indirects sont les organisations qui proposent des produits ou services différents mais qui répondent aux mêmes besoins. Si nous adaptons la définition à notre entreprise, nos concurrents indirects sont les technologies qui n'utilisent pas les rayons du soleil pour créer de l'énergie. Néanmoins elles répondent au même besoin, celui de créer de l'énergie.

7.5.2.1. Les énergies non renouvelables

Les énergies non renouvelables sont des ressources limitées. Elles seront un jour épuisées et elles sont responsables des gaz à effet de serre et du réchauffement climatique par combustion polluante. On peut les classer en deux parties : tout d'abord les énergies fossiles avec le charbon, le gaz, le pétrole, et ensuite l'énergie nucléaire issue de la fission nucléaire.

- Les énergies renouvelables à l'exception de l'énergie solaire

Ces énergies renouvelables sont représentées par :

L'énergie éolienne est l'exploitation du vent pour en faire de l'énergie électrique. Les éoliennes peuvent être installées sur terre ou en mer.

L'énergie hydraulique est l'exploitation de l'énergie produite par des mouvements d'eau. Cette énergie est transformée en énergie mécanique ou électrique selon les technologies (roues à aubes ou turbines et générateurs).

L'énergie géothermique est l'exploitation de l'énergie thermique issue de la terre.

L'énergie marine est l'exploitation des vagues, des marées et des gradients de températures entre les eaux surfaces et les eaux profondes. Elle produit de l'énergie électrique ainsi que thermique.

La biomasse est l'exploitation de l'énergie contenue dans les matières organiques et les plantes afin de produire de l'énergie thermique et électrique

Sources d'énergie	Exploitation	Energie produite
Energie éolienne	Vent	Energie électrique
Energie hydraulique	Mouvements de l'eau	Energie mécanique et électrique
Energie géothermique	Terre	Energie thermique (eau chaude ou vapeur)
Energie marine	Océans, vagues, marées, température	Energie thermique et électrique
Biomasse	Plantes et matières organiques	Energie thermique et électrique

Tableau 8 : Concurrence indirecte : les énergies renouvelables

7.5.3. Conclusion

7.5.3.1. First mover advantage

Sur le marché marocain, nous sommes la première entreprise de concentrateurs solaires hybrides. Nous avons donc l'avantage du premier entrant (plus communément appelé le *first mover advantage*).

D'après Fréry, « *L'avantage au premier entrant donne au concurrent qui est le premier à proposer une nouvelle offre un avantage sur ceux qui le suivent* »⁸¹.

Cependant, nous sommes bien conscients que cet avantage sera temporaire. Afin de ne pas se faire dépasser par la concurrence, nous jouons sur un argument crucial, celui du coût de transfert des acheteurs. En effet, notre objectif est de verrouiller le marché en implémentant notre concentrateur solaire hybride au processus industriel de l'entreprise. Celle-ci s'engage donc à s'investir sur le long terme. Le coût de désinstallation sera élevé dans le cas où elle veut changer de fournisseur d'énergie.

Etant donné notre stratégie de prix (Cf. : Chapitre 10 Stratégie page 57) nous sacrifierons notre marge pour accélérer la croissance de nos ventes.

⁸¹ F. FRÉRY, G. JOHNSON, K. SCHOLES, R. WHITTINGTON, « La stratégie de prix ». *Stratégique*, 9ème éd., Paris, Pearson Education, 2011, p377

7.6. Fournisseurs

Afin de réaliser nos concentrateurs solaires, nous commanderons une partie des pièces chez des fournisseurs. Le choix d'un fournisseur est un critère essentiel. En effet, il doit être possible de recevoir les différents éléments sur place dans le but d'assembler ces dernières directement sur le lieu du chantier.

Le but est donc de travailler avec un maximum de fournisseurs locaux. Nous voulons aussi choisir nos fournisseurs sur d'autres critères notamment sur la fiabilité de leurs chaînes de distribution ou encore sur leur politique R.S.E., nous voulons avoir des fournisseurs de valeurs

Nous vous renvoyons à la section « Commande et usinage des pièces » du plan de plan de production.

7.7. Distributeurs

Nos ventes se feront principalement par le biais de nos agents commerciaux.

Cependant, notre futur client devra se rendre sur notre site internet pour établir un premier lien avec notre entreprise. Certaines informations vont être demandées au client potentiel afin de pouvoir réaliser une approximation de l'économie réalisée si ce dernier fait appel à notre concentrateur solaire hybride.

Nous vous renvoyons à la section « Politique de distribution » au sien du plan marketing.

8. Analyse SWOT

Nous avons analysé aux chapitres précédents l'environnement et la concurrence. Nous pouvons maintenant mettre en exergue les opportunités et les menaces ainsi que les forces et les faiblesses propres à notre entreprise. Ces différents aspects sont illustrés au Tableau 9 Résumé de l'analyse SWOT.

8.1. Analyse de la compétitivité

Notre solution Hybrid Power est une réelle force pour notre société dans la mesure où elle est unique et innovante. Elle produit à la fois de l'électricité et de l'énergie thermique (système « 2 en 1 »). En outre, notre technologie peut disposer d'un brevet qui réduira la possibilité de copie à court terme des concurrents.

Les matériaux utilisés sont très peu onéreux, contrairement aux composants des panneaux photovoltaïques. De plus, ces derniers sont très robustes, ce qui rend la technologie fiable. Ce qui fait également la force de notre concentrateur solaire est qu'il ne dépend pas du réseau électrique comparé aux autres solutions solaires concentrées utilisant un tracker. En effet, la production d'électricité par notre solution peut servir à alimenter les tracker solaire.

Du côté des faiblesses, notre solution est dépendante du soleil. L'énergie solaire est présente par intermittence. Nos panneaux ne produisent ni chaleur ni électricité pendant la nuit sauf si nous pensons à un système de stockage d'eau chaude, mais ce système serait fort onéreux.

Nous dépendons également du ratio précis d'énergie que notre concentrateur solaire fournit : une production de 90% d'eau chaude et 10% électricité. Notre cible doit donc répondre à un grand besoin en énergie thermique.

Une autre faiblesse de l'entreprise pourrait être le manque d'expérience de notre équipe composée d'étudiants.

Notre technologie non mature est également une réelle faiblesse aujourd'hui. En effet, il existe déjà des technologies matures sur le marché disposant de bons rendements.

Enfin, nous démarrons à grande échelle en ciblant les industries ce qui nous demande d'énormes investissements.

8.2. Analyse de l'attractivité

Tout d'abord, le Maroc est un pays qui ne produit pas d'énergie fossile, il importe à 97% ses besoins énergétiques⁸². C'est donc une réelle opportunité pour Hybrid Power de développer le secteur des énergies renouvelables au Maroc, afin de répondre à une demande énergétique croissante de façon durable et autonome.

Une seconde opportunité est que le pays est très ouvert à l'énergie renouvelable. D'une part, celui-ci organise des salons internationaux qui traitent de l'énergie renouvelable et des efficacités énergétiques en général. D'autre part, le pays s'est fixé un objectif pour le cap 2020 : parvenir à ce que 47% de l'énergie soit de l'énergie renouvelable⁸³. Tendre vers ce cap est important pour le Royaume du Maroc l'obligeant à faire des économies en matière d'énergie car il est trop dépendant des fluctuations des énergies fossiles⁸⁴. Le pays veut également stimuler les projets dans l'énergie renouvelable, principalement l'exploitation du secteur solaire.

Une troisième opportunité est le gisement solaire considérable notamment dans les régions désertiques proches des villes de Ouarzazate, Ain Bni Mathar, Fom Al Oued, Boujdour ou Sebkhath Tah. Le gisement solaire est de presque 320 jours/an au Maroc et son potentiel moyen de 5.5kWh/m² jour⁸⁵.

Enfin, le français fait partie des langues officielles du Maroc, ce qui facilite les interactions avec les acteurs économiques ainsi que ses habitants.

En ce qui concerne les menaces, les acteurs établis sur le marché marocain y jouent un rôle important même si la majorité des acteurs sont assez petits. Nous sommes des étrangers au Maroc, ce qui veut dire qu'il faut absolument établir un climat de confiance eux.

⁸² H. KIRÉMIDJIAN (2009). « Etude des filières liées à l'énergie solaire dans la région de Meknès-Tafilalet ». *USAID*. Disponible sur <http://www.gret.org/wp-content/uploads/Filieres-de-l-energie-solaire-au-Maroc.pdf>. (Consulté le 04/03/2014).

⁸³ Map (2013). « Les objectifs du Maroc très ambitieux ». Disponible sur http://www.lematin.ma/express/energies-renouvelables_les-objectifs-du-maroc-tres-ambitieux/189919.html. (Consulté le 05/03/2014).

⁸⁴ J. CHAUDIER. « Le Maroc prévoit de faire 12% d'économie d'énergie d'ici 2020 », *Econostrum*, 3 décembre 2013.

⁸⁵ Informations disponibles sur http://www.geocities.ws/erdd/Chapitre2_GisementSolaire.pdf

<u>Forces</u> - Technologie hybride - Technologie brevetée - Matériaux peu coûteux et innovants - Technologie fiable - Technologie indépendante du réseau électrique	<u>Faiblesses</u> - Dépendance solaire - Production de 90% d'eau chaude et 10% électricité (ratio précis) - Technologie non mature - Manque d'expérience de l'équipe - Démarrage à grande échelle
<u>Opportunités</u> - Dépendance des énergies fossiles - Boom économique et industriel: besoin croissant en énergie - Ouvert à l'énergie renouvelable - Investissements du pays dans le solaire - Gisement solaire - Langue française	<u>Menaces</u> - Acteurs établis sur place - Substituts - Climat de confiance : comment vont réagir les acteurs locaux ?

Tableau 9 Résumé de l'analyse SWOT

9. Milestones

Les Milestones sont les différentes étapes de la mise en œuvre de notre projet. Nous adoptons une stratégie de développement en trois phases distinctes.

L'incubation

La première phase est l'approfondissement et la prolongation de notre business plan, support de communication indispensable afin de trouver des investisseurs. Cette phase durera environ un an.

Tout d'abord, le démarrage réel de l'incubation au sein de la Sopartec débutera après avoir obtenu les accords de cette dernière. Il est par exemple nécessaire d'obtenir les accords d'un jury qui validera ou non le bien fondé du business plan. Nous considérerons dans ce cas-ci que la phase d'incubation débute en janvier 2015.

L'incubation permettra aux porteurs de projet de lier des liens avec des fournisseurs, des clients et des investisseurs. Durant cette phase se réalise la préparation concrète du projet, à savoir la réalisation d'un prototype à l'échelle industrielle. Egalement, des recherches seront menées sur les matériaux thermoélectriques ainsi que l'optimisation du prototype.



Figure 7 : Phase d'incubation de la Sopartec⁸⁶

⁸⁶ Informations disponibles sur www.sopartec.be

Le développement

La deuxième phase se compose de l'usine pilote et de la recherche et développement. La station pilote sera implémentée au processus industriel d'une entreprise. Le but de ce premier pilote est de vérifier le bon fonctionnement de l'ensemble, comme par exemple le système de refroidissement, de concentration et tracker solaire. Cela nous permettra d'améliorer les points les plus faibles de notre produit. En outre, nous pourrions estimer de manière plus précise les gains d'énergie que pourra réaliser l'une ou l'autre industrie grâce à notre système. Notre usine pilote peut être financée, en partie par l'UCL, par des subsides et également par d'autres investisseurs.

En parallèle, le matériau thermoélectrique et le prototype devront encore bénéficier de recherches et développements supplémentaires. Il est en effet primordial que notre solution solaire atteigne un certain niveau de performance avant que l'on puisse la commercialiser à plus grande échelle. Avant d'arriver sur le marché, il est nécessaire que notre système soit moins cher que les systèmes que l'on va remplacer, mais également moins cher que nos concurrents les plus directs (systèmes hybrides ou panneaux solaires thermiques et photovoltaïques). Cette étape prendra environ deux ans.

Le lancement

La troisième phase est le lancement du produit sur le marché. A court terme, nous voulons nous lancer au Maroc (choix justifié à la section : « Choix d'un pays : le Maroc »). Cette étape prendra probablement trois ans avant d'atteindre un stade de croissance au sein de ce pays. Une fois bien implanté au Maroc, il sera envisageable sur le long terme d'exporter le produit dans de nouvelles zones géographiques.



Figure 8 : Milestones

10. Stratégie

10.1. Mission

Quelle est la mission de notre entreprise ? Qui sommes-nous et que faisons-nous ? C'est l'état actuel de l'entreprise. C'est la première phase de l'entreprise. Nous sommes en train de créer un business plan sur le développement de concentrateurs solaires hybrides à destination de processus industriels.

Afin de réaliser notre mission, nous concentrons nos forces dans l'énergie renouvelable solaire en fournissant à nos clients le meilleur équipement et savoir-faire. Pour atteindre cet objectif, nous favorisons la production d'un produit de qualité et le développement d'un modèle d'entreprise qui favorise la croissance durable. Nos priorités sont le service à la clientèle, l'investissement dans les ressources humaines et l'efficacité des protocoles de production.

10.2. Vision

Où allons-nous?

Hybrid Power va passer par différentes phases, dans le but d'atteindre les objectifs fixés.

Nous parlons donc de vision stratégique sur plusieurs années.

Notre vision à long terme est de nous définir comme étant un producteur et fournisseur majeur d'énergie solaire au Maroc à destination des industriels. Pour atteindre cet objectif, nous passerons par trois phases distinctes décrites à la section Milestones.

10.3. Stratégie marketing

Nous avons décidé de suivre la stratégie de prix. D'après Fréry, « *la stratégie de prix consiste à proposer pour un prix inférieur une offre dont la valeur est comparable à celle des concurrents* »⁸⁷.

Tout d'abord, nous allons estimer nos couts pour obtenir notre prix (Cf. section Politique de prix).

Pour obtenir cette stratégie de prix, trois facteurs ont été mobilisés.

Tout d'abord, notre cible est l'industrie (choix justifié en section Cible). Ce choix nous semble judicieux pour réaliser des économies d'échelle. En effet, notre cible a des besoins en énergie plus importants que des particuliers. Notre volume de production se fait donc à grande échelle. Les frais fixes sont ainsi répartis sur un plus grand volume et les prix d'achats des composants sont également réduits.

Un deuxième facteur est celui de la recherche et le développement sur le matériau thermoélectrique. Celui-ci doit atteindre un certain niveau de performance. En outre, nous voulons d'année en année réduire ses couts tout en améliorant ses performances.

Un troisième facteur est l'expérience. Au cours du temps, nous allons gérer notre activité de manière plus efficace. D'après Fréry, « *cela résulte à la fois de l'amélioration du savoir-faire de la main d'œuvre et de l'optimisation des moyens de production au cours du temps* »⁸⁸.

Pour ce faire, nous comptons former de la main d'œuvre pour s'assurer que le montage de nos concentrateurs soit en adéquation avec le cahier des charges du chantier (cf. Gestion des ressources humaines).

Ainsi, il en résultera une équipe expérimentée au bout d'une certaine période de temps.

En ce qui concerne les moyens de production, c'est-à-dire la production des modules, celle-ci sera optimisée sur le long terme. Nous passons par trois phases distinctes lors de notre stratégie de développement (cf. section Milestones). En première phrase, nous sous-traitons, en laboratoire, la production des modules en petite quantité ce qui est assez couteux. En troisième phase, nous allons nous-même produire ces modules et dans un volume important, ce qui diminuera fortement le cout.

⁸⁷F. FRÉRY, G. JOHNSON, K. SCHOLES, R. WHITTINGTON, « La stratégie de prix ». *Stratégique*, 9ème éd., Paris, Pearson Education, 2011, p252

⁸⁸ *Op. Cit.*, p. 253.

Après la phase de recherche et de développement, notre prix de vente sera plus élevé que nos couts (cf. Plan financier à la page 146).

En outre, nous avons l'avantage du premier entrant sur le marché marocain ainsi que l'argument du cout de transfert (choix justifié à la First mover advantage).

11. Aspects techniques

Au sein de ce chapitre, nous résumons très brièvement les points essentiels de la partie technique. La partie technique est en effet un support indispensable au business plan, tous les détails de celle-ci se retrouvent en annexe.

Dans cette section technique, nous aborderons tout d'abord le fonctionnement de la thermoélectricité plus en détail.

Ensuite, nous présentons les différents systèmes solaires actuellement utilisés. De la sorte, nous donnons un aperçu de notre positionnement technologique par rapport aux autres dispositifs solaires.

Enfin, nous évaluons la production d'énergie et d'électricité de ces différentes technologies. Nous montrons ainsi les grandes tendances à l'heure actuelle et les perspectives d'avenir.

11.1. Module thermoélectrique

Le projet Hybrid Power se base sur les matériaux thermoélectriques. Il est donc essentiel de comprendre les fondements théoriques qui permettent à ces matériaux de produire de l'électricité.

11.1.1. Principe de la thermoélectricité⁸⁹

11.1.1.1. L'effet Seebeck

L'effet Seebeck est l'effet thermoélectrique découvert en 1821 par un physicien allemand du même nom. Il découvrit qu'un champ magnétique se développe entre deux conducteurs de natures différentes et dont les jonctions ne sont pas à la même température ($T_h \neq T_c$), comme illustré ci-dessous. Ce champ électrique (E) induit en fait un courant électrique (i) qui circule dans ce circuit fermé.

⁸⁹ E., DE JAEGER, P., JACQUES, E., MATAGNE, Cours UCL: *LELEC 2670 Sources d'énergie électrique renouvelables ou non conventionnelles – Convertisseurs thermoélectriques*.

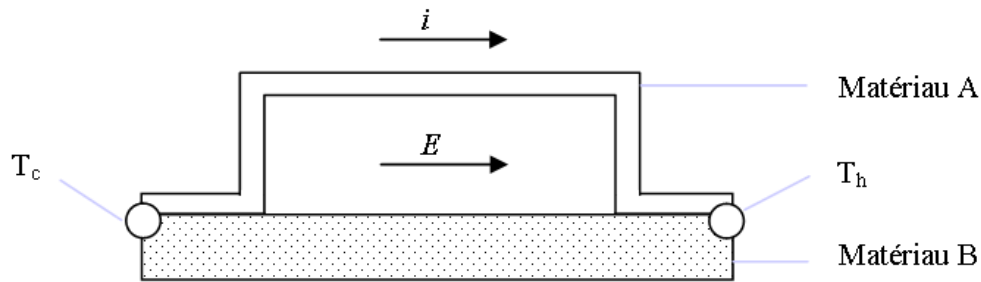


Figure 9 – Le champ magnétique E induit un courant i en circuit fermé

La différence de température entre les deux jonctions entraîne un gradient de température au sein du matériau. Le flux de chaleur qui en résulte a tendance à déplacer les porteurs de charges de la partie la plus chaude vers la partie la plus froide, c'est la base du phénomène thermoélectrique.

11.1.1.2. Couple thermoélectrique

Un couple thermoélectrique est composé de deux matériaux thermoélectriques, l'un de type positif (type p) et l'autre de type négatif (type n). Les matériaux thermoélectriques sont dits de type « p » lorsque le flux de chaleur se développe dans le même sens que le courant électrique. A l'inverse, les matériaux thermoélectriques de type « n » induisent un courant électrique dans le sens contraire au flux de chaleur. Afin que le courant électrique puisse circuler, les deux plots thermoélectriques sont reliés en série par un conducteur électrique, souvent des plaquettes de cuivre.

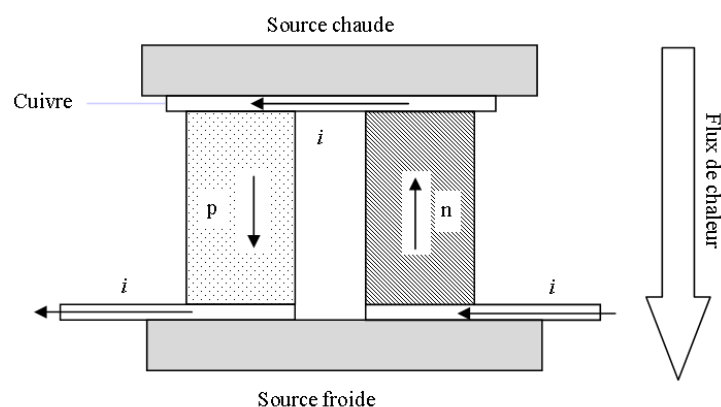


Figure 10 - Couple thermoélectrique

11.1.1.3. Générateur thermoélectrique

Un générateur thermoélectrique est une succession de couples thermoélectriques connectés électriquement en série. Du point de vue thermique, les couples sont tous mis en parallèles, c'est-à-dire les jonctions chaudes sont à une même température chaude et les jonctions froides sont à une même température froide.

Un générateur thermoélectrique, ou module thermoélectrique, est ainsi composé d'une série de couples thermoélectriques parcourus par un même courant et additionnant chacun une tension supplémentaire. Les modules thermoélectriques sont souvent composés d'une plaque de céramique dans leur partie supérieure et inférieure, fournissant de la sorte une isolation électrique extérieure tout en laissant la chaleur traverser le module.

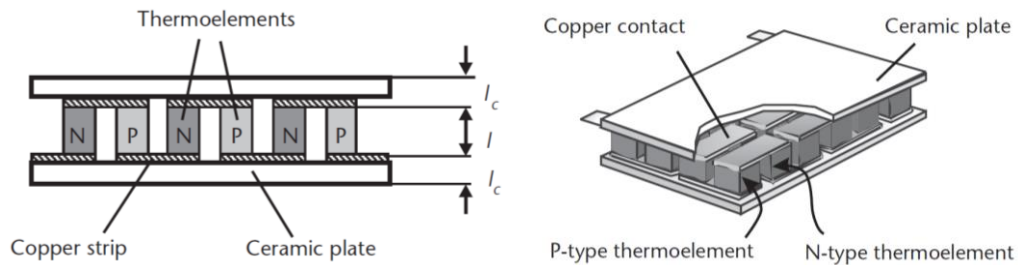


Figure 11 : Série de trois couples thermoélectriques (image de gauche) ; Module thermoélectrique (image de droite).

11.1.2. Les matériaux thermoélectriques utilisés

Dans ce travail, nous utilisons deux types de matériaux thermoélectriques :

- Le Tellure de Bismuth – Bi_2Te_3
- Le Fer Vanadium Aluminium – Fe_2VAl

11.1.2.1. Tellure de Bismuth – Bi_2Te_3

Le tellure de bismuth est un matériau thermoélectrique très répandu. En effet, ce semi-conducteur possède de très bonnes caractéristiques thermoélectriques à température ambiante, ce qui le rend un très bon refroidisseur par effet Peltier⁹⁰. On en fait usage dans de nombreux systèmes de refroidissement comme par exemple les processeurs ou encore la réfrigération embarquée (avions, voitures, hôtels, etc.).

⁹⁰ Voir annexe technique : chap 3.1.2 pour plus de détails concernant le refroidissement par effet Peltier.

Cependant, ce matériau thermoélectrique possède des inconvénients majeurs, à savoir son coût dû à la rareté de ses éléments et sa toxicité⁹¹. Ces propriétés thermoélectriques se dégradent drastiquement au-delà des 300K, ce qui impose, pour la production d'électricité qui se réalise à plus haute température, l'utilisation d'alliages de bismuth, d'antimoine, de tellure et de sélénium⁹².

Dans le cadre du démonstrateur, nous avons utilisé des modules Bi-Te issus du fabricant Tellurex. Cependant, nous n'avons pas la composition exacte de l'alliage utilisé.

11.1.2.1. Fer Vanadium Aluminium – Fe₂VAL

Ce matériau thermoélectrique prometteur est encore au stade de la recherche, notamment au sein de l'UCL pour la mise en forme d'un module thermoélectrique. Les atouts de ce matériau sont d'une part son prix peu élevé puisqu'il s'agit de métaux abondants, et d'autre part ses bonnes caractéristiques physiques. L'alliage possède en effet des propriétés thermoélectriques intéressantes : ce dernier résiste bien à la montée en température et possède une résistivité électrique très basse. Ci-dessous, sont présentées ses caractéristiques en comparaison avec un alliage classique de Bi₂Te₃ ne pouvant pas monter en température⁹³. Nous définissons également le facteur de mérite ZT :

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{\rho \lambda}$$

	Bi ₂ Te ₃	Fe ₂ VAL
Température moyenne T ₁ [K]	300	300
Coefficient Seebeck α [μV/K]	400	200
Résistivité électrique ρ [μΩm]	10	2,5
Conductivité thermique λ [W/mK]	1,5	10
Facteur de mérite ZT ₁ [/]	3,2	0,48
Température moyenne T ₂ [K]	/	600
Coefficient Seebeck α [μV/K]	/	100
Résistivité électrique ρ [μΩm]	/	2,5
Conductivité thermique λ [W/mK]	/	10
Facteur de mérite ZT ₂ [/]	/	0,24

Tableau 10 - Comparaison des caractéristiques physiques et thermoélectriques des matériaux Bi₂Te₃ et Fe₂Val

⁹¹ Fiches Internationales de Sécurité Chimique, in <http://www.cdc.gov/niosh/ipcsnfrn/nfrn0986.html>.

⁹² P. LARSON, S. D. MAHANTI, D.Y. CHUNG, M. G. KANATZIDIS, « Electronic structure of CsBi₄Te₆: A high-performance thermoelectric at low temperatures », *Physical Review B*, vol. 65, no 4, 2002, p. 045205-045209.

⁹³ G., MIN, « Thermoelectric Module Design Under a Given Thermal Input: Theory and Example », *Journal of Electronic Materials*, Vol. 42, No. 7, 2013, pp.2239 - 2241.

Le facteur de mérite, représente bien la capacité des matériaux thermoélectriques à convertir de l'énergie en électricité. Il faut en effet que ces matériaux possèdent un grand coefficient Seebeck, une faible résistivité électrique et une faible conductivité thermique.

Notons qu'ici le facteur de mérite a été calculé avec $T_1 = 300\text{K}$ et $T_2 = 600\text{K}$. Cependant, le Bi_2Te_3 contrairement au Fe_2VAl , possède des caractéristiques fortement dégradées au-delà de 300K , ce qui rend son usage inadéquat au-delà de cette température. Or, une telle température moyenne n'est pas adaptée pour de la génération électrique, puisque typiquement la source froide se situera au-delà de 300K .

Bien que nous ayons présenté uniquement deux matériaux thermoélectriques, il existe une multitude de matériaux, chacun possédant de bonnes caractéristiques dans sa propre gamme de température. Il faut également savoir que la production d'électricité dépend du carré de la différence de température à la borne du générateur thermoélectrique. Il est donc important que le matériau thermoélectrique possède de bonnes caractéristiques à haute température.

11.1.2.2. Le cout des matériaux thermoélectriques

- Bi_2Te_3

Le Tellure de Bismuth est composé d'éléments rares, ce qui rend son prix relativement élevé. Son prix est estimé entre 400 et 1000 USD/kg, ce qui représente à peu près 300 et 700 €/kg.

- Fe_2VAl

Un des moteurs du projet est le coût relativement bas du Fe_2VAl par rapport au Bi_2Te_3 . En effet, cet alliage Fe_2VAl est composé pour 58,9% de Fe ; 26,87% de V et 14,23% d'Al.

Pour composer cet alliage, nous utilisons les matériaux suivants : du Fe pur à 0,5 €/kg; du Al pur à 1,4 €/kg ; du Ferrovandium à 19,2 €/kg (composé de 81,65% de V et 17,03% de Fe).

En respectant la stœchiométrie, le cout des matières premières pour composer le Fe_2VAl est indiqué dans le tableau ci-dessous :

	Fe pur	Al pur	Ferrovandium	Total
Composition Fe ₂ VAl [%]	52,86	14,23	32,91	100
Prix [€/kg]	0,5	1,4	19,2	6,78

Tableau 11 - Composition et prix au kg pour l'alliage Fe₂VAl

Le prix des matières premières pour constituer les éléments thermoélectriques est de 6,78 €/kg, ce qui est environ 100 fois moins élevé que le Bi₂Te₃.

- Cout de la mise en forme

En plus du cout des matières premières, il est nécessaire de les façonner. En effet, il faut fondre l'ensemble des composants pour former l'alliage, et ensuite usiner les plots thermoélectriques.

La fonte des métaux est négligeable par rapport au prix de la découpe. Pour l'instant, le générateur thermoélectrique utilisé pour le démonstrateur a été découpé par électroérosion par un sous-traitant. Le prix de cette découpe a été de 675€ pour environ 60 plots, ce qui représente un prix considérable. Nous pensons cependant que ce cout sera drastiquement réduit si la spin-off se dote d'une machine capable de produire des plots thermoélectriques en grande quantité.

11.2. Positionnement technologique

Le but de cette section est d'avoir un aperçu global des différentes technologies actuelles utilisant l'énergie solaire. Pour ce faire, nous divisons ces différentes technologies en deux grands groupes : les systèmes solaires non-concentrés et concentrés.

11.2.1. Les systèmes solaires non-concentrés

11.2.1.1. Le solaire thermique

Le solaire thermique consiste à utiliser le rayonnement solaire sous forme de chaleur dans un but précis. Soit pour un usage direct, comme par exemple pour chauffer de l'eau, chauffer des aliments, sécher, etc. Soit pour un usage indirect, comme par exemple pour le dessalement, les centrales thermodynamiques, le rafraîchissement solaire, etc.

- Les niveaux de température

On peut définir les transformations thermiques par leur niveau de température d'utilisation (énergie utile)⁹⁴ :

- De 20 à 120 °C : Besoins de chauffage / Eau Chaude Sanitaire / Air conditionné
- De 120 à 200 °C : Applications industrielles
- Au-delà de 200 °C : Centrales thermodynamiques

Dans le cas de notre business plan, nous nous sommes tout d'abord concentrés sur la première gamme de température, c'est-à-dire l'énergie à basse température, à destination de particuliers ou de besoins liés au chauffage de bâtiments en général.

Ensuite, dans un second temps, nous nous sommes focalisés sur les applications industrielles, où les besoins en énergie sont alors à plus haute température. Dans de tels processus, l'utilisation de l'énergie solaire concentrée devient indispensable. Dans la section ultérieure, nous décrirons les systèmes solaires à concentration.

- Les panneaux solaires thermiques

Les panneaux solaires thermiques, ou chauffe-eaux solaires sont des dispositifs à l'échelle d'une maison individuelle, constitués le plus souvent d'une enceinte vitrée dans laquelle circule un fluide caloporteur. Ce liquide, chauffé par le rayonnement solaire, permet d'apporter de la chaleur pour le chauffage, l'ECS, etc.

- Le rafraîchissement solaire

Certaines machines frigorifiques utilisent un apport de chaleur durant leur cycle thermodynamique. Ce type de refroidissement est idéal lorsque ce sont justement les apports solaires qu'il est nécessaire d'évacuer. Dans ce cas-là, la dépendance solaire n'est pas un problème, dépendance qui reste un des principaux désavantages des autres solutions solaires. Notons cependant, que bien souvent, les gains solaires non contrôlés résultent d'une mauvaise conception.

- Cuisinières et sécheurs solaires

Les cuiseurs solaires sont des dispositifs rustiques et très répandus dans certaines régions du monde comme en Inde et en Chine. Il existe ainsi de nombreux dispositifs, atteignant de manière générale des températures de l'ordre de 100 à 220 °C.

⁹⁴ B., WILKIN, « Solaire thermique », *Association de Promotion des Energies Renouvelables APERe asbl*, présentation UCL novembre 2013, p.11.

11.2.1.2. Le solaire photovoltaïque

Les panneaux solaires photovoltaïques sont composés de cellules photovoltaïques qui reliées entre-elles, forment un panneau. Le courant électrique produit est, dans la grande majorité des cas, injecté sur le réseau de distribution électrique via un onduleur. Cette solution solaire est très modulable, elle peut en effet être installée sur les toits des maisons ou pour des centrales de production électrique. Ainsi, la puissance installée pour des particuliers dépasse rarement 3kW, alors que la centrale solaire d'Agua Caliente en Arizona atteint par exemple les 247 MW.

En réalité, l'énergie photovoltaïque voit un réel intérêt lorsque qu'il est nécessaire d'alimenter des zones difficiles d'accès et qui ne possèdent pas le raccord au réseau électrique. En effet, la nécessité d'investissements considérables sont un réel frein à l'expansion de cette technologie, et le développement du photovoltaïque a été virtuellement dopé par les déductions fiscales accordées par les États. Ainsi, selon une étude en France en 2011, un emploi dans le photovoltaïque coûterait de 10 à 40 % plus cher que l'indemnisation d'un chômeur⁹⁵. Le marché du photovoltaïque pour les particuliers semble donc artificiel, et peut s'effondrer comme nous l'a montré la crise du photovoltaïque en Belgique.

On s'attend cependant à l'apparition de centrale solaire photovoltaïque de taille de plus en plus grande, atteignant le GW. Cette évolution est principalement due à la diminution des coûts de production des cellules et aux économies d'échelle, accordant ainsi la confiance des investisseurs dans ce type de grands projets.

Bien que les centrales photovoltaïques soient parfois équipées de tracker solaire, permettant ainsi d'atteindre de meilleurs rendements, la plus grande limitation de ces dernières est issue du faible facteur de charge. En effet, même dans les zones les plus favorables du globe, le facteur de charge ne dépasse pas les 25%, ce qui est faible en comparaison à d'autres systèmes de production comme le nucléaire possédant un facteur de charge d'environ 80%⁹⁶.

Ensuite, la grande variabilité de la production pose d'importants problèmes pour le raccordement au réseau. Il est en effet difficile de gérer une chute de puissance de 100MW quasiment instantanément lorsqu'un nuage passe au-dessus d'une telle centrale.

⁹⁵ M., COURTECUISE, « Un emploi dans le photovoltaïque coûte cher et n'est pas pérenne », *L'Expansion*, 31 janvier 2011.

⁹⁶ Bilan électrique 2012, in http://www.rte-france.com/uploads/Mediatheque_docs/vie_systeme/annuelles/Bilan_electrique/RTE_bilan_electrique_2012.pdf.

En ce qui concerne les coûts, les centrales photovoltaïques permettent d'atteindre une énergie électrique entre 10 et 20 c€/kWh^{97,98}.

En ce qui concerne la recherche et le développement, on notera que l'essentiel des avancées sont réalisées dans l'amélioration des cellules photovoltaïques. Cependant, de nombreux autres domaines sont étudiés, comme les onduleurs, les héliostats, l'intégration aux bâtiments, les coefficients de réflexion et d'absorption, etc.

11.2.2. Les systèmes solaires concentrés

11.2.2.1. Centrales solaires thermodynamiques

L'objectif des centrales thermodynamiques est de produire de l'électricité grâce à des turbines à vapeur ou encore des moteurs thermiques. Dans tous les cas, il est nécessaire de concentrer les rayons du soleil pour atteindre des températures suffisamment hautes.

Ce genre de dispositifs est utilisé à l'échelle industrielle, et consiste à chauffer un fluide caloporteur au point focal du concentrateur solaire. L'intermittence du rayonnement solaire peut être contournée en utilisant des systèmes de stockage. De cette manière, il est possible d'exploiter les moteurs thermiques de manière continue lors des périodes de fort ensoleillement.

Il existe quatre grands types de centrales thermodynamiques qui sont détaillées dans l'annexe technique : les centrales à tour, les centrales à miroirs cylindro-parabolique, les centrales à miroirs de Fresnel et les centrales à concentration paraboliques (*dish Stirling*).

11.2.3. Rendements des technologies

Après avoir parcouru les différentes technologies permettant d'utiliser l'énergie solaire, il est intéressant de les comparer en termes de rendement. Ci-dessous, un graphique reprend les rendements des différentes technologies pour la production d'électricité⁹⁹.

⁹⁷ *Op.cit.*

⁹⁸ Mildura 154MW project, in www.solarsystems.com.au

⁹⁹ KARNI, J., « The thermoelectric alternative », *News and Views – Solar Energy*, 2011

Notons que ce graphique représente également la technologie photovoltaïque concentrée et les systèmes thermoélectriques. Les systèmes photovoltaïques concentrés ne seront pas abordés dans ce travail.

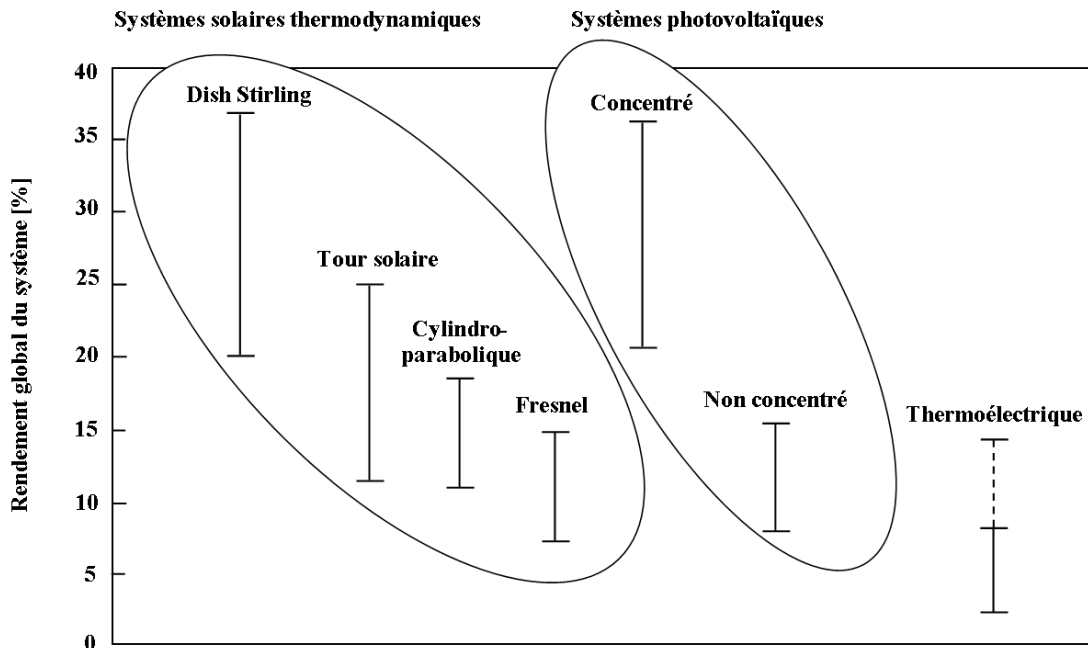


Figure 12 : Comparaison des rendements des différents systèmes solaires produisant de l'électricité

Notons également que ce graphique ne représente pas les systèmes pouvant produire de la chaleur. En effet, au contraire de l'électricité, la chaleur peut être produite à différents niveaux d'énergie. Ceux-ci ont un potentiel économique de plus en plus important avec une plus haute température (cf. Les niveaux de température page 64). Ainsi, la production de chaleur à haute température ne peut pas être comparée à une production de chaleur à basse température, car leurs valeurs économiques ne sont pas évaluées de la même manière. En d'autres termes, avoir un système thermique basse température très performant n'est pas comparable à un système thermique à haute température peu performant.

11.3. Evolution de la production d'énergie thermique et électrique

Notre solution solaire Hybrid Power produit à la fois de l'électricité et de la chaleur. Il est donc intéressant de connaître l'évolution de la production de ces deux énergies. Grâce aux informations fournies par l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA)¹⁰⁰, nous avons illustré l'évolution de la production d'électricité et de chaleur pour les années 2001 et 2011.

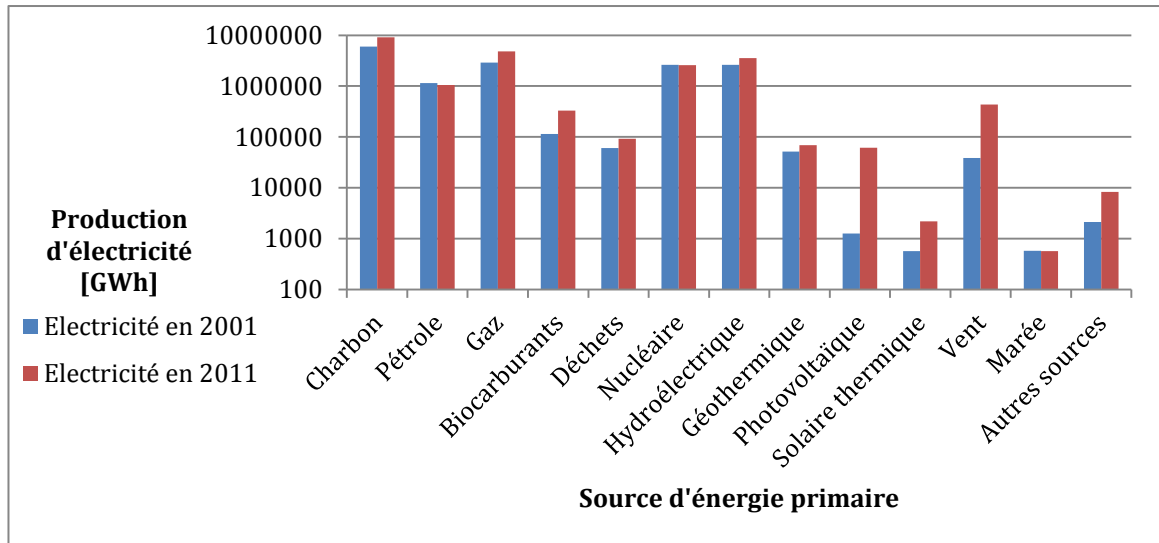


Figure 13 - Production mondiale d'électricité selon la source d'énergie primaire entre 2001 et 2011

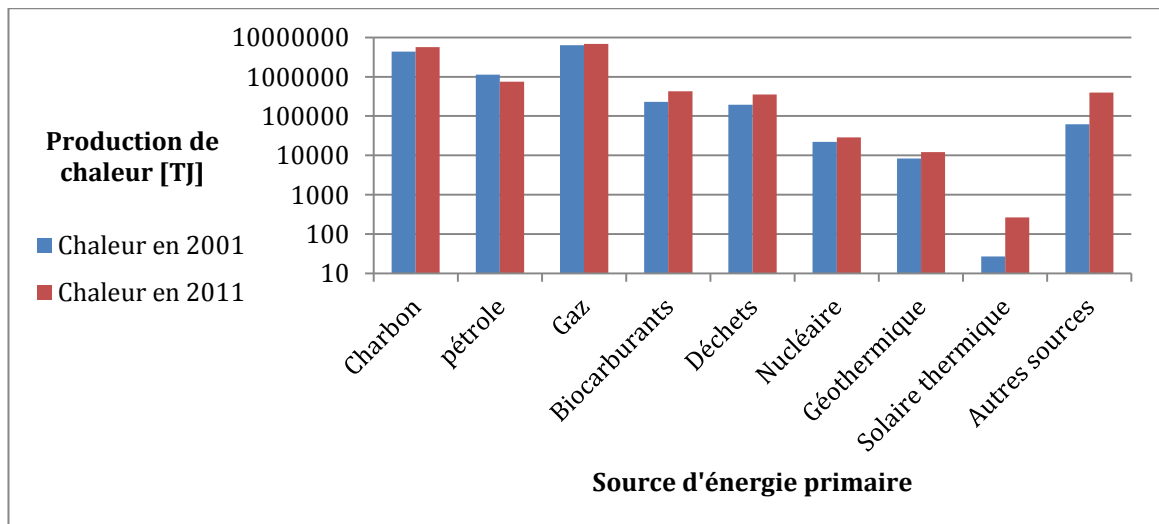


Figure 14 - Production mondiale de chaleur selon la source d'énergie primaire entre 2001 et 2011

¹⁰⁰ International Energy Agency, disponible sur www.iea.org.

Bien que les échelles logarithmiques soient trompeuses, les solutions solaires, photovoltaïques et thermiques réunies, représentaient en fait 0,29 % de la production d'électricité et 0,00002 % de la production de chaleur au niveau mondial en 2011.

Cependant, comme on le constate sur ces graphiques, il existe une évolution rapide des solutions solaires, autant pour la production d'électricité que pour la production de chaleur. L'IEA prévoit ainsi, dans ses analyses les plus optimistes, que l'énergie solaire sera la source d'un tiers de la consommation finale d'énergie mondiale d'ici 2060.

12. Etude de cas

Dans ce chapitre, nous abordons la réalisation complète d'une centrale solaire à concentration utilisant les matériaux thermoélectriques développés par l'UCL, à savoir les alliages de Fe₂VAI. Cette première usine solaire pourrait être la centrale pilote durant la phase de développement, comme expliquée précédemment dans la section Milestones.

12.1. Mise en contexte

Après avoir sélectionné la zone géographique du Maroc, et plus précisément l'industrie du textile (Cf. Cœur de cible), nous avons pris contact avec plusieurs industriels. L'un d'eux, Monsieur Laraki directeur de la société Blancatex, a fait suite à notre demande d'information.

Cette entreprise textile située à Casablanca possède trois ateliers principaux. Les deux premiers sont la filature et le tissage consistant à tisser des fils afin de produire du tissu. Le troisième atelier est le finissage, une fois le tissu brut préparé, cette opération consiste en plusieurs étapes, comme apprêter, laver et sécher les tissus. Ces trois étapes sont fortement consommatrices de chaleur, et notamment en vapeur d'eau.

L'entreprise textile souffre actuellement des prix élevés de l'énergie au Maroc, et le coût de ses consommations pèse lourdement dans son bilan. A titre indicatif, le tableau ci-dessous indique les consommations annuelles moyennes en eau chaude et en électricité :

Consommation électrique [kWh]	1 400 000
Consommation d'eau chaude [m ³]	6000
Consommation de fuel [TEP]	200

Tableau 12 - Consommation annuelle de l'entreprise Blancatex

En 2010 et 2011, le coût de l'énergie a représenté environ 8% du chiffre d'affaires. Actuellement, ce pourcentage est d'environ 12%, à cause d'une production réduite ces dernières années.

L'entreprise étant située en plein centre de Casablanca, il n'existe pas de terrains disponibles à proximité. Une des possibilités est donc d'implémenter des concentrateurs solaires sur le toit du bâtiment. Le toit se compose en fait de quatre surfaces rectangulaires de 120m² (rectangle d'environ 8x15m) séparées par un petit muret. La surface totale du toit est donc de 480m².



Figure 15 - Photographie du toit de l'entreprise Blancatex : 2 surfaces d'environ 8 x 15 m

1.1.1. Disposition des concentrateurs sur le toit

Comme vu précédemment, le toit de l'entreprise de Blancatex se compose de quatre surfaces d'environ 120 m² séparées par un muret. Ci-dessous, est présenté l'implémentation des concentrateurs solaires pour deux surfaces de 120 m² fusionnées ensemble, donnant ainsi une surface de toit de 16 x 15 m. A titre illustratif, un concentrateur cylindro-parabolique du marché est également présenté ¹⁰¹.

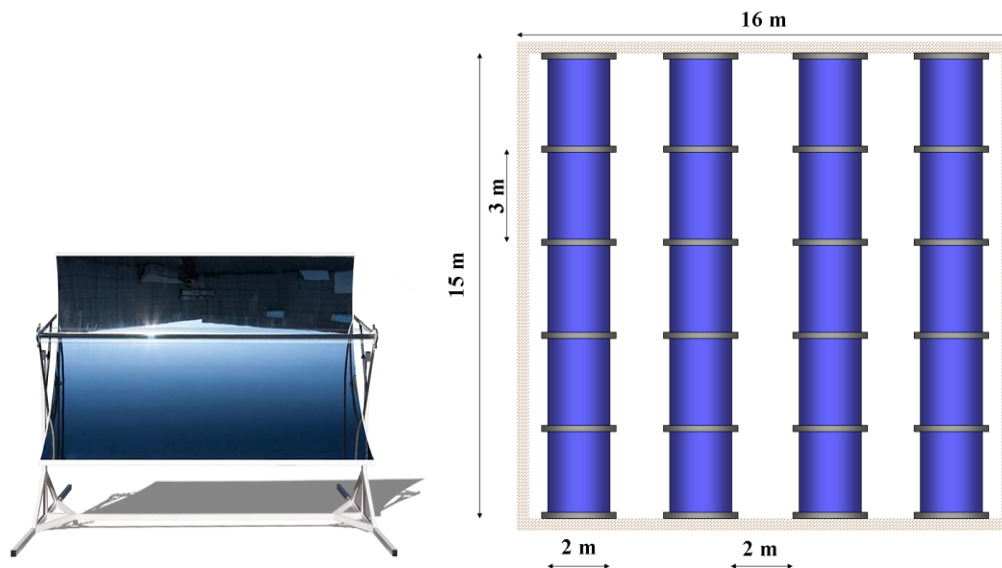


Figure 16 - Gauche : Concentrateur solaire cylindro-parabolique (2x3m). Droite : Vue en plan de l'implémentation des concentrateurs sur le toit de Blancatex, 4 rangées de 5 concentrateurs.

¹⁰¹ Helioclim, Concentrateur cylindro-parabolique, in <http://www.helioclim.fr>.

La centrale solaire se composera donc de deux unités, possédant chacune 4 rangées de 5 concentrateurs. Chaque rangée de concentrateurs étant soutenue par des supports rotatifs espacés de 3m.

Ci-dessous, un tableau reprend les caractéristiques de la centrale solaire :

Dimension en plan d'un concentrateur	2 x 3 [m]
Nombre de concentrateurs	40
Longueur total des concentrateurs	120 [m]
Surface total des concentrateurs	240 [m ²]

Tableau 13 – Dimensions caractéristiques de la centrale solaire

12.2. Premier estimatif

Très rapidement, nous pouvons estimer l'énergie que pourrait produire une centrale située sur ce toit en question. Nous avons donc pris des hypothèses fortes afin d'avoir rapidement un ordre de grandeur.

En ce qui concerne l'énergie solaire reçue par un système de tracker solaire, nous utiliserons une valeur moyenne de DNI (*Direct Normal Insulation*) de 5 kWh/m²/jour¹⁰². Cette valeur correspond à un ensoleillement direct de 1825 kWh/m²/an.

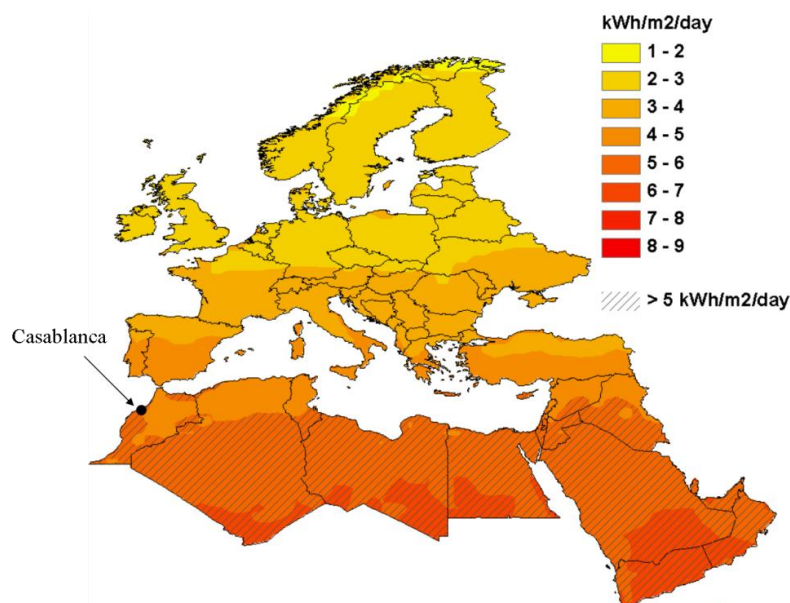


Figure 17 - Gisement solaire : DNI journalier en kWh/m²/jour

¹⁰² K., UMMEL, D., WHEELER, « Desert Power: The Economics of Solar Thermal Electricity for Europe, North Africa, and the Middle East », *Center for Global Development*, December, 2008.

Nous avons supposé, en première approximation, que la surface réellement utilisée par les concentrateurs solaires est de 50% de l'espace disponible. Elle représente donc une surface effective de 240m². Ensuite, à nouveau en première approximation, nous supposons que les rendements globaux sont de 45% pour le thermique et de 5% pour l'électrique.

Grâce à ces premières hypothèses, le tableau ci-dessous montre la quantité de chaleur et d'électricité produite par l'usine solaire sur le toit de l'entreprise Blancatex :

Ensoleillement direct [kWh/m ² /an]	1825
Surface effective des concentrateurs solaires [m ²]	240
Rendement thermique global [%]	45
Rendement électrique global [%]	5
Energie thermique produite [kWh]	197 100
Energie électrique produite [kWh]	21 900

Tableau 14 - Approximation de l'énergie produite par la centrale sur le toit de Blancatex

A présent, il est possible d'estimer les économies, en consommation de carburant et d'électricité, réalisées par l'entreprise. Ci-dessous, un tableau reprend les prix d'achat de l'entreprise pour le fuel et l'électricité. Afin que ces chiffres soient plus parlants, ils sont exprimés en euros, bien que la devise d'achat locale soit le Dirham :

Fuel [€/TEP]	517,43
Électricité heures creuses [€/kWh]	0,044
Électricité heures pleines [€/kWh]	0,067
Électricité heures de pointes [€/kWh]	0,102

Tableau 15 - Prix de l'énergie achetée par l'entreprise Blancatex

Sachant qu'une TEP (Tonne d'Equivalent Pétrole) correspond à 11 630 kWh¹⁰³, l'énergie thermique économisée par Blancatex correspond à 16,95 TEP. En supposant que le prix d'achat moyen de l'électricité est de 0,067 €/kWh, nous pouvons calculer les économies réalisées en un an :

Économie en fuel [€/an]	8 769
Économie en électricité [€/an]	1 473
Économie énergétique totale [€/an]	10 242
Économie énergétique totale en 30 ans [€]	307 260

Tableau 16 - Economie annuelle réalisée par Blancatex

¹⁰³ X, International Energy Agency, *Manuel sur les statistiques de l'énergie*, p. 193, tableau A3.4.

En supposant que la durée de vie de la centrale solaire est de 30 ans, l'économie totale réalisée est d'environ 300 000€. Cependant, cette économie ne tient pas compte de l'inflation du prix de l'énergie, ce qui pourrait la rehausser quelque peu. Cette économie totale est en tout cas une borne supérieure du cout total maximum de l'usine solaire, c'est-à-dire les couts de la conception, de l'achat et la production des composants, de l'installation, de la maintenance et du démantèlement. Notre stratégie consiste à proposer une solution énergétique qui diminue la facture énergétique du client, il faut donc que le cout total de l'usine solaire ne dépasse pas les économies réalisées.

Egalement, il est intéressant d'estimer cette borne supérieure pour le cout de la puissance installée exprimée en [€/W]. En considérant un éclairage standard de 1000 W/m², et un rendement global de 50%, la puissance totale installée pour la centrale solaire est de 120 kW :

$$\text{Puissance totale installée} = 1000 \left[\frac{W}{m^2} \right] * 0,5 * 240 [m^2] = 120 [kW]$$

En divisant l'économie totale réalisée en 30 ans par la puissance totale installée, une borne supérieure du cout d'installation est estimée à 2,5 €/W :

$$\text{Borne supérieure du cout de la puissance installée} = \frac{300\,000 [\text{€}]}{120\,000 [W]} = 2,5 \left[\frac{\text{€}}{W} \right]$$

A titre de comparaison, une étude de 2008 a estimé les couts initiaux d'installation entre 4 et 5 €/W pour une centrale solaire à concentration cylindro-parabolique (CCP) en Espagne avec une puissance installée entre 30 et 80 MW. Les centrales solaires thermiques CCP sont sensiblement similaires à la centrale solaire qui serait installée sur le toit de Blancatex. Cependant, la comparaison effectuée dans le tableau ci-dessous est uniquement illustrative, puisque les deux couts présentés représentent des centrales solaires de taille et de technologie différente.

Borne supérieure du cout de la puissance installée pour la centrale de Blancatex [€/W]	2,5
Cout initial de la puissance installée pour une centrale CPC en 2008 en Espagne [€/W]	4-5

Tableau 17 - Comparaison entre la borne supérieure du coût de la puissance installée pour la centrale de Blancatex et les coûts actuels pour une centrale CCP

Ci-dessous, le graphique représente cette borne supérieure, qui représente le cout total qui comprend le cout d'installation, le cout de l'exploitation et le cout du démantèlement. Notons ici que la proportion de ces trois couts est estimée.

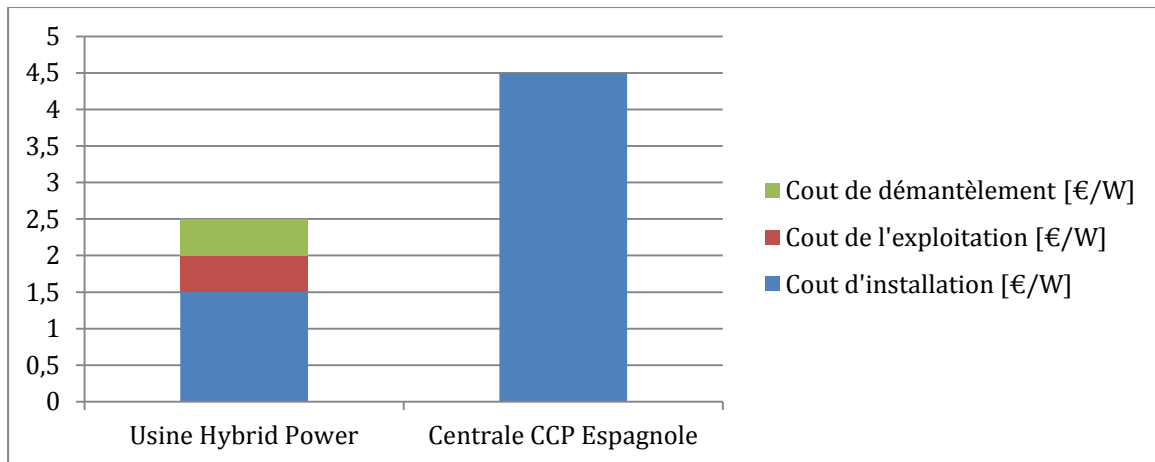


Figure 18 - Borne supérieure des coûts d'installation, de maintenance et de démantèlement de l'usine Hybrid Power comparés aux coûts d'installation d'une usine CCP espagnole [€/W]

Néanmoins, on constate que la borne supérieure de 2,5 €/W est dépassée par le coût initial de puissance installée de 4-5 €/W de son homologue espagnol. De plus, cette borne supérieure de 2,5 €/W comprend également les frais d'exploitation et de démantèlement, frais non compris dans le coût d'installation initial. Par ailleurs, ces coûts d'installation entre 4-5 €/W sont calculés sur base d'une centrale solaire de grande puissance entre 30 et 80 MW, profitant ainsi d'une réduction de coût par rapport à de petites installations.

Cependant, il faut nuancer cette comparaison, puisque les centrales solaires thermodynamiques à concentration cylindro-paraboliques possèdent une infrastructure plus lourde, notamment avec l'installation d'une turbine à vapeur. Enfin, ce coût calculé en Espagne dépend bien évidemment de l'ensemble du contexte socio-économique. Nous pouvons espérer atteindre des coûts d'installation plus bas, notamment par une main d'œuvre locale moins coûteuse et un abaissement du coût général de la technologie CCP.

Pour tenir compte de la différence de technologie entre notre usine Hybrid Power, et une usine CCP, nous pouvons calculer le coût de la puissance solaire totale qui est captée. Pour cela, nous supposons que l'usine Hybrid Power possède un rendement de conversion $\eta_{\text{conversion}} = 50\%$ et que l'usine CCP possède un rendement de conversion $\eta_{\text{conversion}} = 20\%$. Pour calculer cette puissance solaire captée P_{solaire} , il suffit de diviser la puissance installée $P_{\text{installée}}$ par le rendement de conversion $\eta_{\text{conversion}}$:

$$P_{\text{solaire}} = \frac{P_{\text{installée}}}{\eta_{\text{conversion}}}$$

Le graphique ci-dessous présente la puissance solaire pour les deux mêmes centrales. En comparaison avec le graphique précédent (la centrale CCP), le cout d'installation pour un Watt de puissance solaire est cinq fois plus bas que le cout d'un Watt de puissance installée. Pour Hybrid Power, ce cout de puissance solaire est deux fois plus bas que le cout de puissance installé. Dès lors, pour la puissance solaire, les couts d'installation actuellement réalisés pour la centrale espagnole sont plus bas que la borne supérieure de Hybrid Power fixée par le prix de vente. Cette constatation nous laisse penser que, technologiquement parlant, il est possible de construire la centrale Hybrid Power en-dessous de la borne supérieure fixée par le prix de vente.

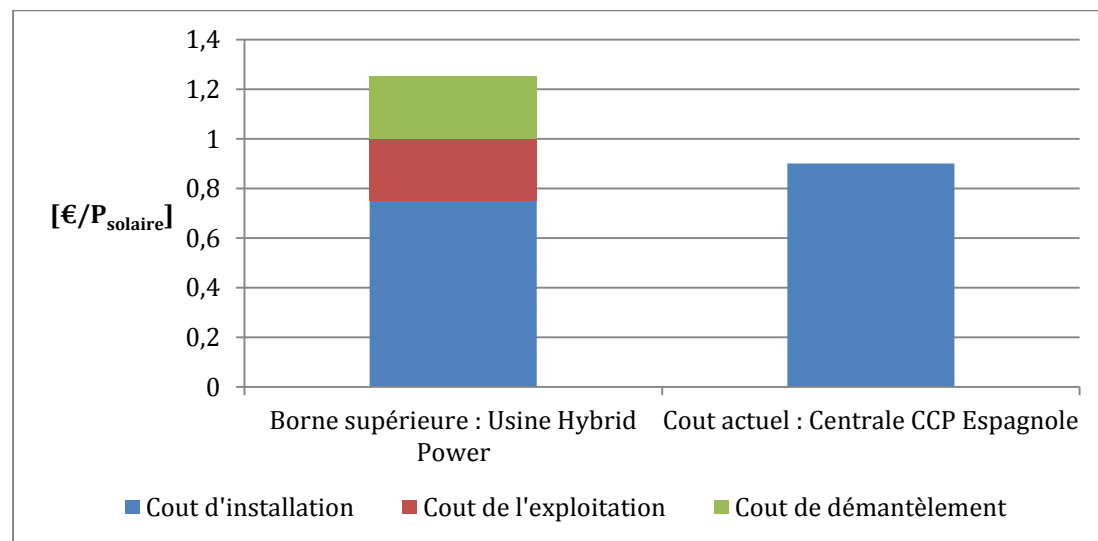


Figure 19 – Puissance solaire : Borne supérieure des couts d'installation, de maintenance et de démantèlement de l'usine Hybrid Power comparés aux couts d'installation d'une usine CCP espagnole [€/W]

Pour conclure ce premier estimatif, on constate que les économies réalisées par l'installation d'une centrale solaire atteignent un niveau de cout semblable aux technologies actuelles de concentration solaire. Il faut cependant étudier de manière plus précise les couts d'installation, d'exploitation, et de démantèlement pour déterminer la véritable rentabilité du projet.

Au sein de la partie technique, l'étude de cas détaillée montre que l'estimatif réalisé ci-dessus est une très bonne approximation de l'énergie thermique produite, cependant, l'énergie électrique produite n'est que de 1% au lieu des 5% prévu. Il est donc nécessaire d'utiliser de meilleurs matériaux thermoélectriques pour atteindre un rendement de conversion électrique acceptable.

Des meilleurs matériaux thermoélectriques peuvent être utilisés, notamment grâce à de nouveaux alliages thermoélectriques, ou encore en améliorant des propriétés du Fe_2VAl .

13. Plan Marketing

13.1. Politique de produit

La politique de produit reprend l'ensemble des éléments qui caractérisent l'offre proposée au client. Nous renvoyons le lecteur à la section Présentation du projet Hybrid Power.

13.2. Politique de prix

Le prix de l'énergie est la quantité d'argent que l'on est prêt à payer pour se procurer un kWh.

La politique de prix détermine le prix auquel nous allons vendre notre concentrateur solaire hybride.

Pour ce faire, nous allons prendre en compte trois facteurs distincts: l'étude de cout, la concurrence et la valeur perçue.

13.2.1. L'étude de cout

Le cout de production d'un kWh solaire peut se définir comme étant la somme de tous les couts engendrés par l'installation, l'exploitation et le démantèlement de la solution solaire, le tout divisé par le nombre de kWh produit durant toute la durée de vie.

$$\text{Cout du kWh} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] = \frac{\text{Cout d'installation, d'exploitation et de démantèlement}}{\text{Nombre de kWh produit durant toute la durée de vie}}$$

Le cout d'installation comprend l'achat et la fabrication de tous les composants, le cout de la main d'œuvre lors de l'installation, etc.

Le cout d'exploitation comprend essentiellement la maintenance du système.

Le cout du démantèlement comprend la main d'œuvre lors du démontage de l'installation ainsi que le cout de recyclage des composants.

A l'aide à tous ces couts, il est possible de déterminer un prix plancher, c'est-à-dire un prix en dessous duquel nous ne pouvons pas vendre notre produit, auquel cas il s'agirait d'une vente à perte.

Actuellement, il nous est impossible de connaître le cout précis d'un kWh produit dans une de nos usines solaires. En effet, il est tout d'abord essentiel de continuer la recherche et le développement afin d'obtenir un produit fini et performant. Par ailleurs, les couts de l'installation, de l'exploitation et du démantèlement dépendent énormément de la zone socio-économique mais également de la taille et de la complexité du projet. Enfin, le nombre de kWh produit par une centrale est évidemment dépendant de la zone géographique.

13.2.2. La concurrence

Nous devons également nous assurer que le prix fixé n'est pas disproportionné, à la hausse ou à la baisse, par rapport à la concurrence. Pour ce faire, nous allons nous comparer à l'entreprise Solar 2G et son panneau solaire hybride DualSun (cf. Section Concurrence directe page 39). Nous avons en effet pu disposer d'informations de prix et de couts assez précis pour cette entreprise.

Enveloppe budgétaire	8000€ TTC
Panneaux	2 – 4 panneaux DualSun
Gains	Prix stable de l'énergie sur 20 ans : 0,15€/kWh

Tableau 18 - Offre de prix de l'entreprise Solar 2G pour des panneaux solaires hybrides

Dans cette offre de prix, DualSun propose en fait d'installer des panneaux solaires hybrides qui servent à l'autoconsommation. Cette installation produira donc une certaine quantité d'énergie durant toute sa durée de vie, ici estimée à 20 ans. En d'autres termes, une fois l'installation payée, le consommateur ne doit plus payer son énergie. C'est à dire, qu'au final il paie un prix constant de 0,15 €/kWh pendant 20 années.

Pour nous comparer à cette offre de prix, nous devons nous placer dans les mêmes conditions d'ensoleillement et avec une capacité de production équivalente. Sachant que cette offre de prix est valide pour le sud de la France, nous déterminons dès lors que l'ensoleillement direct, utile pour notre solution solaire, est d'environ 3,5 kWh/m²/jour¹⁰⁴. Nous pouvons également déduire le nombre de kWh produit pour les panneaux DualSun durant ces 20 années :

$$\text{Nombre de kWh} = \frac{\text{Enveloppe budgétaire}}{\text{Prix du kWh}} = \frac{8000 \text{ [€]}}{0,15 \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right]} = 53\,000 \text{ [kWh]}$$

¹⁰⁴ K., UMMEL, D., WHEELER, « Desert Power: The Economics of Solar Thermal Electricity for Europe, North Africa, and the Middle East », *Center for Global Development*, December, 2008.

Le tableau ci-dessous compare les valeurs pour une installation solaire Hybrid Power et DualSun dans les mêmes conditions d'ensoleillement et pour une même capacité de production énergétique totale. Notons cependant que le ratio entre énergie électrique et thermique est différent pour DualSun et Hybrid Power.

Entreprise	Hybrid Power	DualSun
Ensoleillement direct [kWh/m ² /an]	1278	1278
Surface effective des solutions solaires [m ²]	4,15	2,92
Rendement thermique global [%]	45	51
Rendement électrique global [%]	5	20
Energie thermique produite annuelle [kWh]	2387	1890
Energie électrique produite annuelle [kWh]	265	741
Energie totale produite annuelle [kWh]	2652	2652
Energie totale produite en 20 ans [kWh]	53 000	53000

Tableau 19 - Approximation de l'énergie produite par la centrale sur le toit de Blancatex

En fixant un cout au kWh équivalent à DualSun, nous obtenons un prix pour l'enveloppe budgétaire qui sera également de 8000€. Grâce à cela, nous pouvons fixer un prix par mètre carré à ne pas dépasser pour rester compétitif.

$$\text{Prix par mètre carré} = \frac{\text{Enveloppe budgétaire}}{\text{nombre de mètres carrés}} = \frac{8000[\text{€}]}{4,15[\text{m}^2]} = 1927 \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right]$$

Ce prix par mètre carré est donc la borne supérieure à ne pas dépasser, auquel cas notre solution solaire produirait de l'énergie plus chère que DualSun. Les panneaux de DualSun étant plus performants, il est nécessaire de disposer de moins de mètres carrés pour une même puissance installée, étant donné que leur cout au mètre carré est plus élevé ($8000 / 2,92 = 2740 \text{ €/m}^2$), cela nous donnerait un avantage concurrentiel.

Notons que cette analyse de cout dépend de la région géographique en raison du gisement solaire. Chaque projet étant unique, la complexité de la mise en œuvre impactera sur le cout. Dès lors, il est nécessaire d'effectuer l'analyse de la concurrence par zone géographique et par type de projet.

13.2.3. La valeur perçue

Nous voulons également tenter de déterminer la valeur perçue par les clients, c'est-à-dire le prix que ces derniers sont prêts à mettre compte tenu de la valeur apportée.

Nous estimons que si une personne a un besoin en énergie, c'est dans la majorité des cas un besoin essentiel. Dès lors, la valeur perçue d'un kWh est donc la même qu'elle soit produite par le nucléaire ou par les énergies renouvelables.

Cependant, dans certains cas, la valeur perçue peut-être influencée par d'autres facteurs, comme par exemple la provenance de l'énergie, la fiabilité, la maintenance, etc. Dans notre cas, nous fournissons une énergie renouvelable et nous souhaitons fournir un service de haute qualité.

Nous pouvons aussi mettre en avant l'aspect plus durable de nos solutions solaires pendant la durée de leur cycle de vie. Notamment grâce à l'utilisation de matériaux moins polluants que les panneaux photovoltaïques.

13.3. Politique de distribution

Notre canal de distribution se fera principalement par le biais de nos agents commerciaux. Cependant, notre futur client devra se rendre sur notre site internet pour établir un premier lien avec notre entreprise.

13.3.1. Notre site internet

Notre site internet est utilisé à titre publicitaire et informatif. Les personnes intéressées peuvent réaliser une simulation incitative sur celui-ci. Plusieurs informations vont leur être demandées notamment leur consommation en électricité, en gaz, en pétrole, en charbon qui indiquent leurs besoins en énergie, la région dans laquelle ils se situent, la surface disponible, l'orientation, etc.

Une fois ces données recueillies, un calculateur permet de communiquer de manière approximative les économies réalisées s'ils font appel à notre concentrateur solaire hybride. Aucun contrat de vente ne se fait via la plateforme internet.

Après cette simulation incitative, et si le futur client est intéressé et veut en connaître davantage, il devra prendre contact avec notre bureau d'étude. Ce dernier réalisera une analyse plus approfondie du processus industriel de l'entreprise afin de lui remettre un devis. Lors de cette démarche de conception, si le client décide de ne pas faire appel à notre solution solaire, il s'engage à payer un certain prix pour l'étude réalisée (Cf. section Le contrat de vente à la page 106).

13.3.2. Distribution via les agents commerciaux

Nous avons fait le choix de faire appel à des agents commerciaux (choix justifié L'agent commercial à la page 123).

Une de raisons principales est la motivation accrue d'un agent commercial car il est entièrement payé à la commission. Ces agents vont se rendre sur place et prouver à nos clients potentiels que grâce à notre solution, ils vont pouvoir diminuer le cout de leur facture énergétique.

Cette équipe sera en contact continu avec le bureau d'étude afin de toujours mieux comprendre les besoins de nos clients et d'adapter notre technologie à leurs attentes afin de rester compétitif.

13.3.3. Schématisation

Le schéma ci-dessous nous montre le canal de distribution. Il s'agit d'une suite logique, car nous pouvons commencer par le marketing qui se décline sous la forme de publicité ou de présence sur des salons spécialisés. Celui-ci renvoie directement sur le site internet, le client pourra y faire un premier estimatif et avoir une idée approximative de ce que pourrait être son installation. Enfin, il faut un contact avec un agent commercial pour conclure le contrat avec Hybrid power et être redirigé vers le bureau d'étude.

Il faut souligner que le canal de distribution peut commencer à n'importe quelle étape du cheminement et que celui-ci continue vers la droite pour terminer au bureau d'étude.

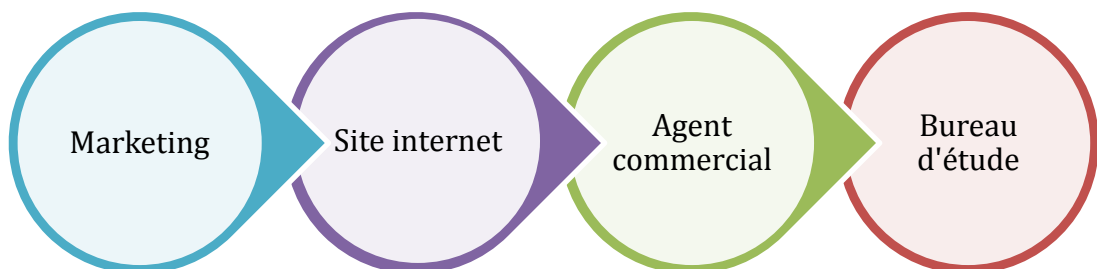


Figure 20 : canal de distribution

13.4. Politique de communication et promotion

Nous avons opté pour une stratégie de prix (cf. Stratégie à la page 57). Cependant, notons que notre solution, à faible coût et de bonne qualité, n'aura que très peu d'incidence auprès de sa cible si elle ne véhicule pas une notoriété forte et si notre stratégie de communication et de promotion ne fait pas la différence.

Bien que nous soyons les premiers entrants sur le marché marocain (cf. First mover advantage à la page 49), nous devons frapper l'esprit de notre client cible : les industries. « Le produit qui dispose du plus fort *top of the mind* est presque systématiquement le leader sur son marché »¹⁰⁵. Le nom Hybrid Power a pour but de véhiculer une image de puissance d'énergie et un mécanisme hybride produisant à la fois de l'électricité et eau chaude (« 2 en 1 »).

13.4.1. Communication avec les industries

Notre communication avec les industries se fera uniquement via du marketing direct.

13.4.1.1. Internet

Trois points primordiaux sont mis en avant sur notre site internet :

- L'opportunité de réduire sa facture énergétique
- Acquérir un produit innovant
- S'engager écologiquement pour la planète (énergie renouvelable)

En outre, nous serons présents sur les réseaux sociaux tels que Facebook, Twitter et LinkedIn mais aussi sur Google+, Vimeo (partage et visionnage de vidéos faites par les utilisateurs) et Slideshare (partage de présentation de contenus professionnels).

13.4.1.2. Emailing

Pour remercier nos clients de leur fidélité, nous leur enverrons des e-mails régulièrement pour leur donner des conseils afin d'économiser de l'énergie, ainsi que les dernières tendances énergétiques du pays. Egaleme nt, nous présenterons les derniers grands projets exécutés et les meilleures performances réalisées par nos solutions solaires. Ces e-mails prendront la forme d'une newsletter personnalisée. En outre, nous ferons des campagnes d'emailing à destination d'industries potentielles.

¹⁰⁵ R., HIEBING, S., COOPER, *Construire un plan marketing performant*, Paris, Interéditions, 1994, p.54.

13.4.1.3. Agents commerciaux

Notre plus grande force de vente sera dirigée par des agents commerciaux. Nous attendons d’eux qu’ils communiquent aux industries les informations relatives au caractère innovant du produit, à ses caractéristiques et son fonctionnement.

Durant la troisième phase (cf. Milestones à la page 55), nous attendons qu’ils démontrent à nos clients potentiels, aidés par les projets déjà réalisés, que notre solution diminue leur facture énergétique.

13.4.1.4. Salons et foires

Nous voulons également être présent dans les foires et salons traitant de l’énergie renouvelable afin d’augmenter notre visibilité. Les premiers salons et foires visés seront à destination des industries. Ensuite, nous participerons à des salons à destination des particuliers afin d’élargir notre cible.

14. Plan d'action

Hybrid Power va lancer sa société dans le secteur énergétique, elle a un prototype mais le développement complet du produit prendra encore un certain temps. A terme, l'objectif de Hybrid Power est de convaincre l'UCL de nous accompagner et de créer une spin-off universitaire.

En effet, il nous semble assez clair que nous sommes à un stade où nous avons découvert une incroyable application de la technologie thermoélectrique mais que nous n'avons pas encore de produit à commercialiser immédiatement. Si nous nous lançons directement sur le marché, dès septembre 2014, ce serait un flop commercial car nous n'avons pas encore de design terminé et la solution solaire n'est pas encore correctement optimisée. Dans cette situation, il serait dommageable, pour l'image de la société, de se lancer directement.

Nous voulons travailler en étroite collaboration avec l'UCL car elle nous a en partie permis de mettre en place notre projet. Dans la philosophie de Hybrid Power, nous pensons qu'il est important de travailler main dans la main avec l'université pour améliorer, sans cesse, notre produit, par conséquent la technologie.

Néanmoins, nous sommes réalistes, lors du lancement il est compliqué d'assumer les frais financiers élevés qu'engendrent la recherche et le développement. C'est principalement dû aux salaires des chercheurs et aux frais de laboratoire. Pour la société, il sera difficile d'assumer l'ensemble de ces coûts si nous n'avons aucune rentrée d'argent. En effet, nous ne pouvons pas vendre un produit à l'état de développement.

En région Wallonne, il existe un programme qui pourrait nous aider : le programme FIRST spin-off. Nous vous renvoyons au point « Aides au lancement » ;

14.1. Vision de l'entreprise

14.1.1. Phase de lancement

Ainsi qu'expliqué dans le point précédent, notre technologie n'est pas encore prête à être commercialisée. C'est pourquoi dans un premier temps, nous aimerions pouvoir convaincre l'université de nous supporter dans notre démarche entrepreneuriale.

Pour ce faire, nous aimerions convaincre la Sopartec de nous faire passer par la phase d'incubation. Cet organisme définit cette phase comme tel : *« création d'une entreprise technologique. Elle permet d'identifier les applications potentielles de la technologie, d'apprendre à connaître le(s) marché(s) visé(s), d'orienter la R&D en*

tenant compte des besoins du marché, de réaliser une preuve de concept technique et commerciale,... dans le but de valider le modèle d'affaires et de concevoir le plan d'affaires. Cette phase d'incubation permet également de constituer ou compléter l'équipe qui aura la mission d'exécuter le plan d'affaires et de mettre en place un conseil d'administration expérimenté.»¹⁰⁶.

Dans le cas où cette phase d'incubation se déroulerait avec succès, nous voulons placer le siège de notre entreprise au Centre Monet qui est un véritable pôle entrepreneurial pour les entreprises ayant un lien avec l'université. Nous comptons également sur un accord avec l'UCL dans le but d'utiliser une partie de ses laboratoires pour continuer nos recherches et développements, nous estimons celle-ci à une année.

14.1.2. Phase de croissance

Après avoir fini la phase d'incubation et avoir développé au mieux notre produit, nous espérons le vendre. Pour ce faire, nous visons le marché marocain possédant un gisement solaire important. Nous sommes déjà en contact avec des entreprises marocaines intéressées.

L'idée est d'installer des champs de notre solution solaire aux abords des usines ou des entreprises pour leur fournir l'énergie. Etant donné qu'il s'agit d'un montage qui s'effectuera à plusieurs kilomètres de Louvain-la-Neuve, nous estimons qu'il est plus simple de sous-traiter le montage et l'installation des panneaux directement sur place. Nous n'effectuerions qu'un simple contrôle final de qualité.

Du côté de l'entreprise elle-même, nous espérons pouvoir trouver des investisseurs prêts à risquer un investissement dans notre société pour pouvoir optimiser notre produit et essayer de quitter les laboratoires de l'UCL.

14.1.3. Phase d'expansion

Il s'agit ici d'une vision de cinq à dix ans. Dans cette étape, nous espérons d'une part pouvoir agrandir notre équipe du pôle recherche et développement ainsi que notre équipe commerciale pour pouvoir prospecter de nouveaux marchés.

Le but est de pouvoir se fixer sur de nouveaux marchés en dehors du Maroc mais dans des pays à fort ensoleillement. Nous pensons notamment à l'Espagne, le Portugal mais également en dehors de l'Europe en Asie ou en Amérique du Sud.

¹⁰⁶ La phase d'incubation : *quand une technologie devient un produit* disponible sur <http://www.sopartec.com>.

Dans cette phase, nous voulons aussi essayer de maîtriser l'ensemble de la chaîne de production. Nous visons un objectif précis : se passer de sous-traitants. Nous désirons avoir nos propres installateurs et équipes de maintenance par zones géographiques définies.

14.2. Les droits d'exploitation de la technologie

Notre business plan exploite une technologie thermoélectrique qui a été en partie développée par l'UCL.

Il semble pertinent de faire un bref rappel historique de la technologie. En se basant sur des recherches de chercheurs japonais, le Professeur Pascal Jacques travaille en étroite collaboration avec un doctorant et un autre professeur de l'ULG, sur un alliage de métal. Le but est d'optimiser la faculté de cet alliage à capter la chaleur pour la changer en électricité. Cette technologie se présente donc sous la forme de petites pièces de métal. En 2013, l'équipe de chercheurs a déposé un brevet sur une application de cette technologie. Pour rester simple, il s'agit d'une plaque thermoélectrique. Cette forme géométrique est complètement nouvelle¹⁰⁷.

Il faut être clair sur un point, nous n'allons pas utiliser ce brevet car nous allons créer une application complètement différente. Nous allons utiliser une partie de la technologie que nous avons améliorée dans les laboratoires de l'UCL pour en faire une application particulière. L'application que nous avons créée est née de l'esprit de Jérémie Denis et de l'aide de ses promoteurs.

L'objectif de cette section est de vérifier que notre application est bien brevetable et de prouver à l'UCL que les conditions sont réunies afin de pouvoir mettre en œuvre la procédure de brevetabilité.

14.2.1. Titularité des droits de l'invention

Dans le cadre de notre projet, nous avons effectué des recherches au sein des laboratoires de l'UCL. Par conséquent, nous avons utilisé les ressources mises à notre disposition par l'université. Préalablement, nous avons signé une convention nous soumettant au règlement en matière de propriété intellectuelle¹⁰⁸.

Jérémie Denis a, lors de ces recherches et grâce à ses promoteurs, découvert un nouveau moyen d'exploiter l'énergie solaire grâce à la combinaison de moyens connus. Il est par conséquent l'un des inventeurs de cette nouvelle technologie. Néanmoins, selon l'article 4.1 du règlement, « *la propriété des résultats de recherche revient à l'Université* ». Le règlement définit ce qu'est un résultat de recherche : « *On entend par résultats des recherches les résultats, brevetables ou non, obtenus dans le cadre des recherches effectuées à l'UCL à l'exclusion des inventions libres, c'est-à-dire des inventions réalisées par des personnes liées à l'Université dans des domaines*

¹⁰⁷ Voir annexe : L'abstract du Brevet Valther.

¹⁰⁸ Règlement en matière de propriété, de protection et de valorisation des résultats des recherches réalisées au sein de l'UCL, 29 mars 2006 disponible sur <http://www.uclouvain.be/393204.html>.

*totale*ment extérieurs à ceux de leur activité professionnelle et sans le recours à des moyens matériels et/ou humains provenant de l'UCL »¹⁰⁹. Au vu de cette définition, nous estimons que les résultats de nos recherches sont soumis au règlement de l'UCL.

Une question se pose dès lors, Jérémie Denis, en tant qu'inventeur, est-il en droit de poser un brevet sur ce nouveau procédé ?

Il faut se tourner vers la convention de Munich portant sur les brevets européens¹¹⁰ pour en avoir la réponse: « *le droit au brevet appartient à l'inventeur ou à son ayant cause*¹¹¹ », toujours dans les termes de ce même article 60, si l'inventeur est dans la relation contractuelle de travail, il faut se référer au droit du pays dans lequel l'employé exerce son activité principale. Il faut donc se référer au droit belge pour résoudre la question. Malheureusement, la loi belge ne tranche pas la question de savoir de qui de l'employeur ou de l'employé a le droit de poser un brevet¹¹². Il semble donc nécessaire de se tourner vers la convention qui fera la loi des parties¹¹³. Il faut donc se référer à la convention signée avec l'UCL. Dans la convention que nous avons signée, nous avons le statut de chercheur non rémunéré que nous pouvons assimiler à un contrat de travail. Dans cet accord, nous cédon

Il convient donc à l'Université de prendre toutes les mesures qui incombent pour protéger la propriété intellectuelle des trouvailles. Elle va le faire par le biais de la Sopartec. Cet organisme est chargé de prendre toutes les mesures appropriées pour une éventuelle protection juridique¹¹⁴.

En tant qu'ayant cause des droits intellectuels, l'Université et son comité de gestion des brevets¹¹⁵ devra décider s'il convient de breveter ou non la technologie proposée par Hybrid Power.¹¹⁶

¹⁰⁹ Art. 2.2 du règlement

¹¹⁰ Convention du 5 octobre 1973 sur la délivrance de brevets européens, *M.B.*, 7 octobre 1977.

¹¹¹ Art. 60, Convention du 5 octobre 1973 sur la délivrance de brevets européens, *M.B.*, 7 octobre 1977.

¹¹² Art.8 Loi du 28 mars 1984 sur les brevets d'invention, *M.B.*, 9 mars 1985.

¹¹³ Art. 1134 C.civ.

¹¹⁴ Art. 2.3.2 Règlement en matière de propriété, de protection et de valorisation des résultats des recherches réalisées au sein de l'UCL, 29 mars 2006

¹¹⁵ Art. 2.4 *op. cit*

¹¹⁶ Art. 5.2 *op. cit*

14.2.2. Une Application brevetable ?

Le but de cette section est de prouver que notre technologie est brevetable et qu'elle rentre bien dans l'ensemble des conditions légales. Nos considérations sont là pour aiguiller le comité de brevetabilité de l'UCL qui aura le dernier mot quant à la protection par brevet.

14.2.2.1. Type d'invention brevetable

Il nous semble important de classer correctement le type d'invention que nous prétendons comme brevetable. En effet, le but est de soulever tout doute quant à la catégorie de l'invention. Les règles qui s'appliquent ne sont foncièrement pas différentes si elles appartiennent à un type ou à un autre.

Il faut distinguer deux grandes catégories de brevets : ceux de produits et ceux de procédés¹¹⁷. Il est important de marquer cette distinction car la protection est légèrement différente dans un cas ou dans l'autre¹¹⁸.

Dans le cas de notre prototype, il existe un type d'invention spécifique que l'on peut qualifier de « *combinaison nouvelle de moyens connus : rassemblement d'organes connus en eux-mêmes mais qui n'avaient pas été réunis jusque-là et qui produisent un résultat d'ensemble des organes assemblés* »¹¹⁹. Il faut ajouter à cette définition que le résultat obtenu ne doit pas être forcément nouveau¹²⁰. Dans notre cas, nous allons produire de l'énergie sous forme d'électricité et d'énergie thermique, ce qui existe déjà.

En se référant à cette définition, nous pouvons y reconnaître notre produit. En vulgarisant le fonctionnement du prototype, un concentrateur va utiliser les rayons directs du soleil pour parvenir à chauffer un module thermoélectrique connu et développé par l'UCL. Celui-ci va produire de l'énergie électrique et de l'énergie thermique. Finalement nous espérons pouvoir émettre un brevet sur ce nouveau procédé.

Il nous reste à démontrer que l'ensemble des conditions légales sont remplies.

¹¹⁷ Remiche, B. *Droit des brevets d'invention et du savoir-faire : Créer, protéger et partager les inventions au XXI siècle*, Bruxelles, Larcier 2010, p. 87.

¹¹⁸ Dans le cas du produit : il existera une protection contre l'ensemble des contrefaçons tandis que dans le cas de du procédé il n'y aura jamais de contrefaçon si pour arriver à un même résultat on utilise un procédé différent.

¹¹⁹ Derouane, D., « Le dépôt de brevet comme outil de valorisation », conférence doctorale, Unamur, disponible sur <http://www.unamur.be/>

¹²⁰ Remiche, B., *Droit des brevets d'invention et du savoir-faire : Créer, protéger et partager les inventions au XXI siècle*, Bruxelles, Larcier 2010, p. 92.

14.2.2.2. Les conditions de brevetabilité

La loi prescrit des conditions pour que l'invention soit brevetable. Les conditions sont identiques pour le brevet européen ou le brevet belge¹²¹.

L'article 2 de la loi sur les brevets d'invention du 28 mars 1984 énonce que : « *Sous les conditions et dans les limites fixées par la présente loi, il est accordé sous le nom de "brevet d'invention", appelé ci-après brevet, un droit exclusif et temporaire d'exploitation pour toute invention qui est nouvelle, implique une activité inventive et est susceptible d'application industrielle.* »

Il existe donc trois conditions de fond pour que l'invention soit brevetable : il faut qu'elle soit nouvelle, qu'elle implique une activité inventive et qu'elle soit susceptible d'une application industrielle.

a) La nouveauté

Il s'agit d'un critère auquel il faut prêter une attention particulière car c'est souvent là que de nombreuses inventions perdent l'accès à la brevetabilité.

En effet, l'article 5 de la loi belge, en tout point identique à la norme européenne, énonce que « *§ 1er. Une invention est considérée comme nouvelle si elle n'est pas comprise dans l'état de la technique. § 2. L'état de la technique est constitué par tout ce qui a été rendu accessible au public avant la date de dépôt de la demande de brevet par une description écrite ou orale, un usage ou tout autre moyen* ¹²² ».

Il faut donc se référer à l'état technique ce qui veut dire qu'il faut se placer antérieurement au dépôt du brevet et savoir si l'invention est similaire à quelque chose qui existait ou encore si elle a été divulguée. L'antériorité est destructrice de nouveauté¹²³.

Dans le cas de Hybrid Power, on peut se poser des questions quant à cet état technique. En effet, il y a un brevet historique¹²⁴ par lequel une équipe de scientifiques de l'UCL a déjà breveté un module thermoélectrique.

Notre technologie est-elle vraiment différente ? Il faut répondre par la positive, bien que les deux technologies arrivent plus ou moins au même résultat, les procédés sont complètement différents dans la manière avec laquelle elles captent l'énergie

¹²¹ Art 2 loi belge et art. 52.1 CBE

¹²² Art.5 *op. cit.*

¹²³ Mons, 9 janvier 2004, *J.L.M.B.*, 2004, p.894.

¹²⁴ Voir annexe : L'abstract du Brevet Valther.

thermique. C'est là qu'il s'agit d'une véritable différenciation par rapport au brevet précédent.

Il faut maintenant s'assurer que le procédé que nous prétendons comme brevetable n'a pas déjà été mis en œuvre. A ce sujet, nous n'avons pas connaissance qu'un tel procédé possédant les mêmes éléments techniques a déjà été mis en place. En effet, pour que notre procédé ne soit pas brevetable, il faudrait qu'il existe déjà (dans l'état technique).

Il reste un dernier point à aborder dans le cas d'Hybrid Power, la divulgation de notre invention. D'une part, avec les contacts que nous avons pris lors de la prospection, nous avons pris la peine de ne pas expliquer l'ensemble du procédé. Pour perdre la nouveauté par la divulgation, il faut que l'antériorité soit « compacte », c'est-à-dire qu'il faut que nous divulguions l'ensemble de notre invention et de sa mise en place¹²⁵. L'agencement de simple bride d'informations éparses ne suffit pas à détruire le caractère nouveau de l'invention.

Nous estimons quant aux éléments cités que nous remplissons le critère de la nouveauté.

b) Activité inventive

Il s'agit encore une fois d'une condition de fond qui a un prescrit légal. En effet, il faut se référer à l'article 6 qui explique ce qu'est une activité inventive : « *Une invention est considérée comme impliquant une activité inventive si, pour un homme du métier, elle ne découle pas d'une manière évidente de l'état de la technique. Les documents visés à l'article 5, § 3, ne sont pas pris en considération pour l'appréciation de l'activité inventive.*¹²⁶ ». Il convient de souligner que dans la norme européenne, il y a une description similaire à l'article 56 CBE.

Il faut donc une certaine prestation de la part de l'inventeur, il faut qu'il ait effectué une certaine cogitation. Dans la définition légale on y retrouve trois critères pour évaluer le degré d'inventivité : l'homme de métier, l'état technique et la non-évidence.

En ce qui concerne l'homme de métier, il s'agit d'une fiction juridique pour permettre d'évaluer si un autre praticien avec les mêmes connaissances techniques aurait sans créativité pu résoudre le problème que l'invention prétend solutionner¹²⁷.

¹²⁵ De VISSCHER, F., « la protection des innovations et du savoir-faire », *guide juridique de l'entreprise- Traité théorique et pratique*, 2^{ème} éd., titre X, liv. 98.1, Waterloo Kluwer, 20 octobre 2003, p. 23.

¹²⁶ Art. 6 *op. cit.*

¹²⁷ Remiche, B., *Droit des brevets d'invention et du savoir-faire : Créer, protéger et partager les inventions au XXI siècle*, Bruxelles, Larcier 2010, p. 112.

En ce qui concerne l'état technique, il s'agit de tout ce que doit connaître cet homme de métier (fictif).

Enfin la non-évidence est prouvée lorsque pour l'homme de métier et dans l'état technique actuel, il parvient à la même invention sans avoir fait preuve d'aucune activité inventive. Dans un tel cas, l'invention était évidente et perd son caractère nouveau. Cependant, il s'agit d'un critère qui reste difficilement évaluable. En effet, ce n'est pas parce que l'inventeur n'a pas été particulièrement minutieux ou que la mise en œuvre est facile que c'est forcément évident.

Dans le cas de Hybrid power, nous estimons que notre procédé couvre bien cette condition de non évidence. Bien que la combinaison semble facile, Jérémie Denis et ses promoteurs ont du faire preuve d'inventivité quant à l'agencement des différents composants tout en continuant à optimiser le résultat de leur recherche (l'invention).

Nous savons que c'est sur ce critère que portera le débat afin de s'assurer que l'invention est bien brevetable. C'est pourquoi nous proposons au LTTO d'utiliser la méthode que l'Office européens des brevets met en œuvre. Il s'agit de l'approche « problème-solution » des brevets par laquelle OEB évalue les brevets¹²⁸, grâce à celle-ci et en passant par les différentes étapes, nous pourrions évaluer notre demande.

c) L'application industrielle

La dernière condition est que l'invention doit avoir une application industrielle et elle doit pouvoir être utilisée dans n'importe quelle industrie¹²⁹. Le but est de pouvoir valoriser l'invention et de pouvoir lui trouver une utilité dans la société.

Dans le cas de Hybrid Power, il est clair que le produit a une utilité dans tout type d'industrie car il produit de l'énergie et il est adaptable aux besoins d'industries différentes. Il existe donc une véritable possibilité d'application industrielle.

14.2.3. Le comité de brevetabilité

A la suite de l'énumération des conditions, nous estimons que notre invention pourrait être brevetable. Il faut tout de même rappeler que nous développons une technologie au sein de l'UCL. La conséquence est que nous travaillerons main dans la main avec la Sopartec et le LTTO.

¹²⁸ Directives relatives à l'examen pratiqué à l'Office européen des brevets, septembre 2013 disponible sur <http://www.epo.org/>.

¹²⁹ Art. 7, *Op. Cit.*

Dès lors, nous devons nous soumettre au comité de gestion des brevets de la Sopartec, celui-ci se réunit plusieurs fois par an et il a comme compétence d'étudier l'opportunité de faire un dépôt de brevet sur les inventions développées au sein de L'UCL.

Il est important de rappeler que nous devons faire au moins une année de recherches sur notre prototype et que celui-ci va être optimisé jours après jours. Il en découlera certainement de nouvelles innovations qui seront probablement brevetables.

Il faudra rester innovant et valoriser la recherche grâce à des brevets qui seront un appui à la partie économique et commerciale. En effet, en brevetant les technologies exploitées par Hybrid Power, cela nous assurera le monopole de celle-ci pendant une période déterminée ce qui, nous l'espérons, attirera des investisseurs et une clientèle.

Une dernière remarque semble essentielle. Une fois que le comité de brevetabilité trouve opportun de faire une demande de dépôt de brevet, il faut que l'office des brevets accepte la demande.

14.3. Relation avec L'université

14.3.1. La Sopartec

En 1992, l'UCL a créé la Sopartec dans le but de valoriser la création de nouvelles activités grâce aux recherches menées au sein de l'université. En 1999, elle a été chargée de la gestion de la propriété intellectuelle de l'université¹³⁰. Il s'agit avant tout d'une société d'investissement qui a pour but de créer de nouvelles activités entrepreneuriales par le biais de spin-offs sur base de recherches effectuées au sein de l'UCL

La Sopartec définit une spin-off sur son site internet de cette manière « *Une entreprise spin-off universitaire est une nouvelle société créée à partir d'un laboratoire de recherche dont l'objectif est de valoriser commercialement un résultat de recherche (une technologie). Pour ce faire, la société spin-off est en principe liée à l'université par le biais d'un contrat de licence qui établit les conditions du transfert de la technologie du laboratoire vers la société*¹³¹. »

Au regard de cette définition, il semble que notre future société Hybrid Power S.A. soit fort probablement une spin-off étant donné que nous voulons valoriser commercialement une recherche universitaire.

¹³⁰ Informations disponibles sur <http://www.sopartec.com>.

¹³¹ Informations disponibles sur <http://www.sopartec.com>.

C'est donc à la Sopartec que nous devons nous adresser lorsque nous serons prêts à lancer Hybrid Power S.A. Lors du lancement de notre société, la Sopartec nous imposera de passer par une phase d'incubation, selon eux, une étape fondamentale lors lancement.

14.3.2. Le droit d'exploiter les recherches

Dans le cas où nos recherches aboutissent, il faut rappeler que l'ensemble de celles-ci appartiendront à l'UCL comme expliqué précédemment. L'université possèdera donc la propriété intellectuelle de la technologie que nous voulons exploiter.

Dans le but d'exploiter et commercialiser Hybrid Power, il va falloir négocier avec l'UCL. Nous allons devoir négocier le droit d'exploiter cette technologie, en vertu du règlement de propriété intellectuelle de l'UCL, il faut s'adresser à la Sopartec pour mener ces négociations. Dès lors nous avons donc rencontré plusieurs intervenants de la Sopartec notamment Frédéric Ooms qui est Senior Patent & Licensing Manager et Laurent van den Hove qui assure la fonction de Senior Legal Counsel, dans le but de bien comprendre l'ensemble de la procédure.

Il nous a été expliqué qu'il était très rare que l'université cède le brevet et qu'elle fonctionne plutôt avec des contrats de licences. En effet, elle préfère garder la propriété des brevets pour s'assurer que lorsque la licence n'est plus exploitée, l'UCL peut recouvrer ses droits d'exploitation.

Nous allons donc demander l'octroi d'une licence d'exploitation. En droit belge, il n'y a pas de véritable définition mais on peut le comparer à un contrat de location¹³². En effet, nous allons en quelque sorte « louer » l'exploitation d'un droit intellectuel avec la contrepartie qui est le paiement de royalties s'apparentant au paiement d'un loyer.

Laurent van den Hove nous a expliqué que lorsqu'on serait parvenu à négocier l'octroi de la licence, il ne nous restait plus qu'à négocier le montant des royalties. Il n'existe pas de montants prédéfinis mais il s'agira normalement d'un pourcentage sur les revenus de la spin-off. C'est ce pourcentage qui fera l'objet de la négociation.

Le taux de ce pourcentage dépend de plusieurs facteurs :

Premièrement, du domaine d'application, dans le cas de Hybrid Power il est assez large car l'énergie couvre un large panel d'industries.

¹³² J. Derenne, « la protection juridique des créations nouvelles », *Guide juridique del'entreprise*, 2^e éd., titre X, liv.98, p. 35.

Deuxièmement, ce taux dépend de la demande de l'exclusivité d'exploitation ou non, dans notre cas, nous préférons bénéficier de l'exclusivité.

Troisièmement, cela dépend également de l'étendue territoriale sur laquelle nous désirons bénéficier de l'exploitation. Nous espérons pouvoir acquérir l'exploitation sur l'ensemble des territoires que pourra couvrir les brevets.

Enfin il faut aussi prendre en compte la durée de ce contrat de licence, nous espérons l'obtenir pour une période de quinze à vingt ans.

En prenant toutes ces données en compte, Laurent van den Hove nous a expliqué que le taux devrait varier entre cinq et dix pourcents. Néanmoins, il nous a rappelé que c'est un taux à calculer au cas par cas et que nous serions amenés à nous revoir dans l'éventualité d'un lancement.

Enfin, il existe un avantage à utiliser ce système : il ne faut payer de royalties qu'au moment où l'entreprise fait des bénéfices ce qui est un véritable avantage.

14.3.3. Schématisation

Ci-dessous, le schéma synthétise les relations entre la Sopartec et Hybrid Power.

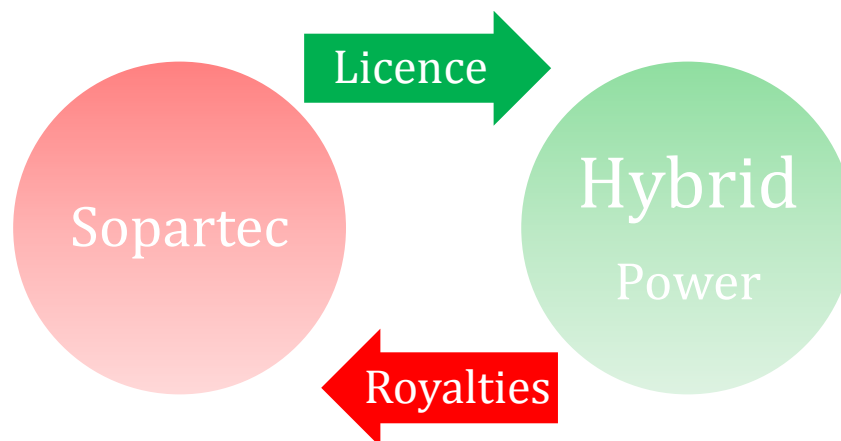


Figure 21 : Relation entre Hybrid Power et Sopartec

14.4. Structure

Dans le cadre de notre projet, il s'agit de choisir une dénomination. Celle-ci sera le nom de notre société et de notre premier produit.

14.4.1. La dénomination sociale

S'agissant d'une société, la loi impose de choisir une dénomination sociale qui figurera dans les statuts¹³³. Celle-ci doit être unique et ne doit pas être déjà utilisée par une autre personne morale. En effet, il faut que la dénomination sociale soit originale et qu'elle ne porte pas à confusion avec une entreprise déjà existante.

Il faut donc vérifier si la dénomination sociale de notre future société est déjà utilisée ou non. Pour ce faire, il faut effectuer une recherche dans la base de données de la Banque carrefour des entreprises (BCE). Celle-ci reprend l'ensemble des sociétés constituées en Belgique. Cette base de données est accessible sur le site internet du SPF économie¹³⁴.

Dans le cas où notre nom ressemblerait ou pourrait porter à confusion avec le nom d'une société existante, celle-ci pourrait intenter une action devant le tribunal de commerce¹³⁵. Le but de cette action serait de modifier notre dénomination et d'obtenir des dommages et intérêts.

Après vérification auprès de la Banque carrefour des entreprises, le nom Hybrid Power S.A. n'est pas encore pris par une autre société. A notre connaissance, il n'existe aucune autre société portant un nom qui pourrait porter à confusion avec le nôtre.

14.4.2. Le nom commercial

Il s'agit du nom avec lequel notre société commerciale va participer au monde des affaires, il peut être différent de la dénomination sociale. Le but est simplement de nous différencier et d'être reconnaissable par rapport à nos concurrents. Encore une fois, il s'agit d'être attentif à ce que notre nom commercial ne soit pas similaire avec celui d'une autre entreprise. En effet, si le choix de notre nom est trop proche de celui d'un concurrent, cela pourrait porter à confusion dans l'esprit des clients. Il s'agirait alors d'une concurrence déloyale : celle-ci est sanctionnée par la loi du 14 juillet 1991

¹³³ Art. 65 C. soc.

¹³⁴ Informations disponibles sur <http://www.economie.fgov.be/>

¹³⁵ Art. 65 C. soc.

sur les pratiques du commerce et sur l'information et la protection du consommateur¹³⁶.

Il convient de souligner qu'il faut apprécier *in concreto* si il y a bien une concurrence déloyale notamment en évaluant si les entreprises sont dans le même secteur d'activité, si elles opèrent dans une même zone ou encore si elles vendent des produits similaires.

Après vérification, nous utiliserons le nom de Hybrid Power comme nom commercial dans le but d'être reconnu sous ce patronyme.

14.4.3. Société anonyme

Après avoir comparé différentes formes de sociétés existantes en droit belge, l'équipe a fait le choix de se tourner vers la société anonyme¹³⁷. C'est un choix qui s'est imposé pour plusieurs raisons.

a) La limitation de la responsabilité

Enoncé par le code des sociétés en son article 437, il s'agit d'une société dans laquelle les associés n'engagent qu'une mise déterminée. En effet, en tant que fondateurs, nous limiterons les risques financiers aux sommes, qui sous forme d'apports, sont injectées dans la société. Il y a donc une séparation des patrimoines entre la personne morale de la société et le patrimoine privé des fondateurs. Ce qui peut également sembler plus sécurisant pour les investisseurs externes.

b) La libre cessibilité des titres

Dans la société anonyme contrairement aux autres formes de sociétés, les titres peuvent être cédés plus facilement même si certains mécanismes existent et peuvent limiter cette cessibilité. Dans le but de financer notre activité, nous devons recourir à des financements externes que ce soit par le biais de Business Angels, fonds d'investissement ou groupes d'investisseurs (comme des ventures capitalistes). A un moment, ceux-ci voudront vendre les titres qu'ils auront reçus en échange de leurs investissements.

Il convient de souligner que nous pouvons limiter la négociabilité de certains de ces titres en vertu des 510 et s. du code des sociétés dans le but de créer un actionariat principal. Celui-ci pourrait être notre équipe ou un actionnaire principal. En créant cette limitation, nous nous assurerons une certaine stabilité.

¹³⁶ Loi du 14 juillet 1991 sur les pratiques du commerce et sur l'information et la protection du consommateur, *M.B.*, 29 août 1991.

¹³⁷ Voir annexe : Comparaison des sociétés.

c) La révocabilité *ad nutum*

Le principe de révocabilité *ad nutum* permet de révoquer les administrateurs sans motifs et sans aucun préavis¹³⁸. Il s'agit d'un avantage pour les futurs investisseurs car ils pourront veiller à ce que la direction de la société soit en accord avec leurs attentes. Le but est de rendre notre société attractive pour les investissements extérieurs.

d) Image de la S.A.

La société anonyme a le mérite de bénéficier d'une certaine image positive auprès des investisseurs que ça soit au niveau national mais aussi sur le plan international. Cela est, en partie, due au fait que le capital est plus élevé que dans d'autres sociétés ce qui rend les investisseurs et les créanciers moins frileux. Nous pensons que créer une S.A. donnera de la crédibilité à notre projet.

e) La relation avec la Sopartec

Notre objectif est de créer une société en lien avec l'université, par conséquent nous aurons des liens étroits avec la Sopartec et le LTTO. Au fil des rencontres avec les différents responsables de ces organismes, il est clair que la S.A. est la forme la plus utilisée dans la création de spin-offs. En suivant cette logique, cela renforce notre choix de se diriger vers la S.A.

f) Le capital

Dans le cas de Hybrid Power, le montant de 61.500€ imposé par la loi¹³⁹ n'est pas un frein à la création de notre société. En effet, en étant une société technologique et se tournant vers la recherche et le développement de produit, il est clair que nous serons bien au-dessus du montant requis lors de la souscription.

g) Le meilleur choix

Nous pensons que la S.A. est la meilleure forme de société dans notre cas, bien qu'elle comporte aussi quelques désavantages que nous aborderons plus loin.

Elle nous permettra d'attirer des investisseurs externes et d'intégrer au mieux l'ensemble des stakeholders du projet. Si le besoin s'en fait ressentir, nous pourrions également faire un appel public à l'épargne et inscrire les titres sur le marché réglementé¹⁴⁰.

¹³⁸ Art. 518 §3 C. Soc.

¹³⁹ Art. 439 C. Soc.

¹⁴⁰ Art. 438 C. Soc.

Pour conclure, la S.A. est une structure qui est « véritablement créée pour attirer les capitaux tout en ménageant l'anonymat des investisseurs, dans le but de promouvoir le développement industriel et commercial »¹⁴¹. Cette constatation est en parfaite adéquation avec la vision de Hybrid Power.

14.4.4. Siège social

Nous faisons le choix de mettre notre siège social à Louvain-la-Neuve pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, nous allons travailler étroitement avec des scientifiques de l'Université Catholique de Louvain-la-Neuve. Au départ, nous allons très certainement utiliser une partie des laboratoires de l'UCL et nous préférons ne pas trop nous éloigner de ce qui constituent le noyau dur de notre société : la recherche et le développement.

Ensuite, Louvain-la-Neuve et ses environs vivent une émulsion économique assez importante, il y a de plus en plus de sociétés qui s'installent dans les parcs scientifiques autour de l'université. C'est pourquoi nous espérons nous installer au centre Monet qui est un véritable vivier à Spin-off.

Enfin, nous voulons rester en Région wallonne pour pouvoir bénéficier de différents subsides qui s'offrent à nous et notamment le programme FIRST Spin-off. Celui-ci nous contraint à laisser notre siège social pendant au minimum cinq années sur le territoire de la Région¹⁴².

¹⁴¹ Y., De Cordt, C., Delforge, T., Leonard, *Manuel de droit commercial*, 2^e éd., Limal, Anthémis, 2011.

¹⁴² Informations disponibles sur <http://www.recherche-technologie.wallonie.be/>

14.5. Les contrats de Hybrid Power

14.5.1. Relation avec nos clients

Dans le cadre de notre projet, nous allons avoir différents types de contrats en fonction des besoins des clients.

Il faut tout d'abord rappeler que notre produit a une vocation internationale. Directement, il se pose la question du droit applicable au contrat. Pour régler cette question, nous allons utiliser le principe de la liberté contractuelle¹⁴³ pour insérer d'office une clause soumettant l'entièreté du contrat au droit belge. La raison est assez simple, nous voulons nous soumettre, lors de nos premières relations contractuelles, à un droit que nous connaissons et qui correspond au lieu du siège social de notre entreprise. Il n'est pas exclu que nous soumettions nos contrats internationaux à d'autres systèmes juridiques à l'avenir.

Nous envisageons plusieurs types de contrats qui nous l'espérons répondront aux besoins de nos futurs clients.

14.5.2. Le contrat d'étude préliminaire

Dans le cas de notre contrat de vente, nous allons devoir vendre une solution adaptée aux besoins du client.

Pour ce faire, il faudra évaluer au mieux les besoins de nos clients. Après un devis rapide fait par une simulation sur notre site internet, il faudra réaliser une étude complémentaire et préliminaire au chantier. Cette étude peut être comparée à celle qui est réalisée par un bureau d'architecture dans le cas du bâtiment.

A ce stade, nous devons informer le client que réaliser une étude plus poussée du futur chantier pourra engendrer des frais. En effet, le bureau d'étude devra dessiner les plans et étudier les rendements par rapport au gisement solaire de l'emplacement. Dès lors, nous devons faire une convention préalable avec notre client. Celle-ci aura pour objet la réalisation de l'étude. Le client aura l'obligation de délivrer toutes les informations utiles à la réalisation de cette étude.

En ce qui concerne l'obligation de paiement, nous la mettrons sous condition :

¹⁴³ BERLINGIN, M., « La formation dynamique du contrat de vente », *Manuel de la vente*, 2010, Kluwer, 2010, p. 38.

Soit le client accepte l'étude et il accepte le contrat de vente, dans un tel cas, il ne paiera pas directement le prix de l'étude car celui-ci sera compris dans le prix final de la vente.

Soit il n'accepte pas l'étude et ne désire pas conclure le contrat de vente, dans ce cas le client aura l'obligation de payer le prix de la prestation du bureau d'étude.

Il est évident que ce mécanisme sera expliqué clairement à notre client avant que l'étude ne soit lancée.

14.5.3. Le contrat de vente

14.5.3.1. Objet du contrat

Dans le cadre de ce contrat, nous envisageons une relation de vente directe d'un produit fini à une entreprise désireuse de placer une centrale solaire à proximité de leur chaîne de production. Dès lors, il s'agit d'un package incluant la livraison, l'installation et la mise en marche d'une station solaire.

Nous fixerons un prix en fonction des besoins et de la demande du client. Ce prix ne comprend ni l'entretien ni la maintenance de la centrale. Il s'agit de services supplémentaires qui font eux aussi l'objet d'un contrat particulier.

14.5.3.2. Définition du contrat

Il faut se référer aux articles 1582 et 1583 du code civil pour saisir les deux éléments essentiels du contrat de vente : « *La vente est une convention par laquelle l'un s'oblige à livrer une chose, et l'autre à la payer. Elle peut être faite par acte authentique ou sous seing privé.*¹⁴⁴ » et « *Elle est parfaite entre les parties, et la propriété est acquise de droit à l'acheteur à l'égard du vendeur, dès qu'on est convenu de la chose et du prix quoique la chose n'ait pas encore été livrée ni le prix payé.*¹⁴⁵ ».

Il y a donc deux éléments essentiels : le paiement d'un prix en argent et le transfert « total » de propriété. C'est ce qui distingue ce contrat des autres types de contrats.

¹⁴⁴ Art. 1582 C. civ.

¹⁴⁵ Art. 1583 C. civ.

14.5.3.3. Les éléments essentiels

- Le transfert de propriété

Le Code civil prescrit que la vente « *est parfaite entre les parties, et la propriété est acquise de droit à l'acheteur à l'égard du vendeur, dès qu'on est convenu de la chose et du prix, quoique la chose n'ait pas encore été livrée ni le prix payé*¹⁴⁶ »

Il faut alors considérer que lorsqu'il y a un accord sur le bien et sur le prix, la propriété est transférée bien que l'acheteur ne soit pas encore en possession du bien.

Dans le cas de Hybrid Power, c'est un peu différent car il s'agit d'un contexte commercial. L'usage veut que la propriété soit transférée lors de la délivrance du bien¹⁴⁷. Il faut souligner que nous vendons une chose future. En effet, il s'agit d'une chose à fabriquer. C'est une fois que l'installation sera construite et que l'acheteur l'aura accepté qu'il y aura un transfert de propriété¹⁴⁸.

Dans le cas du contrat de vente, le package comprend la livraison, le montage de l'ensemble de la structure et la mise en marche de la station solaire. Il est important de saisir le moment du transfert de la propriété car il s'accompagne du transfert du risque. En effet, il y a là un intérêt économique important car si l'entreprise est propriétaire jusqu'à la fin du montage, il faudra supporter la perte économique dans le cas où la chose périt¹⁴⁹ avant la fin de l'assemblage.

Étant donné que nos installations auront très probablement un coût assez élevé, il est de notre intérêt de s'assurer que notre matériel ne subisse aucun dommage jusqu'au moment où le client en deviendra propriétaire.

- Un prix payable en argent

Nous fixerons un prix sur la station que nous livrerons. Ce prix sera fixé librement par Hybrid Power en fonction des besoins des clients.

¹⁴⁶ Art. 1583 C. civ.

¹⁴⁷ E. PLASSCHAERT, C. DETAILLE, « Les effets de la vente », *Manuel de la vente*, 2010, Kluwer, p. 164 et s.

¹⁴⁸ *Op. cit.*, p. 184.

¹⁴⁹ E. MONTERO, « la vente », *guide juridique de l'entreprise*, Waterloo, Kluwer, 2007, p. 13.

14.5.3.4. Les obligations de Hybrid Power

Nous avons deux obligations principales. Il faut se référer à l'article 1603 du Code civil: « *Il a deux obligations principales, celle de délivrer et celle de garantir la chose qu'il vend.* »

- La délivrance de la station solaire

Hybrid Power doit dans le cadre de cette obligation délivrer une chose conforme à ce qui a été convenu dans le contrat entre les parties. Dans la délivrance, il faut comprendre la mise à disposition de la chose pour que son utilisateur puisse s'en servir conformément à sa destination.

Il faut donc qu'une fois la station solaire mise en place, celle-ci corresponde en tout point avec ce qui a été convenu dans le contrat pour qu'elle puisse répondre aux attentes du client. Pour ne pas qu'il existe de point de discorde lors de la livraison, il faudra que le contrat soit rédigé avec précision. Pour ce faire, un cahier des charges sera établi par le bureau d'architecture afin d'informer le client. Celui-ci aura ainsi une connaissance détaillée de la centrale, et la construction s'y tiendra strictement.

Pour s'assurer que l'utilisateur jouisse pleinement de sa nouvelle acquisition, nous fournirons un manuel détaillant précisément : le fonctionnement ainsi que l'utilisation. Nous expliquerons en détail certains aspects techniques essentiels pour une pleine et correcte utilisation de la centrale solaire.

- Garantir une possession utile de la station solaire

C'est une obligation qui nous contraint de garantir à notre client une utilité adéquate de la chose. Concrètement, il faut garantir au client que notre produit est sans vices, ceux-ci peuvent être apparents ou cachés.

Dans le cas des vices apparents, il semble important de passer par un mécanisme juridique qui va protéger Hybrid Power lorsque l'acheteur acceptera le produit. Après que notre client ait vérifié l'installation et constaté que tout est conforme à ce qui était convenu, nous allons lui faire signer une agréation. Par celle-ci, l'acheteur va renoncer à nous poursuivre en cas de vice apparent.

En ce qui concerne les vices cachés, nous devons en assumer la responsabilité si le défaut était antérieur au transfert de propriété et que l'acheteur ne pouvait le constater en examinant le bien même méticuleusement¹⁵⁰.

¹⁵⁰ Art. C. civ. 1641& 1644.

14.5.3.5. Les obligations de l'acheteur

L'acheteur doit quant à lui payer le prix convenu et il a l'obligation de prendre livraison de la chose.

14.5.4. Le contrat de vente d'unité d'énergie

Il s'agit d'un contrat différent que le précédent, nous n'allons pas vendre la station par un contrat de vente classique. Nous allons vendre de l'énergie à l'unité produite. En effet, nous allons fixer un prix par unité d'énergie qui peut être en kWh. Le client paie uniquement l'énergie réellement produite.

Cependant, nous allons tout de même construire une station solaire à proximité de l'industrie cliente. A l'inverse du contrat de vente, nous allons la construire à nos frais que nous espérons amortir grâce à la vente de l'énergie produite sur une durée déterminée, normalement assez longue, de 20 à 30 ans.

Quel est le mécanisme juridique d'une telle vente ?

14.5.4.1. Le bail de longue durée et la renonciation au droit d'accession

Dans un premier temps, nous allons négocier avec le client un bail à longue durée sur sa propriété. Ce bail peut porter sur son toit ou un terrain en friche à côté de son industrie, le but est d'avoir un espace assez important pour pouvoir installer la centrale solaire destinée à produire de l'énergie.

Il nous faut un bail de longue durée car nous tablons sur un minimum de vingt années pour amortir l'installation. Nous pensons que le mieux est de négocier un droit de superficie¹⁵¹ ce qui va nous permettre d'être plus libre sur l'espace qui va nous être accordé par la négociation de ce droit. En effet, selon l'article 5 de la loi du 10 janvier 1824 sur le droit de superficie: « *Pendant la durée du droit de superficie, le propriétaire du fonds ne peut empêcher celui qui a ce droit, de démolir les bâtiments et autres ouvrages, ni d'arracher les plantations et de les enlever, pourvu que ce dernier en ait payé la valeur lors de son acquisition, ou que les bâtiments, ouvrages et plantations aient été construits ou faits par lui, et pourvu que le fonds soit remis dans l'état où il se trouvait avant la construction ou la plantation.* ».

¹⁵¹ P., LECOCP, « Superficie et emphytéose: aspects civils », *guide juridique de l'entreprise -Traité théorique et pratique*, 2^e éd. , Titre III, Liv. 34, Waterloo, Kluwer p. 9.

Enfin pour plus de sécurité, nous signerons avec le cédant du droit de superficie une renonciation au droit d'accèsion de telle sorte qu'il ne pourrait pas revendiquer la station solaire comme son bien.

Grâce à ce droit, nous pourrions construire librement la station solaire sur l'espace accordé par la convention. De celle-ci découlerait une obligation de notre part de payer une somme contre la jouissance du droit ou d'une réduction sur le prix de la vente de l'énergie produite.

14.5.4.2. La vente d'énergie

Nous concluons un contrat de vente d'énergie qui porterait sur la vente au kWh. Ce contrat serait conclu pour une durée déterminée qui serait au minimum celle de l'amortissement de la station solaire.

D'un point de vue économique, le calcul du prix de vente au kWh comprendrait le cout de production, du montage, la marge bénéficiaire, la maintenance et le démontage à la fin du contrat.

Enfin, lorsque le contrat sera arrivé à terme, nous laisserions trois possibilités au client. Premièrement nous démontons la station solaire et nous n'entretenons plus de relation contractuelle. Deuxièmement, nous pouvons prolonger notre relation contractuelle pour une nouvelle durée à déterminer. Enfin, nous lui laissons la possibilité d'acheter la station à un prix réduit.

14.5.4.3. Schématisation

Ci-dessous, le schéma synthétise le cheminement de la vente.

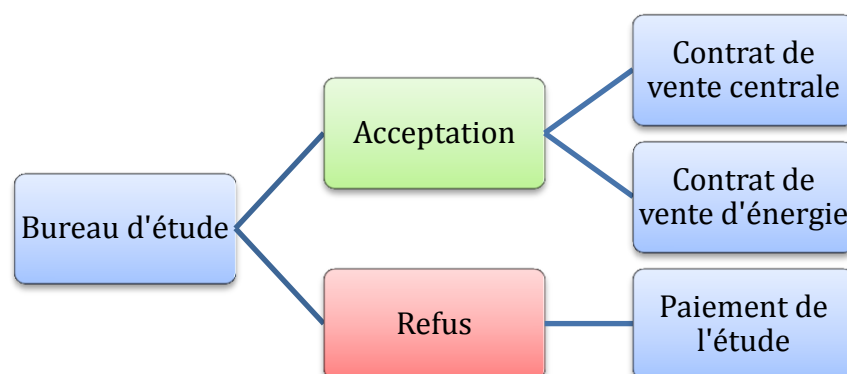


Figure 22 : Les contrats de Hybrid Power

14.6. Aides au lancement

Lors du lancement nous pouvons bénéficier d'aides financières de plusieurs organismes décrit ci-dessous.

14.6.1. FIRST spin-off

Il s'agit d'un programme mis en place par la Région wallonne et son gouvernement dans le but de soutenir la création de spin-offs universitaires. C'est un soutien à la recherche universitaire, par la mise à disposition de fonds pour des chercheurs ou unité de recherche au sein des universités, dans le but d'étudier la faisabilité technique du projet.

Concrètement, l'aide consiste au paiement du salaire d'un chercheur pendant maximum deux années auxquelles il faut ajouter les frais pour le fonctionnement du laboratoire¹⁵².

Cependant, pour pouvoir être admis à bénéficier de cette aide régionale, il faut remplir un certain nombre de conditions¹⁵³.

Premièrement, il faut que les projets soient dans des domaines de préférence : l'énergie, le développement durable, la recherche dans les domaines technologiques, la santé ou l'allongement de la durée de la vie.

Deuxièmement, il faut réaliser une recherche dans le but de mettre au point un procédé ou produit qui va justifier une nouvelle activité industrielle.

Troisièmement, il faut que l'aboutissement de cette recherche arrive finalement à la création d'une entreprise en Wallonie et en l'occurrence une spin-off.

Quatrièmement, il faut que le produit soit *in fine* commercialisable.

Cinquièmement, il faut que le chercheur bénéficiant du soutien soit titulaire d'un diplôme universitaire.

Sixièmement, il faut qu'une université supervise les recherches et qu'elle soit la marraine du projet.

¹⁵² Informations disponibles sur <http://www.recherche-technologie.wallonie.be>.

¹⁵³ Critères repris pour un dépôt de candidature 2014.

Enfin, il faut que le dossier soit introduit dans un délai imparti. Après un entretien avec une responsable du programme FIRST spin-off, les candidatures pour 2015 se feront dès septembre 2014.

Au regard, de l'ensemble de ces conditions, nous estimons que notre projet pourrait se porter candidat car il remplit l'ensemble des conditions. Cependant, il reste une inconnue, le fait que l'UCL devrait se porter garante de notre projet et qu'elle soit d'accord de le chapeauter.

Nous restons dans l'espoir que l'ensemble de ce business plan comprenant une étude de faisabilité pourra convaincre l'université de nous soutenir.

14.6.2. La bourse de préactivité

L'agence de stimulation économique (ASE) peut nous octroyer une bourse de préactivité. Celle-ci a été instituée par le gouvernement wallon. Le but est de couvrir les couts liés à l'étude de faisabilité. Cette bourse peut être demandée dans le cadre de la création du projet avant même d'avoir constitué la société. Cette bourse s'élève à un montant de 12.500€.

Pour ce faire, l'agence va analyser notre projet grâce à un comité d'experts. Pour que nous soyons éligibles à l'obtention de la bourse, le comité va examiner les critères suivants¹⁵⁴ :

- *Le caractère original de l'idée ou du projet ou l'existence d'une niche particulière pour le projet ;*
- *Les possibilités de développement de l'activité en Wallonie et les possibles retombées en matière d'emploi ;*
- *Le réalisme de la méthode de travail et l'existence d'un marché potentiel permettant d'assurer la viabilité du projet ;*
- *L'encadrement professionnel de l'idée ou du projet ;*
- *Les aspects financiers*

14.6.3. La bourse innovation développement durable

Une fois notre société lancée, nous allons nous tourner vers un autre type d'aide. Le but de celle-ci est de promouvoir les projets axés sur le développement durable. Ce type de développement entre exactement dans la philosophie de Hybrid Power.

¹⁵⁴ Informations disponibles sur <http://www.aidesdirectes.be/>

La bourse est octroyée sur décision du Ministre de l'Economie, après avis d'un comité de sélection composé d'experts. Ce comité va évaluer la candidature au regard des critères suivants¹⁵⁵ :

- *Le caractère innovant du projet et le caractère économiquement différenciant du projet*
- *L'implication du projet dans le développement durable; les effets déterminants du projet pour le développement de l'entreprise et les possibles retombées en matière d'emploi;*
- *Le réalisme de la méthode de travail envisagée et la capacité d'accès du projet au marché ;*
- *L'encadrement professionnel du projet.*

14.6.4. Primes aux services de conseil

Plusieurs primes existent également pour financer la demande à des services de conseil. En voici deux :

14.6.4.1. Conseil en marketing stratégique¹⁵⁶

Cette prime est destinée aux PME disposant d'un siège d'exploitation en Wallonie. Cette aide va couvrir 75% du cout des services du ou des prestataires extérieurs et consiste à connaître les chances de succès d'un produit, d'un procédé ou d'un service nouveau.

¹⁵⁵ *Op.cit.*

¹⁵⁶ Informations disponibles sur <http://recherche-technologie.wallonie.be>

14.6.4.2. Prime aux services de conseil¹⁵⁷

Cette prime est également destinée aux PME disposant d'un siège d'exploitation en Wallonie et les indépendants exerçant une activité commerciale. Elle couvre 50% du cout admissible et ne peut dépasser 12 500€. L'entreprise va décider à quel type de conseil elle veut faire appel parmi une liste agréée par la Wallonie. Les types de conseil sont dans les domaines suivants :

1. *Diagnostic global*
2. *Gestion financière*
3. *Gestion commerciale*
4. *Politique industrielle*
5. *Gestion de la qualité des produits*
6. *Gestion environnementale et stratégie de développement durable y compris en matière de transport combiné*
7. *Organisation et management*
8. *Informatique et transmission d'entreprises*

14.6.4.3. Intervention sites web et webmarketing (« Carte de Visite d'entreprises ») 158

Cette prime est également destinée aux PME disposant d'un siège d'exploitation en Wallonie. Elle couvre maximum 50% des frais réels HTVA et ne peut dépasser 10 000€.

Ces supports professionnels prennent la forme de :

1. *Brochure (trptyques, folders, fardes, fiches, catalogues, powerpoint ...)*
2. *Site web & webmarketing*
3. *Webcast*
4. *CD ROM*
5. *Vidéo (DVD)*
6. *Insertion publicitaire dans des revues professionnelles périodiques publiées à l'étranger sous format papier et/ou sur des sites web étrangers, à destination d'hommes d'affaires étrangers sous format électronique*

14.6.4.4. Les aides à l'exportation

Deux organismes disposent d'aides concrètes à l'exportation pour les entreprises wallonnes: l'AWEX et la Sofinex.

¹⁵⁷ Informations disponibles sur <http://economie.wallonie.be>

¹⁵⁸ Informations disponibles sur www.awex.be

14.6.4.5. Sofinex¹⁵⁹

Elle intervient au moyen d'instruments financiers pour des opérations comme:

1. *La création de filiale.*
2. *L'acquisition, la restructuration et le développement d'entreprises existantes.*
3. *La joint venture.*
4. *Le financement des besoins en fonds de roulement lié à l'activité exportatrice de l'entreprise.*

14.6.5. AWEX¹⁶⁰

Les incitants à l'exportation de cet organisme sont les suivants :

1. *Une assistance prospection à l'étranger*
2. *Une aide à la création et au fonctionnement d'un bureau individuel ou collectif à l'étranger.*
3. *Une aide spécifique réservée aux fédérations, clusters et groupements professionnels.*
4. *Une expertise en Commerce extérieur, en Stratégie à l'exportation ou en Design.*
5. *La réalisation de supports promotionnels comme une « carte de visite d'entreprise », des brochures ou un site internet.*
6. *L'engagement de personnel grâce au Décret APE marchand qui permet l'affectation de chômeurs à des activités relatives à l'exportation au sein de votre entreprise.*

14.6.6. Le Maroc et les fonds

Au Maroc, il y a actuellement, une stratégie énergétique qui est mise en place, elle passe par une dotation de un milliard de dollars. Cet argent vient des Emirats Arabes Unis, d'Arabie Saoudite et du fond Hassan II.

Pour distribuer cet argent, il existe différents organisme qui sont en charges de la gestion des fonds.

Il faut souligner qu'il y a de nombreux investissements qui sont fait dans le domaine des énergies et plus précisément dans le domaine du solaire au Maroc. Ces investissements sont faits par une agence créée par l'état marocain. Il y a

¹⁵⁹ Informations disponibles sur <http://www.sofinex.be> - société de financement de l'Exportation et de l'Internationalisation des Entreprises wallonnes

¹⁶⁰ Informations disponibles sur www.awex.be

principalement deux organismes principaux qui gèrent cet argent : la Société d'investissements énergétique (SIE)¹⁶¹ et la Moroccan Agency for Solar Energy¹⁶².

Ces investissements ne sont pas des subsides donnés directement aux entreprises mais il s'agit de participation aux capitaux ou partenariats financier dans des projets d'envergures. Il faut que les projets que nous menions aient un impact sur l'énergie durable au Maroc ou encore que nous fassions des partenariats publics privés.

Ces types facilitations financières pourront être envisagés lorsque nous envisagerons de plus gros projets en partenariats avec des acteurs étatiques¹⁶³.

¹⁶¹ Informations disponibles sur <http://www.siem.ma/>

¹⁶² Informations disponibles sur <http://www.masen.org.ma/>

¹⁶³ B., Andriani, P., Lignières, M., Barges, A., Bennis, G. Mokhtari, (2013). « L'énergie au Royaume du Maroc ». Disponible sur <http://www.linklaters.com/>

14.7. Gestion des ressources humaines

Cette section a pour vocation d'expliquer l'organisation de notre future société. Après avoir choisi le lieu de son implantation et sa forme juridique, il faut planifier la manière dont nous allons gérer quotidiennement notre structure.

Pour trois jeunes entrepreneurs, il est compliqué de pénétrer le marché de l'énergie qui est complexe sous bien des aspects. C'est pourquoi, il faut pouvoir s'entourer de partenaires expérimentés qui nous aiderons à faire grandir la société.

Dans le choix de notre forme juridique nous avons opté pour la société anonyme. Il y a des conséquences quant à la gestion quotidienne de Hybrid Power.

14.7.1. Les co-fondateurs

Janet Bailey, Jérémie Denis et Julien Spedale-scarlata sont les trois futurs fondateurs de la société Hybrid Power. Chacun jouit de compétences uniques qui aideront la société à grandir. Jérémie Denis s'occupera essentiellement de la gestion des aspects techniques, Janet Bailey sera en charge de la gestion financière et marketing, et Julien Spedale-scarlata s'occupera de la gestion des contrats avec les clients ainsi que des ressources humaines.

Néanmoins, nous savons que nous devons effectuer encore au minimum une année de recherches. C'est pourquoi, certaines de nos attributions de départ pourraient changer. Durant cette période de recherche et de développement, il semble que seul Jérémie aurait une tâche utile. Par conséquent, nous décidons d'attendre que cette phase soit terminée afin d'évaluer une nouvelle fois la faisabilité du projet pour pouvoir se lancer.

14.7.2. Les organes de gestions

La partie gestion des ressources humaines a pour vocation de nous aider à bien cerner les différents rôles de chacun des organes de notre future société et des liens qu'ils établissent entre eux.

Nous décidons de nous aider d'un outil très précieux qu'est le Code Buisse II¹⁶⁴ pour en tirer un maximum de recommandations dans le but de gérer au mieux notre futur S.A.. Celui-ci va nous orienter dans les relations avec le conseil d'administration, l'assemblée générale et le management quotidien.

¹⁶⁴ Code Buisse disponible sur <http://www.codebuisse.be/>

14.7.2.1. Conseil d'administration

a) Son rôle

Le rôle du conseil d'administration est principalement de prendre les décisions importantes pour la société notamment sur la stratégie à suivre. En effet : « *Le conseil d'administration a le pouvoir d'accomplir tous les actes nécessaires ou utiles à la réalisation de l'objet social de la société, à l'exception de ceux que la loi réserve à l'assemblée générale.*¹⁶⁵ »

Le Code de Commerce quant à lui spécifie quelles sont les tâches d'un conseil d'administration d'une société non cotée.

Le conseil d'administration a le pouvoir d'accomplir tous les actes nécessaires ou utiles à la réalisation de l'objet social de la société, à l'exception de ceux que la loi réserve à l'assemblée générale. « *La mission du conseil d'administration consiste à :*

- *Prendre des décisions concernant des affaires importantes et stratégiques, telles que l'approbation de la stratégie ;*
- *Veiller à ce que le management et les actionnaires prennent les initiatives qui relèvent de leur domaine de compétence ;*
- *Nommer l'administrateur délégué, le comité de direction et le management ;*
- *Fournir des avis à l'administrateur délégué, au comité de direction et au management ;*
- *Effectuer le contrôle financier et opérationnel, en ce compris l'introduction et la surveillance d'un système de contrôle interne ;*
- *Définir une politique de dividendes qui sera soumise ensuite à l'approbation de l'assemblée générale ;*
- *Préparer et organiser la succession de l'administrateur délégué, du comité de direction et du management ;*
- *Sauvegarder les intérêts de la société en cas de crise et de conflit.»*¹⁶⁶.

Ensuite, il convient de souligner que le code de Commerce nous recommande de nous réunir au moins quatre fois par année¹⁶⁷. Nous estimons que le conseil doit se réunir plus que quatre fois par année, nous essayerons de le réunir tous les 2 mois pour que le conseil se tienne au courant des nouvelles avancées au niveau de la technologie.

¹⁶⁵ Art. 522 § 1 C. Soc.

¹⁶⁶ Art. 5.2 Code de Commerce

¹⁶⁷ Art. 5.8 Code de Commerce

b) La composition

Nous comptons tous les trois faire partie du conseil d'administration ce qui répondra à l'exigence légale d'un nombre minimum d'administrateurs qui est de trois¹⁶⁸.

Ainsi que nous l'avons énoncé, nous pensons qu'il est impossible de mener à bien notre projet sans nous entourer d'une équipe de gestion compétente et expérimentée. C'est pourquoi nous espérons pouvoir ajouter d'autres administrateurs à notre équipe comme le code Buysse l'indique, il faut que l'équipe du C.A. soit complémentaire sur le plan des compétences et de des expériences¹⁶⁹.

Il faut également souligner le règlement de l'UCL, portant sur ces règles de bonne gouvernance et gestion des spin-offs universitaires, nous invite à ce que notre conseil d'administration comporte au moins un membre qui représentera l'université en éventuelle qualité d'observateur¹⁷⁰. Cette recommandation va dans le même sens que le Code Buysse II.

Nous avons l'envie de nommer des administrateurs externes qui apporteront leurs expertises et qui pourront nous aiguiller pour prendre les décisions importantes dans la gestion de la société. Nous pensons particulièrement à des personnes ayant une grande expérience de l'entrepreneuriat et de l'énergie renouvelable.

14.7.2.2. L'administrateur délégué

Le conseil d'administration nommera un administrateur délégué à la gestion journalière de la société. Celui-ci ne sera pas un membre des co-fondateurs dans un premier temps car il nous paraît plus logique de mettre quelqu'un de plus expérimenté à la tête de notre spin-off.

Nous pensons qu'il devra être choisi avec la ratification de l'assemblée générale des actionnaires qui renforcera sa position à la tête d'Hybrid Power.

Il aura un rôle d'informations pour le conseil d'administration et un rôle de représentation pour l'ensemble des administrateurs¹⁷¹.

A moyen ou à long terme, nous espérons qu'un des membres fondateurs de la société puisse endosser le rôle d'administrateur délégué.

¹⁶⁸ Art. 518 C. Soc.

¹⁶⁹ Art. 5.4 Code Buysse II.

¹⁷⁰ Art. 3.3. al. 2 du règlement de bonne gouvernance et gestion des spin-offs universitaires.

¹⁷¹ Art. 6 Code Buysse II.

14.7.2.3. L'assemblée générale des actionnaires

Elle rassemblera l'ensemble de nos actionnaires. Nous voulons être proches de nos actionnaires en leur transmettant un maximum d'informations. A ce stade, nous ne savons pas encore qui seront les actionnaires mais, il semble qu'en tant que spin-off soutenue par l'UCL, nous passerons par le fond VIVES qui devrait nous aider à trouver des investisseurs et par conséquent, des actionnaires.

Le rôle de l'assemblée générale est de fixer les valeurs de l'entreprise et de tenter de les faire respecter, on peut aussi y fixer les objectifs financiers ou encore définir la vision de l'entreprise¹⁷². Quoi qu'il en soit, il s'agit de l'organe « législatif » de notre société qui va fixer le cadre dans lequel Hybrid Power devra agir.

14.7.3. Le capital humain : les employés

Il est temps de parler de notre capital humain et comment nous allons l'organiser. Nous pouvons diviser l'équipe de Hybrid Power en trois pôles. D'un côté, il y a le pôle recherches et développements, de l'autre les équipes de ventes et de montages. Il y a donc une équipe fixe et des équipes « volantes ».

14.7.3.1. L'équipe recherche et développement

Il s'agit de l'épine dorsale de Hybrid Power, c'est à elle que nous devons notre technologie et qui continuera à innover afin d'améliorer notre solution solaire.

Cette équipe sera fixée à Louvain-la-Neuve, au départ dans les laboratoires de l'Université ensuite, si les financements le permettent, dans les laboratoires propres de l'entreprise. Dans un premier temps, l'équipe serait composée de Jérémie Denis et d'un autre chercheur, le but serait d'améliorer et de tester la technologie pour l'optimiser au maximum. A moyen terme, nous espérons recruter de nouveaux talents pour travailler sur de nouveaux projets innovants.

14.7.3.2. Bureau d'étude et réalisation

Lorsque le client sera intéressé par notre technologie et souhaitera l'installer, il faudra réaliser une étude pour construire l'installation qui s'adaptera au mieux à ses besoins. C'est pourquoi, il nous faut une équipe qui s'occupera de l'étude de faisabilité du projet de construction chez le client. Cela nous permettra d'avoir une idée précise des coûts et de réaliser un devis précis pour notre client.

¹⁷² Art. 7.2. Code Buyse II

L'équipe R&D s'occupera dans un premier temps de ces études. À moyen terme, nous voulons constituer une équipe indépendante pour s'occuper de l'ensemble des études. Il existe une autre tâche que devra accomplir une partie de l'équipe : il s'agit de la formation des équipes de montages. En effet, les ingénieurs de l'équipe R&D et réalisation nous semble être les mieux placés pour former les équipes qui vont placer les solutions solaires.

Lors de la fin des chantiers, si besoin est, ils pourraient être chargés de la vérification des installations afin de les certifier conformes.

Ces techniciens et ingénieurs seront employés sous un contrat de travail dès lors l'entreprise devra se conformer aux normes sociales belges¹⁷³.

14.7.3.3. L'équipe de distribution du produit

Une fois le produit conçu et prêt à être mis en vente, encore faut-il trouver des acheteurs qui saisissent l'opportunité d'une telle technologie.

Pour ce faire, nous avons opté pour des agents commerciaux qui distribueraient notre produit. Les avantages et les inconvénients de cette démarche est analysée plus loin.

Ces agents vont au départ être divisés dans deux zones géographiques spécifiques : le nord de l'Afrique et le sud de l'Europe. Le but de cette manœuvre est d'aller à la rencontre des clients potentiels et de leur prouver l'efficacité de nos stations solaires (cout de la facture énergétique réduit).

Nous recherchons des agents qui connaissent bien le secteur et les pays où ils vont prospecter. Néanmoins, ils devront passer par nos bureaux à Louvain-la-Neuve pour suivre une formation sur la technologie.

Il faudra que cette équipe soit en permanence en contact avec le bureau d'étude et de réalisation afin de mieux comprendre les besoins de nos clients et d'adapter notre technologie à leurs attentes pour rester compétitif.

14.7.3.4. L'équipe de montage

Lorsque l'entreprise cliente aura commandé sa nouvelle station solaire, il faudra lui livrer et l'installer. Pour ce faire, nous allons passer par des sous-traitants que nous allons agréer en s'assurant de les former correctement au montage de la technologie.

¹⁷³ Comme le paiement de l'ONSS.

Une fois que le montage sera terminé si besoin est, nous enverrons un ingénieur pour vérifier et certifier l'installation solaire.

A moyen terme, nous souhaitons avoir nos équipes définies dans des zones géographiques qui s'occuperaient de l'ensemble de l'installation solaire.

14.7.3.5. Maintenance

L'installation solaire devrait faire l'objet d'une maintenance pour qu'elle reste performante tout au long de son existence.

Nous pensons que la maintenance doit être effectuée par des professionnels. C'est pourquoi, nous estimons que c'est l'équipe du bureau d'étude et de réalisation qui devra s'en charger. En effet, certaines manœuvres requièrent une connaissance accrue du produit. Dans un premier temps, ils pourront effectuer ces maintenances avec l'aide de quelques sous-traitants spécialisés si le besoin s'en fait ressentir.

Ici encore, nous espérons à moyen terme disposer de nos propres équipes de maintenance pour s'occuper de ces tâches.

14.7.3.6. L'équipe de management

L'équipe de management, qui se composera des deux autres co-fondateurs, sera chargé de s'occuper de la gestion des nouveaux contrats, du marketing ainsi que des tâches administratives telles que la gestion des commandes, la gestion de la sous-traitance, etc.

Elle devra être disponible aux bureaux de Louvain-la-Neuve pour pouvoir répondre aux besoins des clients.

14.7.4. L'agent commercial

Nous avons décidé d'avoir recours à des agents commerciaux pour pouvoir distribuer nos produits aux clients. Il s'agit d'un choix qui est cohérent dans la politique de Hybrid Power S.A. Ce choix a des conséquences légales.

14.7.4.1. Le choix de l'agent commercial

Nous nous sommes posé la question de savoir quelle serait la manière la plus cohérente de distribuer notre produit et d'entrer en contact avec nos futurs clients.

Plusieurs possibilités s'offraient à nous. Il nous fallait un intermédiaire capable de conclure des ventes, ce qui nous semble être un élément essentiel pour être notre partenaire. C'est pourquoi nous avons décidé d'écarter d'emblée le courtier qui a pour vocation de ne mettre en relation que deux personnes sans conclure lui-même le contrat¹⁷⁴.

En ce qui concerne le commissionnaire, il ne nous semblait pas intéressant car il agit en son nom propre et peut prendre de la distance avec notre entreprise¹⁷⁵.

Il nous restait donc deux statuts qui semblaient appropriés dans le cas de Hybrid Power : la représentation commerciale et le contrat d'agence commerciale. La différence majeure se trouve dans le lien contractuel qui les unit avec notre société. Le représentant commercial serait lié par un contrat de travail¹⁷⁶ avec Hybrid Power tandis que l'agent commercial serait indépendant de notre firme.

Nous avons choisi le contrat d'agent commercial.

Tout d'abord, au regard du droit social, nous ne serons pas liés par un contrat de travail ce qui implique que nous ne devons pas payer de cotisations sociales ce qui a un impact économique direct pour la société.

Ensuite, au niveau de la rémunération, bien que les deux fonctionnent de la même manière, à savoir des commissions sur les ventes qu'ils pourraient réaliser, il faudra garantir un salaire fixe minimum au représentant de commerce étant donné qu'il est lié par un contrat de travail¹⁷⁷.

¹⁷⁴ Y., De CORDT, C., DELFORGE, T. LÉONARD, Y. POULLET, « Les principaux contrats commerciaux », *Manuel de Droit commercial*, 2éd., Limal, Anthemis, 2011, p.333 et s.

¹⁷⁵ Art. 12 du Code de commerce

¹⁷⁶ Art. 4, Loi du 3 juillet 1978 relative au contrat de travail, *M.B.*, 22 août 1978.

¹⁷⁷ P., BEYENS, « Le contrat de travail de représentant de commerce », *les fiches pratique*, disponible sur www.droitbelge.net.

Enfin, en cas de rupture de contrat, dans le cas du représentant commercial, il faudra respecter une durée de préavis pouvant aller jusqu'à six mois¹⁷⁸. De notre point de vue, cette situation est moins avantageuse que celle de l'agent commercial indépendant car son préavis est plus court.

Nous pensons que l'agent commercial est la meilleure manière de vendre notre produit car il sera plus motivé à vendre puisqu'il ne sera rémunéré que s'il vend notre produit. De plus, les agents commerciaux que nous rechercherons auront une connaissance accrue du secteur dans lequel ils vendront. Cela semble logique, car sans connaissance du secteur, ils ne seront que moins performant à la vente.

14.7.4.2. La loi régissant le contrat d'agence commerciale

Dans le cas des agents commerciaux que nous recruterons en Belgique, la loi du 13 avril 1995¹⁷⁹ qui régit le contrat d'agence commerciale s'appliquera aux relations que nous entreprendrons avec eux.

La loi définit le contrat d'agence commerciale comme : « *le contrat par lequel l'une des parties, l'agent commercial, est chargée de façon permanente, et moyennant rémunération, par l'autre partie, le commettant, sans être soumis à l'autorité de ce dernier, de la négociation et éventuellement de la conclusion d'affaires au nom et pour compte du commettant. L'agent commercial organise ses activités comme il l'entend et dispose librement de son temps.*¹⁸⁰ ».

Cette définition reprend les quatre éléments du contrat d'agence commerciale.

- La négociation

L'agent commercial va pouvoir négocier des contrats au nom de Hybrid Power, lorsqu'il va se rendre chez des clients, nous lui laisserons la possibilité de conclure le contrat. Cependant, nous ajouterons une clause dans le contrat d'agence commerciale qui nous permettra de refuser le contrat conclu par l'agent sous certaines conditions. Le but de cette clause est d'empêcher d'être lié avec un contrat qui nous semblerait inexécutable. Dans le cas où nous ne voudrions pas exécuter le contrat que l'agent a conclu, il faut que nous l'informions en temps utile¹⁸¹.

¹⁷⁸ Ibid

¹⁷⁹ Loi du 13 avril 1995 relative au contrat d'agence commerciale, M.B., 2 juin 1995.

¹⁸⁰ Art. 1 loi, Loi du 13 avril 1995 relative au contrat d'agence commerciale, M.B., 2 juin 1995.

¹⁸¹ M. WILLEMART & S. WILLEMART, « Le contrat d'agence commerciale », *Les dossiers du journal des tribunaux*, Bruxelles, Larcier, 2005, p. 27 et 28.

- Le lien qui unit Hybrid Power à son agent commercial

Il n'existe aucun lien de subordination entre l'agent et notre société. Par conséquent, il est libre d'organiser son travail comme il l'entend. Néanmoins, il a l'obligation d'agir loyalement, de bonne foi, dans l'intérêt de Hybrid Power (son commettant)¹⁸² tout en suivant les directives qui lui auraient été données.

En tant que commettant, nous devons également agir de bonne foi en lui remettant l'ensemble des documents dont il a besoin pour mener à bien sa prospection¹⁸³.

Nous allons insérer dans le contrat d'agence commerciale une clause de non concurrence qui empêchera l'agent de vendre des produits concurrents et trop similaires sur une zone géographique déterminée.

- La durée de la mission

Nous décidons de créer une relation durable avec nos agents commerciaux. Néanmoins, nous voulons dans un premier temps signer un contrat à durée déterminée de deux années, dans le but de pouvoir évaluer l'agent commercial et savoir si après la période d'essai de deux années, il est opportun de renouveler le contrat pour une durée indéterminée cette fois.

Il faut souligner qu'en cas de cessation de la relation contractuelle, nous voulons instaurer une clause de non-concurrence pour la période post-contractuelle. Il faut que cette clause respecte certaines conditions pour qu'elle soit valable. Il faut se référer à l'article 24 de la loi :

« § 1er. Le contrat d'agence peut contenir une clause de non-concurrence. Une clause de non-concurrence n'est valable que si : 1° elle a été stipulée par écrit ; 2° elle concerne le type d'affaires dont l'agent était chargé ; 3° elle ne vise que le secteur géographique ou le groupe de personnes et le secteur géographique confiés à l'agent ; 4° elle n'excède pas six mois après la cessation du contrat.

§ 2. La clause de non-concurrence ne produit pas ses effets lorsqu'il est mis fin au contrat d'agence par le commettant, sans invoquer un motif prévu à l'article 19, alinéa 1er, ou par l'agent, en invoquant un motif prévu à l'article 19, alinéa 1er. »

¹⁸² Art. 6, *ibid.*

¹⁸³ Art .7, *ibid*

- La rémunération

Voici le dernier élément du contrat d'agence commerciale.

Nous pouvons choisir entre rémunérer l'agent commercial avec une commission sur l'objet de la vente ou avec un salaire fixe¹⁸⁴. Comme nous l'avons énoncé, nous voulons motiver les agents à faire un maximum de vente, c'est pourquoi nous ne prévoyons qu'une commission.

Nous pouvons fixer le taux de la commission librement¹⁸⁵, mais il faudra prendre en compte plusieurs éléments pour calculer celui-ci. Il devrait varier entre 1 et 2 % sur le prix facturé au client¹⁸⁶ (ce qui représente entre 1700 et 3400€).

14.7.4.3. Dernières considérations

Nous voulons établir des relations durables et loyales avec nos agents commerciaux. C'est pourquoi nous prévoyons de leur donner une formation dans nos locaux.

Nous chercherons des agents qui opèrent principalement sur les territoires de nos clients cibles. Nous n'excluons pas d'employer des agents commerciaux qui pourraient provenir d'autres pays. Dans un tel cas, nous devons appliquer la loi de la résidence habituelle¹⁸⁷ de l'agent si nous n'avons pas choisi une loi régissant notre convention. Dans le cas où nous aurons la possibilité d'imposer une loi régissant le contrat, nous choisirons la loi belge.

¹⁸⁴ Art. 9, *Ibid*

¹⁸⁵ Art. 14., *Ibid*

¹⁸⁶ Art. 15. Al 4., *Ibid*

¹⁸⁷ Règlement Rome I, (CE) n°593/2008 du Parlement Européen et du Conseil du 17 juin 2008 sur la loi applicable aux obligations contractuelles, *J.O.U.E.*, L177, 4 juillet 2008.

14.8. Plan de production

Le plan de production consiste en plusieurs étapes principales listées ci-dessous :

- Conception des plans d'implantation
- Commande et usinage des pièces
- Assemblage
- Maintenance

Ci-dessous, une ligne du temps représente les différentes étapes.

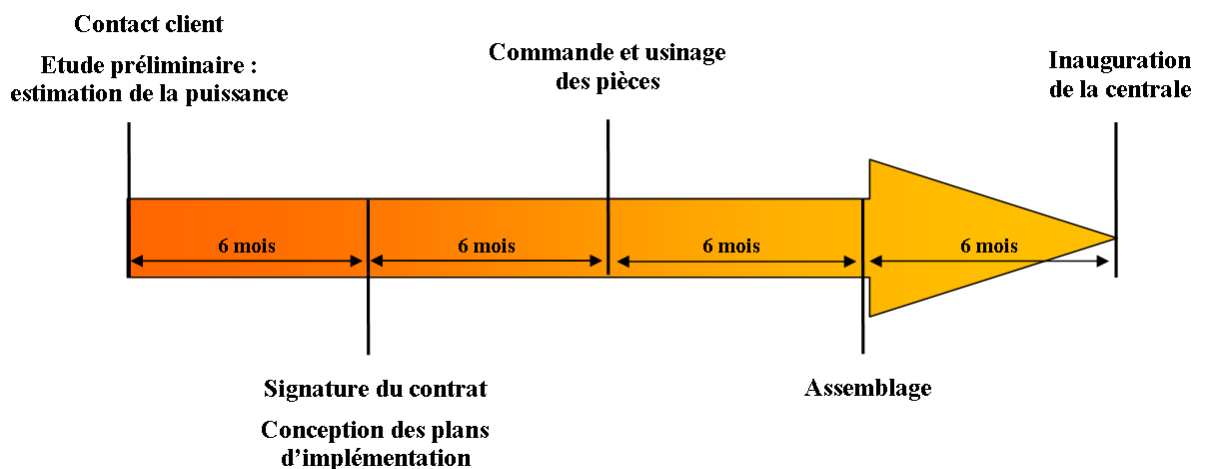


Figure 23 - Ligne du temps des étapes du plan de production

14.8.1. Conception des plans d'implantation

Lors des contacts avec les industriels, nous avons dans un premier temps déterminé précisément les besoins en chaleur et en électricité, et cela pour leurs différents processus industriels. En fonction de l'espace disponible et du processus industriel à alimenter en chaleur, nous proposons une première implémentation et un ordre de grandeur de l'énergie qui sera produite par la centrale solaire.

Une fois cette première étape réalisée, et un partenariat engagé, notre équipe concevra des plans d'implémentation plus précis. Il faut en effet déterminer la taille et l'espacement des concentrateurs solaires avec un tracker adapté, déterminer les trajets des tuyaux qui alimenteront le processus industriel, dimensionner l'échangeur de chaleur, déterminer la puissance et l'emplacement de l'onduleur, déterminer la puissance du circulateur pour le fluide caloporteur, etc. La durée de cette étape variera en fonction de la taille de l'usine solaire et de la complexité de l'implémentation au processus industriel. En moyenne, nous supposons que cette phase de conception durera 6 mois.

14.8.2. Commande et usinage des pièces

Après l'étape de design et la détermination des différents composants de notre solution solaire, il faut soit commander soit produire ces éléments. Une partie de ces pièces sera directement commandée chez des fournisseurs, comme par exemple le concentrateur cylindro-parabolique. Le reste des éléments sera conçu sur mesure, soit avec des partenaires, soit au sein de l'UCL. Une des étapes importantes de l'usinage des pièces est la conception des générateurs thermoélectriques, produits à l'UCL.

L'objectif est de récolter directement toutes les pièces sur le lieu du chantier. La livraison des différents éléments se réalisera, dans la mesure du possible, directement sur place. La distribution proposée par les fournisseurs sera donc un des critères importants dans le choix de ces derniers. Idéalement, nous travaillerons avec des fournisseurs locaux.

Durant cette phase, un gestionnaire de chantier aménagera le terrain. Des zones spécifiques seront réservées pour le stockage du matériel et l'espace qui accueillera les concentrateurs solaires sera entièrement dégagé.

Au total, cette phase de commande, d'usinage et de pré-chantier est estimée à 6 mois.

14.8.3. Assemblage

Une fois tous les éléments rassemblés sur le chantier, le conducteur de chantier, formé par nos soins, pourra diriger l'équipe d'ouvriers pour implémenter la solution solaire. Une des contraintes durant le chantier sera de perturber le moins possible les activités de l'industrie. Il sera néanmoins nécessaire de connecter notre échangeur de chaleur à leur système de chauffage. Cette opération engendrera un arrêt provisoire de la production industrielle. Le planning du chantier sera donc suivi de près et réalisé de commun accord avec l'industriel. La durée de cette phase d'assemblage dépendra de la taille du chantier, de la complexité et des moyens mis en œuvre. Nous estimons qu'elle durera en moyenne 6 mois.

14.8.4. Maintenance

Lorsque la centrale de concentration solaire sera en place, des maintenances, plus ou moins régulières en fonction des particularités, seront réalisées sur une base temporelle fixe. Ces maintenances seront menées durant toute la durée de vie de la centrale. N'ayant pas encore l'expérience d'une telle centrale, la durée de vie est difficilement quantifiable. Néanmoins, la plus part des matériaux sont robustes et

possèdent une bonne durabilité, nous pouvons donc espérer une durée de vie de l'ordre de 30 ans.

14.8.5. Conclusion

Nous proposons un service complet d'installation, de gestion et de suivi d'exploitation. Cela semble être une réelle opportunité. En effet, le secteur des services (installation, maintenance et service après-vente) manque de professionnalisme et est le maillon faible de la filière solaire marocaine¹⁸⁸.

¹⁸⁸ H. KIRÉMIDJIAN (2009). Etude des filières liées à l'énergie solaire dans la région de Meknès-Tafilalet (Maroc). USAID, 2009, 64p., <http://www.gret.org/wp-content/uploads/Filieres-de-l-energie-solaire-au-Maroc.pdf>

15. Gestion des risques

Entreprendre n'est pas sans risques. L'entrepreneur peut se retrouver face un événement imprévu qui le mettra en difficulté au niveau financier ou au niveau de sa responsabilité. Ces difficultés peuvent venir d'une erreur qu'il a commise ou être un élément externe sur lequel il n'a pas de maîtrise.

Cette section a vocation à énumérer les principaux risques auxquels pourraient faire face Hybrid Power. Il est impossible de tous les prévoir c'est pourquoi cette liste n'est pas exhaustive.

Le monde des affaires peut être impitoyable car nous avons aujourd'hui une innovation unique mais nous pouvons être dépassés par des nouvelles technologies. Dans l'hypothèse où nous allons obtenir un brevet, nous savons d'ores et déjà que ce droit d'interdiction d'exploitation contre les tiers va un jour expirer. Nous devons pouvoir garder un avantage concurrentiel pour diminuer ce risque de dépassement.

Ensuite, une fois que nous allons mettre notre produit sur le marché, il faudra garantir que notre produit est sûr pour les futurs utilisateurs. Il existe des contraintes légales qui forcent les producteurs à vérifier la sécurité de leurs produits.

Enfin, la société peut être face à ses responsabilités que cela soit au niveau pénal, contractuel ou extracontractuel. Sans oublier le fait que les promoteurs de la société peuvent mettre en jeu leurs responsabilités lorsqu'ils posent des actes même si la société n'est pas encore formée. Dans le cas où celle-ci est mise en cause, la constitution de Hybrid Power pourrait devenir plus scabreuse.

15.1. Le risque technologique

Nous nous lançons sur le marché en mettant en avant une nouvelle technologie. Nous voulons l'exploiter, pour ce faire, nous espérons poser un brevet. Cela signifie deux choses que nous allons protéger notre exclusivité d'exploitation seulement pour une certaine période donnée et que lors de la publication de ce brevet celui-ci sera dévoilé à nos concurrents.

Premièrement, nous devons nous préparer à la période « après brevet » pour cela, il nous faudra agir de deux manières. D'une part, avoir ancrée une clientèle et s'être fait un nom pour la reconnaissance de la qualité de nos produits. De telle manière que même sans le brevet, les clients percevraient une réelle plus-value en passant par notre société. D'autre part, nous ne devons pas cesser d'innover pour que nous puissions proposer de nouveaux produits, pouvoir les mettre sur le marché et les breveter à leurs tours.

Ensuite, le fait de divulguer notre brevet par sa publication est un risque pour notre société. En effet, les entreprises concurrentes pourront se le procurer et comprendre notre solution en détails. Dès lors, ils pourraient, à partir de cette base, faire de nouvelles recherches et mettre quelque chose de similaire en œuvre avec un coût moindre en développement. Cela pour être un véritable risque qui est difficilement quantifiable sans connaître les intentions des acteurs concurrents.

Enfin, nous pourrions faire face à de nouveaux entrants ayant une technologie similaire à la nôtre. Ils pourraient avoir une meilleur R&D et proposer des prix encore plus bas que les nôtres.

Pour conclure, Il existe bien des risques technologiques qui pourraient avoir un impact important sur les aspects économiques de Hybrid Power.

15.2. Sécurité du produit

Lorsque Hybrid Power va mettre en vente sa solution solaire innovante, il faut que celle-ci soit fiable. En effet, le client s'attend à ce que le produit soit sécurisé et produise de l'énergie sans avoir le moindre problème. Il s'agit là d'un aspect commercial car si nous ne mettons pas sur le marché un produit fiable, notre société sera complètement décrédibilisée. Dans le cas où le produit n'est pas opérationnel et qu'il pose des problèmes lors de son utilisation, il est clair que nous ne vendrons plus jamais aucun produit.

Il existe aussi une contrainte légale : le produit mis en vente sur le marché doit être fiable au niveau de sa sécurité. L'union européenne a mis en place en 1992 une directive pour s'assurer que l'ensemble des produits entrants sur le marché ont un degré minimum de sécurité.

15.2.1. Régime de sécurité du produit

Nous mettons un point d'honneur à ce que nos produits respectent les normes de sécurité en vigueur en Belgique et en Europe bien que dans un premier temps nous visons un marché étranger. Nous sommes conscients que notre produit va à moyen terme se trouver sur le marché européen. C'est pourquoi nous tenons à ce qu'il respecte, dès le départ, les normes européennes.

Les règles légales se trouvent dans une directive européenne relative à la sécurité générale des produits du 3 décembre 2001¹⁸⁹. Au niveau belge, il faut se référer à la loi du 9 février 1994 relative à la sécurité des produits et des services¹⁹⁰, celle-ci a été mise à jour suite à la transposition de la directive européenne. L'objectif de la loi est de garantir un niveau de sécurité aux consommateurs¹⁹¹.

Il existe une obligation générale énoncée à l'article 3 de la directive : « *Les producteurs sont tenus de ne mettre sur le marché que des produits sûrs* ». Il faut donc s'assurer que Hybrid Power entre bien dans le champ d'application de la directive et de la loi belge.

15.2.2. Champ d'application de la directive

15.2.2.1. Producteur

La directive décrit avec précision qui est concerné par l'application de cette norme. Un producteur est :

« i) le fabricant du produit, lorsqu'il est établi dans la Communauté, et toute autre personne qui se présente comme fabricant en apposant sur le produit son nom, sa marque ou un autre signe distinctif, ou celui qui procède au reconditionnement du produit;
 ii) le représentant du fabricant, lorsque celui-ci n'est pas établi dans la Communauté ou, en l'absence de représentant établi dans la Communauté, l'importateur du produit;
 iii) les autres professionnels de la chaîne de commercialisation, dans la mesure où leurs activités peuvent affecter les caractéristiques de sécurité d'un produit; »¹⁹²

Au vu de cette définition légale, nous entrons dans la définition de producteur car bien que nous sous-traitions certains éléments, nous apposons notre marque et un signe distinctif sur le produit.

15.2.2.2. Le produit

La directive définit également ce que sont des produits : « *tout produit qui — également dans le cadre d'une prestation de services — est destiné aux consommateurs ou susceptible, dans des conditions raisonnablement prévisibles, d'être utilisé par les consommateurs, même s'il ne leur est pas destiné, et qui est*

¹⁸⁹ Directive 2001/95/CE du parlement européen et du Conseil du 3 décembre 2001 relative à la sécurité générale des produits, *J.O.C.E.*, L 11/4, 15 janvier 2002.

¹⁹⁰ Loi du 9 février 1994 relative à la sécurité des produits et des services, *M.B.*, 1 avril 1994.

¹⁹¹ F., MANIET, « qualité et sécurité des produits et des services », *Les guides juridiques de l'entreprise*, livre 111, Waterloo, Kluwer, 24 juin 1998,

¹⁹² Art. 2, e) Directive 2001/95/CE.

fourni ou mis à disposition dans le cadre d'une activité commerciale, à titre onéreux ou gratuit, qu'il soit à l'état neuf, d'occasion ou reconditionné. »¹⁹³.

Nous entrons également dans cette définition. Dès lors nous sommes directement concernés par l'obligation légale qui nous incombe de ne mettre que des produits sûrs sur le marché.

15.2.3. Obligations dictées par la directive

La directive nous contraint de ne mettre sur le marché que des produits sûrs, encore une fois le texte légal est très complet et délimite très clairement ce qu'il est :

« Tout produit qui, dans des conditions d'utilisation normales ou raisonnablement prévisibles, y compris de durée et, le cas échéant, de mise en service, d'installation et de besoins d'entretien, ne présente aucun risque ou seulement des risques réduits à un niveau bas compatibles avec l'utilisation du produit et considérés comme acceptables dans le respect d'un niveau élevé de protection de la santé et de la sécurité des personnes, compte tenu, en particulier:

- i) des caractéristiques du produit, notamment sa composition, son emballage, ses conditions d'assemblage et, le cas échéant, d'installation et d'entretien;*
- ii) de l'effet du produit sur d'autres produits au cas où on peut raisonnablement prévoir l'utilisation du premier avec les seconds;*
- iii) de la présentation du produit, de son étiquetage, des avertissements et des instructions éventuels concernant son utilisation et son élimination ainsi que de toute autre indication ou information relative au produit;*
- iv) des catégories de consommateurs se trouvant dans des conditions de risque au regard de l'utilisation du produit, en particulier des enfants et des personnes âgées. »¹⁹⁴.*

A la lecture de cet article, il faut se rendre à l'évidence que nous n'avons pas l'obligation de garantir un risque nul¹⁹⁵, il n'y a pas d'obligation de sécurité absolue car il y a la limite de « *des conditions d'utilisation normales ou raisonnablement prévisibles* »¹⁹⁶.

Nous avons le devoir de réduire les risques lors de l'utilisation de notre produit. Il convient de souligner qu'il s'agit d'une obligation de moyen et non de résultat, même si nous mettons tous les moyens en œuvres pour réduire les risques et prévenir l'utilisateur des risques que nous pensons prévisibles au regard de certains

¹⁹³ Art. 2 a), *op. cit.*

¹⁹⁴ Art. 2 b), *op. cit.*

¹⁹⁵ C. NICAISE & V. PIRE, « Développements récents en matière de sécurité des produits et des services et en matière de responsabilité du fait des produits défectueux », *R.G.A.R.*, 1/2004, n°9.

¹⁹⁶ Art. 2, b), Directive 2001/95/CE.

comportements ou utilisations inappropriés, il nous est impossible de garantir une utilisation sans risque absolu.

La directive nous impose également de prévenir l'utilisateur des risques inhérents à l'utilisation de notre produit¹⁹⁷. Cette prévention se fera via un guide d'utilisation que nous devons fournir avec le produit et ce dans la langue du pays dans lequel nous allons vendre notre solution solaire.

Il faut enfin savoir ce qu'est un produit sûr et la manière de vérifier sa fiabilité. Pour cela, il faut se référencer à la directive qui détaille ce qui est considéré comme sûr : *« Un produit est considéré comme sûr, pour les aspects couverts par la réglementation nationale concernée, quand, en l'absence de dispositions communautaires spécifiques régissant la sécurité du produit en cause, il est conforme aux réglementations nationales spécifiques de l'État membre sur le territoire duquel il est commercialisé, qui sont établies dans le respect du traité et notamment des articles 28 et 30, et qui fixent les exigences auxquelles le produit doit répondre sur le plan de la santé et de la sécurité pour pouvoir être commercialisé¹⁹⁸. »*

Il va donc falloir se référer à d'autres normes spécifiques pour s'assurer que notre solution solaire soit un produit sécurisé. Il est important de respecter ces normes car nous ne pourrions pas avoir accès au marché européen si nous ne le faisons pas. Ensuite, nous pensons que mettre des produits sûrs sur le marché ne fera que renforcer notre image auprès des consommateurs. Enfin, notre responsabilité pourrait être mise en cause pour avoir mis un produit défectueux sur le marché.

15.2.4. Le marquage CE

Ce simple logo est bien connu des consommateurs européens. Celui-ci a pour but d'être un indicateur de la conformité du produit aux normes qui sont imposées par l'espace économique européen (EEE). Il s'agit des normes européennes harmonisées et il faut vérifier si le produit que nous mettons sur le marché correspond à l'une d'entre-elles. Il existe plus d'une vingtaine de ces normes qui correspondent aux catégories de produits.



Figure 24 - Marquage CE

Il convient de rappeler que par l'apposition de ce logo, le fabricant va déclarer en engageant sa propre responsabilité que son produit est conforme à ces normes.

¹⁹⁷ Art. 5, *op. cit.*

¹⁹⁸ Art. 3 §2, *op. cit.*

Dans le cas de Hybrid Power, nous pensons que notre produit n'entre pas directement dans l'une de ces directives. Il se pourrait qu'après la phase de recherche et de développement, notre solution entre dans la Directive 2009/125/CE relative à la conception écologique de produits liés à l'énergie ou dans la Directive 2006/95/CE concernant le rapprochement des législations des États membres relatives au matériel électrique destiné à être employé dans certaines limites de tension.

L'évaluation de ces normes devra se faire lorsque notre solution solaire sera totalement terminée et prête à être testée.

Nous ne passerons pas un organisme de certification pour nous assurer que nous suivrons correctement la procédure.

15.2.5. Les autres normes et certifications

Pour certifier que notre solution solaire est bien sécurisée, il existe d'autres normes en dehors de celles qui existent dans le cadre de la certification CE.

Il existe notamment les normes :

- EN 12975 sur installations solaires thermiques et leurs composants de décembre 2006 et
- EN 12976 sur installations solaires thermiques et leurs composants - Installations préfabriquées en usine de janvier 2006.

Un organisme de certification soutenu par la commission européenne attestera la conformité à ces normes. C'est important pour Hybrid Power, d'être certifié par cet organisme car il va vérifier la qualité de notre solution thermoélectrique¹⁹⁹. Cela va donner de la crédibilité à notre projet.

Enfin, nous allons nous adresser aux laboratoires TUV. Son rôle est de contrôler la conformité des panneaux solaires aux normes prescrites. Il délivre un certificat pour chaque panneau et assure donc que l'appareil est sûr tant pour l'homme que pour l'environnement²⁰⁰.

Notre but est d'offrir un produit qui est le plus sécurisant possible mais il est impossible à ce stade, qui est celui du prototypage, de s'assurer que nous serons conformes à l'ensemble des normes qui nous incombent. C'est pourquoi nous nous dirigerons vers des organismes qui vérifieront et testeront nos produits en fonction des normes existantes afin de nous octroyer des labels et certifications de qualité.

¹⁹⁹ Informations disponibles sur <http://www.estif.org/solarkeymarknew>

²⁰⁰ Informations disponibles sur <http://www.guide-panneaux-solaires.be> et <http://www.tuv.com>

15.3. L'entreprise face à ses responsabilités

15.3.1. La société en formation

Dans le cas de Hybrid Power, nous savons que nous ne pourrions pas constituer directement la société dès le mois de septembre car il reste des recherches à effectuer.

Néanmoins, en tant que promoteur du projet, certains actes juridiques peuvent être posés en nom et pour le compte de la future société, c'est le cas pour un compte en banque ou encore la négociation et la signature d'un contrat avec un futur client.

Dès lors, le tiers qui entrerait dans une relation avec cette future société doit être protégé. C'est pourquoi le Code des Sociétés²⁰¹ souligne que ceux qui se présentent comme promoteurs de la société en formation sont tenus personnellement et solidairement des engagements jusqu'au moment où la société est formée et qu'elle reprenne à son compte les engagements.

En effet l'article 60 du Code des Sociétés énonce : « A défaut de convention contraire, ceux qui, au nom d'une société en formation, et avant l'acquisition par celle-ci de la personnalité juridique, ont pris un engagement à quelque titre que ce soit, en sont personnellement et solidairement responsables, sauf si la société a déposé l'extrait visé à l'article 68 dans les deux ans de la naissance de l'engagement et si ces engagements sont repris par elle dans les deux mois suivant le dépôt précité. Dans ce dernier cas, l'engagement est réputé avoir été contracté par la société elle-même dès l'origine. »

Dans le cas où nous prendrions des engagements pour Hybrid Power, il faudra cependant respecter certaines conditions pour que nous soyons libérés de nos engagements rétroactivement lors de la formation de la S.A.

Les engagements que nous devons prendre au nom de Hybrid Power doivent être pris avec des tiers de la future société. Ceux-ci doivent être réalisés par les promoteurs de la société. Dans le cas de Hybrid Power, nous considérons que ce sont les fondateurs mais également certains stakeholders qui peuvent effectuer des engagements dans l'intérêt de la société. Il faut toujours informer le tiers qu'il s'agit d'un engagement pour une société en formation et il faut bien identifier pour quelle société l'engagement est pris²⁰².

Pour conclure, il s'agit donc d'une responsabilité conséquente pour celui qui prendra un engagement pour la société en formation. D'une part, si la société ne se forme pas,

²⁰¹ Art. 60 C. soc.

²⁰² M., COIPEL, « Engagements conclus au nom d'une société en formation », *J.D.S.C.*, 10 éd., livre 6, 2008, pp. 67-68.

il sera tenu personnellement par la convention qu'il aura signée. D'autre part, la société, une fois formée, n'a aucune obligation de reprise de l'engagement. Par conséquent, le promoteur sera tenu personnellement à l'engagement qu'il aura pris.

Dans le cas de non-exécution de sa part, le promoteur mettra sa responsabilité contractuelle en jeu. Il faudra donc rester très prudent lorsqu'un des fondateurs prendra un engagement pour Hybrid Power. Nous incluons, dans la convention des fondateurs, une obligation de concertation avant la prise d'un tel engagement.

15.3.2. L'entreprise face à ses responsabilités une fois créée

Dans cette hypothèse, l'entreprise jouit d'une personnalité juridique propre et d'un patrimoine propre. En tant que personne morale, elle va pouvoir accomplir des actes juridiques mais elle va se retrouver face à ses responsabilités. Il y a trois types de responsabilité : pénale, contractuelle et extracontractuelle.

15.3.2.1. Sa responsabilité pénale

La société Hybrid power est susceptible d'être poursuivie en Belgique si elle commet des actes pénalement répréhensibles prévus par le code pénal tels que du blanchiment d'argent, des abus de confiance²⁰³. Il peut également s'agir d'infractions comprises dans des lois particulières comme la fraude fiscale.

Il s'agit d'un prescrit du code pénal en son article 5 : « *Toute personne morale est pénalement responsable des infractions qui sont intrinsèquement liées à la réalisation de son objet ou à la défense de ses intérêts, ou de celles dont les faits concrets démontrent qu'elles ont été commises pour son compte.* ». Il faut souligner que dans son alinéa deux l'article précise que : « *Lorsque la responsabilité de la personne morale est engagée exclusivement en raison de l'intervention d'une personne physique identifiée, seule la personne qui a commis la faute la plus grave peut être condamnée. Si la personne physique identifiée a commis la faute sciemment et volontairement, elle peut être condamnée en même temps que la personne morale responsable.* ». Ce qui signifie que dans l'infraction pénale, les personnes physiques ne sont pas totalement exonérées de leurs responsabilités si elles commettent sciemment un acte.

²⁰³ A. MASSET, « La responsabilité pénale de l'entreprise », *Guide juridique de l'entreprise, traité théorique et pratique*, Waterloo, Kluwer, 2007, p. 6.

15.3.2.2. La responsabilité contractuelle

Avant toute chose, nous ajouterons une clause dans nos contrats qui soumettra nos contrats au droit belge et nous désignerons les tribunaux belges comme compétents en cas de conflit.

Au niveau de la responsabilité contractuelle, cela peut-être avantageux pour notre client qui peut se trouver dans un pays où les garanties peuvent être moindres par rapport au droit belge. Nous indiquons clairement que nous écartons l'application de la CVIM et que nous appliquons le Code civil au contrat²⁰⁴.

D'emblée, il faut noter que la loi sur la garantie légale des biens à la consommation et la loi sur la protection du consommateur ne nous sont pas applicables car elles définissent les relations entre un commerçant et un consommateur en dehors de toutes activités professionnelles²⁰⁵.

Dans ce type de responsabilité, nous pourrions mettre en cause notre responsabilité en cas d'inexécution de nos obligations contractuelles. Il s'agit notamment de la garantie en cas d'éviction, cette garantie est énoncée à l'article 1626 du Code civil : « *Quoique lors de la vente il n'ait été fait aucune stipulation sur la garantie, le vendeur est obligé de droit à garantir l'acquéreur de l'éviction qu'il souffre dans la totalité ou partie de l'objet vendu, ou des charges prétendues sur cet objet, et non déclarées lors de la vente.* ».

Il faut aussi parler de la garantie des vices cachés là encore prévu par le Code civil aux articles 1641 et suivants : « *Le vendeur est tenu de la garantie à raison des défauts cachés de la chose vendue qui la rendent impropre à l'usage auquel on la destine, ou qui diminuent tellement cet usage, que l'acheteur ne l'aurait pas acquise, ou n'en aurait donné qu'un moindre prix, s'il les avait connus.* »

Ensuite, notre responsabilité contractuelle pourrait être mise en cause si nous n'avons pas correctement informé notre client. En effet, nous devons respecter notre obligation d'information pour que l'acheteur fasse l'acquisition de notre solution solaire en connaissance de cause car il s'agit d'un produit complexe²⁰⁶. Cependant, notre client est également un professionnel, il ne pourra pas invoquer son ignorance manifeste pour mettre en cause notre responsabilité. Dans ce cas, il faudrait que nous n'ayons donné aucune information et que nous nous soyons contentés de livrer le bien sans aucune explication pour que notre responsabilité soit mise en cause.

²⁰⁴ Ph., MALHERBE, T., LEIDGENS, « Quelques ventes particulières : la vente internationale de marchandises », *manuel de la vente*, Waterloo, Kluwer, 2010 p. 515.

²⁰⁵ G., GATHEM, « la responsabilité du fait des produits », *Les guides juridiques de l'entreprise, traités juridiques et pratique*, Kluwer, Waterloo, livre 118.1, p. 45.

²⁰⁶ D., CHAVAL, L., VAN DE KERCHOVE, « les ventes commerciales : notions générales », *Vente. Commentaire pratique*, Waterloo, Kluwer, 2007.p. 26.

Enfin, nous pouvons ajouter à notre responsabilité contractuelle les clauses concluent lors de la négociation du contrat. Par exemple, nous pouvons imposer une date de livraison précise ce qui permettra au client d'être rassuré quant à notre sérieux. Nous pouvons y combiner une clause pénale qui aurait pour objet de nous faire payer le manque à gagner de notre utilisateur sans l'installation.

15.3.2.3. Responsabilité extracontractuelle de Hybrid Power

Ici encore se pose la question de savoir quelles sont les normes légales que nous allons appliquer dans le cas d'un tel conflit. Nous allons dans nos contrats ajouter une clause qui soumettra tous nos différends découlant d'une obligation non-contractuelle.

Nous avons la possibilité de choisir en vertu de l'article 4 du règlement Rome II qui permet au commerçant de choisir une loi applicable par *un accord librement négocié avant la survenance du fait générateur*²⁰⁷. Nous allons choisir d'appliquer le droit belge pour l'ensemble de ces futurs conflits.

Dès lors quels pourraient être ces conflits ?

Nous pouvons partir de l'hypothèse dans laquelle l'utilisateur de notre système solaire pourrait subir un dommage lors du fonctionnement de celui-ci. Comment notre responsabilité pourrait-elle être mise en jeu et sur quelles bases ?

a) Fait des produits défectueux

Il s'agit d'une hypothèse dans laquelle notre responsabilité pourra être mise en cause car notre utilisateur a subi un dommage dû à une défectuosité de notre produit. Dans ce cas, nous avons préalablement signé une convention qui soumettra ce différend au droit belge et plus précisément à la loi du 25 février 1991.

Il existe un cas plus compliqué où c'est un tiers qui subit un dommage à cause d'un défaut de notre produit. Dans ce cas, le règlement Rome II prévoit que : « *Les parties peuvent choisir la loi applicable à l'obligation non contractuelle : a) par un accord postérieur à la survenance du fait générateur du dommage, ...*

*Ce choix est exprès ou résulte de façon certaine des circonstances et ne porte pas préjudice aux droits des tiers.*²⁰⁸ ».

Nous estimons que la loi belge relative à la responsabilité des produits défectueux est actuellement plus favorable que la loi marocaine pour un tiers qui subirait un dommage. C'est pourquoi nous espérons pouvoir conclure un accord avec la victime.

²⁰⁷ Art. 4, 2° Règlement Rome II (CE) n°864/2007 du Parlement Européen et du Conseil du 11 juillet 2007 sur la loi applicable aux obligations non contractuelles, L 199/40, J.O.U.E., 31 juillet 2007.

²⁰⁸ Art. 14, *Op. cit.*

Néanmoins dans le cas où il serait impossible de conclure un tel accord, nous devons nous conformer à l'article 5 du règlement Rome II : *« la loi applicable à une obligation non contractuelle découlant d'un dommage causé par un produit est: a) la loi du pays dans lequel la personne lésée avait sa résidence habituelle au jour du dommage, si le produit a été commercialisé dans ce pays; ou à défaut b) la loi du pays dans lequel le produit a été acheté, si le produit a été commercialisé dans ce pays; ou à défaut c) la loi du pays dans lequel le dommage est survenu, si le produit a été commercialisé dans ce pays. »*.

Nous n'analyserons pas en détail les lois de l'ensemble des pays où nous pourrions vendre notre solution solaire car nous estimons que dans les pays européens il y a des lois similaires dû à l'application de la Directive européenne 85/374 relative au rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des Etats membres en matière de responsabilité du fait des produits défectueux²⁰⁹.

- La loi du 25 février 1991 relative à la responsabilité du fait des produits défectueux

Le but de cette loi est d'instituer un régime de responsabilité dissocié de la faute dans lequel la victime va simplement devoir prouver que son dommage trouve sa cause dans le défaut du produit²¹⁰. Il s'agit d'un régime « simplifié » car la charge de la preuve devant être apportée par la victime est allégée. Elle devra simplement prouver que son dommage est dû à un défaut du produit mis en vente.

- Le champ d'application

Il faut se référer à l'article 1 de la loi *« Le producteur est responsable du dommage causé par un défaut de son produit. »*. A ce stade, il faut se demander si notre solution solaire entre dans la notion de produit. Il faut encore une fois se tourner vers la loi qui définit aussi ce qu'elle entend par cette notion : *« Au sens de la présente loi, on entend par "produit" tout bien meuble corporel, même incorporé à un autre bien meuble ou immeuble, ou devenu immeuble par destination. L'électricité est également un produit au sens de la présente loi²¹¹. »*. Comme le distingue la doctrine, le bien meuble corporel, ce qu'est notre solution, est un produit au sens de la loi, indépendamment de son utilisation (professionnelle ou privée)²¹².

²⁰⁹ Directive 85/374/CE du Conseil du 25 juillet 1985 relative au rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des Etats membres en matière de responsabilité du fait des produits défectueux, *J.O.C.E.*, L 210, 7 août 1985.

²¹⁰ G., GATHEM, « la responsabilité du fait des produits », *Les guides juridiques de l'entreprise, traités juridiques et pratique*, Kluwer, Waterloo, livre 118.1, p.11.

²¹¹ Art. 2 de la loi du 9 février 1994 relative à la sécurité des produits et services, M.B., 1er avril 1994.

²¹² G., GATHEM, « la responsabilité du fait des produits », *Les guides juridiques de l'entreprise, traités juridiques et pratique*, Kluwer, Waterloo, livre 118.1, p.13.

Hybrid power est le producteur de la solution solaire au sens de la loi²¹³, étant donné que nous serons normalement les producteurs effectifs. Le cas échéant, nous serons les producteurs apparents car nous apposerons notre marque et/ou notre nom sur le produit. Donc nous serons les débiteurs de la responsabilité.

- Conditions de mise en cause de la responsabilité de Hybrid Power

Il ne suffit pas à la personne victime d'un dommage de l'invoquer pour mettre notre responsabilité en cause. Il faut qu'elle fasse la preuve du défaut, de son dommage et du lien de causalité entre le défaut et le dommage²¹⁴.

Tout d'abord, le défaut du produit : il faut que le produit mis sur le marché présente un défaut ce n'est que dans ce cas que notre responsabilité pourrait être engagée. La loi considère que : « *Un produit est défectueux lorsqu'il n'offre pas la sécurité à laquelle on peut légitimement s'attendre compte tenu de toutes les circonstances et notamment : a) de la présentation du produit; b) de l'usage normal ou raisonnablement prévisible du produit; c) du moment auquel le produit a été mis en circulation.* »²¹⁵. In fine, il appartiendra au juge de déterminer si notre produit comporte un défaut lorsque notre solution solaire est utilisée de manière normale.

Ensuite, il faut que notre produit soit mis en circulation²¹⁶ : c'est au moment de la mise en circulation qu'il faut évaluer le défaut de notre produit. C'est une condition qui ne sera pas difficile à prouver car notre produit sera effectivement sur le marché. De plus, il faut que la victime prouve que c'est le défaut du produit qui lui a causé ce dommage. Il se peut que notre solution solaire ait malheureusement un défaut mais que celui-ci ne soit pas à la base de son dommage.

Enfin, il faut que la victime subisse un dommage : la loi prescrit trois types de dommages. Le dommage corporel, moral et le dommage aux biens. Dans le dommage aux biens, nous pouvons parler brièvement du dommage économique pur.

Dans notre cas la personne morale (cliente) qui aurait subi un dommage à la suite de notre solution défectueuse, subira un dommage financier important. En effet, elle devra se fournir en énergie de façon différente si le défaut affecte la production de notre solution solaire. Il est évident que cela lui coûtera plus cher qu'en utilisant notre solution et notamment en frais complémentaire (raccordement au système électrique classique par exemple).

²¹³ Art. 3, *op. cit.*

²¹⁴ Art. 7, *op. cit.*

²¹⁵ Art. 5, *op. cit.*

²¹⁶ Art. 6, *op. cit.*

Quid des clauses limitatives de responsabilité ?

La loi interdit que nous incluions des clauses qui exonéreraient notre responsabilité quant à la survenance d'un défaut²¹⁷. Ce serait le cas si nous forçons notre client à ne pas mettre en cause notre responsabilité s'il subissait un dommage causé par un défaut.

b) La faute aquilienne

La victime d'une faute commise par notre société, qu'elle soit tiers ou non à toute relation contractuelle, peut intenter une action sur le régime commun de la responsabilité extracontractuelle.

Il s'agit du régime énoncé aux articles 1382 et 1383 du Code civil, il faudra dès lors qu'elle prouve : une faute qui serait basée sur la méconnaissance d'une règle générale de prudence et un dommage qui serait en lien causale avec cette faute.

Etant donné que notre société Hybrid Power S.A. a vocation d'évoluer à l'international, il est possible que nous causions un dommage en dehors du territoire belge. Dans ce cas, il faudra se référer au code de droit international privé pour savoir quelles règles légales devront être appliquées.

²¹⁷ Art. 10 *op. cit.*

16. Plan financier

16.1. Hypothèses du plan financier

Cette section synthétise le plan financier en montrant un aperçu général. Tous les détails de celui-ci se trouvent en annexe.

Etant donné que les premières ventes ne s'effectueront qu'à partir de 2019, les tableaux récapitulatifs présentent les ventes et les coûts entre 2019 et 2021. Cependant, nous décrivons dans les paragraphes les coûts liés à la phase d'incubation et de développement.

Ce plan financier se concentre sur la zone géographique du Maroc. En effet, nous travaillerons avec énormément d'acteurs locaux, et lorsque l'entreprise s'exportera vers d'autres régions, la création d'une filiale distinctive sera sans doute envisagée.

16.2. Début des activités et vision

Nous nous référons aux Milestones à la page 55 en ce qui concerne les différentes étapes.

Tout d'abord, la première année consistera à élaborer de manière plus précise la technologie et à trouver des investisseurs. Nous supposons que cette étape débutera le 1^{er} janvier 2015.

Ensuite, entre 2016 et 2017, nous prévoyons la conception et la réalisation de l'usine pilote.

Enfin, la phase de lancement débute en 2018, avec l'espérance des premières ventes conclues en 2019.

16.3. Chiffre d'affaires

En fonction du type de contrat conclu, les revenus générés seront composés par distinctivement la réalisation des plans, l'installation de la centrale ou l'unité d'énergie produite (cf. Les contrats de Hybrid Power). Dans tous les cas de figures, nous générons un revenu sur les prestations de maintenance qu'engendrent le fonctionnement d'une centrale.

Il est donc important de distinguer les deux types de contrats :

- Vente de la centrale : Contrat type C
- Vente à l'unité d'énergie produite à un prix fixe : Contrat type E

16.3.1. Volume de vente

Ci-dessous, un estimatif des différents contrats conclus à partir de 2019.

Année	C : Vente de centrales	E : Vente d'énergie	Centrales de construites
2019	1	1	2
2020	2	3	5
2021	4	7	11

Tableau 20 - Nombre de contrats vendus et de centrales construites par an

Les contrats type E pourraient intéresser de nombreux industriels n'ayant pas les moyens d'acquérir une centrale. Par ailleurs, cela engendre un risque bien moins important pour le consommateur, puisqu'il paie ce qu'il consomme. Il en résulte donc une vente plus importante de contrat type E que de contrat type C pour la phase de lancement. Les premières centrales seront des vitrines grâce auxquelles nous espérons gagner la confiance des industriels locaux.

Par la suite, une fois la fiabilité des centrales prouvées, le nombre de contrats de type C sera en nette augmentation. En effet, les industriels auront plus de confiance dans le produit, et ils choisiront l'option la plus intéressante sur le long terme. Dans ce type de contrat, une fois que le prix d'achat de la centrale est amorti, l'énergie produite est gratuite pour le client. Dans le futur, nous espérons décrocher des contrats de type C de grande envergure, qui propulseraient ainsi les ventes de centrales (cf. - Nombre de contrats vendu par an).

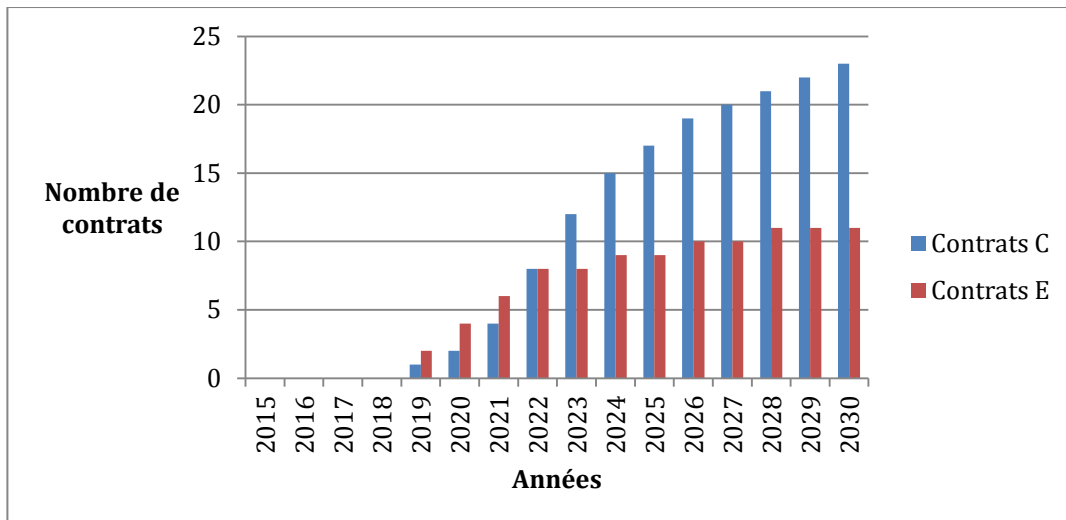


Figure 25 - Nombre de contrats vendu par an

16.3.2. Prix de vente

Pour fixer les prix, nous nous baserons sur l'étude de cas réalisée pour l'entreprise textile Blancatex (cf. Etude de cas). Nous supposons donc par la suite que les centrales solaires construites possèdent une puissance moyenne de 120 kW et produisent 219 MWh/an.

16.3.2.1. Prix de vente d'une centrale

Pour les contrats de type C, le prix de vente sera fixé à 250 000€ afin d'être compétitif par rapport aux énergies fossiles actuellement utilisées. Nous serons donc environ 20 % moins chers en comparaison à celles-ci. Ce prix de vente sera majoré de 1% par an à partir de 2019.

16.3.2.2. Prix de vente de l'énergie

Pour les contrats de type E, le prix de l'énergie est fixé à 0,05 €/kWh tant pour l'électricité que pour l'énergie thermique. Ce prix est légèrement plus bas que le prix actuel des énergies fossiles. Au contraire de celles-ci, notre prix est invariable durant toute la période d'utilisation.

Tout comme les contrats de type C, nous allons indexer annuellement de 1% tous nos nouveaux contrats conclus de type E. Cela implique que les centrales les plus anciennes bénéficieront d'un meilleur tarif que les centrales implantées par la suite. Ce taux d'inflation annuel sera un incitant pour convaincre les industriels d'investir plus rapidement dans le projet.

16.3.2.3. Prix des prestations de maintenance

Les prestations de maintenance seront facturées une fois par an, elles s'élèvent à 15 € par kW installé. Cela signifie que le contrat de maintenance d'une centrale de 120 kW sera facturée à 1800 €/an. Ce prix de prestation sera majoré de 2% par an à partir de 2019.

16.3.3. Récapitulatif des revenus

Le tableau ci-dessous présente les revenus pour les trois premières années de vente. Les revenus sont séparés en deux parties.

Premièrement, les revenus dus à la vente des centrales sont calculés en multipliant le prix de vente des centrales par le nombre de centrales vendues.

Deuxièmement, les revenus de la vente d'énergie sont calculés en multipliant le nombre de kWh produits par leur prix de vente.

	2019	2020	2021
Revenu vente de centrales	252 500 €	510 000 €	1 030 000 €
Revenu vente d'énergie	22 119 €	66 795 €	134 466 €
Prestation de maintenance	5 508 €	16 848 €	36 252 €
Total des revenus	280 127 €	593 643 €	1 200 718 €

Tableau 21 : Récapitulatif des ventes

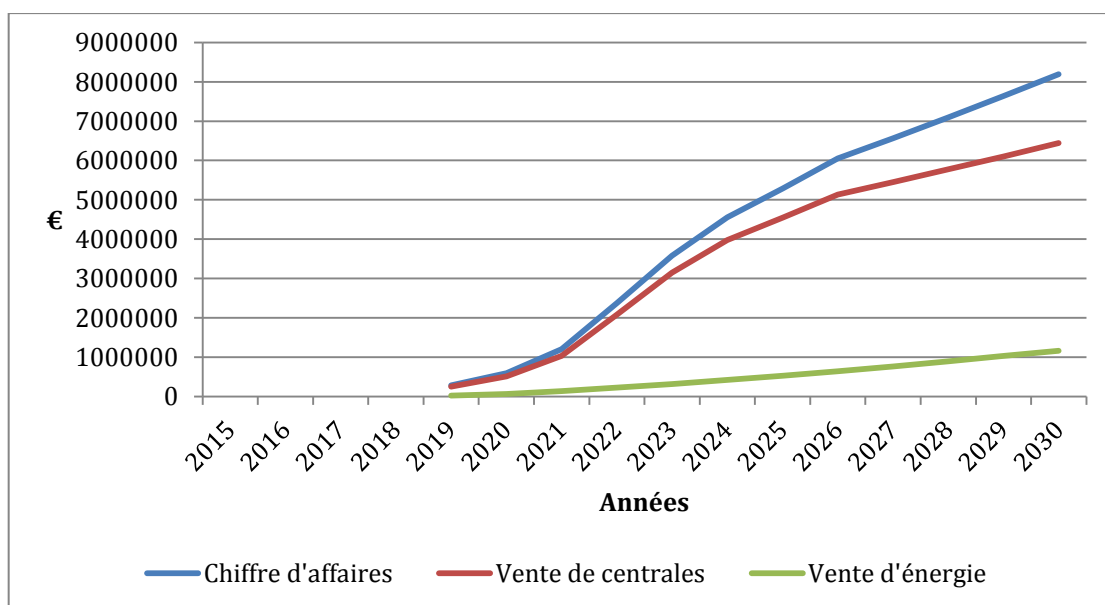


Figure 26 - Chiffre d'affaires, revenu des ventes de centrales et revenus des ventes d'énergie

16.4. Coûts

La plus grande difficulté de ce travail est l'estimation des coûts. Il est en effet nécessaire d'estimer les coûts de recherche et de développement, les coûts de fabrication, les coûts d'installation et d'exploitation. De plus, il existe certains coûts liés à l'obtention de certificats, de labels et le passage sur des bancs de tests.

16.4.1. Coûts liés à la vente

Notons que dans le cas où des frais sont engagés pour la conception des plans, ceux-ci seront intégralement remboursés par le client. Les ventes se réalisent également par l'intermédiaire de commerciaux, payés via des commissions sur les ventes effectives.

16.4.2. Coûts des ressources humaines

16.4.2.1. Coûts de recherche et de développement

Nous estimons que, durant les premières années de la spin-off, trois personnes travailleront à temps-plein. Il est en effet nécessaire qu'un chercheur mène de nombreuses recherches et optimisations sur le matériau. Une personne s'occupera également de concevoir l'ensemble du dispositif, à savoir la concentration optique, le tracker solaire, le système de refroidissement, l'échangeur de chaleur, etc. Enfin, une troisième personne s'occupera de la gestion, entre autres la gestion des fournisseurs, des partenaires, des futurs clients et des investisseurs.

En considérant toutes les taxes sociales s'appliquant aux contrats de travail (cotisation sociale ONNS, charges patronales), nous estimons que le coût pour l'entreprise sera de 3000€ par mois pour chaque emploi²¹⁸.

Grâce à la croissance de l'entreprise, le nombre de centrales installées augmentera sensiblement à partir de 2019. L'équipe de conception et de gestion s'agrandira donc au fur et à mesure de cette croissance.

16.4.2.2. Prestation de maintenance

Lors du lancement de l'usine pilote, une personne sera formée et chargée de la maintenance de celle-ci. Par la suite, cette même personne se chargera de la gestion et de la maintenance des différentes usines. Cette personne relais au Maroc est liée par

²¹⁸ Informations disponibles sur www.partena.be

un contrat de sous-traitance. En effet, les salaires y sont nettement plus bas qu'en Belgique. Nous considérons que les frais annuels liés à l'entièreté des prestations de maintenance sont de 12 000€ par personne. Le coût de la main d'œuvre augmente dû à l'élévation du niveau de vie au Maroc, ainsi que le coût des maintenances en raison de la vétusté de la centrale. Cependant, l'efficacité de ces employés augmente également. Ce coût global semble donc rester fixe dans le temps.

16.4.3. Coûts liés à l'installation

Le coût principal de l'entreprise est engendré par la conception des plans, l'achat des pièces et l'installation de la centrale solaire. Bien qu'actuellement il soit très difficile d'en estimer les coûts, nous pensons que les frais liés à l'installation ne doivent pas excéder 175 000 €, ce qui correspond à 70% du prix total de vente. Au fur et à mesure du temps, les prix des composants diminueront, cependant, le prix de la main d'œuvre local augmentera. Ces deux effets contraires se compensent.

Cependant, avec l'expérience, le bureau d'étude réalisera ses plans avec beaucoup plus d'efficacité, les coûts liés à l'étude seront donc largement réduits.

Ci-dessous, le tableau présente la répartition entre les différents coûts.

Coût de l'étude	25 000 €
Coût des concentrateurs cylindro-paraboliques	30 000 €
Coût du dispositif absorbeur/générateur	20 000 €
Coût du dispositif de tracking	40 000 €
Coût des autres composants (système de refroidissement)	10 000 €
Coût de la main d'œuvre	50 000 €
Total	175 000 €

Tableau 22 - Estimatif des coûts pour une centrale de 120 kW

16.4.4. Coûts du démantèlement

Le coût lié au démantèlement ne devrait pas excéder les 12 500 €, ce qui correspond à 5% du prix total de vente. Cependant, ces coûts ne seront engendrés qu'en fin de vie de la centrale (20 ans si le contrat n'est pas prolongé). Dans bien des cas, il sera possible de réaliser des plus-values sur le matériel encore réutilisable, ou par le recyclage de certains composants.

16.4.4.1. Cout initial de la centrale pilote

Lors de la phase de développement, il sera nécessaire de construire une première centrale pilote. Celle-ci sera implantée dans le processus industriel d'une entreprise. Néanmoins, elle ne dégagera aucun revenu, étant donné qu'il s'agit d'un test à échelle réelle.

16.4.4.2. Cout lié à la certification et à la constitution

Les différents composants utilisés dans les centrales solaires devront être certifiés afin d'être conformes aux règles en vigueur. Cependant, ce cout de certification sera déboursé une seule fois dans la vie de l'entreprise. Nous estimons ce budget à 20 000€. Les frais de constitution pour la SA sont d'au minimum 1200€.

16.4.4.3. Frais généraux

Les frais généraux sont constitués de l'ensemble de nos couts fixes. Ceux-ci comprennent notamment les assurances, les frais de déplacement, de télécommunication et de bureautique. Egalement, des frais liés au développement et à la gestion du site internet et des frais de promotion. Nous estimons l'ensemble de ces frais à 2000€ pour la première année, ensuite ils augmentent de 10% par an.

16.4.5. Récapitulatif des couts

Le tableau ci-dessous présente le récapitulatif des couts.

	2019	2020	2021
Couts des ressources humaines	120 000 €	120 000 €	168 000 €
Couts liés à l'installation	525 000 €	1 050 000 €	1 750 000 €
Autres couts annuels	2 800 €	3 000 €	3 200 €
Couts totaux par an	647 800 €	1 173 000 €	1 921 200 €

Tableau 23 : Récapitulatif des couts

Les couts des ressources humaines sont fixes durant les deux premières années, et augmentent ensuite avec le recrutement de nouveaux employés du bureau d'étude et les sous-traitants qui gèrent les différentes centrales. Les couts liés à l'installation sont directement proportionnels aux nombres de centrales installées, tandis que les autres couts augmentent de manière régulières avec le temps.

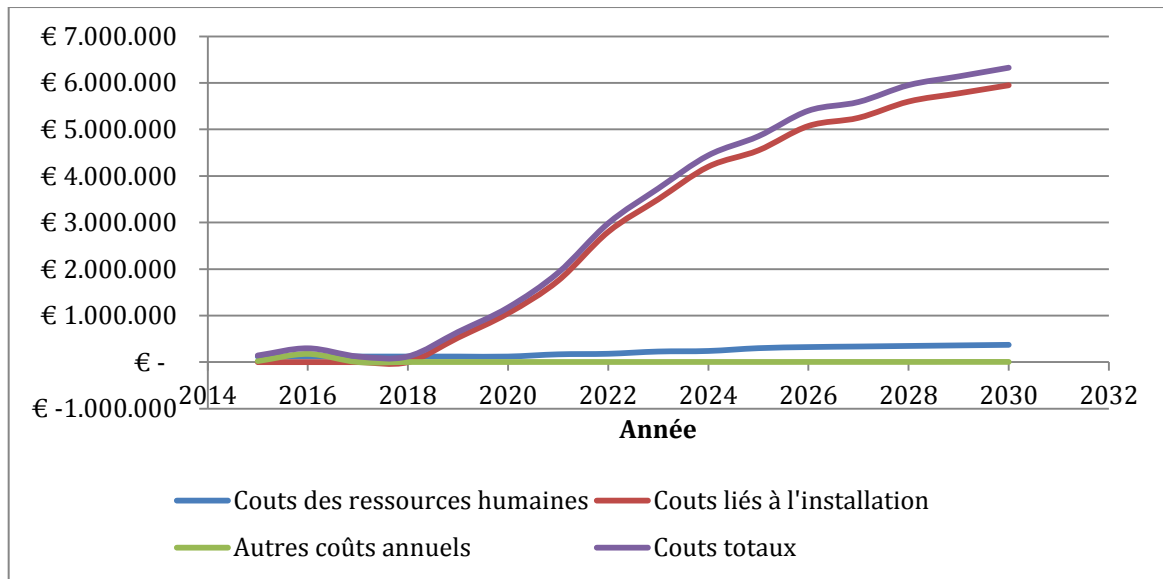


Figure 27 - Récapitulatif des différents coûts par année

Les prévisions en termes de coûts montrent qu'au fur et à mesure du temps, la proportion du coût d'installation devient de plus importante. En effet, une fois le bureau d'étude bien établi, les frais d'études seront négligeables par rapport aux coûts des matériaux et de la main d'œuvre pour construire une centrale solaire.

16.5. Aides et subsides

L'obtention de la bourse FIRST Spin-off est un gain de 18 000 €. De plus, la bourse innovation développement durable octroyée par l'Agence de Stimulation Economique (ASE) est de 15 000 € (cf. Aides et subsides).

Le total de ces aides dont nous pourrions bénéficier est donc d'environ 33 000 €.

16.6. Capitaux propres

Afin de financer le développement de l'entreprise et les nombreuses centrales qui seront construites, il sera nécessaire d'insérer des capitaux propres tout au long de la croissance de l'entreprise. Nous serons donc à la recherche constante d'investisseurs, prêts à placer des fonds dans Hybrid Power. Les opportunités au Maroc sont nombreuses pour trouver des partenaires prêts à investir des fonds dans ce genre de projet.

La première année, le capital minimum de 61 500 € sera souscrit. Ensuite, les deux années suivantes, 50 000 € supplémentaires seront souscrits. Enfin, durant toute la

phase de croissance, 100 000 € seront souscrits chaque année. Ainsi, le capital souscrit en 2030 sera d'approximativement 1 500 000 €.

16.7. Dettes financières

La vente de contrats d'énergie est un véritable investissement sur le long terme. En effet, nous investissons dans les centrales solaires pour ensuite revendre l'énergie produite. La société n'étant pas capable de fournir à elle seule tous ces capitaux, nous faisons donc appel à des emprunts bancaires. Nous supposons que le taux d'intérêt sur ces emprunts est fixe et vaut 3%. Ces emprunts permettent notamment de financer en partie la centrale pilote, ensuite, ils sont contractés durant la croissance de l'entreprise. Le remboursement de la dette financière ainsi accumulée se réalise à partir de 2024.

16.8. Trésorerie

L'objectif des emprunts et des capitaux est d'alimenter la croissance, tout en gardant une trésorerie positive. Il faudra donc prévoir minutieusement les demandes d'emprunts pour financer l'installation des centrales.

Tant que la croissance de l'entreprise est forte, une demande importante d'emprunt est nécessaire. Il est prévu que pour l'année 2024 le résultat courant soit positif, permettant ainsi de commencer à rembourser les différents emprunts, contractés 10 ans plus tôt. En quatre années, l'ensemble de la dette financière est remboursée, permettant ainsi de dégager des capitaux pour éventuellement lancer l'exploration de nouveaux marchés.

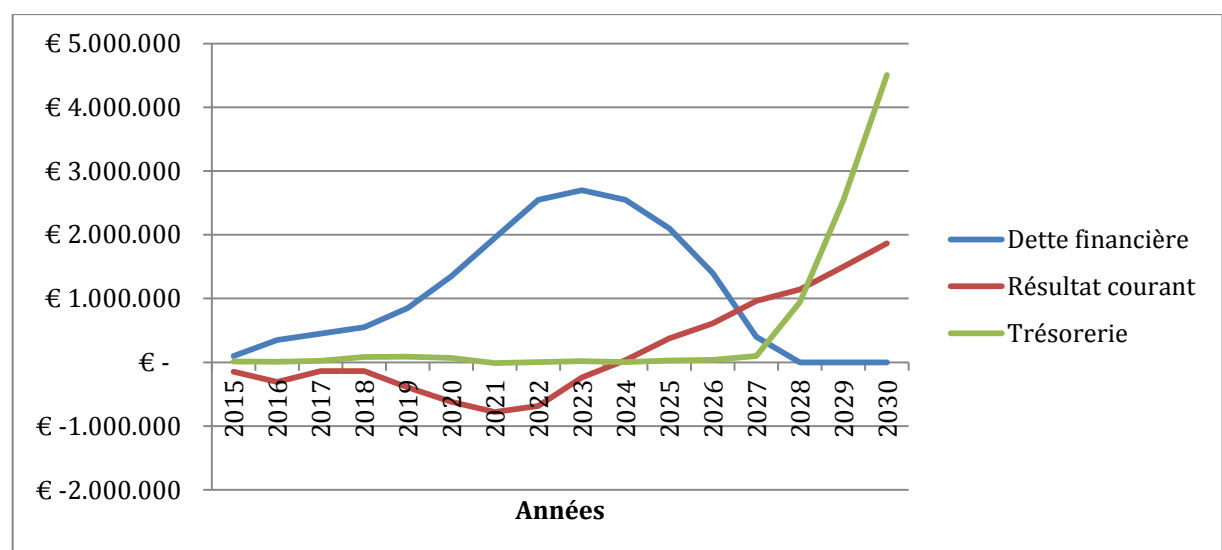


Figure 28 - Dette financière, résultat courant et trésorerie

16.9. Le bilan

Nous présentons rapidement quelques éléments clés du bilan, qui représente l'état du patrimoine de l'entreprise. Nous divisons donc cette analyse avec d'une part l'actif, qui représente l'ensemble des emplois de fonds qui ont été effectués, et d'autre part, le passif, qui représente l'ensemble des ressources qui sont mises à disposition de l'entreprise.

16.9.1. L'actif

Nous détaillons l'actif en deux grandes entités : les actifs immobilisés et les actifs circulants.

16.9.1.1. Les actifs immobilisés

Dans notre cas, notre structure d'entreprise comporte énormément d'actifs immobilisés. En effet, la part des centrales solaires²¹⁹ qui ne sont pas vendues au client rentre dans les actifs corporels de la société. Par ailleurs, les frais en recherche et développement consistent en des actifs immobilisés incorporels.

Bien qu'au fur et à mesure du temps, ces actifs soient dépréciés par le mécanisme de la dotation aux amortissements, le nombre de centrales construites ne cesse d'augmenter. L'évolution de notre entreprise est donc fortement liée à la croissance des actifs corporels représentés par l'acquisition d'un parc de centrales solaires.

16.9.1.2. Les actifs circulants

Pour notre entreprise, les actifs circulants sont représentés par toutes les créances et les valeurs disponibles. Il est par exemple nécessaire de financer la construction des centrales avant qu'elles ne soient vendues, il faut également toujours un certain montant de liquidités disponibles afin de payer à temps tous les fournisseurs. L'ensemble de ces actifs circulants grandiront donc avec la croissance du nombre de centrales en cours de construction.

²¹⁹ Dans les contrats de type E: nous restons propriétaire des centrales et nous ne vendons que de l'énergie (cf. Le contrat de vente d'unité d'énergie)

16.9.2. Le passif

A nouveau, nous divisons le passif en deux grandes entités qui sont les capitaux propres et les capitaux étrangers.

16.9.2.1. Les capitaux propres

Au départ, les capitaux propres sont essentiellement apportés par les fondateurs et par l'UCL. Par la suite, lors de la croissance de l'entreprise, il sera nécessaire d'apporter continuellement des fonds. Ceux-ci peuvent être apportés par des Ventures Capitalistes sur le moyen terme lorsque la rentabilité de l'entreprise sera démontrée.

Il existe également des fonds d'investissements publics, pour lesquels la réussite de l'entreprise prime sur sa rentabilité. Avant de convaincre ces fonds d'investissement, il sera nécessaire de lier d'étroites collaborations avec les acteurs locaux.

Notons enfin qu'une grande partie des capitaux seront apportés par des partenaires industriels au fur et à mesure de la croissance de l'entreprise.

16.9.2.2. Les capitaux étrangers

Les capitaux étrangers sont constitués d'une part par les dettes vis-à-vis des fournisseurs, et d'autre part par les dettes financières.

Premièrement, comme vu précédemment, le recours aux emprunts sera indispensable pour couvrir les premières années de croissance de l'entreprise. Afin de décrocher ces financements, la SOWALFIN²²⁰ peut octroyer des garanties allant jusqu'à 75% du montant emprunté.

Deuxièmement, l'entreprise possédera d'importantes dettes commerciales, qui seront croissantes dans le temps avec l'achat grandissant de composants à destination des centrales. Le règlement de ces dettes dépendra des conditions négociées avec chacun des fournisseurs. Un des critères de sélection des fournisseurs sera notamment le délai de paiement accordé par ceux-ci, que nous espérons être le plus long possible.

²²⁰ Société Wallonne de Financement et de Garantie des Petites et Moyennes Entreprises.

16.10. Analyse financière

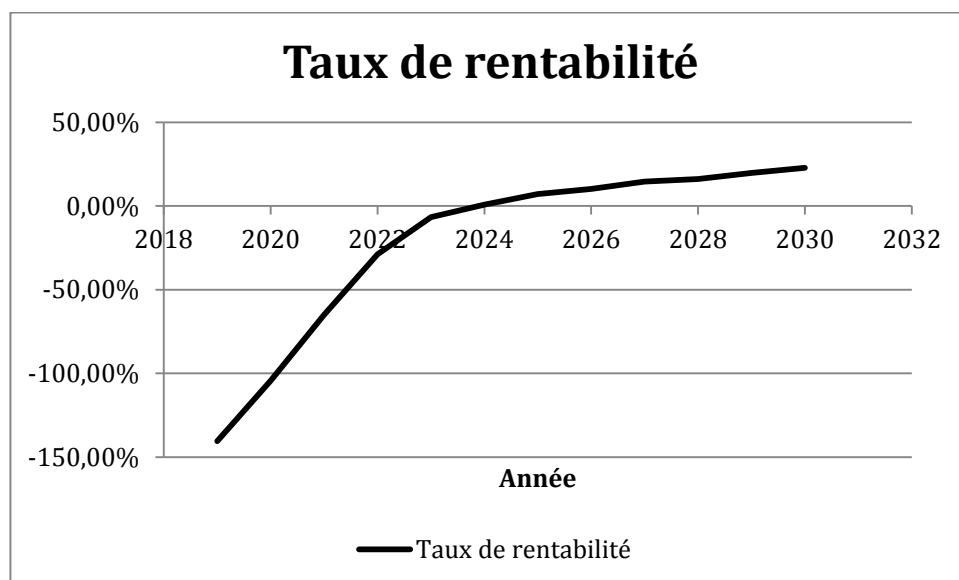
Nous traitons ci-dessous l'analyse de quelques ratios de rentabilité. Les ratios seront calculés uniquement à partir de l'année 2019 puisqu'avant cette date aucun revenu ne rentre dans la société.

16.10.1. Ratios de rentabilité

16.10.1.1. Taux de rentabilité net

Ce ratio mesure la rentabilité de l'entreprise en fonction de son chiffre d'affaires, comme indiqué ci-dessous :

$$\text{Taux de rentabilité net} = \frac{\text{Résultat net}}{\text{Chiffre d'affaires}}$$

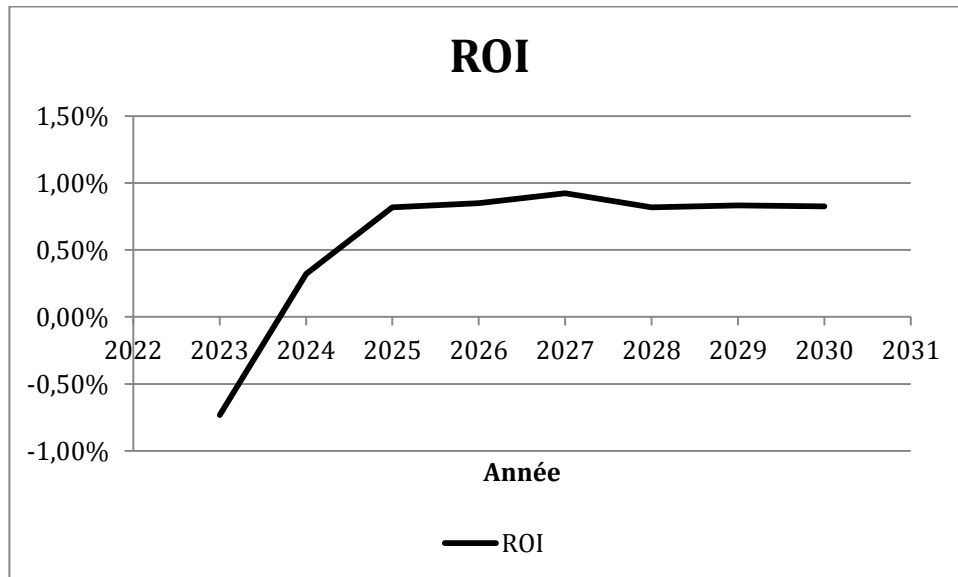


Comme déjà cité précédemment, l'entreprise devient rentable en 2024, c'est-à-dire au bout de 10 ans d'activité (début des activités en 2015). Une fois les centrales construites, la vente de l'énergie apporte un flux financier constant, qui à partir de 2024 permet de financer la construction des nouvelles centrales sans devoir passer par des emprunts.

16.10.1.2. ROI

Le ROI (Return On Investment) est le ratio qui mesure la rentabilité pour l'ensemble des capitaux investis :

$$ROI = \frac{\text{Résultat net} + \text{Charges financières nettes}}{\text{Total du passif}}$$



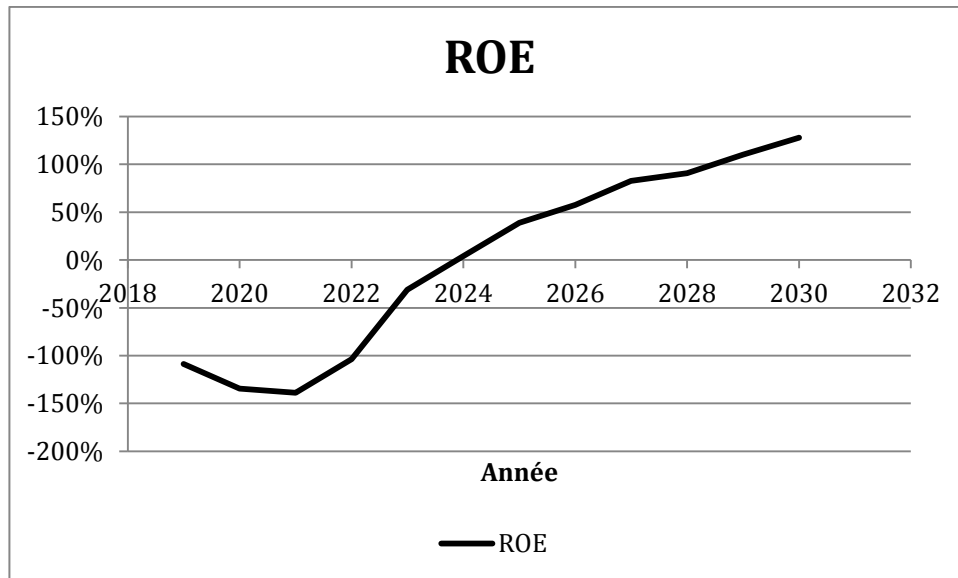
Le ROI est négatif durant la phase de croissance de l'entreprise, cependant, en 2024 celui-ci devient positif, et il reste relativement constant durant les années suivantes. En réalité, dans le cas de centrales solaires, le total du passif est très élevé, et la rentabilité n'est visée qu'à long terme (environ 15 à 20ans). Par ailleurs, les investissements croissants de l'entreprise tirent le résultat net vers le bas. Dès lors, lorsque l'entreprise atteindra sa taille maximale, le ROI devrait s'établir aux alentours de 5% à 7%.

Notons que dans notre cas, l'investissement dans l'énergie solaire est destiné aux acteurs recherchant une rentabilité peu élevée mais constante sur le long terme.

16.10.1.3. ROE

Le Return On Equity est le ratio mesurant la rentabilité des fonds propre :

$$ROE = \frac{\text{Résultat net}}{\text{Fonds propres}}$$



A nouveau, ce ratio de rentabilité devient positif en 2024 lorsque l'entreprise perçoit des bénéfices. Par ailleurs, à partir de cette date, l'effet de levier (ROE/ROI) devient supérieur à l'unité, rendant ainsi l'endettement financier intéressant pour l'entreprise. Il sera possible à partir de 2024, avec l'aide d'emprunts bancaires, de lancer une nouvelle phase d'expansion dans une autre région géographique.

16.11. Conclusion du plan financier

L'analyse du plan financier permet de mieux se rendre compte de l'implémentation du projet et des moyens à mettre en œuvre. Il semble par exemple difficile de réaliser des bénéfices avant une dizaine d'années d'activités, cela oriente donc nos recherches vers des investisseurs attirés par une rentabilité à long terme.

Egalement, nous avons clairement pu voir que l'implémentation de centrales solaires bénéficie en grande partie à l'économie locale, en fournissant de nombreux d'emplois. Dès lors, il est clairement envisageable de conclure des partenariats locaux.

Le point le plus sensible reste donc la recherche de partenaires financiers prêts à investir d'importantes sommes d'argent sur le long terme.

16.12. Responsabilité du plan financier

Le plan financier est l'œuvre des fondateurs. Il s'agit d'une œuvre qui a une importance sur le plan légal car lors de la constitution de la société, il faudra l'ajouter à l'acte authentique au moment de la comparution chez le notaire²²¹.

Le but est de justifier que le capital social est suffisant au regard de la future activité exercée par la société. Les fondateurs pourraient mettre en cause leurs responsabilités dans le cas où il y a un manque manifeste de capitalisation au regard de l'activité²²².

D'un point de vue juridique, la rédaction d'un plan financier prendra toute son importance lors de la faillite qui interviendrait endéans les trois ans de sa constitution. En effet, le tribunal de commerce pourrait demander la production du plan financier, si il estime que le capital (et donc que le plan financier) a été insuffisant estimé pour les deux premières années de l'activité, il pourra déclarer les fondateurs responsable de la faillite²²³. Cette responsabilité particulière, dans le cas d'une S.A., ne concerne que les fondateurs signataires non pas les simple comparants à l'acte ou encore les gérants et administrateurs non fondateurs²²⁴.

Le code des sociétés n'impose pas de nouvelle rédaction de plan financier dans le cas d'une augmentation de capital. En effet, il ne s'agit d'une obligation légale que lors de la constitution. Néanmoins, en tant que gestionnaires prudents et diligents, l'équipe Hybrid Power mettra à jour le plan financier très régulièrement.

²²¹ Art. 400 & 456, 4° du C. soc.

²²² P.-F., COPPENS, « Responsabilités aggravées pour insuffisance du capital social en cas de faillite », *Bulletin institut Professionnel des Comptables et Fiscalistes Agréés*, Pacioli, n°240, 20 octobre 2007 disponible sur www.juridat.be

²²³ *Ibid*

²²⁴ Art. 456, 4° C. Soc.

16.13. La fiscalité à l'aide de la société

Il existe plusieurs dispositions fiscales qui peuvent venir en aide à la société et à son financement. En effet, il est possible de faire plusieurs déductions, il semble important d'en énumérer les incontournables.

16.13.1. Déduction fiscale des revenus de brevets

Il s'agit de déduire des bénéfices 80% des revenus engendrés grâce au brevet²²⁵. En effet, dans le cas de Hybrid Power, nous aurons des revenus de brevet par la vente de nos solutions solaires qui seront brevetées. Nous pourrions donc déduire de la base d'imposition 80% provenant des revenus des brevets que nous exploiterons.

Il faudra joindre à la déclaration un relevé qui est un modèle arrêté par l'administration pour pouvoir bénéficier de la déduction²²⁶.

16.13.2. Dispense de paiement de précompte professionnel

Le code d'impôt sur les revenus nous propose une aide à l'emploi qui nous permet de ne pas payer 75% du précompte professionnel pour le personnel scientifique que nous emploierons²²⁷.

Cependant il faut que nous soyons une entreprise *Young innovative company*. Nous entrons dans la définition énoncée par le Code dans le même article : « *On entend par Young Innovative Company une société réalisant des projets de recherche lorsque, à la fin de la période imposable, elle remplit simultanément les conditions suivantes:*

- a) Elle est une petite société au sens de l'article 15 du Code des sociétés;*
- b) Elle est constituée depuis moins de 10 ans avant le 1er janvier de l'année durant laquelle la dispense de versement du précompte professionnel est attribuée;*
- c) Elle n'est pas constituée dans le cadre d'une concentration, d'une restructuration, d'une extension d'activité préexistante ou d'une reprise de telles activités;*
- d) Elle a effectué des dépenses de recherche et de développement représentant au moins 15 p.c. du montant total des frais de la période imposable précédente ».*

²²⁵ Art. 205 C.I.R.

²²⁶ Art. 205/4 C.I.R.

²²⁷ Art. 275/3 §1 al. 3 C.I.R.

Nous sommes aussi une petite société au sens de l'article 15 du Code des sociétés. En effet, il ne faut pas que nous dépassions une des limites suivantes : nous avons moins de 50 employés occupés annuellement, notre chiffre d'affaires semble être inférieur à 7.300.000€ du moins pour les premières années ou enfin avoir un bilan total de moins de 3.600.000€. Cependant, au bout de plusieurs années d'exploitation, nous passerons au stade de moyenne entreprise.

17. Conclusion

Après plus d'un an et demi de travail commun, notre mémoire nous a permis de combiner nos savoirs respectifs et d'arriver à la conclusion générale qu'il existe une réelle opportunité pour le lancement de notre société Hybrid Power.

Qu'il nous soit permis de souligner les difficultés auxquelles nous avons été confrontés dans l'élaboration de ce mémoire :

Le plus grand défi fut de réussir, en partant d'une technologie non mature issue d'un laboratoire et non prédestinée au marché de l'énergie solaire, à créer une application et un prototype.

Pour ce faire, nous avons énormément « brainstormé » non seulement avec des acteurs du secteur de l'énergie renouvelable mais aussi avec des profanes.

Ce travail nous a permis d'identifier une problématique, celle de la rareté des énergies fossiles couplée avec l'augmentation des prix de l'énergie.

La conscientisation de ce problème, alliée au phénomène d'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, a suscité en nous l'idée de Hybrid Power. Le concept se présente sous la forme d'un concentrateur, captant l'énergie du soleil pour produire à la fois de l'électricité et de l'énergie thermique.

Bien que notre solution présente les atouts de capter l'énergie d'une manière totalement innovante, c'est néanmoins dans la politique de prix qu'elle se distingue. En effet, un de nos fers de lance est de rendre accessible à tous l'énergie en privilégiant un faible coût.

A la suite de notre formation entrepreneuriale, nous avons tiré une leçon essentielle, celle de concrétiser son idée via un business plan éloquent. Celui-ci est l'outil de notre réussite. Après avoir saisi toute l'importance de l'opportunité, nous avons réussi à trouver un marché, à l'intérieur duquel un besoin n'était pas encore comblé. Pour le pénétrer, nous avons mis en place une stratégie reposant sur une politique de prix. Sa mise en œuvre se base sur son plan marketing, son plan d'action et son plan de production. Pour chiffrer les coûts de cette entreprise ambitieuse, nous avons rédigé un plan financier dans lequel transparait une estimation des investissements nécessaires et des bénéfices potentiels.

Pour conclure, il paraît présomptueux de lancer le produit dans un très bref délai. En effet, celui-ci requiert des recherches et des développements colossaux afin d'obtenir un produit performant. Bien que nous sachions que, comme à l'aube d'une nouvelle ère technologique, le changement fasse peur aux incrédules, nous avons foi en l'avenir de cette innovation. C'est pourquoi, nous avons le devoir de convaincre un certain nombre de stakeholders passionnés d'investir leurs connaissances, leur réseau et aussi des fonds importants afin d'effleurer cette révolution énergétique.

18. Bibliographie

18.1. Législations nationales

1. Code civil, article 1382, 1583, 1603,1641, 1646,
2. Code de commerce article : 12
3. Code Pénal : article 5
4. Code des sociétés articles 15 ; 60 ; 437; 439 ; 438 ; 456, 4°; 510 ; 511 ; 518 ; 518§3.
5. Code d'impôts sur les revenus articles 205, 275.
6. Loi du 10 janvier 1824 concernant le droit de superficie, *Journ. off.*, 10 janvier 1824
7. Loi du 3 juillet 1978 relative au contrat de travail, *M.B.*, 22 août 1978.
8. Loi du 28 mars 1984 sur les brevets d'invention, *M.B.*, 9 mars 1985.
9. Loi du 25 février 1991 relative à la responsabilité du fait des produits défectueux, *M.B.*, 22 mars 1991.
10. Loi du 14 juillet 1991 sur les pratiques du commerce et sur l'information et la protection du consommateur, *M.B.*, 29 août 1991.
11. Loi du 9 février 1994 relative à la sécurité des produits et services, *M.B.*, 1^{er} avril 1994.
12. Loi du 13 février 1995 relative au contrat d'agence commerciale, *M.B.*, 2 juin 1995.

18.2. Législations internationales

1. Convention sur la délivrance de brevets européens telle que modifié par l'acte portant sur la révision de la Convention sur la délivrance de brevets européens, son Règlement d'exécution et ses quatre protocoles, fait à Munich le 5 octobre 1973., *M.B.*, 7 octobre 1977.
2. Règlement Rome I, (CE) n°593/2008 du Parlement Européen et du Conseil du 17 juin 2008 sur la loi applicable aux obligations contractuelles, *J.O.U.E.*, L177, 4 juillet 2008.
3. Règlement Rome II (CE) n°864/2007 du Parlement Européen et du Conseil du 11 juillet 2007 sur la loi applicable aux obligations non contractuelles, L 199/40, *J.O.U.E.*, 31 juillet 2007.
4. Directive 85/374/CE du Conseil du 25 juillet 1985 relative au rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des Etats membres en matière de responsabilité du fait des produits défectueux, *J.O.C.E.*, L 210, 7 août 1985.
5. Directive 2001/95/CE du parlement européen et du Conseil du 3 décembre 2001 relative à la sécurité générale des produits, *J.O.C.E.*, L 11/4, 15 janvier 2002.
6. Directive 2009/125/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits liés à l'énergie, *J.O.C.E.*, L. 285, 31 octobre 2009.
7. Loi n° 13-09 relative aux énergies renouvelables, promulguée par Dahir n° 1-10-16 du 26 Safar 1431, le 11 février 2010, *Bulletin officiel n° 5822*, du 1er rabii ii 1431 (18 mars 2010). (MAROC)

18.3. Articles et Ouvrages

1. Apere ASBL, « L'énergie photovoltaïque ou thermique », *Renouvelle ; l'actualité de l'énergie renouvelable*, juin 2013
2. BARNOUX, G., *L'audit Marketing : analyse des risques marketing et démarches d'audit*, Paris, McGraw-Hill, 1990.
3. BERLINGIN, M., « La formation dynamique du contrat de vente », *Manuel de la vente*, 2010, Kluwer, 2010.
4. CHAVAL, D., VAN DE KERCHOVE, L., « les ventes commerciales : notions générales », *Vente. Commentaire pratique*, Waterloo, Kluwer, 2007.
5. CHAUDIER, J., « Le Maroc prévoit de faire 12% d'économie d'énergie d'ici 2020 », *Econostrum*, 3 décembre 2013.
6. Coipel, M., « Engagements conclus au nom d'une société en formation », *J.D.S.C.*, 10 éd., livre 6, 2008.
7. COURTECUISSÉ, M., « Un emploi dans le photovoltaïque coûte cher et n'est pas pérenne », *L'Expansion*, 31 janvier 2011.
8. COMMISSION CORPORATE GOVERNANCE pour les entreprises non cotées en Bourse, *Code Buysse II*, 2009, disponible sur <http://www.codebuysse.be/>.
9. COPPENS, P.-F., « Responsabilités aggravées pour insuffisance du capital social en cas de faillite », *Bulletin institut Professionnel des Comptables et Fiscalistes Agréés*, Bruxelles, Paciolini, 20 octobre 2007, n°240
10. De CORDT, Y., DELFORGE, C., LEONARD, T., Y. POULLET, *Manuel de droit commercial*, 2^e éd., Limal, Anthémis, 2011.
11. De CORDT, Y., MALHERBE, J., LAMBRECHT, P., MALHERBE, P., *Droit des sociétés précis : droit belge droit européen*, 4^e éd., Bruxelles, Bruylant, 2011.
12. DERENNE, J., « La propriété industrielle et intellectuelle et le droit communautaire », *Guide juridique de l'entreprise- traité théorique et pratique*, 2^e éd., titre X, liv.101, Waterloo, Kluwer, 2000,

13. DERENNE, J., « la protection juridique des créations nouvelles », *guide juridique de l'entreprise- Traité théorique et pratique*, 2^{ème} éd., titre X, liv.98, Waterloo, Kluwer, 2003
14. DEROUANE, D., « Le dépôt de brevet comme outil de valorisation », conférence doctorale, Unamur, disponible sur <http://www.unamur.be/>
15. De VISSCHER, F., « la protection des innovations et du savoir-faire », *guide juridique de l'entreprise- Traité théorique et pratique*, 2^{ème} éd., titre X, liv. 98.1, Waterloo Kluwer, 20 octobre 2003.
16. FRÉRY, F., JOHNSON, G., SCHOLÉS, K., WHITTINGTON, R., « La stratégie de prix ». *Stratégique*, 9ème éd., Paris, Pearson Education, 2011.
17. Gathem, G., « la responsabilité du fait des produits », *Les guides juridiques de l'entreprise - traités juridiques et pratique*, 2^e éd., liv. 118.1, Waterloo, Kluwer.
18. HIEBING, R., COOPER, S., *Construire un plan marketing performant*, Paris, Interéditions, 1994.
19. DE JAEGER, E. JACQUES, P., MATAGNE E.,, Cours UCL: *LELEC 2670 Sources d'énergie électrique renouvelables ou non conventionnelles – Convertisseurs thermoélectriques*.
20. KARNI, J., « The thermoelectric alternative », *News and Views – Solar Energy*, 2011
21. LARSON, P. D. MAHANTI,S., CHUNG, D.Y., KANATZIDIS, M. G., « Electronic structure of CsBi₄Te₆: A high-performance thermoelectric at low temperatures », *Physical Review B*, vol. 65, no 4, 2002
22. LECOCP, P., « Superficie et emphytéose: aspects civils », *guide juridique de l'entreprise- Traité théorique et pratique*, 2^e éd., Titre III, Liv. 34., Waterloo, Kluwer, 15 mars 2007.
23. MALHERBE, Ph., LEIDGENS,, T. « Quelques ventes particulières : la vente internationale de marchandises », *manuel de la vente*, Waterloo, Kluwer, 2010 .
24. MANIET, F., « qualité et sécurité des produits et des services », », *Guide juridique de l'entreprise- traité théorique et pratique*, 2^e éd., liv.11.1, 24 juin 1998

25. MANDIL, C., PERCEBOIS, J., « Rapport énergies 2050 », Ministère de l'économie des finances et de l'industrie, 2012.
26. MASSET, A., « La responsabilité pénale de l'entreprise », », *Guide juridique de l'entreprise- traité théorique et pratique*, 2^e éd., Kluwer, Waterloo, 2007.
27. MIGNOT, A., « Ouarzazate, capitale du Plan solaire marocain », *La tribune*, 2 Aout 2013.
28. MIN, G., « Thermoelectric Module Design Under a Given Thermal Input: Theory and Example », *Journal of Electronic Materials*, Vol. 42, No. 7, 2013.
29. MONTERO, E., « la vente », *guide juridique de l'entreprise- traité théorique et pratique*, Waterloo, Kluwer, 2007.
30. NICAISE & V. PIRE, « Développements récents en matière de sécurité des produits et des services et en matière de responsabilité du fait des produits défectueux », *R.G.A.R.*, 1/2004, n°9.
31. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, « Les forêts et l'énergie, questions principales », *Etude FAO: Forêts 154*, 2008.
32. PLASSCHAERT, E., DETAÏLE, C., « Les effets de la vente », *Manuel de la vente*, Waterloo, Kluwer, 2010.
33. PHILIPPE, D. *Droit des affaires*, Manuels Larcier, Bruxelles, 2012.
34. REMICHE, B., *Droit des brevets d'invention et du savoir-faire : Créer, protéger et partager les inventions au XXI siècle*, Bruxelles, Larcier, 2010.
35. UMMEL, K., WHEELER, D., « Desert Power: The Economics of Solar Thermal Electricity for Europe, North Africa, and the Middle East », *Center for Global Development*, December, 2008.
36. Willemart M., Willemart, S., « Le contrat d'agence commercial », *Les dossiers du journal des tribunaux*, Bruxelles, Larcier, 2005.
37. WILKIN, B., « Solaire thermique », *Association de Promotion des Energies Renouvelables APERe asbl*, présentation UCL novembre 2013.

38. X, « Energie solaire : l'Afrique a perdu la bataille mais peut gagner la guerre ». *L'Afrique s'éveille*. 17 septembre 2010.
39. X., « L'Afrique et les énergies renouvelables: la voie vers la croissance durable », *International Renewable Energy Agency*, 2013.
40. X, International Energy Agency, *Manuel sur les statistiques de l'énergie*.

18.4. Webographies

18.4.1. Articles

1. ANDRIANI, B., LIGNIÈRES, P., BARGES, M., BENNIS, A., MOKHTARI, G. (2013). « L'énergie au Royaume du Maroc : Stratégie énergétique et développements récents ». Disponible sur <http://www.linklaters.com>. (Consulté le 05/04/2014).
2. DU BLED, C. (2013). « Certificats verts: On a trop subsidié le système ». Disponible sur <http://www.lesoir.be/211433/article/economie/2013-03-20/certificats-verts-«on-trop-subsidie-systeme»>. (Consulté le 03/03/2014)
3. CHAVARDED D. (2010). « Enjeux énergétiques des trois géants d'Asie: Japon, Chine, Inde ». Disponible sur http://www.janus.co.jp/essays/chavardes/energie_d'asie-f.html. (Consulté le 04/03/2014).
4. EDF (2013). « Les coûts de production des différentes sources d'énergie en France ». Disponible sur <https://www.lenergieenquestions.fr/les-couts-de-production-des-differentes-sources-denergie-en-france-infographie/>. (Consulté le 27/02/2014).
5. EDF Energies Nouvelles (2014). « EDF Energies Nouvelles prend position sur le marché marocain ». Disponible sur <http://www.edf-energies-nouvelles.com/communiqués-de-presse/edf-energies-nouvelles-prend-position-sur-le-marche-marocain/>. (Consulté le 24/03/14).
6. EnR (2013). *Partenaires*. Disponible sur <http://maroc.energie-ren.com/partenaires/partenaires>. (Consulté le 08/03/2014).

7. GDF Suez (2013). « GDF SUEZ va construire et exploiter le plus grand parc éolien d'Afrique ». Disponible sur <http://www.gdfsuez.com/journalistes/communiqués-de-presse/gdf-suez-va-construire-et-exploiter-le-plus-grand-parc-eolien-dafrique/>. (Consulté le 24/03/14).

8. GreenUnivers (2009). « L'énergie mondiale poursuit sa mutation malgré la crise ». Disponible sur <http://www.greenunivers.com/2009/05/rapport-ren21-energies-renouvelables-monde-2008-6617/> (Consulté le 02/03/2014).

9. Groupement français des professionnels du solaire photovoltaïque. « Le marché des panneaux solaires ». Disponible sur <http://www.businesscoot.com/le-marché-des-panneaux-solaires-40/>. (Consulté le 27/02/2014).

10. INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (2013). « L'Afrique et les énergies renouvelable : la voie vers la croissance durable ». Disponible sur www.irena.org. (Consulté le 15/03/2014)

11. KIRÉMIDJIAN, H. (2009). « Etude des filières liées à l'énergie solaire dans la région de Meknès-Tafilalet ». *USAID*. Disponible sur <http://www.gret.org/wp-content/uploads/Filieres-de-l-energie-solaire-au-Maroc.pdf>. (Consulté le 04/03/2014).

12. MARTIN, A.S (2013). « Photovoltaïque: le marché marocain en perte de vitesse depuis 2010 ». Disponible sur <http://www.lavieeco.com> (Consulté le 10/04/2014).

13. Map (2013). « Les objectifs du Maroc très ambitieux ». Disponible sur http://www.lematin.ma/express/energies-renouvelables_les-objectifs-du-maroc-tres-ambitieux/189919.html. (Consulté le 05/03/2014).

14. Map (2014). « Le Maroc en passe de devenir un acteur de référence». Disponible sur http://www.lematin.ma/express/2014/energie-solaire_-le-maroc-en-passe-de-devenir-un-acteur-de-reference/198792.html. (Consulté le 24/03/14).

15. PAPILLON, P. (2012). « Plateforme Technologique de l'AIE: Atelier Solaire thermique ». Disponible sur www.ines.org . (Consulté le 25/03/14)

16. Plein Soleil (2014). « Larivière: Partenariat avec Sonnenkraft et Dualsun pour la distribution de solutions solaires thermiques et hybrides ».

- Disponible sur <http://www.plein-soleil.info/actualites/la-riviere-partenariat-avec-sonnenkraft-et-dualsun-pour-la-distribution-de-solutions-solaires-thermiques-et-hybrides/>. (Consulté le 05/04/2014).
17. Région wallonne. « Un chauffe-eau solaire chez vous! ». Disponible sur <http://energie.wallonie.be/servlet/Repository/brochure-grand-public---8-questions--8-raisons-et-les-systemes-combines.PDF?IDR=7831>. (Consulté le 4/03/14)
 18. Royaume du Maroc ministère des affaires étrangères et de la coopération, « Statut avancé », Disponible sur www.diplomatie.ma.
 19. Règlement en matière de propriété, de protection et de valorisation des résultats des recherches réalisées au sein de l'UCL, 29 mars 2006 disponible sur <http://www.uclouvain.be/393204.html>.
 20. SINAÏ, A. (2014). « Un paquet climat-énergie européen sans audace ». Disponible sur <http://www.actu-environnement.com/ae/news/paquet-climat-energie-europe-20508.php4>. (Consulté le 27/02/2014).
 21. SPF affaires étrangères (2012). « Conseil aux voyageurs Maroc ». Disponible sur http://diplomatie.belgium.be/fr/Services/voyager_a_letranger/conseils_par_destination/afrique/maroc/ra_marokko.jsp?referer=tcm:313-75105-64. (Consulté le 05/03/2014).
 22. VINH Y. (2013). « L'Asie face aux défis énergétiques ». Disponible sur <https://www.futuribles.com/base/article/lasie-face-aux-defis-energetiques-2/>. (Consulté le 03/03/2014)
 23. X (2009). « L'initiative européenne pour l'énergie solaire, moteur du progrès technique ». Disponible sur http://ec.europa.eu/environment/ecoap/about-eco-innovation/policies-matters/eu/261_fr.htm. (Consulté le 27/02/2014).
 24. X (2013). « Boum des énergies renouvelables en Amérique latine ». Disponible sur <http://www.mobilite-durable.org/innover-pour-demain/energies/boum-des-energies-renouvelables-en-amerique-latine.html>. (Consulté le 05/03/2014).
 25. X (2013). « Coût de l'électricité photovoltaïque: 2014-2020-2030 ». Disponible sur http://energeia.voila.net/solaire/prix_moyen.htm. (Consulté le 2/03/14)

18.4.2. Consultations

26. <http://www.aidesdirectes.be>
27. <http://www.atacama-solar.com>
28. <http://as-e.be/>
29. <http://www.as-maroc.com>
30. <http://www.awex.be>
31. <http://www.banquemondiale.org/>
32. <http://www.base-innovation>
33. <http://www.droitbelge.be/>
34. <http://www.droit-fiscalite-belge.com/>
35. <http://dualsun.fr>
36. <http://economie.fgov.be/>
37. <http://economie.wallonie.be>
38. <http://ec.europa.eu/>
39. <http://www.epo.org/>
40. <http://www.estif.org/solarkeymarknew>
41. <http://www.invest.gov.ma>
42. <http://www.guide-panneaux-solaires.be>
43. <http://www.geocities.ws>
44. <http://www.greenvivo.com>
45. <http://www.lefigaro.fr/>
46. <http://www.lesoir.be/>

47. <http://www.mcinet.gov.ma/>
48. <http://www.mem.gov.ma>.
49. <http://www.masen.org.ma/>
50. www.partena.be
51. <http://recherche-technologie.wallonie.be/>
52. <http://www.references.be/>
53. http://www.statistiques-mondiales.com/burkina_faso.htm
54. <http://www.siem.ma>
55. <http://www.solimpeks.com/>
56. <http://socialsecurity.fgov.be/>
57. <http://www.solaire-guide.fr>
58. www.solarsystems.com.au
59. <http://www.sopartec.com>
60. <http://www.tuv.com>
61. <http://www.ucm.be/>
62. <http://www.zenithsolar.com>

18.5. Jurisprudence

1. civ. Mons, 9 janvier 2004, *J.L.M.B*, 2004, p.894.

TABLES DES MATIERES DES ANNEXES

1. Cv de l'équipe	2
2. Les différentes sources d'énergie en France.....	5
3. Analyse PESTEL : Europe	6
4. Analyse PESTEL : Asie	11
5. Analyse PESTEL : USA.....	13
6. Analyse PESTEL Afrique	18
Côte d'Ivoire	18
Burkina Faso	19
Sénégal	22
Maroc	24
7. Cartographie des gisements.....	27
8. Comparaison des sociétés	28
9. Carte répartition d'énergie Afrique.....	32
10. L'abstract du Brevet Valther	33
11. Facteurs clés de succès.....	35
12. Bibliographie.....	36
Webographie.....	36
Législation.....	38

1. Cv de l'équipe

Jérémie DENIS

16th March 1991

Master's in Civil Engineering

Driving licence B

Avenue du Diamant 53, 1030 Brussels

+32 496 95 33 65

jeremiedenis@hotmail.com

Education

2012 - 2014	Master's degree in Civil Engineering, option Création de Petites et Moyennes entreprises Multidisciplinary thesis : business plan for the development of hybrid solar panels
2009 - 2012	Bachelor's degree in Engineering at Université Catholique de Louvain
2003 - 2009	CESS : Mathematics and Sciences at Collège Saint-Michel d'Etterbeek

Work experience

2012 - present	Founder and manager of a SPRL in events (www.makeitpop.be) Organizing over a hundred events per year (wedding, ball, dinner, conference, concert..)
2003 - present	Event support : Professional knowledge in sound, lighting, picture and video
2013	Internship at Galère and Blaton : Site supervision at the Convention Center of Mons
2007 - 2013	Tutor in mathematics and sciences
2008 - 2012	Steward : Managing a team of 8 people to welcome spectators at Théâtre Saint-Michel
2008 - 2011	Student job at Clinique Sans Souci

Languages

French	Mother tongue
English	Intermediate level (B2 course)
Dutch	Intermediate level (B1)

Skills

Accounting	Accounting Denis Lippens Partners SPRL : I take care of the accounting with Ciel program
Computing	Technic : AutoCad, Matlab General : Word, Power Point, Excel, LaTeX Webmaster : Creating and managing websites with Dreamweaver, Wordpress, Fireworks Design and video : Creating multimedia support with PhotoShop, Indesign, SonyVegas IT management : Installation of computer network
Electrical	Electrical work planning

Other experiences

2008 - 2013	Technical Manager for Les Équipes Saint Michel ASBL : Organizing an annual trip abroad for 300 people, weekend, conferences for more than 1000 people, etc..
1996 - 2007	Youth movement

Hobbies & Interests

Hobbies	Music, piano, computer
Sport	Badminton, jogging

BAILEY JANET

Place Saint Walhère, 1
 5651 Gourdinne
 Belgique
 0032 494 83 14 85
 janet.bailey@hotmail.com
 12/03/1990
 Permis de conduire B

**Formation**

09/2012-06/2014	Master en Sciences de Gestion – Options : Finance - Entrepreneuriat Louvain School of Management; Louvain-la-Neuve
09/2011-06/2012	Année préparatoire au Master en Sciences de Gestion Université Catholique de Louvain-la-Neuve
09/2008-06/2011	Bachelier en Marketing HENAM; Namur
01-05/2010	ERASMUS – Business Management VAMK, University of Applied Sciences - Vaasa, Finland
09/2001-06/2008	Enseignement secondaire général Options : Economie - Langues Institut Notre-Dame de Loverval

Expériences professionnelles

02-04/2014	Stagiaire chez TribalVision – Mont-Saint-Guibert (Axisparc) Assistante Marketing
04-05/2011	Stagiaire chez Cobalt Recruitment – London Consultante en recrutement
01-03/2011	Stagiaire chez Universal Music Belgium – Zaventem Assistante Marketing
<u>Jobs étudiants</u>	
2012-Actuellement	Red Bull Gestion de diverses actions et hôtesse
07-08/2013	Galeria Inno – Namur Vendeuse
08/2010-08/2012	Air Products – Sombreffe Assistante administrative et commerciale
06/2010	Stock Americain – Fosses-la-Ville Vendeuse
08/2005-08/2007	Poney-Club du Poucet – Morialmé Monitrice d'équitation

Compétences**Compétences linguistiques**

Français	Langue maternelle
Anglais	Avancé B2-C1
Néerlandais	Elémentaire A2

Compétences informatiques

Office	Word, Excel, PowerPoint
Logiciels spécialisés	Access, SPSS, RStudio

Centres d'intérêts

- Activités sportives (tennis, course à pied et équitation)
- Passionnée par les voyages et la découverte d'autres cultures, j'ai été membre d'un projet d'échange pour étudiants internationaux issus de diverses universités (International Week in Belgium)

Spedale-Scarlata Julien

Rue du Moulin
5190 Moustier-sur-Sambre
julien.sped@gmail.com



☎+32499/26.25.74

Belge

Né le 03/07/1990 (23 ans)

CURRICULUM VITEA

Etudes

- 2012-2014 Master en Droit, finalité Droit comparé
Formation interdisciplinaire en création d'entreprise - CPME
Université Catholique de Louvain (Louvain-la-Neuve)
- 2011-2012 Master en Droit, finalité Droit des Entreprises, option Droit des Assurances
Université Catholique de Louvain (Louvain-la-Neuve)
- 2008-2011 Bachelier en Droit
Facultés Universitaires Notre-Dame De La Paix (Namur)
- 2005-2008 Humanités Supérieures, Sciences-Mathématiques
Institut Saint-Louis (Namur)

Formations complémentaires

- 2013 Certificate in comparative law – Programme d'échange Erasmus (1^{er} Semestre)
University of Szeged (Hongrie)
- 2013 Summer school Poland
Wroclaw University of Economics (Pologne)
- 2012 Certificat d'études juridiques et politiques d'Europe Centrale et Orientale
Szegedi Tudományegyetem (Szeged, Hongrie) - Summer school

Expériences extra-académiques

- 2011-2012 Administrateur de l'a.s.b.l. Théâtre Royal Universitaire de Louvain
Trésorier du kot-à-projet T.U.L
- 2010-2011 Trésorier du cercle de droit Namur
Organisation & coordination du ski pour Odyssée
- 2009-2010 Délégué relations extérieures & webmaster pour le cercle de droit Namur
Animateur responsable section louveteaux XX^{ème} N.O.

Prix & Récompenses

- 2013 Winner of the International Business simulation – *Wroclaw University (Poland)*
- 2013 Winner of the Supply Chain Challenge – *LSM CUP (Business Game)*

Connaissances linguistiques

Français : langue maternelle
Anglais : niveau B2

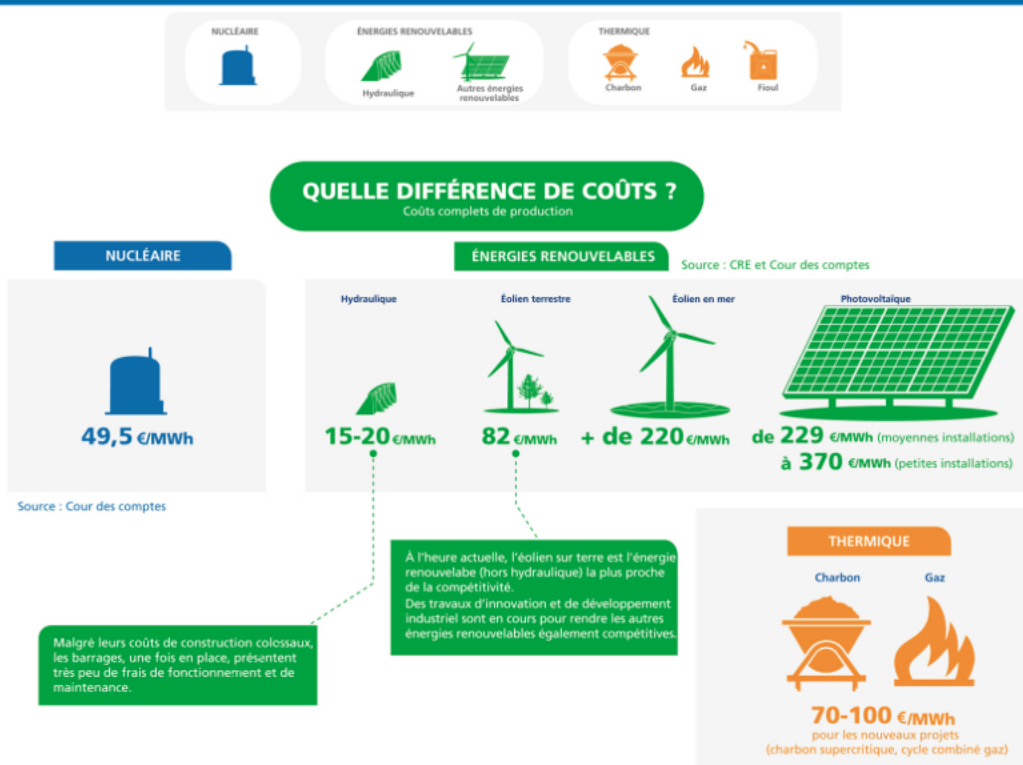
Néerlandais : A2
Italien : niveau A2

Centres d'intérêt

Scoutisme – Politique - Musique – Entrepreneuriat – Voyages – Sport

2. Les différentes sources d'énergie en France¹

ÉLECTRICITÉ EN FRANCE : LES DIFFÉRENTES SOURCES D'ÉNERGIE



¹ EDF (2013). « Les coûts de production des différentes sources d'énergie en France ». Disponible sur <https://www.lenergieeenquestions.fr/les-coûts-de-production-des-differentes-sources-denergie-en-france-infographie/>. (Consulté le 27/02/2014).

3. Analyse PESTEL : Europe

Environnement politique

L'Europe s'est engagée à réduire fortement d'ici 2030 ses émissions de gaz à effet de serre². Cet objectif sera atteint en partie par le développement des énergies renouvelables. Ainsi, la part des énergies renouvelables devrait atteindre au minimum 27% en Europe d'ici 2030, ce qui suggère une croissance importante de celles-ci. Conjointement à cet objectif, des politiques d'investissements dans les énergies renouvelables sont mises en œuvre³. On citera par exemple la France, où le secteur de l'énergie solaire a réellement décollé en 2007, grâce notamment à des avantages fiscaux comme le crédit d'impôt développement durable⁴. Depuis, la filière photovoltaïque connaît une croissance très rapide, cependant le développement de l'industrie solaire, encore émergente, dépend fortement de l'environnement législatif et économique. De nombreux pays, comme la Belgique, requiert un cadre législatif plus clair et plus favorable pour le secteur des énergies renouvelables. En effet, certains marchés sont totalement artificiels et réglementés par les mécanismes d'aides. Le manque de clarté et de cohérence dans les politiques sont de véritables freins à l'investissement.

Environnement économique

En Europe, le taux de chômage est d'environ 12%⁵. En ce qui concerne l'inflation, la zone euro continuera à connaître un environnement de taux d'intérêts bas pendant une certaine période. La force de l'euro pénalise les entreprises exportatrices, cependant la monnaie européenne devrait s'infléchir dans les années qui viennent. Le PIB des pays européens est élevés et en croissance surtout dans les pays où ce dernier est le plus faible⁶. Les coûts salariaux sont inégalement répartis au sein de l'Europe, cependant ils tendent tous à augmenter.

²Informations disponibles sur <http://www.actu-environnement.com/ae/news/paquet-climat-energie-europe-20508.php4>

³Informations disponibles sur <http://ec.europa.eu>

⁴Informations disponibles sur <http://www.businesscoot.com/le-march-des-panneaux-solaires-40/>

⁵Informations disponibles sur <http://www.lalibre.be>

⁶Informations disponibles sur <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>

Environnement socio-culturel

Eurostat prévoit que, dans des conditions normales, la population de l'UE-27 restera relativement stable jusqu'en 2025, date à laquelle elle devrait commencer à décliner⁷.

Environnement technologique

La R&D est au coeur de la stratégie de l'UE pour devenir l'économie de la connaissance la plus compétitive et la plus dynamique au monde⁸. Pour produire son énergie sans émettre de CO₂, l'Europe va devoir faire une évolution technologique. L'Union européenne a donc approuvé, en mars 2008, un plan stratégique pour les technologies énergétiques sobres en carbone. Il consiste à réunir les industriels des secteurs concernés pour les faire coopérer et bénéficier du soutien de l'Union européenne. Certaines initiatives industrielles concernent la production et les sources d'énergie, comme les biocarburants, l'éolien, le solaire, le nucléaire, ainsi que les piles à combustible et l'utilisation de l'hydrogène. Le coût du plan européen est estimé à 50 milliards d'euros jusqu'en 2020⁹.

Environnement écologique et richesse en ressources naturelles

En 2010, la consommation intérieure brute d'énergie primaire dans l'UE-27 s'élevait à 1 759 millions de tonnes-équivalent pétrole (tep)¹⁰.

La consommation intérieure brute de chaque État membre dépend, dans une large mesure, de la structure de son système énergétique, des ressources naturelles disponibles pour la production d'énergie primaire, ainsi que de la structure et du niveau de développement de son économie, ce qui vaut non seulement pour les combustibles traditionnels et le nucléaire, mais également pour les sources d'énergie renouvelables¹¹.

En Europe, le plus grand changement intervenu dans la palette énergétique réside dans l'accroissement de l'importance relative des sources d'énergie renouvelables: leur part de la consommation intérieure brute d'énergie primaire de l'UE-27 a augmenté de 4,2 points de pourcentage entre 2000 et 2010 pour atteindre 9,8 %, soit un taux de croissance de 74 %¹².

⁷ *Op. cit*

⁸ *Op.cit*

⁹ *Op.cit* et <http://ec.europa.eu/>

¹⁰ *Op.cit*

¹¹ Informations disponibles sur <http://www.touteleurope.eu/les-politiques-europeennes/energie.html>

¹² Informations disponibles sur <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>

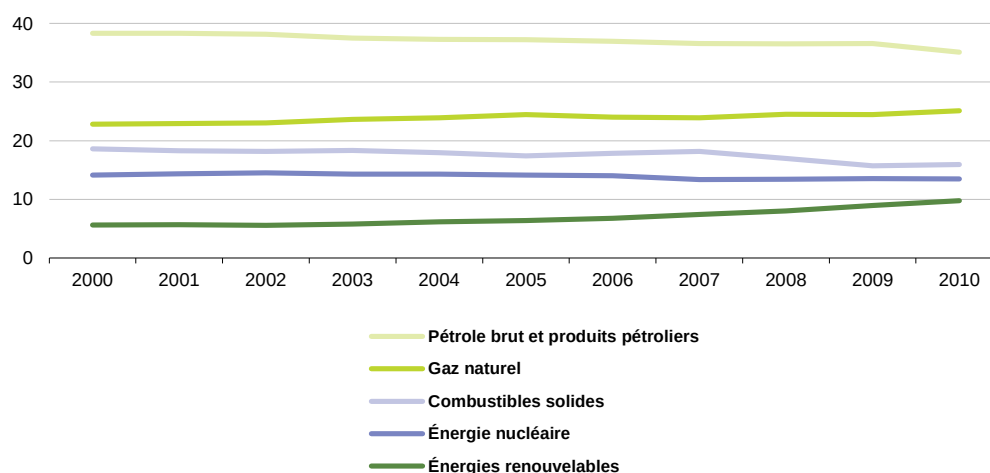


Figure 1 : Evolution de la consommation européenne

Une analyse de l'utilisation finale de l'énergie dans l'UE-27 en 2010 met en lumière les trois grandes catégories d'utilisateurs suivantes: les transports (31,7 %), les ménages (26,7 %) et l'industrie (25,3 %) ¹³.

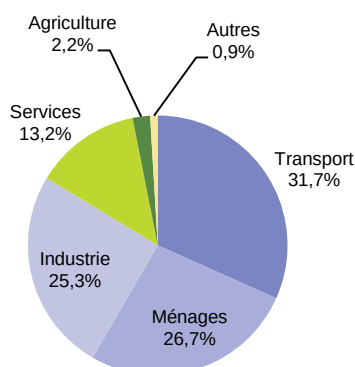


Figure 2 : Pourcentage de la consommation européenne d'énergie en 2010

En ce qui concerne uniquement les énergies renouvelables, les disparités entre les pays sont importantes. La production d'énergie renouvelable dépend essentiellement des ressources présentes dans le pays et de sa structure économique.

On notera cependant que des efforts importants ont été réalisés pour développer la part d'énergie renouvelable, et notamment dans les pays qui possédaient en 2000 une part négligeable d'énergie renouvelable. On citera par exemple l'Italie ou l'Allemagne qui ont plus que doublé leur part d'énergie renouvelable entre 2000 et 2010.

¹³ *Op.cit*

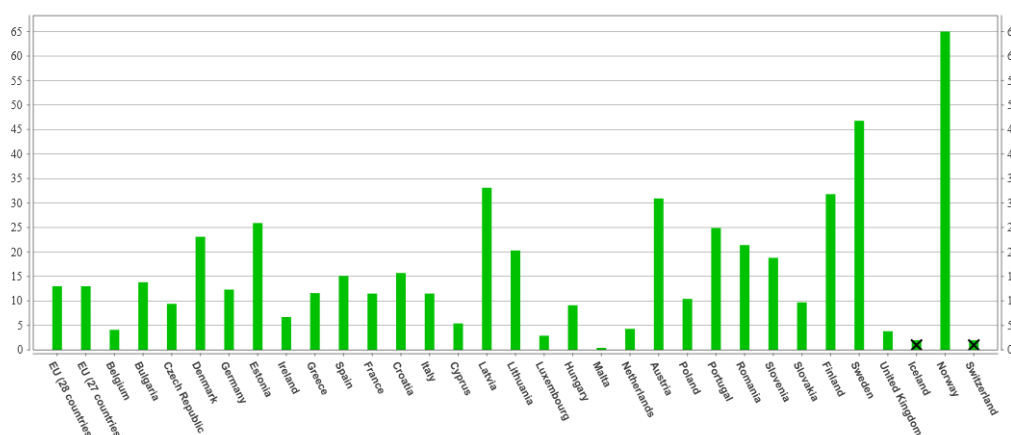


Figure 3 : Share of renewable energy in gross final energy consumption¹⁴

Toutes les sources d'énergie renouvelable se sont accrues et particulièrement les bio-gazes, bio-carburant, l'éolien et le solaire.

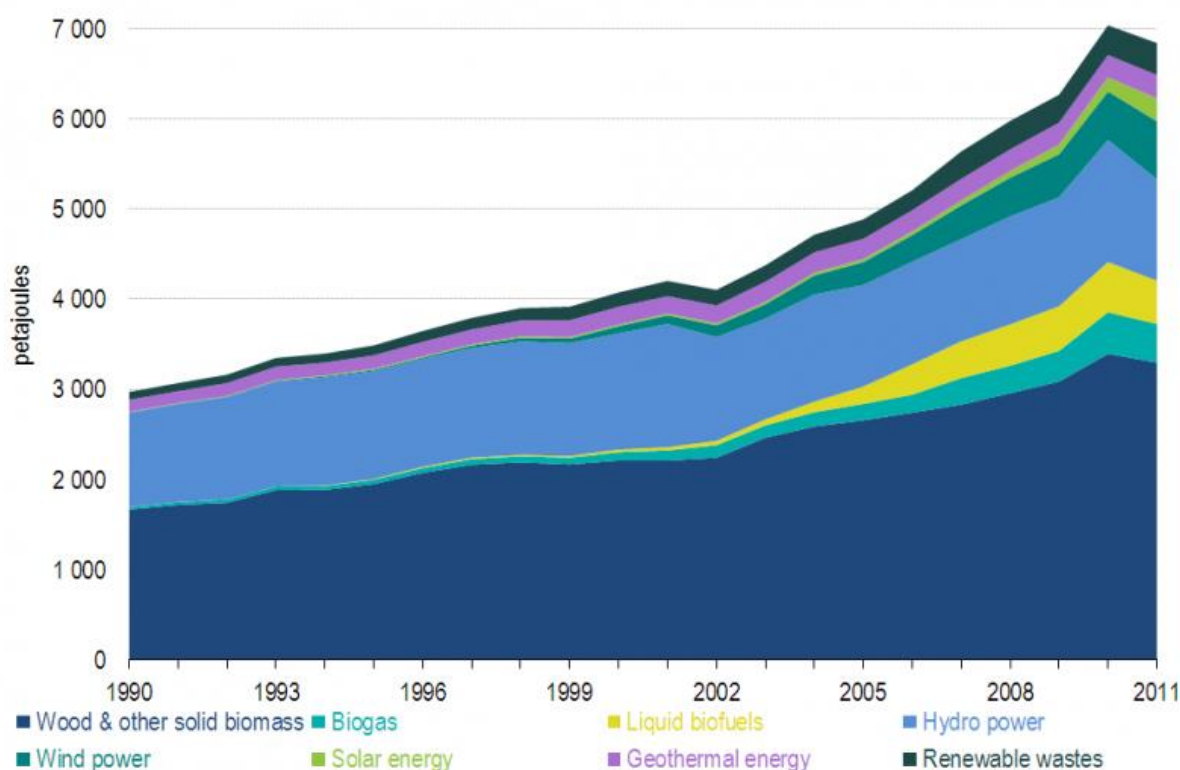


Figure 4: Primary production of energy from renewable sources, EU-28, 1990-2011¹⁵

Une évolution similaire de ces sources d'énergie renouvelables est également constatée pour la production d'électricité. On notera encore l'évolution très rapide de l'éolien et du solaire.

¹⁴ Informations disponibles sur <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>

¹⁵ Op.cit

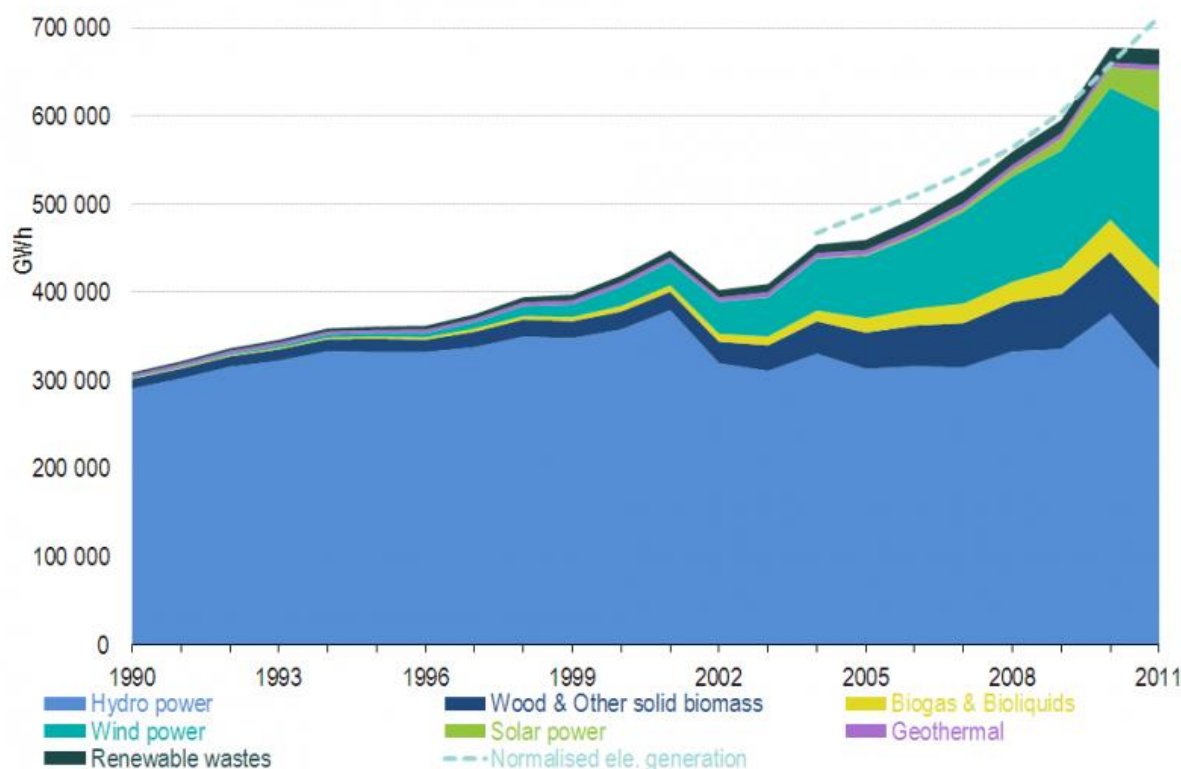


Figure 5 : Gross electricity generation from renewable sources, EU-28, 1990-2011¹⁶

En ce qui concerne le chauffage et le refroidissement, la part d'énergie renouvelable est passée de 9,6% à 15,1% entre 2004 et 2011. Cette augmentation a été réalisée au sein des secteurs industriels, de service et résidentiel¹⁷.

Environnement légal

Il est difficile de présenter l'environnement légal pour chacun des pays européens. En effet, ils ont tous une politique particulière. Cependant, le programme européen « Horizon 2020 » met en avant les nouveaux enjeux et objectifs pour la recherche et l'innovation pour l'ensemble de ces pays¹⁸.

¹⁶ Informations disponibles sur <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>

¹⁷ *Op.cit*

¹⁸ Informations disponibles sur <http://www.horizon2020.gouv.fr>

4. Analyse PESTEL : Asie

Environnement politique

Certains pays comme le Pakistan et la Birmanie ont des difficultés économiques, alourdies par des situations politiques agitées (conflit interne entre des groupes islamistes et le gouvernement etc.). Certains pays comme par exemple, l'Ouzbékistan s'est rapproché de la Chine et la Russie pour assurer la sécurité de son régime.

Tous les pays asiatiques n'ont bien sûr pas d'environnement politique instable, et ont même des économies très développées et systèmes politiques stables, comme le Japon, Singapour, Taiwan etc.

La tendance générale des formes de gouvernance est vers la démocratisation politique¹⁹.

Environnement économique

Ce continent comporte plus de la moitié de la population de la planète et six pays de celui-ci font partie des plus grandes puissances économiques mondiales : la Chine, le Japon, l'Inde, la Corée du Sud, l'Indonésie et le Taïwan.

La plupart des pays du continent sont maintenant membres de l'Organisation mondiale du commerce (OMC).

Néanmoins, certains pays comme le Bangladesh, la Birmanie, la Mongolie etc. ont une puissance économique très pauvre. Deux tiers de la population pauvre du monde se situe en Asie²⁰.

En ce qui concerne le PIB, il devrait plus que quadrupler entre 2010 et 2035 en Asie, ce qui a pour conséquence une augmentation de la consommation²¹. En effet et selon la Banque asiatique de développement (BASD), « l'Asie consommera la moitié de l'énergie mondiale d'ici 2035 »²².

¹⁹ Informations disponibles sur <http://www.diploweb.com/forum/asiecentr06102.htm>

²⁰ Informations disponibles sur http://eeas.europa.eu/asia/rsp/07_13_fr.pdf

²¹ Asian Development Bank, *Asia 2050: Realizing the Asian Century*, 2011. Disponible sur www.adb.org/publications/asia-2050-realizing-asian-century (voir le compte rendu de ce rapport dans *Bibliographie prospective*, n° 96, septembre 2011).

²² Asian Development. *Outlook 2013: Asia's Energy Challenge*, Manille: BAD, 2013, 306 p. Disponible sur <http://wcm.adb.org/publications/asian-development-outlook-2013-asias-energy-challenge>

Le continent est très riche de part ses ressources naturelles tels que le pétrole, les forêts, les poissons, l'eau, le riz, le gaz naturel, le cuivre et l'argent.

Environnement socio-culturel

L'Asie est composée aujourd'hui de 4,3 milliards d'habitants, soit environ 60% de la population mondiale. La population est répartie de manière inégale. En effet, l'Asie du nord et de l'ouest est peu peuplée tandis que l'Asie du sud et de l'est est fort peuplée. La population croît de manière similaire à la population mondiale. Cependant, certains pays comme la Chine et l'Inde mettent en place des politiques afin de limiter les naissances²³.

En ce qui concerne la fécondité, elle se différencie selon les pays du continent : les pays de l'Asie de l'Est ont un taux de fécondité très faible tandis que les pays de l'Asie centrale et de l'Ouest ont un taux de fécondité élevé²⁴.

Environnement technologique

Selon l'AIE, la Chine représenterait 23% de l'énergie primaire mondiale consommée en 2020. En outre, le pays est très dépendant des énergies fossiles tant sur le plan énergétique qu'électrique. Il lui faudra donc réduire cette dépendance en développant de nouvelles technologies. Ce sont les énergies hydrauliques, nucléaires, et dans une moindre mesure l'éolien que voudraient développer le gouvernement chinois. Néanmoins, la Chine ne remettra pas en cause ses installations nucléaires de 80 GWe à 2020, et 200Gwe à l'horizon 2030²⁵.

L'Inde, disposant d'une industrie des technologies et de l'information extrêmement compétitive, est devenue une importante plaque tournante pour l'externalisation.

Environnement écologique et richesse en ressources naturelles

Le continent fait face également à de nombreuses catastrophes naturelles (tsunamis, ouragans, cyclones dues à la forte instabilité géologique et climatique à la pression constante sur l'environnement (utilisation non durable des ressources naturelles, pression démographique, croissance économique rapide).

²³ Informations disponibles sur <http://yildizoglu.u-bordeaux4.fr/croissance/dos9900/population.html>

²⁴ F. ZELLER, « Baisse de la natalité en Asie: une inquiétude pour les pays les plus riches », AFP sur Google News, le 26 décembre 2010.

²⁵ Informations disponibles sur http://www.strategie.gouv.fr/system/files/rapport-energies_0.pdf

L'Asie est fortement dépendante des énergies fossiles, et si « *la trajectoire actuelle se maintient, la consommation de charbon, très polluante, serait accrue de 81%, avec pour conséquence un doublement des émissions de dioxyde de carbone, qui atteindraient plus de 20 milliards de tonnes en 2035* »²⁶. L'Asie deviendrait donc le continent qui émettrait plus de la moitié des gaz à effet de serre dans le monde. Les questions environnementales, et d'approvisionnement en matières premières sont donc plus que nécessaires.

La consommation intérieure brute en Chine est d'environ « *2000 MTep dont 2/3 en charbon, 22% en pétrole, 7% en hydraulique, 3% en gaz et 1,5% en nucléaire* ». Le Japon, a pour sa part une consommation en énergie de « *520 MTep en 2008 donr 85% en énergies thermiques: 45% pétrole, 23% charbon, 17% gaz* ». Enfin, l'Inde consomme « *500 MTep, dont 54% charbon, 33% pétrole, 9% gaz, 3% hydraulique et 1 % nucléaire est le 3ème pays consommateur de la zone Asie-Pacifique* »²⁷. La Chine et le Japon importent énormément de pétrole. C'est pourquoi ces deux pays sont vulnérables à toute nouvelle crise pétrolière.

Environnement légal

Dans certains pays, une augmentation de conflits avec la faiblesse généralisée de la société civile, ont pour conséquence une vulnérabilité ambiante et des abus des droits de l'homme (principalement des discriminations envers des minorités).

Les marchandises de contrefaçon posent aussi des préoccupations croissantes.

En Chine, il existe très peu de lois sociales, ce qui incitent certaines entreprises à délocaliser pour profiter d'une main d'œuvre très peu coûteuse et très peu exigeante quant aux conditions de travail. L'Asie émergente attire également de nombreuses délocalisations²⁸.

5. Analyse PESTEL : USA

Dans cette section, nous avons analysé principalement les Etats-Unis car c'est le pays qui possède l'économie la plus puissante du monde. Cependant, et pour

²⁶ Y. VINH (2013). « L'Asie face aux défis énergétiques ». Disponible sur <https://www.futuribles.com/base/article/lasie-face-aux-defis-energetiques-2/>. (Consulté le 03/03/2014)

²⁷ D. CHAVARDED (2010). « Enjeux énergétiques des trois géants d'Asie: Japon, Chine, Inde ». Disponible sur http://www.janus.co.jp/essays/chavardes/energie_d'asie-f.html. (Consulté le 04/03/2014).

²⁸ Informations disponibles sur http://eeas.europa.eu/asia/rsp/07_13_fr.pdf

l'environnement écologique, nous avons analysé l'évolution de la demande en énergie, la consommation d'énergie renouvelable et les investissements dans le renouvelable, et cela pour l'Amérique.

Environnement politique

Les Etats-Unis (comptant 50 Etats) est une République fédérale fondée sur une démocratie représentative. Le Président est en même temps chef d'Etat et chef du gouvernement. Les trois pouvoirs (exécutif, législatif et judiciaire) sont séparés.

Les principaux partis sont le Parti Démocrate avec une philosophie plus axée à la classe des travailleurs et le Parti Républicain qui contribue au capitalisme et à une économie de libre marché. Le Président Barack Obama, est élu depuis janvier 2009 et fait partie du Parti Démocrate. Le droit de vote est autorisé aux plus de 18 ans mais il n'est pas obligatoire.

A l'automne 2013, des désaccords politiques entre démocrates et républicains relatifs au relèvement du plafond de la dette, a paralysé l'administration fédérale qui est restée inactive jusqu'en octobre 2013. Cet arrêt aurait coûté plus de 17 milliards à l'Etat²⁹.

Environnement économique

Le pays a connu un très grave récession en 2009 : la crise financière. L'économie du pays s'est redressée en 2010 grâce à une relance budgétaire de grande envergure. Les Etats-Unis reste Le » pays qui possède encore l'économie la plus puissante du monde. Afin de relancer l'économie, le budget 2013 a été principalement accordé à l'éducation, l'innovation, la recherche et le développement, ainsi qu'à l'énergie verte et les infrastructures. En outre, la surveillance des marchés financiers est une priorité.

Le secteur agricole est très important aux Etats-Unis. Il est un des plus grands producteurs de maïs, soja, coton et viande bovine. Cependant, le secteur agricole ne compte que pour 1% du PNB.

Le pays est également très industrialisé (cf. environnement technologique).

Environnement socio-culturel

Les Etats-Unis sont composés aujourd'hui plus 318 millions d'habitants (2013). C'est le premier pays qui comptent autant d'immigrants (à titre d'exemple, et en 2005 le pays compte approximativement 36 millions d'habitants nés à l'étranger, soit plus de 10% de la population). En outre, c'est un pays qui est très peuplé, riche et

²⁹ Informations disponibles sur la Banque Mondiale : <http://www.banquemondiale.org>

développé (avec un indice de développement humain de 0,937 en 2012) mais qui compte de grandes inégalités sociales.

En ce qui concerne la sécurité sociale, le système est pluraliste et décentralisé. En effet, une enveloppe fixe est donnée aux 50 Etats, ce qui entraîne des inégalités quant aux dépenses et aux redistributions sociales.³⁰

Environnement technologique

Le pays est très industrialisé, il est le leader mondial dans l'industrie aérospatiale et pharmaceutique et comporte de grandes variétés d'activités dont la majorité sont la « *fabrication de machines électriques et électroniques, produits chimiques, machines industrielles, secteurs de l'agroalimentaire et l'automobile* »³¹.

Les Etats-Unis conservent de grandes sociétés high-tech : dans l'armement avec Lockheed Martin, dans l'aéronautique avec Boeing, dans l'aérospatiale biotechnologies, pharmaceutique, etc.

Environnement écologique et richesse en ressources naturelles

L'évolution de la demande en énergie va s'accroître en Amérique du Sud et Centrale mais également en Amérique du Nord OCDE.³²

Le pétrole, le charbon et le gaz naturel sont les principales sources d'énergie aux États-Unis.

Il est également le leader dans la production de plusieurs minéraux grâce à l'abondance de ressources naturelles. « *Le pays est ainsi le plus grand producteur mondial de gaz naturel liquide, d'aluminium, d'électricité et d'énergie nucléaire, le troisième producteur mondial de pétrole et depuis plusieurs années l'extraction de gaz de schiste est développée à grande échelle* »³³.

³⁰ Informations disponibles sur http://www.ined.fr/fr/ressources_documentation/toile/demographie_des_etats_unis/

³¹ Informations disponibles sur <http://www.champagne-ardenne-export.com/fr/marches/fiches-pays/etats-unis/contexte-politique>

³² Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, « Les forêts et l'énergie, questions principales », *Etude FAO: Forêts 154*, 2008, pp 5-19.

³³ Informations disponibles sur <http://www.champagne-ardenne-export.com/fr/marches/fiches-pays/etats-unis/contexte-politique>

Les États-Unis est le deuxième pays le plus gros consommateur d'énergie après la Chine en 2010 et est le second émetteur de dioxyde de carbone après la Chine également.

Cependant, en 2008 ils sont les premiers mondiaux à investir dans les énergies renouvelables (24 millions de dollars)³⁴.

Un autre facteur clé est le pourcentage des importations et exportations d'énergie. L'Amérique du Nord importe plus qu'elle n'exporte (11,7% d'importations pour 7,1% d'exportations) tandis que l'Amérique du Sud et centrale exporte plus qu'elle n'importe (20,2% d'exportations pour 15,6% d'importations)³⁵.

C'est en Amérique latine et plus précisément au Brésil que les énergies renouvelables jouent un rôle très important. En effet, 45% de l'énergie consommée provient des sources renouvelables telles que l'hydroélectricité ainsi et le bois et l'éthanol tiré de la canne à sucre.

Tant pour l'Amérique du Nord OCDE que pour l'Amérique du Sud et centrale, la consommation d'énergie renouvelable commercialisée devrait fortement progresser dans les années à venir. Contrairement au pays en développement d'Asie, l'Amérique du Sud et centrale a mis l'accent sur les ressources renouvelables. En effet, leur sources de combustibles non fossiles sont déjà très compétitives.

C'est en Amérique latine qu'il y a le plus d'investissement dans l'énergie renouvelable. Le Mexique, le Chili, l'Uruguay, et le Pérou affichent des croissances extrêmes. La biomasse est l'activité dans laquelle les investissements sont les plus importants (822 millions de dollars en 2012) devant les biocarburants et la géothermie.³⁶

Environnement légal

En ce qui concerne les contrats d'affaires, les obligations du vendeur doivent être définies précisément mais aussi les systèmes de contrôle de qualité.

Les cinquante Etats disposent d'une pleine souveraineté dans plusieurs domaines dont la justice. La législation est différente d'une circonscription à une autre.

³⁴ GreenUnivers (2009). « L'énergie mondiale poursuit sa mutation malgré la crise ». Disponible sur <http://www.greenunivers.com/2009/05/rapport-ren21-energies-renouvelables-monde-2008-6617/> (Consulté le 02/03/2014).

³⁵ Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, « Les forêts et l'énergie, questions principales », *Etude FAO: Forêts 154*, 2008, p. 22.

³⁶ X (2013). « Boum des énergies renouvelables en Amérique latine ». Disponible sur <http://www.mobilite-durable.org/innover-pour-demain/energies/boum-des-energies-renouvelables-en-amerique-latine.html>. (Consulté le 05/03/2014).

Etant un état fédéral, les Etats-Unis disposent d'un droit fédéral américain et également un droit particulier à chaque Etat fédéré. Le droit fédéral domine sur le droit des Etats.

« Ainsi, en cas de contradiction, la Constitution fédérale prime sur les Constitutions particulières de chaque Etat ; de même que les lois fédérales, et que les traités signés par les États-Unis. Tous les six ans, un code fédéral est rédigé, recensant l'ensemble des lois fédérales permanentes »³⁷.

³⁷ Helaine M. BARNETT, *Documenting the Justice Gap in America: The Current Unmet Civil Legal Needs of Low-Income Americans*, Legal Services Corporation, September 2005, p.4-9.

6. Analyse PESTEL Afrique

Côte d'Ivoire

Environnement politique

La Côte d'Ivoire est un pays qui est plutôt instable politiquement. En effet, le pays a souffert d'une crise politico-militaire le 19 septembre 2002 (2002-2007). Le 4 mars 2007, un nouveau processus de sortie de crise est mis en place sur un accord politique conclu à Ouagadougou au Burkina Faso. Dès 2012, une nouvelle stabilité politique s'installe.

La Côte d'Ivoire est une république constitutionnelle unitaire présidentielle. Le président se nomme Alassane Ouattara. Les pouvoirs exécutif, législatif, sont séparés au sein de l'Etat.

Environnement économique

La croissance économique du pays est assez importante : 9,8% de taux de croissance en 2012³⁸. Cependant, un accroissement de la dette extérieure réside.

L'économie est dominée par l'agriculture notamment la production de café et de cacao. Le pays exporte du cacao, du café, de la canne à sucre, de l'ananas, de la banane, de la noix de cajou, et de l'huile de palme, et de productions fruitières vers l'Europe en grande partie. Les cultures vivrières sont également importantes pour l'économie. La principale ressource naturelle du pays est le bois d'où un risque de déforestation important.

Environnement socio-culturel

Le pays est en voie de développement et son indice de développement humain est de 0,438 en 2012 (168^e position). La langue officielle est le français. En ce qui concerne la démographie, la population est en croissance rapide. En 2010, le taux de croissance annuelle de la population est de 2,403 %.

Environnement technologique

Les taxes sont encore élevées et elles ne permettent donc pas à toute la population d'avoir facilement accès à certains outils technologiques. En outre, il y a encore très

³⁸ Informations disponibles http://www.statistiques-mondiales.com/cote_divoire.htm

peu de formations qui permettent à la population d'utiliser facilement les outils technologiques³⁹.

Environnement écologique

En ce qui concerne le climat, les températures oscillent autour de 28 °C en moyenne. Cependant, il y a une variation importante de température entre le nord et le sud, mais également en fonction des saisons.

En ce qui concerne la protection de l'environnement, le gouvernement ivoirien participe fortement à la protection de certaines aires comme les parcs nationaux, les réserves naturelles, les forêts ainsi que certaines espèces rares ou en voie de disparition.

La Côte d'Ivoire a un potentiel de biomasse important. Le pays a énormément de projets dans les énergies nouvelles et renouvelables. En janvier 2014, le groupe Hanergy a rencontré le président ivoirien afin de discuter d'un investissement de 500 milliards de dollars dans l'implantation d'une usine de production de panneaux photovoltaïques ainsi qu'une centrale de production d'énergie solaire à Abidjan⁴⁰.

Environnement Légal

La Côte d'Ivoire est également membre de la Communauté Économique du Développement des États de l'Afrique de l'Ouest pour les mêmes raisons que le Burkina Faso.

En ce qui concerne la fiscalité, il existe un taux réduit pour les entreprises étrangères qui est de 20% retenu à la source des revenus⁴¹.

Quant à la propriété intellectuelle, le pays a une protection similaire à la Belgique à condition d'enregistrer le brevet à l'office ivoirien des brevets.

Burkina Faso

Environnement politique

Le Burkina Faso a adopté un système politique démocratique depuis 1991. C'est un président qui dirige le pays et qui est élu pour cinq ans avec un mandat qui peut se

³⁹ Informations disponibles sur <http://news.abidjan.net/h/460297.html>

⁴⁰ Informations disponibles sur <http://economie.jeuneafrique.com>

⁴¹ Informations disponibles sur <http://www.expert-comptable-international.info/>

renouveler qu'une seule fois. Il est entouré d'un conseil constitutionnel et économique dont leur rôle n'est que consultatif.

En juin 2008, le Burkina Faso a souffert d'une grève de l'université de Ouagadougou qui s'est terminé par une suppression de toutes les prestations sociales étudiantes.

En 2011, la mort d'un élève battu par des policiers de Koudougou a provoqué une grève⁴².

Environnement économique

C'est un pays en voie de développement. Les principales activités économiques sont l'élevage mais aussi la culture du maïs etc.

La croissance économique est de 9% en 2012⁴³.

Environnement socio-culturel

C'est l'un des dix pays les moins développés du monde (avec un indice de développement humain de 0,343 en 2012, le Burkina Faso est encore moins développé que la Côte d'Ivoire).

Il est le deuxième producteur africain de coton derrière l'Égypte⁴⁴.

La langue officielle est le français mais le pays dispose d'autres langues locales.

Le niveau de scolarisation est assez bas. Son indicateur de pauvreté est de 58,6 en 2006⁴⁵.

Environnement technologique

Beaucoup d'enfants n'ont pas accès à la scolarisation. La technologie y est très peu développée.

A titre d'exemple, le nombre de fournisseurs d'accès Internet était de 15 en 2006.

Environnement écologique

Le gisement solaire est de 5,5KWh/m²/jour pendant 3000 à 3500h/an, celui-ci reste faiblement exploité.

⁴² Informations disponibles sur <http://www.hsph.harvard.edu/population/policies/burkina.pop.pdf>

⁴³ Informations disponibles sur http://www.statistiques-mondiales.com/burkina_faso.htm

⁴⁴ A. DIONGUE (2008), « Coton: bonnes récoltes en Afrique de l'Ouest », Disponible sur <http://www.lesafriques.com/produits-de-base/coton-bonnes-recoltes-en-afrique-de-l-ouest.html?Itemid=308?articleid=11739>. (Consulté le 10 février 2013).

⁴⁵ Informations disponibles sur http://www.statistiques-mondiales.com/burkina_faso.htm

En ce qui concerne les ressources naturelles, elles sont abusivement utilisées du à une croissance démographique importante. L'urbanisation rapide provoque également d'autres problèmes environnementaux tels que la pollution.

Environnement Légal

Le Burkina-Faso est membre de la Communauté Économique du Développement des États de l'Afrique de l'Ouest. Le but est de promouvoir les échanges commerciaux entre différents pays de cette région africaine.

En ce qui concerne le taux d'imposition des sociétés, il est de 27% ce qui est plus bas qu'en Belgique, il existe beaucoup d'exonération. Quant à la TVA elle est de 18% ce qui est nettement plus bas⁴⁶.

Il y a de nombreux avantages légaux comme le fait qu'il n'est pas obligatoire d'avoir un partenaire local pour posséder une société.

Néanmoins, il est compliqué d'obtenir un jugement dans certains cas car les juges peuvent parfois être corrompus et il existe de nombreuses lenteurs administratives⁴⁷.

⁴⁶ Informations disponibles sur <https://www.tradesolutions.bnpparibas.com>

⁴⁷ Inventaire des cas de corruptions, disponible sur <http://www.renlac.com/>

Sénégal

Environnement politique

Le Sénégal est un pays stable politiquement, en comparaison avec d'autres pays d'Afrique noire. Il s'agit d'une république avec un président élu, ce pays suit le modèle républicain français. Il y a un président qui est le chef du pouvoir exécutif et il existe une assemblée nationale ainsi qu'un sénat qui compose le pouvoir législatif. L'état essaye d'améliorer les relations qu'il entretient avec les différentes entreprises du pays pour essayer d'accroître la compétitivité⁴⁸.

Environnement économique

Le Sénégal a un produit intérieur brut de 14,05 milliards de dollars en 2012 et une croissance de 3,5%⁴⁹. Il est à noter que 46,7% de la population vivait sous le seuil de pauvreté en 2011⁵⁰.

Le secteur d'activité principal est celui de l'agriculture pour presque 70% de l'activité économique mais il existe d'autres secteurs tel que le tourisme.

C'est un pays qui est en difficulté économique : le taux de chômage est de 47% et le pays est très endetté⁵¹. La monnaie pose aussi un problème car elle fut dévaluée en 1994.

Le pays fait partie de la communauté économique des états de l'Afrique de l'Ouest: le but est de promouvoir les échanges économiques entre les différents pays membres. Ils ont notamment mis en place une monnaie commune pour favoriser les échanges entre eux. Cette monnaie est le franc CFA qui au taux de change actuel est de 1€ égal 655 CFA.

Environnement socio-culturel

Le pays fut longtemps sous colonisation française et ne fut autorisé à être indépendant qu'en 1960. La langue officielle nationale est restée le français mais il existe une pléiade de langues locales qui sont cantonnées dans les régions éloignées de la capitale.

⁴⁸ AMA, « Compétitivité des entreprises : Etat, patronat et travailleurs misent sur la modernisation des relations professionnelles ». Disponible sur <http://www.lesoleil.sn/>.

⁴⁹ Informations disponibles sur <http://www.banquemondiales.org/>.

⁵⁰ *Op.cit.*

⁵¹ Informations disponibles sur <https://www.cia.gov/>.

Il existe un gros flux migratoire vers l'Europe des jeunes populations. Il existe dès lors un phénomène de « Brain drain » important.

Environnement technologique

Les grandes villes sont les plus modernes, elles bénéficient généralement d'installations plus ou moins modernes mais en campagne beaucoup d'infrastructures semblent être obsolètes. C'est un ressenti dans le domaine de l'éducation nationale, les investissements étatiques y sont très faibles, par exemple, il n'y a qu'un ordinateur pour toute une école secondaire. Les entreprises étrangères bénéficient de technologie de pointe comme la compagnie pétrolière FAR Ltd. Il s'agit de technologie qui n'est pas utile pour l'ensemble du pays. Le gouvernement tente de mener de nouvelles politiques pour essayer de moderniser le pays mais celles-ci ne sont encore qu'au stade du démarrage.

Environnement écologique et richesse en ressources naturelles

Le Sénégal bénéficie de ressources naturelles telles que le pétrole, le phosphate, des métaux rares tels que l'or ou le platine, le sel naturel ou encore des caoutchoutiers.

En ce qui concerne les gisements solaires, le Sénégal a un potentiel solaire de moyenne 5,5 kWh/m²/jour au sol d'énergie solaire brute⁵². Il s'agit d'un des pays d'Afrique centrale à avoir un potentiel aussi élevé en comparaison à d'autres pays tels que la République du Congo où la moyenne se situe entre 3 et 3,5 kWh/m²/jour.

Environnement légal

Le Sénégal a promulgué un code des investissements pour protéger les investisseurs étrangers. Il convient de souligner que l'état a également réduit l'impôt des sociétés à 33%. L'état tente de combler de nombreux vides juridiques tels que par exemple les relations entre les partenariats publics et privés qui n'étaient pas encadrés par une loi claire⁵³. Il reste de très nombreux « vides » à combler et ce genre de législation prouve que le Sénégal manque cruellement d'armes législatives en matière de droit commercial.

Nonobstant le fait d'un manque cruel de textes législatifs, le gouvernement propose de nombreuses aides à l'investissement. Ces aides sont malheureusement contraignantes dans les conditions d'obtention⁵⁴.

⁵² Informations disponibles sur <http://senegal-energies.com/>.

⁵³ Informations disponibles sur <http://www.gouv.sn/>.

⁵⁴ Informations disponibles sur <http://www.senex.gouv.sn/>.

Maroc

L'environnement politique

Le Maroc est un royaume, le chef de l'état est donc un roi. Le souverain actuel est Mohamed VI, il mène une politique plus moderne que celle de son père.

Le Maroc est une monarchie constitutionnelle, tout comme la Belgique, ce qui signifie que le pays est doté d'un parlement élu. Le pouvoir législatif est exercé par deux chambres. Le pouvoir exécutif quant à lui est exercé par le Roi et par le chef du gouvernement. En 2011, dans un souci de démocratie, le Roi va réduire ses propres pouvoirs exécutifs au profit de ceux du chef de gouvernement⁵⁵.

Il est à souligner que le Maroc bénéficie d'un statut avancé avec l'Union Européenne. Ce qui signifie qu'il y a un renforcement des relations entre l'Europe et le Royaume du Maroc. Il convient de souligner qu'il est question dans ce statut de faire renforcer les relations économiques entre le Maroc et l'Union Européenne, ce qui signifierait à long terme de le faire entrer dans l'espace économique européen pour ainsi favoriser les libres échanges commerciaux⁵⁶.

En conclusion, le Maroc jouit d'une politique stable et démocratique. Le pays a su gérer de graves crises comme le printemps arabe qui s'est déroulé en douceur au Maroc car le gouvernement mène une politique dirigée vers le citoyen.

L'environnement économique

Le Maroc est un pays dit émergent, c'est-à-dire qu'il connaît une forte croissance mais que le PIB par habitant est inférieur à celui des pays développés.

Le produit intérieur brut est de 105 milliards de dollars⁵⁷ et le PIB par habitant est de 5450 dollars. La croissance du PIB est en moyen de 4,5%. Le taux de chômage est de 11%.

Le principal secteur d'activité est l'industrie de service.

Le Maroc importe énormément d'énergie notamment fossile (pétrole) mais également de l'électricité venant en majeure partie de l'Espagne⁵⁸.

⁵⁵ H. SALLON, « Mohamed VI offre au Maroc "une révolution tranquille" », *Le Monde*, 10 mars 2011.

⁵⁶ Royaume du Maroc ministère des affaires étrangères et de la coopération, « Statut avancé », Disponible sur www.diplomatie.ma.

⁵⁷ Informations disponibles sur le www.banquemondial.org.

⁵⁸ AGUENIOU, S., « 17% de l'électricité consommée au Maroc provient des importations d'Espagne », Disponible sur www.lavieeco.com.

La monnaie locale est le Dirham qui s'échange en avril 2014 à un taux de 0.089€ soit 1€ équivaut à 11,232 Dirham.

Le coût salarial est nettement plus bas qu'en Europe, il tournerait autour des 300 dollars mensuellement⁵⁹. Cependant, il ne faut pas perdre de vue le coût salarial unitaire. Si un ouvrier qualifié en Europe effectue un travail en 2 heures tandis qu'au Maroc un ouvrier en mettra 12 heures, il faut vérifier si la productivité n'est pas affaiblie.

L'environnement socio-culturel

Le Maroc est un pays à majorité musulmane, il s'agit d'ailleurs de la religion d'état⁶⁰. Plus de 97% de la population est de confession musulmane. Le Maroc prône un islam moderne et modéré, plus ouvert sur le monde occidental.

Le Royaume du Maroc compte plus de 33 millions d'habitants pour une densité de 7000 habitants au mètre carré. Le rôle et les droits de la femme évoluent dans une société qui se modernise de jours en jours. Cette évolution est notamment marquée par le changement du code de la famille en 2000 dans lequel la femme a le pouvoir de demander le divorce.

Dans une société en croissance, les familles marocaines ont tendance à consommer plus et mieux. Elles donnent priorité à l'hygiène et aux soins médicaux⁶¹.

Le Maroc est également un endroit d'échanges internationaux, notamment à cause de la venue de nombreuses sociétés occidentales. Celles-ci ne sont pas venues que pour la main d'œuvre ouvrière bon marché, mais également pour les compétences en matière de services qu'offrent les marocains. Le Maroc compte de nombreux expatriés occidentaux qui sont soit chef d'entreprise soit employé par une société internationale.

L'environnement technologique

Le Maroc est un pays où l'innovation a une place importante notamment au sein des universités qui travaillent avec des entreprises.

Le gouvernement marocain a mis en place un programme « initiative Maroc innovation ». Le but est de développer et de stimuler l'innovation technologique dans

⁵⁹ Informations disponibles sur <http://www.invest.gov.ma/>

⁶⁰ Art. 175 de la constitution Marocaine.

⁶¹ A., WADE. « Consommation : les marocains changent leurs habitudes ». Disponible sur www.bladi.net

le pays⁶². Le ministère de l'industrie a compris que pour maintenir la compétitivité des entreprises, il fallait stimuler la technologie. Ils se sont fixés divers objectifs notamment la mise en place de nouvelles structures ou de financement pour mobiliser un maximum de talents sur le territoire marocain.

Il existe au Maroc une société d'investissement énergétique qui est dotée d'un capital d'un milliard de Dirham. Le but est de promouvoir les nouveaux projets dans l'énergie renouvelable et surtout dans l'exploitation du secteur solaire⁶³. Il existe également le fond Hassan II qui supporte divers projets qui ont pour but le développement économique du Maroc

Environnement écologique et richesse en ressources naturelles

Le royaume du Maroc est particulièrement attentif à son environnement. Il mène une politique durable notamment par la signature du gouvernement de la Charte Nationale de l'Environnement et du Développement Durable. Celle-ci a pris la forme d'une loi applicable à l'ensemble du territoire⁶⁴. Le but de cette charte est de favoriser l'équilibre entre trois aspects : l'environnemental, le social et les activités économiques.

Les ressources naturelles sont nombreuses, dans le cadre de notre projet, il est important de se focaliser sur les gisements solaires. Ceux-ci sont nombreux au Maroc, notamment dans les régions désertiques proches des villes de Ouarzazate, Ain Bni Mathar, Foum Al Oued, Boujdour ou Sebkhath Tah.

L'environnement légal

Le Maroc bénéficie d'un encadrement juridique exacerbé. Le pays, considérant que les investissements et l'entrepreneuriat comme un facteur de développement, possède un système d'acteurs privé assez développé et assez proches de celui des pays occidentaux notamment en matière de protection de la propriété intellectuelle ou encore des droits d'auteurs. Il existe aussi des lois en matière de concurrence qui permettent de sanctionner des comportements anti-concurrentiels.

Le gouvernement a mis en place des mesures incitatives notamment en matière fiscale. Par exemple, en matière de TVA, il existe une exonération moyennant le respect de certaines conditions qui ne sont pas contraignantes.

Il existe des mesures incitatives qui permettent de faciliter l'investissement en contribuant à hauteur d'un certain montant au prorata d'un certain pourcentage^{65,66}.

⁶² Initiative Maroc Innovation, Disponible sur <http://www.mcinet.gov.ma/>.

⁶³ Informations disponibles sur <http://www.siem.ma/>

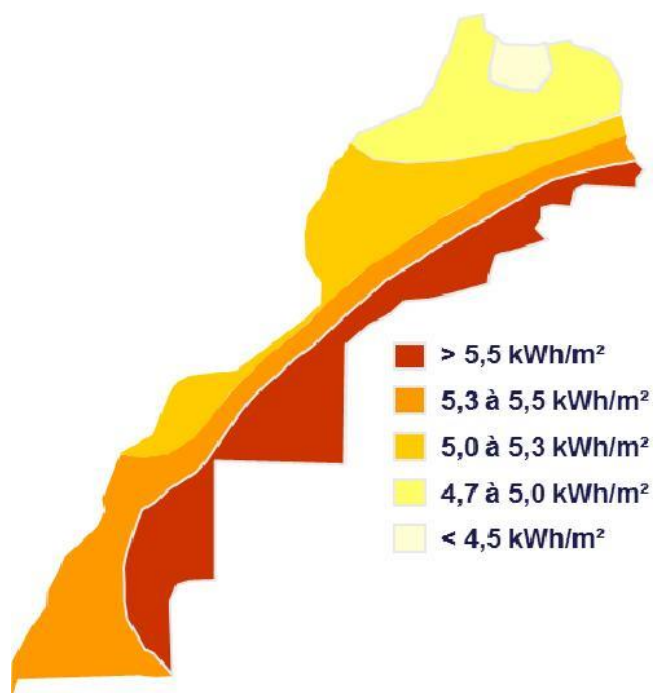
⁶⁴ Charte disponible sur le site du ministère de l'environnement <http://www.environnement.gov.ma/>.

⁶⁵ Par exemple le fond Hassan II.

⁶⁶ Informations disponibles sur <http://www.invest.gov.ma/>.

7. Cartographie des gisements

« Le solaire est certainement la source d'énergie renouvelable la plus importante au Maroc. Avec plus de 3000 h/an d'ensoleillement, soit une irradiation de ~ 5 kWh/m²/jour, le Maroc jouit d'un gisement solaire considérable. Cette source d'énergie constitue un potentiel particulièrement important surtout dans les régions mal desservies en capacités de production électrique »⁶⁷.



⁶⁷ Informations disponibles sur <http://www.siem.ma/>

8. Comparaison des sociétés

1) Introduction

Le projet Hybrid power se doit de s'articuler autour d'une structure sécurisante dans laquelle, il est possible de rassembler plusieurs personnes dans un esprit relativement égalitaire.

Cette structure, rassemblant les différentes parties prenantes du projet mettant en commun une nouvelle technologie, se doit d'être une entité indépendante.

Cette activité commune doit également être encadrée par un accord commun des parties prenantes contraignant celle-ci à leur accord.

L'ensemble des caractéristiques précitées est l'exacte définition telle que décrite par l'article premier du Code des sociétés « *Une société est constituée par un contrat aux termes duquel deux ou plusieurs personnes mettent quelque chose en commun, pour exercer une ou plusieurs activités déterminées et dans le but de procurer aux associés un bénéfice patrimonial direct ou indirect* »⁶⁸. Dès lors, la création d'une société semble être une évidence dans le cas d' Hybrid Power.

2) Quel type de société choisir

a) Les structures à écarter

Dans le cadre de la création d'une structure juridique encadrant un projet entrepreneurial, certain type de société convienne mieux à certain type de projet. Dans le cas présent, il est aisé d'en écarter d'emblée.

Tout d'abord, le but de lucre étant au centre de l'intérêt des futurs associés, l'association sans but lucratif ne convient absolument pas.

Ensuite, en ce qui concerne la société en commandite simple et la société en nom collectif, celles-ci semblent inopportunes à un projet comme le nôtre. Bien qu'elles offrent toutes les deux certains avantages tels que la non nécessité d'un acte notarié ou encore la non exigence d'un capital minimum, elles comportent également des inconvénients. En effet, la responsabilité solidaire des associés ou encore la faillite de la société entraînent directement la faillite des associés, sont des arguments juridiques qui nous semblent assez pertinents pour écarter ces deux types de sociétés.

Au surplus, ce type de société peut rendre frileux un certain nombre d'investisseurs quant à la difficulté de la transmission des actions et à la non séparation du patrimoine privé et professionnel des fondateurs.

⁶⁸ Art. 1 Code des sociétés.

b) La S.A. – S.P.R.L.- S.C.R.L.

Dans le cadre du projet Hybrid Power, l'équipe a une préférence quant à une structure juridique à part entière et ayant une personnalité propre. En effet, l'équipe cherche une entité commune dans laquelle elle pourra mettre ses connaissances et ses compétences à la réalisation du projet.

Nous estimons que nous devons nous tourner vers une société à personnalité morale mais ayant une responsabilité limitée car nous voulons scinder notre patrimoine privé et notre patrimoine professionnel. Opter pour une société à responsabilité limitée nous permet de n'engager que les apports respectivement amenés par les associés.

Dès lors, nous devons faire un choix entre plusieurs formes juridiques : la société anonyme, la société privée à responsabilité limitée et la société coopérative à responsabilité limitée. Celles-ci ont la caractéristique de jouir d'une personnalité morale indépendante et de n'engager qu'à hauteur des apports engagés par les associés⁶⁹.

Ces différentes structures offrent des avantages et des inconvénients, il convient de choisir celle qui correspond à nos besoins en tant qu'entrepreneur.

c) Comparaison

Pour comparer de façon pertinente les trois formes de sociétés, nous allons nous focaliser sur leurs caractéristiques dans le but de distinguer celle qui conviendra le mieux à notre projet.

Les critères de distinction choisis sont les suivants : le capital minimum (souscrit et/ou libéré), les formalités de constitution, la cessibilité des actions ou parts, la stabilité des actionnaires et les formalités dues à la levée de capital.

d) Définition de chacune des sociétés

Cette section donne un mot d'explication et définit chacune des sociétés analysées :

- La société anonyme (S.A.) : il s'agit d'une société de capitaux, ce qui signifie que les actionnaires font des apports qui représenteront une part du capital. Le capital de la société sera pris en compte sans aucun lien avec la personnalité des actionnaires. La conséquence directe est que la cessibilité des titres est rendue plus libre.
- La société privée à responsabilité limitée (S.P.R.L.) : elle est définie par le Code des sociétés comme « *La société privée à responsabilité limitée est une*

⁶⁹ Art. 210 Code des sociétés en ce qui concerne la SPRL, Art. 437. du Code des sociétés.

société où les associés n'engagent que leur apport et où leurs droits ne sont transmissibles que sous certaines conditions. »⁷⁰. Dans ce type de société, les associés sont considérés directement par rapport aux apports qu'ils auraient émis mais en ce qui concerne la cessibilité des titres, elle ne peut se faire que sous le respect de certaines conditions strictes.

- La société coopérative à responsabilité limitée (S.C.R.L.) : il s'agit d'une société plus libre au niveau des apports et des associés car ceux-ci sont variables⁷¹. Au départ, cette société a été développée au sein du milieu coopératif pour rassembler diverses parties prenantes travaillant à un objectif commun et partageant des valeurs communes. Elle s'écarterait des sociétés « classiques » aux niveaux des valeurs des sociétés commerciales. La caractéristique principale est qu'elle laisse une grande liberté statutaire aux fondateurs.

e) Critères de comparaison

- Le capital :

Dans le cas de la S.A., il faut un capital minimum souscrit de 61 500€⁷². Ce capital est représenté par des actions.

Dans le cas de la S.P.R.L., la loi exige un capital minimum de 18 500€ mais seul de 6200€ doivent être libérées dès la constitution de la société⁷³. Celui-ci est divisé en parts et non en action.

Dans le cas de la S.C.R.L., la loi exige également un capital minimum de 18 500€ mais seul de 6200€ doivent être libérées dès la constitution de la société⁷⁴.

Pour conclure, le capital minimum dans la S.A. est plus important mais il est possible de faire un appel de fond en dehors des apports des fondateurs en accordant des actions à ces fonds venant de l'extérieur.

- Formalité de constitution :

Dans le cas de la S.A., il faut que la société soit constituée par un acte authentique et doit être déposé au greffe.

⁷⁰ Art. 210 *op. cit.*

⁷¹ Art. 350 Code des sociétés.

⁷² Art. 439 et 441 du Code des sociétés.

⁷³ Art. 223 du Code des sociétés.

⁷⁴ Art. 397 et s. du Code des sociétés.

Dans le cas d'un S.P.R.L., c'est assez similaire, il faut que la société soit constituée par un acte authentique qui comprendra un certain nombre de mentions spécifiques tels que l'objet social, le capital libéré, etc. Il faut également souligner qu'il faut déposer l'acte au greffe dans les 15 jours.

- Gestion et stabilité des fondateurs :

Dans le cas de la S.A., l'organe de gestion est le conseil d'administration et il est composé d'administrateurs. Il est normalement constitué de trois membres au minimum : cet organe collégial se charge de la gestion et de l'administration de la société.

En ce qui concerne la stabilité des administrateurs de la S.A., il est très précaire car ils sont révocable *ad nutum*. C'est-à-dire qu'ils sont révocables à tout moment sans motifs et sans indemnités. Cependant, certains administrateurs cumulent avec le statut de dirigeant, il faudra donc bien distinguer dans le cas de la révocation de l'administrateur et celle du licenciement du dirigeant qui devra respecter les normes du droit social.

Dans le cas d'un S.P.R.L., chacun des associés est un organe à part entière et jouit d'une grande stabilité. Il n'est pas concevable de les révoquer *ad nutum* quand il s'agit de gérants statutaires.

Dans le cas de la S.C.R.L., il y a là aussi une grande stabilité des gérants si elle est prévue par les statuts de la société.

- Cession des titres :

Dans le cas de la S.A., il existe quatre sortes de titres prévu par le code : les actions, les obligations, les parts bénéficiaires et les droits de souscription⁷⁵. Le principe général est que les titres sont librement cessibles. Néanmoins, cette libre cessibilité peut être limitée par des mécanismes juridiques tels que : une clause d'inaliénabilité, une clause d'agrément ou une clause de préférence.

Dans le cas d'un S.P.R.L. et de la S.C.R.L., les titres sont des parts. Celles-ci sont nominatives car la société doit pouvoir connaître tous ses actionnaires.

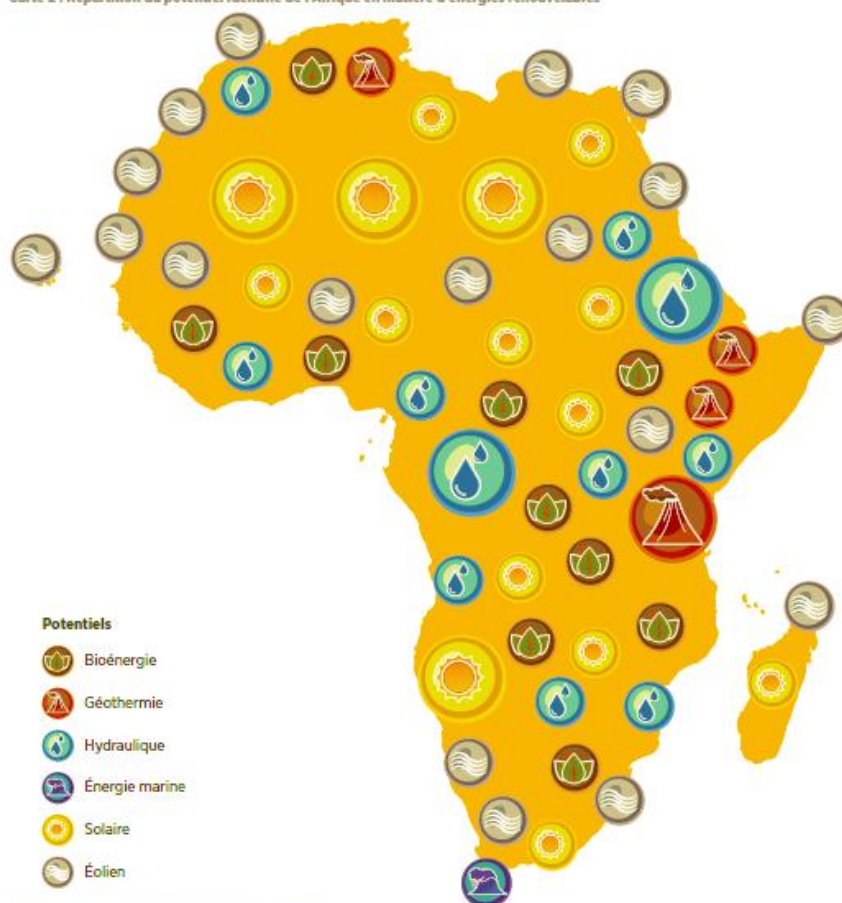
Pour la S.P.R.L., le code prévoit un mécanisme d'agrément de la part des autres associés ce qui renforce encore la difficulté de cessions des parts. Pour la S.C.R.L., la cessibilité est aussi plus limitée car il faut que les parts sociales soient cédées à des personnes ou catégories de personnes prévues par les statuts.

En conclusion, il y a une plus grande liberté au niveau de la cessibilité des titres dans le cas d'une société anonyme.

⁷⁵ Art. 460 du Code des sociétés

9. Carte répartition d'énergie Afrique

Carte 2 : Répartition du potentiel identifié de l'Afrique en matière d'énergies renouvelables



Source : analyse de l'IRENA d'après l'Atlas mondial

10. L'abstract du Brevet Valther

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property
Organization
International Bureau



(10) International Publication Number
WO 2013/164307 A1

(43) International Publication Date
7 November 2013 (07.11.2013)

(51) International Patent Classification:
H01L 35/32 (2006.01) H01L 23/36 (2006.01)

(21) International Application Number:
PCT/EP2013/058897

(22) International Filing Date:
29 April 2013 (29.04.2013)

(25) Filing Language: English

(26) Publication Language: English

(30) Priority Data:
12166123.5 30 April 2012 (30.04.2012) EP

(71) Applicant: UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN [BE/BE]; Place de l'Université 1, B-1348 Louvain-la-Neuve (BE).

(72) Inventors: PASCAL, Jacques; rue d'Enfer 20, B-1457 Tourinnes-saint-lambert (BE). SIMAR, Aude; Venelle du Bois de Saras 30, B-1300 Wavre (BE). van der Rest, Camille; rue du Ministre 2A, Bte 3, B-1170 Boitsfort (BE). MATAGNE, Ernest; rue de la Distillerie 36, B-5081 Bovesse (BE). ROY, Geoffrey; avenue de Villefranche 44, B-1330 Rixensart (BE). SHMITZ, Alain; rue du Tige 30, B-4920 Aywaille (BE).

(74) Agents: DE GROOTE, Christophe et al.; Centre Monnet, Avenue Jean Monnet 1, B-1348 Louvain-la-Neuve (BE).

(81) Designated States (unless otherwise indicated, for every kind of national protection available): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Designated States (unless otherwise indicated, for every kind of regional protection available): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), European (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Published:

- with international search report (Art. 21(3))
- before the expiration of the time limit for amending the claims and to be republished in the event of receipt of amendments (Rule 48.2(h))

(54) Title: THERMOELECTRIC CONVERSION MODULE AND METHOD FOR MAKING IT

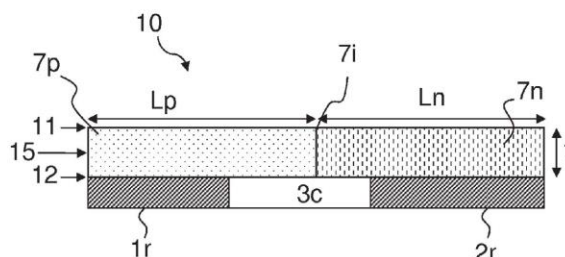


Fig. 1

(57) Abstract: According to a first aspect, the invention relates to a thermoelectric module (10) that comprises a thermoelectric layer (15) comprising one p-type (7p) and one n-type (7n) portions presenting together an upper and a lower main surfaces (11,12). The thermoelectric module (10) further comprises a first and a second thermal resistor elements (1r, 2r), and a first thermal bridge element (3c), between and adjacent to the first and second thermal resistor elements (1r, 2r). The first and second thermal resistor elements (1r, 2r) and the first thermal bridge element (3c) cover the whole lower main surface (12). The p-type (7p) and the n-type (7n) portions are adjacent and directly coupled by an interface (7i). The first thermal bridge element (3c) spans at least over the orthogonal projection of the interface (7i) on the lower main surface (12).

WO 2013/164307 A1

WO 2013/164307

PCT/EP2013/058897

1

Thermoelectric conversion module and method for making it**Field of the invention**

5 [0001] According to a first aspect, the invention relates to a thermoelectric module. According to a second aspect, the invention relates to an assembly of at least two thermoelectric modules. According to a third aspect, the invention relates to a process for making a thermoelectric module.

Description of prior art

10 [0002] A major part of energy waste in industrial and domestic applications takes the form of thermal energy. High temperature (>400 °C) rejected gases can be efficiently used. However, there is a big challenge in using rejected gases that have a lower temperature. Thermoelectric converters or thermal conversion modules using the Seebeck effect could be used in order
15 to generate electric energy from such a source of thermal energy. Thermoelectric converters can be used in other applications; for instance they can be used to convert into electricity geothermal energy, heat from sun or heat from the seas. Using the Peltier effect, thermoelectric converters can also be used to generate heat or coldness from electricity.

20 [0003] US2011/0226304 discloses a thermoelectric module that comprises p-type and n-type elements that are bonded to each others. In order to add the electric voltages induced in each of the n-type and p-type elements by the Seebeck effect, each p-type element is bonded to an n-type element with an electrically insulating material in a second region of a junction surface joining
25 each p-type and n-type element. Hence, the p-type and n-type elements of this thermoelectric module are electrically connected in series whereas they are thermally connected in parallel. The fabrication of such a thermoelectric module is not simple as it requires the presence of such an electrically insulating material between each p-type and n-type element along a part of the junction
30 surface joining each p-type and n-type element. Moreover, such a configuration is not adapted when one aims at having a thermoelectric module having the form of a layer or a plate with a small thickness because of the two following reasons. First, the electric voltage takes place over the thickness of each p-type

11. Facteurs clés de succès

Lors du lancement de Hybrid Power, plusieurs facteurs doivent être mis en œuvre et maîtrisés pour assurer son succès :

- Un produit propre, renouvelable et de qualité : Hybrid Power est une solution solaire composé de matériaux robustes et propres, elle se doit de respecter des critères clairs quand elle sélectionne ses fournisseurs. Utilisant les rayonnements du soleil, Hybrid Power respecte l'environnement.
- Un service professionnel : la main d'œuvre va être formée au montage de nos concentrateurs. Il y aura respectivement une équipe expérimentée pour les études et la maintenance.
- Information sur notre solution: le client doit être informé clairement sur les rendements de notre concentrateur solaire hybride, ainsi que sur les prix de l'énergie.
- Un marché étudié : Le Maroc est un pays à fort ensoleillement solaire. Il y existe énormément d'investissements dans l'énergie renouvelable. Il faut que nous mettions tout en œuvre pour pouvoir bénéficier de l'ensemble des subsides.
- Un marketing adapté : Il faut que nous adaptions notre marketing à notre clientèle cible en fonction des régions où nous allons aller. Nous devons aussi compter sur notre force de vente qui est notre équipe d'agent commerciale qui devra nous faire un rapport constant de ce qui se passe sur le terrain.

12. Bibliographie

Webographie

a. Articles et ouvrages

- Asian Development Bank, *Asia 2050: Realizing the Asian Century*, 2011. Disponible sur www.adb.org/publications/asia-2050-realizing-asian-century (voir le compte rendu de ce rapport dans *Bibliographie prospective*, n° 96, septembre 2011).
- Asian Development. *Outlook 2013: Asia's Energy Challenge*, Manille: BAD, 2013, 306 p. Disponible sur <http://wcm.adb.org/publications/asian-development-outlook-2013-asias-energy-challenge>
- AGUENIOU, S. « 17% de l'électricité consommée au Maroc provient des importations d'Espagne ». Disponible sur www.lavieeco.com
- AMA. « Compétitivité des entreprises : Etat, patronat et travailleurs misent sur la modernisation des relations professionnelles ». Disponible sur <http://www.lesoleil.sn/>
- CHAVARDED, D. (2010). « Enjeux énergétiques des trois géants d'Asie: Japon, Chine, Inde ». Disponible sur http://www.janus.co.jp/essays/chavardes/energie_d'asie-f.html. (Consulté le 04/03/2014).
- DIONGUE A. (2008), « Coton: bonnes récoltes en Afrique de l'Ouest », Disponible sur <http://www.lesafriques.com/produits-de-base/coton-bonnes-recoltes-en-afrique-de-l-ouest.html?Itemid=308?articleid=11739>. (Consulté le 10 février 2013).
- EDF (2013). « Les coûts de production des différentes sources d'énergie en France ». Disponible sur <https://www.lenergieenquestions.fr/les-couts-de-production-des-differentes-sources-denergie-en-france-infographie/>. (Consulté le 27/02/2014).
- GREENUNIVERS (2009). « L'énergie mondiale poursuit sa mutation malgré la crise ». Disponible sur <http://www.greenunivers.com/2009/05/rapport-ren21-energies-renouvelables-monde-2008-6617/> (Consulté le 02/03/2014).
- HELAINE M. BARNETT, *Documenting the Justice Gap in America: The Current Unmet Civil Legal Needs of Low-Income Americans*, Legal Services Corporation, September 2005, p.4-9
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, « Les forêts et l'énergie, questions principales », *Etude FAO: Forêts 154*, 2008.

- SALLON, H., « Mohamed VI offre au Maroc "une révolution tranquille" », *Le Monde*, 10 mars 2011.
- VINH, Y. (2013). « L'Asie face aux défis énergétiques ». Disponible sur <https://www.futuribles.com/base/article/lasie-face-aux-defis-energetiques-2/>. (Consulté le 03/03/2014)
- WADE, A. « Consommation : les marocains changent leurs habitudes ». Disponible sur www.bladi.net
- X (2013). « Boum des énergies renouvelables en Amérique latine ». Disponible sur <http://www.mobilite-durable.org/innover-pour-demain/energies/boum-des-energies-renouvelables-en-amerique-latine.html>. (Consulté le 05/03/2014)
- ZELLER, F., « Baisse de la natalité en Asie: une inquiétude pour les pays les plus riches », AFP sur Google News, le 26 décembre 2010.

b. Consultations

- <http://www.actu-environnement.com>
- <http://www.banquemondiale.org>
- <http://www.businesscoot.com/>
- <http://www.champagne-ardenne-export.com>
- <https://www.cia.gov/>
- <http://www.diplomatie.ma>
- <http://www.diploweb.com/forum/asiecentr06102.htm>
- <http://economie.jeuneafrique.com>
- <http://www.expert-comptable-international.info/>
- <http://ec.europa.eu>
- <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>
- http://eeas.europa.eu/asia/rsp/07_13_fr.pdf
- <http://www.environnement.gov.ma/>
- <http://www.gouv.sn/>

- <http://www.hsph.harvard.edu>
- <http://www.horizon2020.gouv.fr>
- <http://www.invest.gov.ma/>.
- <http://www.ined.fr>
- <http://www.lalibre.be>
- <http://www.mcinet.gov.ma/>.
- <http://news.abidjan.net/h/460297.html>
- <http://www.renlac.com/>
- <http://www.siem.ma/>
- <http://www.senex.gouv.sn/>.
- <https://www.tradesolutions.bnpparibas.com>
- <http://www.statistiques-mondiales.com>
- <http://www.strategie.gouv.fr/>
- <http://www.touteurope.eu/les-politiques-europeennes/energie.html>
- <http://yildizoglu.u-bordeaux4.fr/croissance/dos9900/population.html>

Législation

- Art. 1 Code des sociétés.
- Art. 175 de la Constitution Marocaine.
- Art. 210 Code des sociétés
- Art. 210 Code des sociétés
- Art. 223 du Code des sociétés.
- Art. 350 Code des sociétés.
- Art. 397 et s. du Code des sociétés.
- Art. 437. du Code des sociétés.

- Art. 439 du Code des sociétés.
- Art. 441 du Code des sociétés.
- Art. 460 du Code des sociétés

Partie technique

Abstract

Ce travail présente l'ensemble de la partie technique réalisée dans le cadre du Business Plan de l'entreprise Hybrid Power. Ce document sert donc de support au développement du projet entrepreneurial, qui consiste à développer des solutions solaires hybrides grâce à la thermoélectricité en valorisant l'énergie solaire. Ces systèmes hybrides sont des concentrateurs solaires permettant de produire à la fois de l'électricité et de l'énergie thermique.

Les objectifs de cette partie technique sont doubles. D'une part, il est essentiel de synthétiser l'ensemble des solutions solaires existantes afin d'établir un positionnement technologique de Hybrid Power par rapport aux autres technologies. D'autre part, la partie technique se consacre au développement du dispositif hybride, notamment par l'élaboration d'un prototype et l'étude d'un cas pratique.

Les résultats de cette étude montrent que le prototype développé possède des rendements de conversion électrique et thermique de respectivement 2% et 45% dans le cas d'un ensoleillement par temps clair.

Dans l'étude de cas, il est question d'alimenter en énergie une partie du processus industriel de l'entreprise textile marocaine Blancatex. Pour ce faire, le design d'un concentrateur et d'un générateur thermoélectrique a été étudié. Ensuite, en intégrant la météorologie locale, les rendements annuels de conversion électrique et thermique ont été estimés respectivement à 1% et 49%.

Table des matières

1. Introduction.....	1
2. Source solaire.....	2
2.1. Les différentes sources d'énergies.....	2
2.2. Le rayonnement solaire	3
2.2.1. Caractéristiques du rayonnement	3
2.2.2. Les contraintes du solaire	5
2.2.3. Le potentiel solaire	7
3. Exploitation de l'énergie solaire	8
3.1. L'usage de l'énergie solaire.....	8
3.1.1. Les mécanismes de transformation	9
3.2. Les systèmes solaires non-concentrés	10
3.2.1. Le solaire passif.....	10
3.2.2. Le solaire thermique.....	10
3.2.3. Le solaire photovoltaïque	11
3.3. Les systèmes solaires concentrés.....	13
3.3.1. Centrales solaires thermodynamiques	13
3.4. Evolution de la production d'énergie thermique et électrique.....	16
3.5. Rendements des technologies	17
4. Module thermoélectrique	18
4.1. Principe de la thermoélectricité	18
4.1.1. L'effet Seebeck	18
4.1.2. L'effet Peltier	20
4.1.3. Couple thermoélectrique	20
4.1.4. Générateur thermoélectrique	21
4.1.5. Les matériaux thermoélectriques utilisés	21
4.1.6. Le cout des matériaux thermoélectriques.....	23
4.1.7. Rendement et gamme de température	24
4.2. Les applications thermoélectriques	26
4.2.1. Les applications solaires concentrées thermoélectriques	26
5. Construction du démonstrateur	31
5.1. Objectifs du démonstrateur.....	31
5.2. Critères de dimensionnement	32

5.3.	Données solaires utiles	33
5.4.	Le concentrateur solaire.....	34
5.5.	Le générateur thermoélectrique	34
5.5.1.	Pertes par réflexion.....	34
5.5.2.	Pertes par radiation.....	35
5.5.3.	Pertes par convection	35
5.5.4.	Récapitulatif des pertes	36
5.5.5.	Sélection du module thermoélectrique	36
5.6.	Éléments du démonstrateur	37
5.6.1.	Lentille et générateur.....	37
5.6.2.	Structure	38
6.	Caractérisation des modules thermoélectriques.....	39
6.1.	Banc de test des modules Bi_2Te_3	39
6.2.	Caractérisation du module G2-56-0375 (Grand module : G).....	41
6.3.	Caractérisation du module G2-30-0313 (petit module : p).....	43
6.4.	Estimation des résistances thermiques	45
6.5.	Conclusion des caractérisations des modules	45
7.	Test du démonstrateur.....	46
7.1.	Mise en place du banc de test	46
7.1.1.	Disposition du banc de test.....	46
7.2.	Les différents éléments du banc de test	50
7.2.1.	Le concentrateur solaire	50
7.2.2.	L'absorbeur de chaleur	51
7.2.3.	Le générateur thermoélectrique.....	52
7.2.4.	Le système de refroidissement	53
7.3.	Résultats obtenus	53
7.3.1.	Premier jour de tests	53
7.3.2.	Deuxième jour de tests	54
7.4.	Paramètres variables	56
7.4.1.	La vitesse du vent.....	56
7.4.2.	Le contact thermique	56
7.4.3.	La position du spot de lumière	57
7.4.4.	Le refroidisseur	58

7.4.5.	L'apport de chaleur	58
7.5.	Analyse des résultats	59
7.5.1.	Approche générale.....	59
7.5.2.	L'apport de chaleur	60
7.5.3.	Les pertes au niveau du récepteur	64
7.5.4.	Conduction thermique du module thermoélectrique	69
7.5.5.	Comparaison entre théorie et expérience	70
7.5.6.	Rendement global du démonstrateur	74
7.6.	Les pistes d'améliorations	76
7.6.1.	Système de serrage	76
7.6.2.	Protection contre la convection	76
7.6.3.	Autres améliorations	76
7.7.	Rendement global idéalisé.....	77
8.	Etude de cas	80
8.1.	Mise en contexte	80
8.2.	Premier estimatif.....	81
8.2.1.	Production d'énergie	81
8.2.2.	Economie réalisée	82
8.2.3.	Borne supérieure pour le cout de la puissance installée.....	83
8.3.	Implémentation de la solution solaire.....	86
8.3.1.	Principe de la centrale solaire.....	86
8.3.2.	Principe et objectif du concentrateur solaire	86
8.3.3.	Concentrateur cylindro-parabolique.....	87
8.3.4.	Géométrie du concentrateur cylindro-parabolique.....	88
8.3.5.	Disposition des concentrateurs sur le toit.....	94
8.4.	Bilan thermique de la centrale solaire	95
8.4.1.	Pertes optiques.....	95
8.4.2.	Pertes par réflexion.....	96
8.4.3.	Apport de chaleur par le concentrateur	96
8.4.4.	Température maximale.....	96
8.4.5.	Pertes par convection	97
8.4.6.	Pertes par radiation.....	97
8.4.7.	Flux de chaleur traversant le générateur	97

8.4.8.	Résistance thermique maximale	97
8.4.9.	Récapitulatif	98
8.5.	Dimensionnement des générateurs thermoélectriques	99
8.5.1.	Propriétés physiques des matériaux thermoélectriques.....	99
8.5.2.	Résistance thermique du générateur circulaire.....	99
8.5.3.	Absorbeur plan	101
8.5.4.	Résistance thermique du générateur plan	102
8.6.	Rendement du générateur thermoélectrique	104
8.6.1.	Puissance maximale produite par le générateur	104
8.6.2.	Puissance variable	105
8.7.	Production annuelle	107
8.7.1.	Eclairement moyen.....	107
8.7.2.	Puissance thermique et électrique mensuelle	108
8.7.3.	Production annuelle.....	109
8.8.	Rendement global	110
8.9.	Récapitulatif.....	112
8.10.	Rendement idéalisé	114
9.	Conclusion	115
10.	Bibliographie et webographie	116
11.	Liste de contacts	121
12.	Annexes techniques.....	122
12.1.	Average Daily Solar Irradiance – Louvain-La-Neuve - Belgium - May	122
12.2.	Average Daily Solar Irradiance – Casablanca – Maroc - June	124
12.3.	Average Montly Solar Irradiance – Casablanca – Maroc	126
12.4.	Fiche technique module thermoélectrique – Tellurex G2-56-0375.....	127
12.5.	Fiche technique module thermoélectrique – Tellurex G2-30-0313.....	129
12.6.	Fiche technique lentille Fresnel	131

Liste des figures

Figure 1 – Schéma de principe de l'exploitation de l'énergie.....	1
Figure 2 – Potentiel solaire : Irradiation solaire annuelle et ressources connues d'énergie par rapport à la consommation énergétique mondiale annuelle	2
Figure 3 - Spectre d'un corps noir, du rayonnement solaire en-dehors de l'atmosphère et au niveau de la mer.....	3
Figure 4 - Illustration du rayonnement diffus et direct.....	4
Figure 5 - Energie journalière moyenne reçue sur une surface horizontale en Belgique	4
Figure 6 - Diagramme solaire cylindrique pour Uccle en temps universel	5
Figure 7 - Energie solaire mensuelle reçue à Uccle pour une surface horizontale [kWh/m ²]	6
Figure 8 - Potentiel solaire en Europe [5]	7
Figure 9 - Schéma du processus d'exploitation de l'énergie solaire, avec les principales transformation et formes utiles d'énergies	8
Figure 10 - Centrale à tour d'Ivanpah (gauche) et de Gemasolar (droite) dans la région de Séville (Espagne). [75]	13
Figure 11 – Gauche : Centrale à concentration cylindro-parabolique : Solar Energy Generating Systems. Droite : Concentrateur cylindro-parabolique de la centrale Nevada Solar one. [75].....	14
Figure 12 – Gauche : Centrale solaire à miroir Fresnel en Andalousie (Almeria). Droite : Récepteur parabolique - Dish Stirling parabolique [55].....	15
Figure 13 - Production mondiale d'électricité selon la source d'énergie primaire entre 2001 et 2011	16
Figure 14 - Production mondiale de chaleur selon la source d'énergie primaire entre 2001 et 2011	16
Figure 15 - Comparaison des rendements des différents systèmes solaires produisant de l'électricité.....	17
Figure 16 – Le champ magnétique E induit un courant i en circuit fermé	18
Figure 17 - Effet Seebeck en circuit ouvert.....	18
Figure 18 - Couple thermoélectrique	20
Figure 19 - Gauche : Série de trois couples thermoélectrique. Droite : Module thermoélectrique.	21
Figure 20 - Schéma simplifié d'un générateur thermoélectrique	24
Figure 21 - Circuit équivalent du générateur thermoélectrique.....	25
Figure 22 - Schéma expérimental d'un prototype avec une lentille Fresnel et un fluide caloporteur	26
Figure 23 - Schéma proposé d'un prototype avec plusieurs lentille Fresnel et un fluide caloporteur	27
Figure 24 - Schéma proposé d'un prototype à concentration solaire thermoélectrique sans fluide caloporteur	27
Figure 25 - Schéma de prototype de concentration cylindro-parabolique et refroidissement par fluide caloporteur	28
Figure 26 - Prototype avec concentration solaire parabolique suivie d'une lentille Fresnel. Refroidissement par air.	29
Figure 27 - Schéma de principe pour le dimensionnement	32
Figure 28 – Gauche : Plan du cadre accueillant la lentille – Droite : Plan d'ensemble du concentrateur solaire ..	38
Figure 29 - Schéma de principe du test des modules thermoélectriques	39
Figure 30 - Schéma électrique de la caractérisation des modules thermoélectriques	40
Figure 31 - Comparaison entre la fiche technique et la mesure expérimentale en circuit ouvert pour le module A	41
Figure 32 - Comparaison entre la fiche technique et la mesure expérimentale en circuit ouvert pour le module B	43
Figure 33 - Schéma général du banc de test, vue en coupe	46
Figure 34 - Photographie du banc de test	47
Figure 35 - Schéma de principe du banc de test, vue en plan.....	48
Figure 36 – Disposition NGC : Schéma du récepteur de chaleur avec peinture noire réfractaire (N), le grand module thermoélectrique (G) et une plaque de cuivre du côté froid (C).	48
Figure 37 – Disposition CG/ : Schéma du récepteur de chaleur avec une plaque de cuivre sans peinture (C), le grand module (G) et sans plaque de cuivre du côté froid (/)	49
Figure 38 - Réglage de l'inclinaison et de l'orientation du concentrateur solaire	50
Figure 39 - Modification de la hauteur et de la distance horizontale du point focal en fonction de l'inclinaison .	51

Figure 40 – Les deux types d'absorbeur de chaleur. Gauche : Plaque de cuivre avec couche de peinture noire réfractaire (N). Droite : Plaque de cuivre simple (C)	52
Figure 41 - Générateur thermoélectrique et plaque de cuivre enduit de pâte thermique	52
Figure 42 – De bas en haut : Récepteur et module thermoélectrique, boîte à eau et statif de chimie réglable.....	53
Figure 43 - Défaut de contact thermique du aux sondes de température.....	56
Figure 44 – Gauche : Spot de lumière centré sur le grand module. Droite : Spot de lumière centré sur le petit module.....	57
Figure 45 - Coupe du dispositif : Module B (schéma de gauche) et module A (schéma de droite)	57
Figure 46 - Mesure de T_h à deux endroits distincts du récepteur, relevant le gradient de température (139°C et 101 °C).....	58
Figure 47 - Schéma d'analyse pour les calculs théoriques du démonstrateur	59
Figure 48 - Schéma de la géométrie de la lentille dans son cadre d'aluminium	60
Figure 49 - Coefficient de transmission de la lentille en fonction de la longueur d'onde	62
Figure 50 - Spectre de radiation solaire au niveau de la mer	62
Figure 51- Superposition du spectre solaire et du facteur de transmission de la lentille.....	63
Figure 52 - Pertes par radiation en fonction de la température du récepteur ($T_{sky} = 20^\circ\text{C}$).....	65
Figure 53 - Coefficient de convection naturelle en fonction de la température du récepteur ($T_{amb} = 20^\circ\text{C}$).....	67
Figure 54 - Coefficient de convection forcée en fonction de la vitesse du vent.....	68
Figure 55- Pertes par convection naturelle et convection forcée en fonction de la température du récepteur ($T_{amb} = 20^\circ\text{C}$).....	68
Figure 56 - Comparaison des points de mesures et théoriques (dans la fiche technique selon une disposition idéale) pour les dispositions NG/ et CG/ (graph de gauche) et pour les dispositions Np/ et Cp/ (graph de droite).....	73
Figure 57 - Schéma d'un prototype amélioré	76
Figure 58 - Schéma d'analyse général pour un prototype idéal avec $T_h = 250^\circ\text{C}$ et $T_c = 80^\circ\text{C}$	79
Figure 59 - Photographie du toit de l'entreprise Blancatex : 2 surfaces d'environ 8 x 15 m.....	81
Figure 60 - Gisement solaire : DNI journalier en kWh/m ² /jour	81
Figure 61 – Puissance installée : Borne supérieure des couts d'installation, de maintenance et de démantèlement de l'usine Hybrid Power comparé aux couts d'installation actuel d'une usine CCP espagnole [€/W _{installé}].....	84
Figure 62 – Puissance solaire : Borne supérieure des couts d'installation, de maintenance et de démantèlement de l'usine Hybrid Power comparés aux couts d'installation d'une usine CCP espagnole [€/W].....	85
Figure 63 - Géométrie du concentrateur cylindro-parabolique	88
Figure 64 - Variation du ration Surface du réflecteur/Surface projetée en fonction de l'angle d'ouverture ϕ	90
Figure 65 - Schéma non à l'échelle du concentrateur cylindro-parabolique.....	93
Figure 66 - Gauche : Concentrateur solaire cylindro-parabolique (2 x 3m). Droite : Implémentation des concentrateurs sur le toit de Blancatex, vue en plan.	94
Figure 67 - Schéma de l'absorbeur de chaleur, des plots thermoélectriques et du système de refroidissement	95
Figure 68 - Fonctionnement du système en régime maximal.....	98
Figure 69 - Schéma non à l'échelle du concentrateur cylindro-parabolique et de l'absorbeur plan.....	101
Figure 70- Vue en plan de la disposition des plots thermoélectriques	103
Figure 71 - Vue en coupe du générateur thermoélectrique	103
Figure 72 – Répartition de la puissance électrique et thermique du générateur pour différents éclairagements pour un mètre courant de concentrateur cylindro-parabolique.	106
Figure 73 – Eclairage direct moyen (DNI) ou par temps dégagé (DNIC) pour les mois de Janvier et Juin. ...	107
Figure 74 – Puissance électrique et thermique durant un jour moyen du mois de Juin, pour un mètre courant de concentrateur cylindro-parabolique.....	108
Figure 75 – Energie électrique et thermique produite par mois, pour un mètre courant de concentrateur cylindro-parabolique.....	109
Figure 76 - Bilan global annuel de l'usine solaire à Casablanca pour $T_c = 120^\circ\text{C}$	111
Figure 77 - Rendement de conversion électrique en fonction du facteur de mérite ZT	114

Liste des Tableaux

Tableau 1 - Comparaison des caractéristiques physiques et thermoélectriques des matériaux Bi_2Te_3 et Fe_2VAl ..	22
Tableau 2 - Composition et prix au kg pour l'alliage Fe_2VAl	23
Tableau 3 - Récapitulatif des performances atteintes ou théoriques des rendements de conversion électrique par de la concentration solaire thermoélectrique.....	30
Tableau 4 - Valeurs d'ensoleillement en Belgique durant le mois de Mai	33
Tableau 5 - Lentilles de Fresnel disponibles	34
Tableau 6 - Récapitulatif des pertes par réflexion, radiation, convection pour les deux lentilles Fresnel.....	36
Tableau 7 - Calcul des résistances thermiques et de la différence de température aux bornes des modules Peltier.	36
Tableau 8 - Tableau de mesure pour le module G : $T_h = 97,7\text{ }^\circ\text{C}$; $T_c = 25,3\text{ }^\circ\text{C}$	41
Tableau 9 - Tableau de mesure pour le module p : $T_h = 129,3\text{ }^\circ\text{C}$; $T_c = 21,7\text{ }^\circ\text{C}$	43
Tableau 10 - Mesures expérimentales des résistance thermiques des modules thermoélectriques	45
Tableau 11 - Tableau récapitulatif des différentes dispositions de tests	49
Tableau 12 - Tableau récapitulatif des acronymes pour les mesures	49
Tableau 13 - Dénomination des générateurs thermoélectriques.....	52
Tableau 14 - Mesures obtenues le premier jour de tests.	53
Tableau 15 - Mesures obtenues le deuxième jour de tests : tests 1, 2 et 3	54
Tableau 16 - Mesures obtenues le deuxième jour de tests : tests 4, 5 et 6	54
Tableau 17 - Mesures obtenues le deuxième jour de tests : test 1bis, 2bis et 3bis	55
Tableau 18 - Mesures obtenues le deuxième jour de tests : test 4bis et 6bis.....	55
Tableau 19 - Résistances thermiques mesurées expérimentalement pour les deux générateurs issus du commerce	69
Tableau 20 - Mesures expérimentales des tests 4, 6, 4bis et 6bis.....	70
Tableau 21 - Expressions et données pour les calculs théoriques des pertes	70
Tableau 22 - Calcul théorique du flux de chaleur traversant le module thermoélectrique et comparaison avec son estimatif.....	71
Tableau 23 - Comparaison entre les résistances thermiques théorique et mesurée	72
Tableau 24 - Comparaison entre les résistances thermiques idéales (fiche technique), mesurées (caractérisation des générateurs) et théoriques (bilan thermique théorique).....	72
Tableau 25 - Comparaison entre les tensions en circuit ouvert idéales (fiche technique) et mesurées lors des tests.	73
Tableau 26 - Calcul de la puissance électrique produite par les générateurs thermoélectriques	74
Tableau 27 - Puissance thermique produite pour chaque disposition.....	75
Tableau 28 – Rendement électrique et thermique pour chaque disposition	75
Tableau 29 - Rendements du prototype idéalisé	78
Tableau 30 - Consommation annuelle de l'entreprise Blancatex.....	80
Tableau 31 - Approximation de l'énergie produite par la centrale sur le toit de Blancatex.....	82
Tableau 32 - Prix de l'énergie achetée par l'entreprise Blancatex	82
Tableau 33 – Estimatif de l'économie annuelle réalisée par Blancatex	82
Tableau 34 - Comparaison entre la borne supérieure du coût de la puissance installée pour la centrale de Blancatex et les coûts actuels pour une centrale CCP	83
Tableau 35 - Variation du facteur de concentration optique en fonction de l'angle d'acceptance et de l'angle d'ouverture.....	91
Tableau 36 – Dimensions caractéristiques de la centrale solaire	94
Tableau 37 - Valeurs d'ensoleillement au Maroc durant le mois de Juin	96
Tableau 38 - Récapitulatif des pertes et du flux de chaleur traversant le module pour un absorbeur cylindrique	98
Tableau 39 - Propriétés du Fe_2VAl utilisées pour le dimensionnement	99
Tableau 40 - Dimensionnement des plots thermoélectrique pour le générateur cylindrique	100
Tableau 41 - Récapitulatif des pertes et du flux de chaleur traversant le module pour un absorbeur plan	102
Tableau 42 - Dimensionnement des plots thermoélectrique pour le générateur plan.....	102

Tableau 43 - Caractéristiques pour un mètre courant de générateur thermoélectrique.	104
Tableau 44 - Température du côté chaud, pertes par radiation et flux de chaleur traversant le générateur pour différents éclairagements, $T_c = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$	105
Tableau 45 – Puissance électrique, rendement de conversion électrique et puissance thermique du générateur pour différents éclairagements pour un mètre courant de concentrateur cylindro-parabolique.	106
Tableau 46 – Energie électrique et thermique par mois et annuel, pour un mètre courant de concentrateur cylindro-parabolique.	109
Tableau 47 – Rendement de conversion électrique et thermique pour un mètre carré de solution solaire.....	110
Tableau 48 - Récapitulatif de l'énergie produite par la centrale sur le toit de Blancatex	112
Tableau 49 – Estimatif de l'économie annuelle réalisée par Blancatex	112

1. Introduction

L'ensemble du travail réalisé est entièrement intégré au domaine de l'énergie. Avant de commencer à détailler les différents chapitres, il semble opportun de tout d'abord les situer dans un contexte général. L'énergie est, par définition, la capacité d'un système à produire un travail [1], entraînant un mouvement ou produisant par exemple de la lumière, de la chaleur ou de l'électricité. C'est une grandeur physique caractérisant l'état d'un système, qui est d'une manière globale conservée au cours des transformations. L'énergie s'exprime en joules ou souvent en kilowatt-heure (kWh).

Du point de vue de l'activité humaine, l'énergie n'est pas un objectif en soi. Elle est toujours exploitée dans un but précis, comme par exemple pour s'éclairer, se déplacer, se chauffer, etc. Dans la grande majorité des cas, avant d'atteindre cette forme utile d'énergie, il est nécessaire d'opérer une conversion, comme représentée sur le schéma ci-dessous :



Figure 1 – Schéma de principe de l'exploitation de l'énergie

Au sein de cette section technique, les différents chapitres vont se focaliser sur deux points importants de ce schéma général : la source d'énergie et le système de conversion. Dans le business plan, la forme utile de l'énergie ainsi que son usage sont étudiés. Cette partie technique sert de support à la partie commune.

Dans cette section technique, nous passerons tout d'abord en revue les principales caractéristiques de la source d'énergie solaire. Ensuite, en ce qui concerne le système de conversion, il se divise en deux grands chapitres, avec d'une part, l'exploitation de l'énergie solaire, et d'autre part, la thermoélectricité. Ensuite, deux chapitres détaillent la construction du démonstrateur et la caractérisation des générateurs thermoélectriques employés. Par ailleurs, un chapitre se consacre spécifiquement au fonctionnement du modèle expérimental. Enfin, une étude de cas tente de mettre en application une solution solaire hybride basée sur les matériaux thermoélectriques.

2. Source solaire

Dans ce chapitre nous réalisons tout d'abord un rapide tour d'horizon des différentes sources d'énergies. Ensuite, nous nous focaliserons sur l'énergie solaire en mettant l'accent sur les caractéristiques du rayonnement, ses contraintes et son potentiel.

2.1. Les différentes sources d'énergies

Actuellement, notre consommation d'énergie est principalement basée sur les énergies fossiles. Or ces dernières ne sont pas infinies et leur accessibilité devient de plus en plus difficile, ce qui augmente leur coût d'exploitation. Par ailleurs, les émissions de gaz et autres déchets engendrent des problématiques qui accentuent d'avantage le remplacement de ces énergies fossiles. L'attrait pour les énergies vertes est donc de plus en plus croissant, et de nombreuses recherches et des développements sont menés à cette fin. Le potentiel de ces énergies vertes est d'ailleurs énorme, comme l'indique le schéma ci-dessous [2].

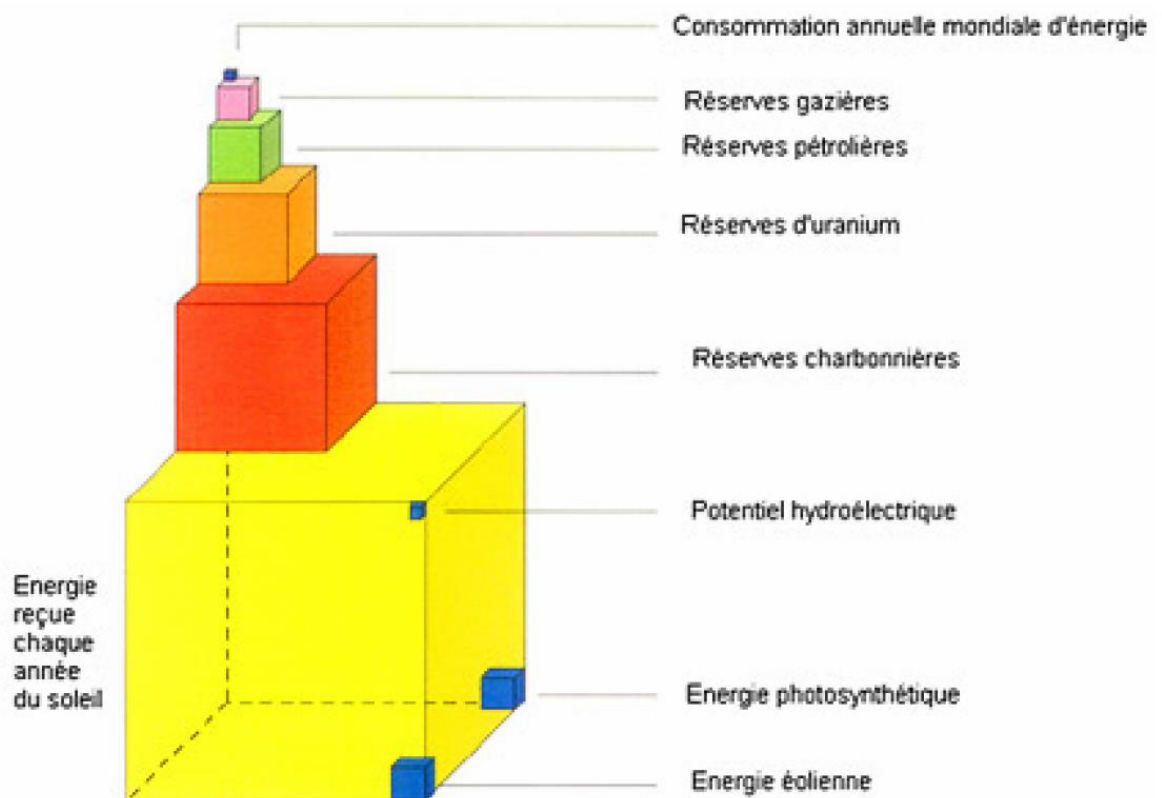


Figure 2 – Potentiel solaire : Irradiation solaire annuelle et ressources connues d'énergie par rapport à la consommation énergétique mondiale annuelle

L'énergie solaire est en fait à la base de quasiment toutes les sources d'énergies, autant les énergies renouvelables comme l'éolien, la biomasse et l'hydroélectricité, que les énergies fossiles telles que le gaz, le pétrole et le charbon.

Les principales difficultés dans l'exploitation de l'énergie solaire sont issues de sa faible densité de puissance et de son intermittence. Mais quoiqu'il en soit, on estime que la partie qui pourrait être exploitée représente trois fois plus que l'énergie consommée mondialement [3].

2.2. Le rayonnement solaire

2.2.1. Caractéristiques du rayonnement

Le soleil, l'étoile de notre système solaire, produit de l'énergie par la réaction nucléaire de fusion des atomes d'hydrogènes présents dans son noyau. Cette réaction émet des rayonnements électromagnétiques de haute fréquence appelés rayonnements gamma. Ce rayonnement provenant du noyau est ensuite absorbé par la couche dite radiative du soleil, les rayons gamma ainsi absorbés par la matière sont ensuite réémis sous forme de photons de plus basse énergie, et ainsi de suite jusqu'à atteindre la surface du soleil. De là, un large spectre électromagnétique est émis et à la vitesse de $3 \cdot 10^8$ m/s, ce rayonnement atteint la Terre en 8 min. Le soleil étant très éloigné de la Terre, on considère les faisceaux comme étant parallèles.

La puissance disponible en dehors de l'atmosphère est de 1367 W/m^2 , appelée constante solaire. Lors du passage par l'atmosphère, une partie du spectre est absorbée et c'est finalement une puissance maximale de 1000 W/m^2 que l'on obtient au sol.

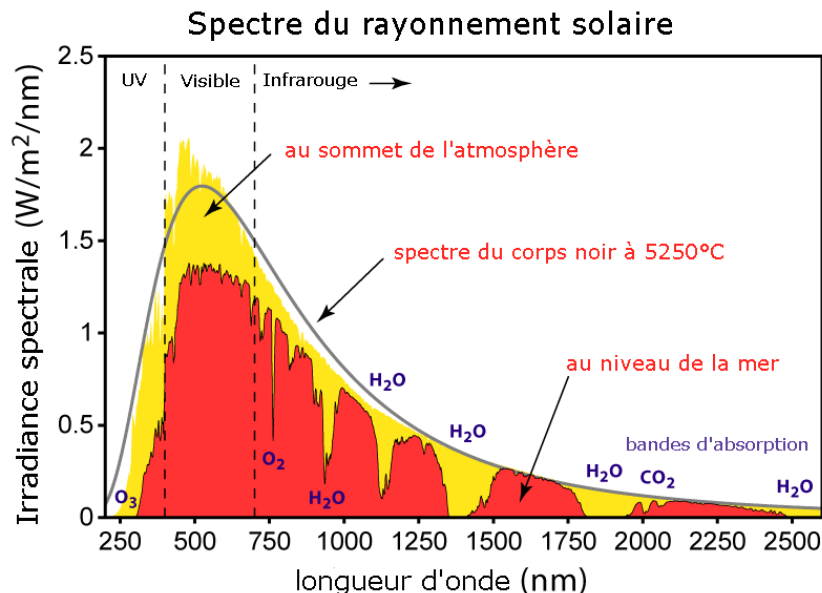


Figure 3 - Spectre d'un corps noir, du rayonnement solaire en-dehors de l'atmosphère et au niveau de la mer

L'énergie solaire est une énergie de flux dont la puissance est fortement variable. Tout d'abord, le rayonnement global est décomposé en rayonnement direct ou diffus. Le rayonnement direct vient directement du soleil et est monodirectionnel. Il peut donc être concentré. En revanche, le rayonnement diffus vient de la diffusion de la route atmosphérique, des nuages et il ne peut pas être concentré.

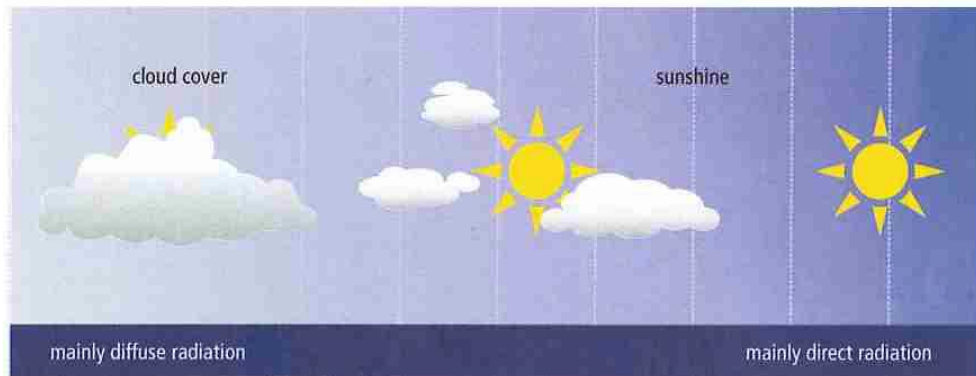


Figure 4 - Illustration du rayonnement diffus et direct

Il faut également noter que le rayonnement n'est jamais totalement direct. En effet, même par temps clair, les rayons sont toujours en partie diffusés par l'atmosphère. Par ailleurs, en Belgique, due à la présence fréquente de couverture nuageuse, le rayonnement diffus représente à peu près 60% du rayonnement global.

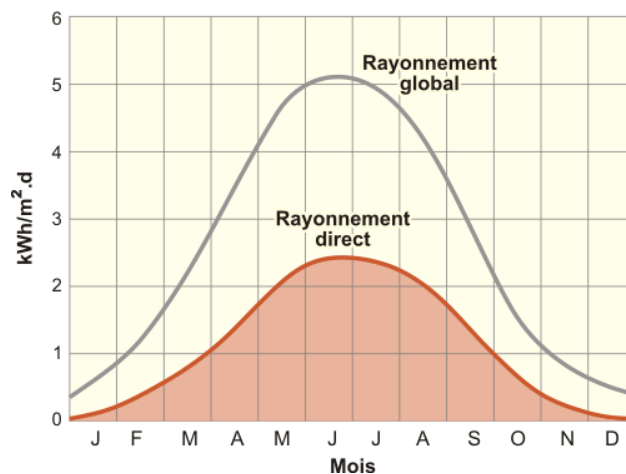


Figure 5 - Energie journalière moyenne reçue sur une surface horizontale en Belgique

Le rayonnement solaire envoyé sur la Terre varie en fonction de la latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du Soleil. L'énergie reçue au sol par unité de surface est donc fortement dépendante de cette variation de hauteur, qui impacte d'une part sur l'angle d'incidence des rayons, mais également sur l'épaisseur de la couche atmosphérique qui est traversée. De la sorte, les normes internationales définissent différents types de spectre : AM1 (pour air mass 1, lorsque le rayonnement traverse une épaisseur d'atmosphère), AM0 (spectre à la surface externe de l'atmosphère), AM1.5 (spectre utilisé pour les tests standardisés des panneaux solaires correspondant à la traversée d'une atmosphère et demie) [3].

2.2.2. Les contraintes du solaire

- L'inclinaison

Le soleil possède une trajectoire dans la voûte céleste telle que sa hauteur par rapport à l'horizon ne cesse de changer. Si l'on souhaite capter le rayonnement de manière perpendiculaire, ce qui est souvent le cas pour de la concentration solaire, l'inclinaison de la surface réceptrice doit être adaptée à tout moment. Dans le chapitre suivant, nous verrons différentes techniques de concentration, souvent accompagnées de tracker solaire.

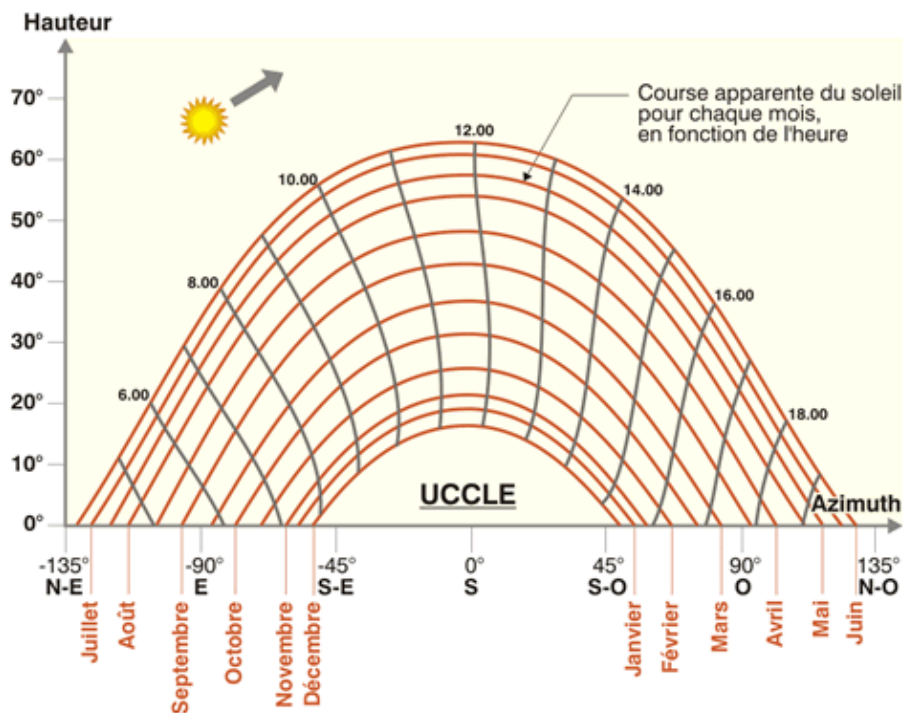


Figure 6 - Diagramme solaire cylindrique pour Uccle en temps universel

- L'heure et la période de l'année

La puissance varie en fonction de l'heure mais également en fonction de la période de l'année. Comme on peut le voir sur la Figure 6, la hauteur du soleil varie en fonction des saisons, ce qui implique des périodes plus ou moins favorables en termes de puissance reçue. Cette différence d'énergie reçue est fort marquée dans nos régions comme le présente le graphique ci-dessous.

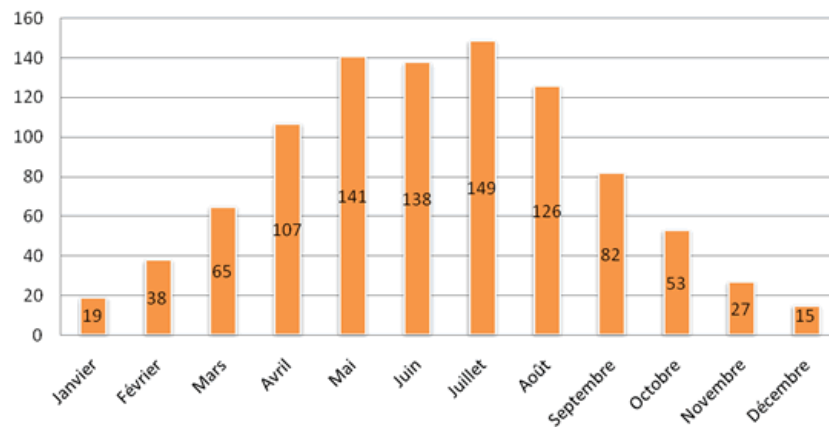


Figure 7 - Energie solaire mensuelle reçue à Uccle pour une surface horizontale [kWh/m²]

- La météorologie

L'énergie solaire est intermittente et dépend fortement des conditions climatiques, surtout dans le cas d'une concentration solaire où seul le rayonnement direct est utilisé. Par temps clair, lorsque le soleil est au plus haut, le rayonnement est d'environ 1000 W/m², mais cette puissance chute rapidement et atteint par exemple 250 W/m² par temps fort nuageux.

2.2.3. Le potentiel solaire

L'énergie solaire est inégalement répartie sur la surface de la Terre. Comme le montre la carte de gisement solaire ci-dessous, les pays du sud possèdent un potentiel solaire bien plus important. Cependant, les solutions solaires actuellement déployées ne suivent pas du tout cette carte de potentiel solaire. En effet, ces applications sont encore onéreuses et requièrent des investissements importants. Or, dans de nombreux cas, les applications solaires se trouvent à proximité des zones où l'énergie produite est consommée. On constate alors, par exemple que l'Allemagne est la première productrice d'énergie électrique issue de panneaux solaires photovoltaïques (Wc/hab) [4], alors qu'en termes de gisement solaire elle n'est pas favorisée, comme illustré ci-dessous.

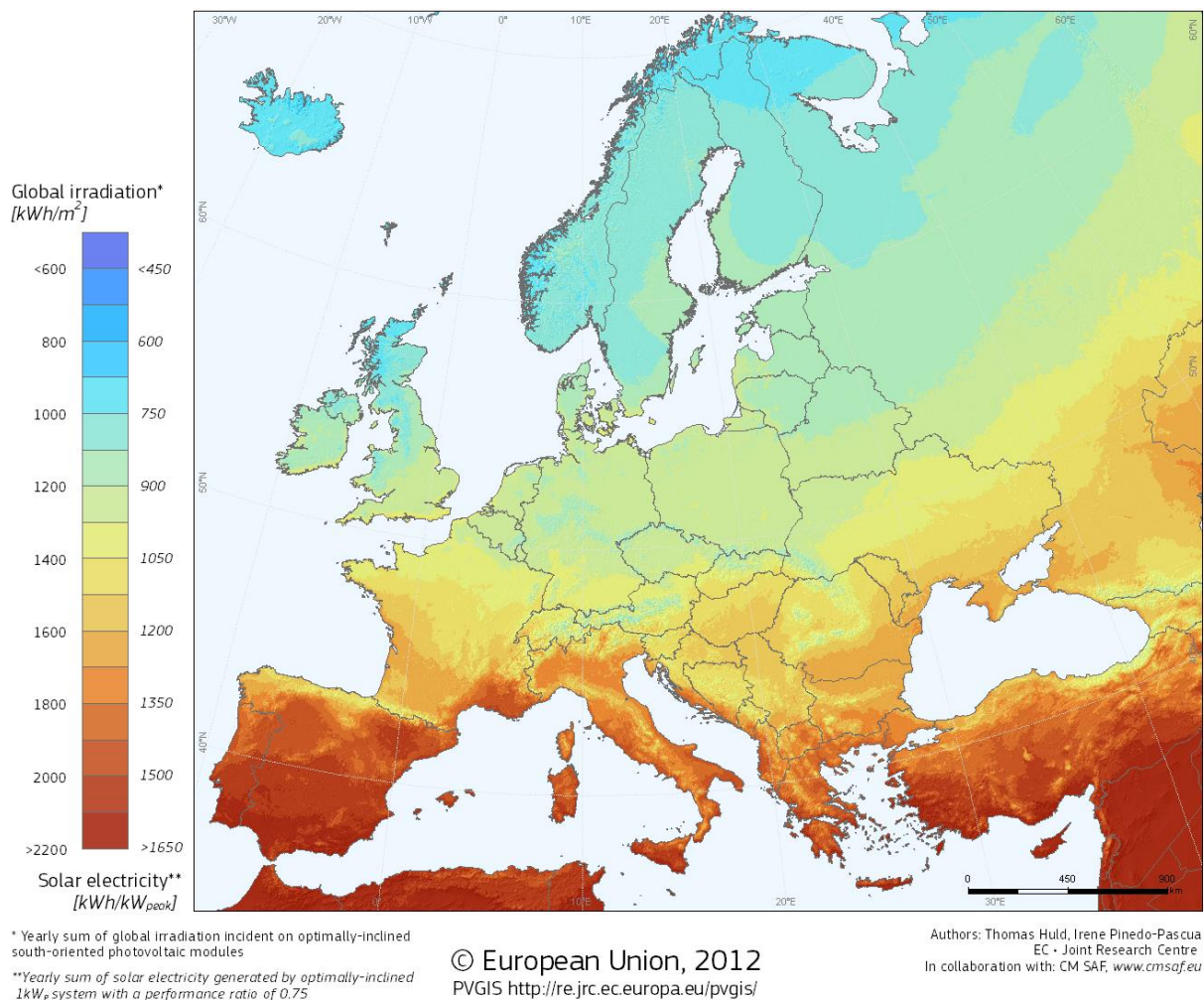


Figure 8 - Potentiel solaire en Europe [5]

3. Exploitation de l'énergie solaire

Dans ce chapitre, nous effectuons une synthèse des différentes techniques actuellement utilisées pour exploiter l'énergie solaire. Cette synthèse est séparée en trois grandes parties : l'usage de l'énergie solaire, les systèmes solaires concentrés et non concentrés.

3.1. L'usage de l'énergie solaire

Comme déjà présenté dans l'introduction de la partie technique, le processus d'exploitation de l'énergie se réalise en plusieurs étapes. Le schéma ci-dessous illustre la source d'énergie solaire, ses principaux systèmes de transformation et enfin l'énergie sous forme utile.

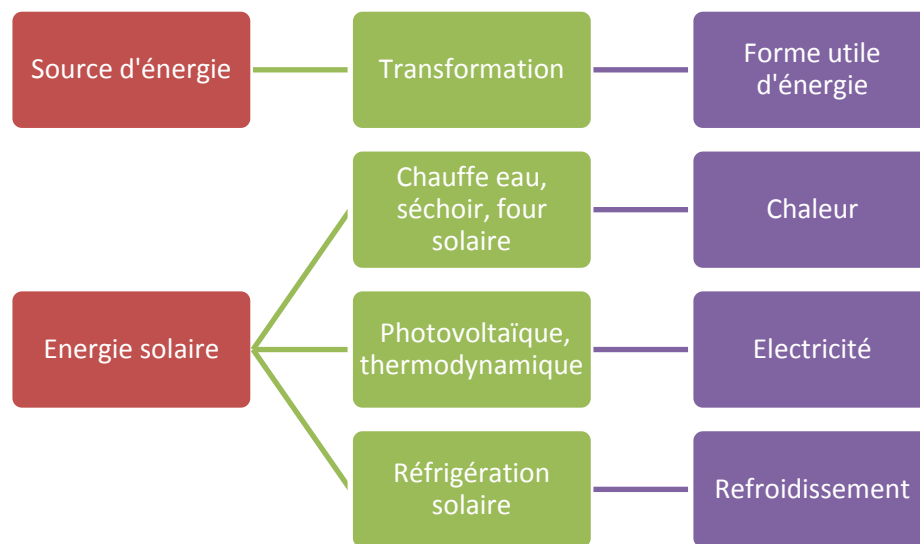


Figure 9 - Schéma du processus d'exploitation de l'énergie solaire, avec les principales transformation et formes utiles d'énergies

Actuellement, l'énergie solaire est principalement utilisée comme source de chaleur, même si le développement des systèmes photovoltaïques et des centrales thermodynamiques pour la production d'électricité est en plein essor. Le refroidissement par la réfrigération solaire reste actuellement anecdotique, mais les nombreuses recherches sur ce sujet rendront cette application sans doute bien plus répandue dans le futur.

Dans la suite de ce chapitre, nous parcourons les différents systèmes de transformation, en tentant de les comparer sur plusieurs critères, tels que le coût, la puissance, le rendement, la répartition au niveau mondial, la recherche et le développement et l'impact écologique.

3.1.1. Les mécanismes de transformation

Avant de détailler les différentes solutions solaires, il est important de comprendre les mécanismes physiques permettant de transformer le rayonnement solaire sous une autre forme d'énergie. Ainsi, le rayonnement solaire peut-être transformé via trois manières principales : la photosynthèse, l'effet photoélectrique et la photothermie.

- La photosynthèse

La photosynthèse est le mécanisme qui permet aux plantes, aux algues et à certaines bactéries de synthétiser de la matière organique en utilisant la lumière du soleil [6]. C'est ce processus qui fournit l'essentiel de l'énergie sur Terre (biomasse, pétrole, gaz naturel, etc.) [7]. Cependant, le rendement de la photosynthèse est inférieur à 1%, ce qui requiert de grande quantité d'espaces en vue d'une production d'énergie (biofuel par exemple) [8].

- L'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique désigne l'émission d'électrons par un matériau soumis à l'action de la lumière. L'effet photovoltaïque, directement lié à ce principe, se déroule dans un semi-conducteur où l'excitation d'un électron dans la bande de conduction donne lieu à un courant. Ce courant ainsi produit est ensuite récolté pour fournir de l'électricité. C'est le principe des cellules photovoltaïques. Actuellement, les rendements moyens des systèmes photovoltaïques est d'environ 16 %, bien que certaines applications atteignent les 40 % dans des domaines où une efficacité optimale est recherchée (aérospatial par exemple). Cependant, le coût de fabrication des semi-conducteurs (silicium purifié) est l'un des principaux inconvénients.

- La photothermie

La photothermie est la transformation en chaleur du rayonnement par le premier micromètre de la couche externe d'un solide. Ce mécanisme est responsable de l'échauffement des corps lorsqu'ils sont soumis au rayonnement solaire, comme par exemple dans le cas de panneaux solaires thermiques. Les rendements de telles applications dépendent essentiellement de la qualité du matériau qui absorbe le rayonnement et de sa température. On notera que certaines applications atteignent des rendements de 80%.

3.2. Les systèmes solaires non-concentrés

3.2.1. Le solaire passif

Le solaire passif consiste à utiliser l'énergie issue du soleil directement. Cet apport direct en énergie est l'une des plus importantes utilisations de l'énergie solaire [9]. Les bâtiments, lorsqu'ils sont bien orientés et bien conçus, bénéficient d'un gain solaire qui permet d'éviter le chauffage. Par exemple, les maisons solaires passives parviennent de la sorte à éviter l'usage d'énergie pour le chauffage.

3.2.2. Le solaire thermique

Le solaire thermique consiste à utiliser le rayonnement solaire sous forme de chaleur dans un but précis : soit pour un usage direct, comme par exemple pour chauffer de l'eau, chauffer des aliments, sécher, etc. ou soit pour un usage indirect, comme par exemple pour le dessalement, les centrales thermodynamiques, le rafraîchissement solaire, etc.

- Les niveaux de température

On peut définir les transformations thermiques par leur niveau de température d'utilisation (énergie utile) [8] :

- De 20 à 120 °C : Besoins de chauffage / Eau Chaude Sanitaire / Air conditionné
- De 120 à 200 °C : Applications industrielles
- Au-delà de 200 °C : Centrales thermodynamiques

Dans le cas de notre business plan, nous nous sommes tout d'abord concentrés sur la première gamme de température, c'est-à-dire l'énergie à basse température, à destination de particuliers ou de besoins liés au chauffage de bâtiments en général.

Ensuite, dans un second temps, nous nous sommes focalisés sur les applications industrielles, où les besoins en énergie sont alors à plus haute température. Dans de tels processus, l'utilisation de l'énergie solaire concentrée devient indispensable. Nous décrirons dans la section suivante les systèmes solaires à concentration.

- Les panneaux solaires thermiques

Les panneaux solaires thermiques, ou chauffe-eau solaire, sont des dispositifs à l'échelle d'une maison individuelle, constitués le plus souvent d'une enceinte vitrée dans laquelle circule un fluide caloporteur. Ce liquide, chauffé par le rayonnement solaire, permet d'apporter de la chaleur pour le chauffage, l'ECS, etc.

- Le rafraîchissement solaire

Certaines machines frigorifiques utilisent un apport de chaleur durant leur cycle thermodynamique. Ce type de refroidissement est idéal lorsque ce sont justement les apports solaires qu'il est nécessaire d'évacuer. Dans ce cas-là, la dépendance solaire n'est pas un problème, dépendance qui reste un des principaux désavantages des autres solutions solaires. Notons cependant que bien souvent, les gains solaires non contrôlés résultent d'une mauvaise conception.

- Cuisinières et sécheurs solaires

Les cuiseurs solaires sont des dispositifs rustiques et très répandus dans certaines régions du monde comme en Inde et en Chine. Il existe ainsi de nombreux dispositifs, atteignant de manière générale des températures de l'ordre de 100 à 220 °C.

3.2.3. Le solaire photovoltaïque

Les panneaux solaires photovoltaïques sont composés de cellules photovoltaïques qui, reliées entre-elles, forment un panneau. Le courant électrique produit est, dans la grande majorité des cas, injecté sur le réseau de distribution électrique via un onduleur. Cette solution solaire est très modulable. Elle peut en effet être installée sur les toits des maisons ou pour des centrales de production électrique. Ainsi, la puissance installée pour des particuliers dépasse rarement 3kW, alors que la centrale solaire d'Agua Caliente en Arizona atteint par exemple les 247 MW.

En réalité, l'énergie photovoltaïque possède un réel intérêt lorsque qu'il est nécessaire d'alimenter des zones difficiles d'accès et qui ne possèdent pas le raccord au réseau électrique. En effet, les investissements considérables sont un réel frein à l'expansion de cette technologie et le développement du photovoltaïque a été virtuellement dopé par les déductions fiscales accordées par les États. Ainsi, selon une étude en France en 2011, un emploi dans le photovoltaïque coûterait de 10 à 40 % plus cher que l'indemnisation d'un chômeur [10]. Le marché du photovoltaïque pour les particuliers semble donc artificiel et peut s'effondrer comme nous l'a montré la crise du photovoltaïque en Belgique.

On s'attend cependant à l'apparition de centrales solaires photovoltaïques de taille de plus en plus grande, atteignant le GW. Cette évolution est principalement due à la diminution des coûts de production des cellules et aux économies d'échelle, accordant ainsi la confiance des investisseurs dans ce type de grands projets.

Bien que les centrales photovoltaïques soient parfois équipées de tracker solaire, permettant ainsi d'atteindre de meilleurs rendements, la plus grande limitation de ces dernières est issue

du faible facteur de charge. En effet, même dans les zones les plus favorables du globe, le facteur de charge ne dépasse pas les 25%, ce qui est faible en comparaison à d'autres systèmes de production comme le nucléaire possédant un facteur de charge d'environ 80% [11].

Ensuite, la grande variabilité de la production pose de sérieux problèmes pour le raccordement au réseau. Il est en effet difficile de gérer une chute de puissance de 100MW quasiment instantanément lorsqu'un nuage passe au-dessus d'une telle centrale.

En termes de coûts, les centrales photovoltaïques permettent d'atteindre une énergie électrique entre 10 et 20 c€/kWh [12] [13].

En ce qui concerne la recherche et le développement, on notera que l'essentiel des avancées sont réalisées dans l'amélioration des cellules photovoltaïque. Cependant, de nombreux autres domaines sont étudiés, comme les onduleurs, les héliostats, l'intégration aux bâtiments, les coefficients de réflexion et d'absorption, etc.

3.3. Les systèmes solaires concentrés

3.3.1. Centrales solaires thermodynamiques

L'objectif des centrales thermodynamiques est de produire de l'électricité grâce à des turbines à vapeur ou encore des moteurs thermiques. Dans tous les cas, il est nécessaire de concentrer les rayons du soleil pour atteindre des températures suffisamment hautes.

Ce genre de dispositifs est utilisé à l'échelle industrielle et consiste à chauffer un fluide caloporteur au point focal du concentrateur solaire. L'intermittence du rayonnement solaire peut être contournée en utilisant des systèmes de stockage. De cette manière, il est possible d'exploiter les moteurs thermiques de manière continue lors des périodes de fort ensoleillement.

Nous détaillons ci-dessous les quatre grandes sortes de centrales thermodynamiques.

- Les centrales à tour

Une centrale à tour solaire réceptionne les rayonnements solaires réfléchis par une multitude de réflecteurs orientables appelés héliostats. Le foyer, situé en haut de la tour est parcouru par un fluide caloporteur (eau, sel fondu, huile), ce dernier pouvant monter à très haute température. Ce fluide chauffe ensuite de la vapeur d'eau qui actionne une turbine et produit de l'électricité. Ce type de centrale reste peu répandu étant donné les investissements importants, induits par une technologie relativement complexe en raison des héliostats orientables sur deux axes et d'une lourde infrastructure. La plus grande centrale solaire de ce type, la centrale solaire d'Ivanpah se situe aux Etats-Unis et possède une puissance nominale de 377 MW.



Figure 10 - Centrale à tour d'Ivanpah (gauche) et de Gemasolar (droite) dans la région de Séville (Espagne). [75]

- Les centrales à miroir cylindro-parabolique

Ce type de centrale est constitué d'une multitude de rangées de miroirs cylindro-paraboliques, concentrant le rayonnement sur des tubes parcourus par un fluide caloporteur. A nouveau, ce fluide est amené dans une chaudière afin de chauffer de la vapeur d'eau. La technologie de concentrateur cylindro-parabolique est la plus utilisée actuellement, notamment dans les plus grandes centrales solaires thermodynamiques au Sud-Ouest des Etats-Unis et dans le Sud de l'Espagne [14]. L'orientation des concentrateurs se réalise uniquement sur un axe, ce qui réduit la complexité comparé aux centrales à tour. La plus grande centrale solaire de ce type, la centrale Solar Energy Generating Systems se situe aux Etats-Unis et possède une puissance nominale de 354 MW.



Figure 11 – Gauche : Centrale à concentration cylindro-parabolique : Solar Energy Generating Systems. Droite : Concentrateur cylindro-parabolique de la centrale Nevada Solar one. [75]

- Centrale à miroirs de Fresnel

Les centrales à miroirs de Fresnel sont similaires aux centrales à miroirs cylindro-paraboliques. La principale différence réside dans le concentrateur, formé par des miroirs plans (ou quasi plans), pouvant chacun pivoter autour d'un axe [15]. Le principal avantage de cette technique est l'utilisation de miroirs plats, bien meilleur marchés et nécessitant moins de nettoyage lors de leur fonctionnement (du sable se déposant sur les optiques). Il en résulte également une prise au vent et une infrastructure moins importante comparé aux centrales à miroirs cylindro-paraboliques. Bien que cette technologie reste encore peu répandue, de plus en plus de centrales solaires sont amenées à utiliser ce principe de concentration, freinées cependant par un rendement optique 30% plus bas que les concentrations paraboliques ou cylindro-paraboliques. Actuellement, la plus grande centrale de ce type, Puerto Errado, se situe en Espagne et possède une puissance nominale de 31,4 MW.

- Centrale à concentration parabolique

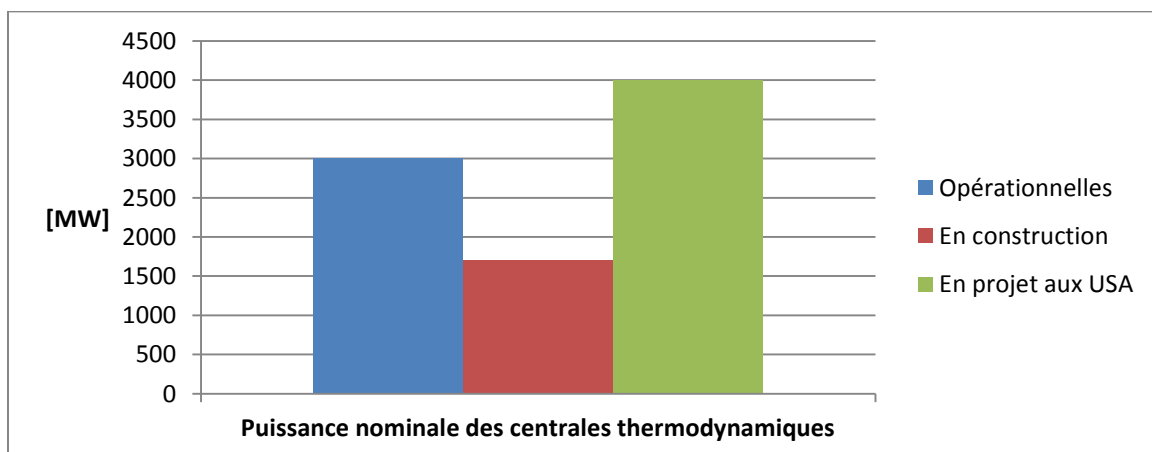
Les centrales à concentration parabolique, ou encore Dish Stirling parabolique, sont des grandes paraboles concentrant le rayonnement sur des moteurs thermiques. Ces systèmes sont connus pour leurs grandes performances (environ 30%). Les récepteurs de chaleur sont des moteurs Stirling fonctionnant grâce à la montée en pression d'un gaz chauffé à haute température. Ces systèmes, relativement complexes et coûteux, permettent de monter à environ 1000 °C favorisant ainsi le rendement de conversion de l'énergie [16]. Le principal avantage de ces dispositifs est leur indépendance, pouvant ainsi fournir une puissance d'environ 15kW dans des endroits isolés.



Figure 12 – Gauche : Centrale solaire à miroir Fresnel en Andalousie (Almería). Droite : Récepteur parabolique - Dish Stirling parabolique [55]

- Récapitulatif et perspectives

Les différents types de centrales thermodynamiques cumulent au total un peu plus de 3 000 MW de puissance nominale installée [17]. Actuellement, une vingtaine de projets de nouvelles centrales solaires sont en construction, totalisant 1 700 MW de puissance. Les projets du futur prévoient des centrales de plus en plus grandes, et rien qu'aux Etats-Unis, une vingtaine de projets sont en cours d'étude, totalisant 4 000 MW de puissance. Une bonne partie de cette puissance sera issue des centrales à tour.



3.4. Evolution de la production d'énergie thermique et électrique

Notre solution solaire Hybrid Power produit à la fois de l'électricité et de la chaleur. Il est donc intéressant de connaître l'évolution de la production de ces deux énergies. Grâce aux informations fournies par l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA) [18], nous avons illustré l'évolution de la production d'électricité et de chaleur pour les années 2001 et 2011.

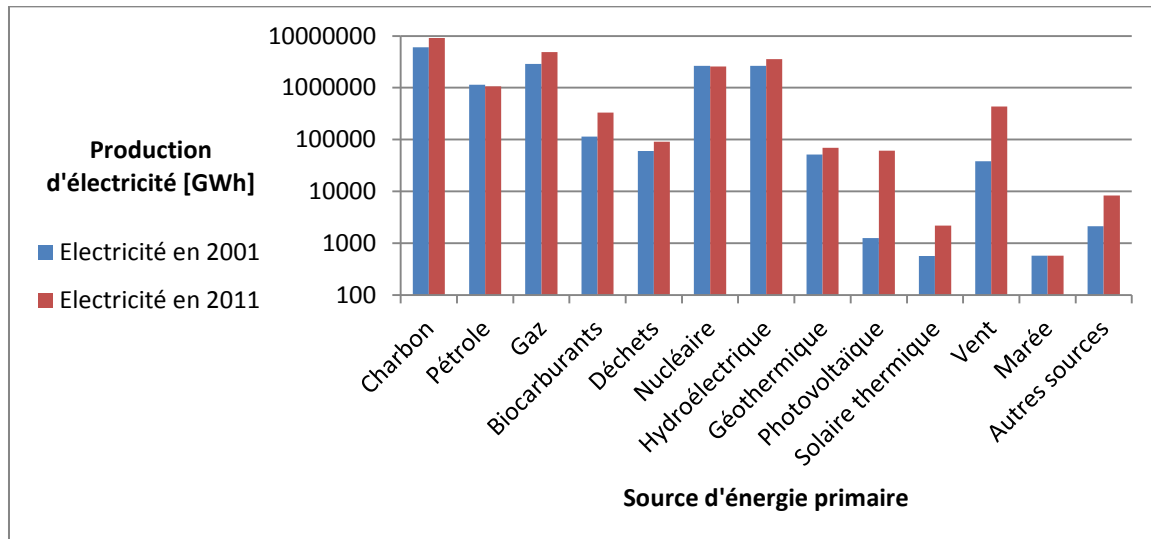


Figure 13 - Production mondiale d'électricité selon la source d'énergie primaire entre 2001 et 2011

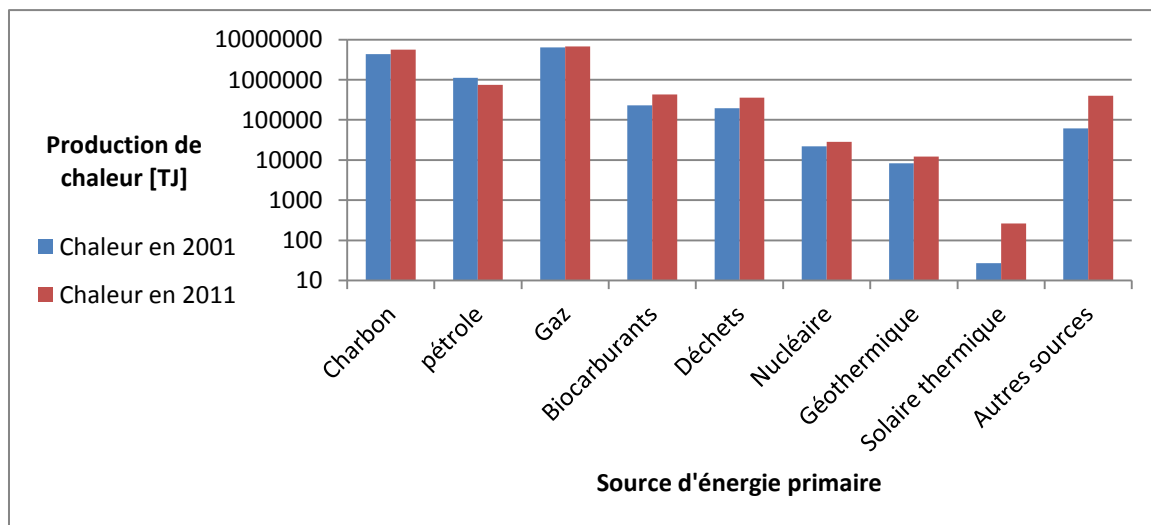


Figure 14 - Production mondiale de chaleur selon la source d'énergie primaire entre 2001 et 2011

Bien que les échelles logarithmiques soient trompeuses, les solutions solaires, photovoltaïques et thermiques réunies, représentaient en fait 0,29 % de la production d'électricité et 0,00002 % de la production de chaleur au niveau mondial en 2011.

Cependant, comme on le constate sur ces graphiques, il existe une évolution rapide des solutions solaires, autant pour la production d'électricité que pour la production de chaleur. L'IEA prévoit ainsi, dans ses analyses les plus optimistes, que l'énergie solaire sera la source d'un tiers de la consommation finale d'énergie mondiale d'ici 2060.

3.5. Rendements des technologies

Après avoir parcouru les différentes technologies permettant d'utiliser l'énergie solaire, il est intéressant de les comparer en termes de rendement. Ci-dessous, un graphique reprend les rendements des différentes technologies pour la production d'électricité [19].

Notons que ce graphique représente également la technologie photovoltaïque concentrée et les systèmes thermoélectriques. Les systèmes photovoltaïques concentrés ne seront pas abordés dans ce travail. En revanche, dans le chapitre suivant, nous verrons plus en détails les générateurs thermoélectriques.

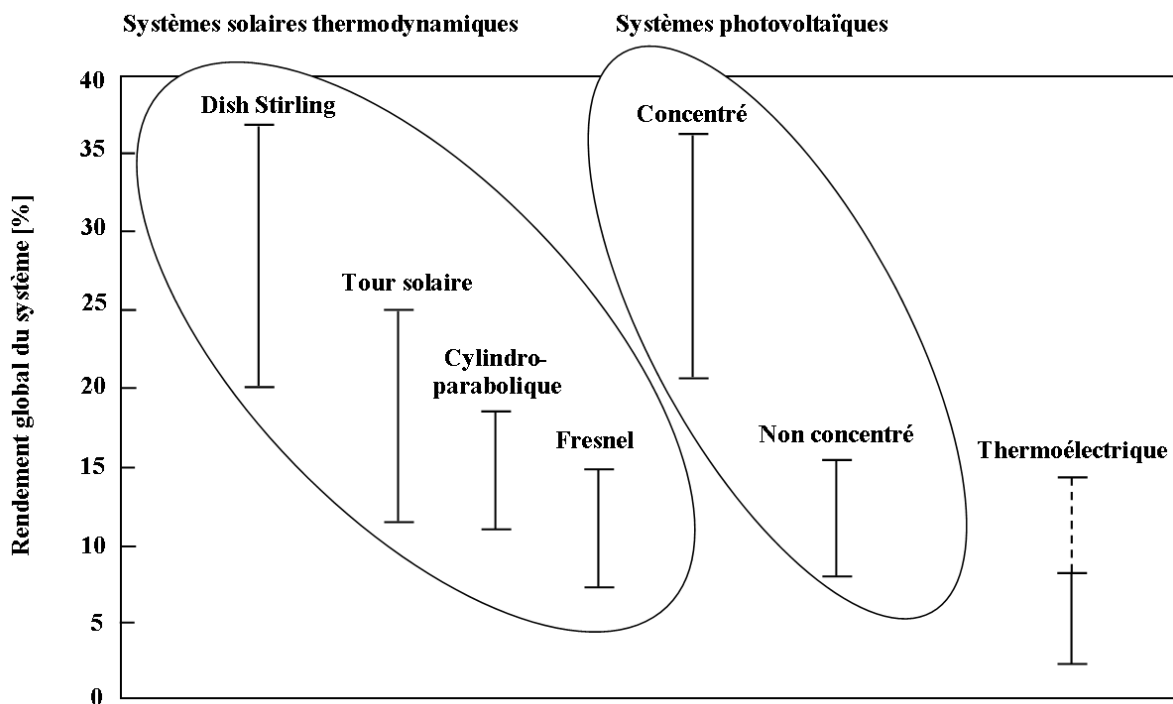


Figure 15 - Comparaison des rendements des différents systèmes solaires produisant de l'électricité

Notons également que ce graphique ne représente pas les systèmes pouvant produire de la chaleur. En effet, au contraire de l'électricité, la chaleur peut être produite à différents niveaux d'énergie. Ceux-ci ont un potentiel économique de plus en plus important avec une plus haute température (cf. Les niveaux de température, page 10). Ainsi, la production de chaleur à haute température ne peut pas être comparée à une production de chaleur à basse température, car leur valeur économique n'est pas évaluée de la même manière. En d'autres termes, avoir un système thermique basse température très performant n'est pas comparable à un système thermique à haute température peu performant.

4. Module thermoélectrique

Au sein de ce chapitre, nous aborderons de manière générale le fonctionnement des matériaux thermoélectriques [20]. Nous passerons également en revue différentes applications se rapprochant de notre solution solaire. Enfin, nous considérerons les coûts liés à la thermoélectricité.

4.1. Principe de la thermoélectricité

4.1.1. L'effet Seebeck

L'effet Seebeck est le premier effet thermoélectrique découvert en 1821 par le physicien allemand du même nom. Il découvrit qu'un champ magnétique se développe entre deux conducteurs de nature différente et dont les jonctions ne sont pas à la même température ($T_h \neq T_c$), comme illustré ci-dessous. Ce champ électrique (E) induit en fait un courant électrique (i) qui circule dans ce circuit fermé.

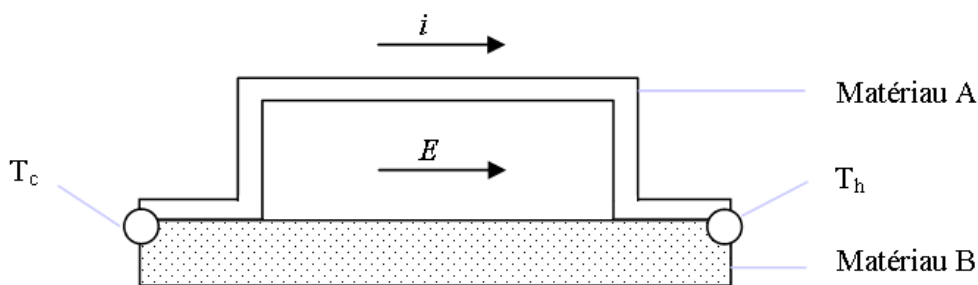


Figure 16 – Le champ électrique E induit un courant i en circuit fermé

Pour mieux visualiser la force électromotrice qui se développe, on peut ouvrir le circuit, annulant ainsi le courant ($i = 0$). Lorsque T_h est différent de T_c , une tension E_{AB} apparaît aux bornes du circuit, c'est ce que l'on appelle l'effet Seebeck.

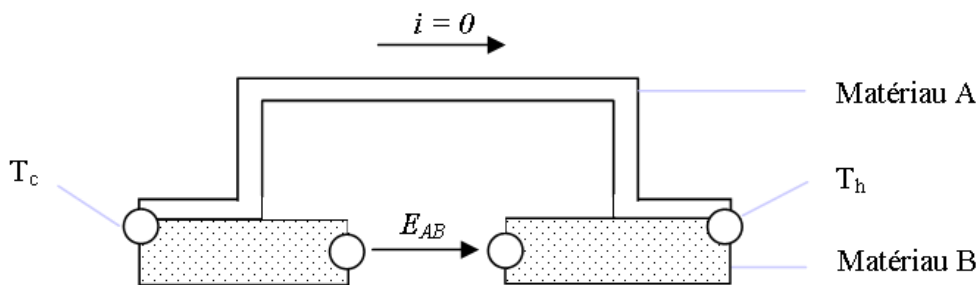


Figure 17 - Effet Seebeck en circuit ouvert

La différence de température entre les deux jonctions entraîne un gradient de température au sein du matériau. Le flux de chaleur qui en résulte a tendance à déplacer les porteurs de charges de la partie la plus chaude vers la partie la plus froide, c'est la base du phénomène thermoélectrique.

Au niveau local, le champ électrique électromoteur, noté E_{Seebeck} , est proportionnel au gradient de température et au pouvoir thermoélectrique du matériau¹.

$$E_{\text{Seebeck}} = \pi_A(T) \frac{\delta T}{\delta x}$$

Avec

$$\pi_A(T) : \text{Pouvoir thermoélectrique du matériau A} \left[\frac{\mu V}{K} \right]$$

$$\frac{\delta T}{\delta x} : \text{Gradient de température} \left[\frac{K}{m} \right]$$

Ainsi, pour un matériau dont la jonction chaude est T_h et la jonction froide T_c , la force électromotrice au sein du matériau devient :

$$E_A(T_c, T_h) = \int_{T_c}^{T_h} \pi_A(T) dT$$

A présent, si l'on considère deux matériaux disposés comme à la Figure 16, la force électromotrice devient alors :

$$E_{AB}(T_c, T_h) = E_A(T_c, T_h) - E_B(T_c, T_h) = \int_{T_c}^{T_h} \pi_{AB}(T) dT$$

Avec

$$\pi_{AB} = \frac{\delta E_{AB}(T)}{\delta T} = \pi_A(T) - \pi_B(T) : \text{Pouvoir thermoélectrique du couple de matériaux A et B}$$

Lorsque le pouvoir thermoélectrique des matériaux ne varie pas de manière excessive en fonction de la température, on fera souvent l'approximation d'un pouvoir thermoélectrique constant :

$$\pi_{AB}(T) = \pi_{AB}$$

¹ Notons également que le pouvoir thermoélectrique π est usuellement appelé coefficient Seebeck α [$\mu V/K$].

4.1.2. L'effet Peltier

Le complément de l'effet Seebeck est l'effet Peltier : une variation de température apparaît aux jonctions de deux matériaux conducteurs différents soumis à un courant électrique. En effet, à l'inverse de l'effet Seebeck, lorsque la jonction est traversée par un courant électrique, un flux de chaleur est induit, permettant ainsi d'apporter de la chaleur à une jonction et d'en absorber à l'autre. L'effet Peltier est donc utilisé pour la réfrigération. Le coefficient Peltier Π est défini par le rapport entre la puissance thermique absorbée et le courant électrique :

$$P_{thermique} = \Pi_{AB} i$$

L'effet Seebeck et l'effet Peltier sont en fait directement reliés par la température :

$$\Pi_{AB} = \pi_{AB} T$$

Avec

Π_{AB} : Le coefficient Peltier du couple de matériaux AB [μV]

π_{AB} : Le coefficient Seebeck du couple de matériaux AB [$\frac{\mu V}{K}$]

T : La température [K]

4.1.3. Couple thermoélectrique

Un couple thermoélectrique est composé de deux matériaux thermoélectriques, l'un de type positif (type p) et l'autre de type négatif (type n). Les matériaux thermoélectriques sont dits de type « p » lorsque le flux de chaleur se développe dans le même sens que le courant électrique. A l'inverse, les matériaux thermoélectriques de type « n » induisent un courant électrique dans le sens contraire au flux de chaleur. Afin que le courant électrique puisse circuler, les deux plots thermoélectriques sont reliés en série par un conducteur électrique (souvent des plaquettes de cuivre).

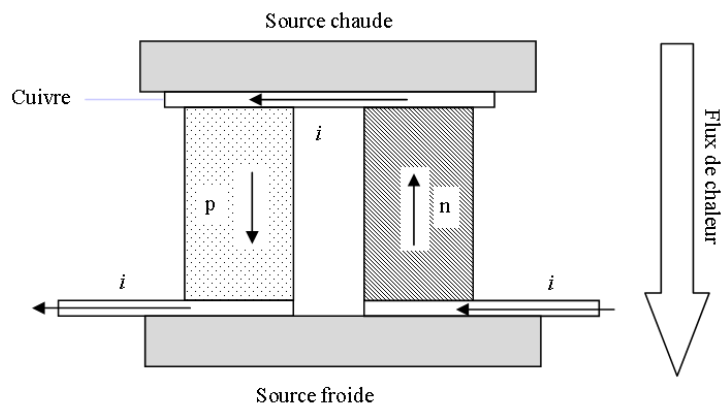


Figure 18 - Couple thermoélectrique

4.1.4. Générateur thermoélectrique

Un générateur thermoélectrique est une succession de couples thermoélectriques connectés électriquement en série. Du point de vue thermique, les couples sont tous mis en parallèles, c'est-à-dire, les jonctions chaudes sont à une même température chaude et les jonctions froides sont à une même température froide.

Un générateur thermoélectrique ou module thermoélectrique, est ainsi composé d'une série de couples thermoélectriques parcourus par un même courant et additionnant chacun une tension supplémentaire. Les modules thermoélectriques sont souvent composés d'une plaque de céramique dans leurs parties supérieure et inférieure, fournissant de la sorte une isolation électrique extérieure tout en laissant la chaleur traverser le module. La somme des épaisseurs de cette plaque de céramique et du conducteur cuivre est dénommée l_c .

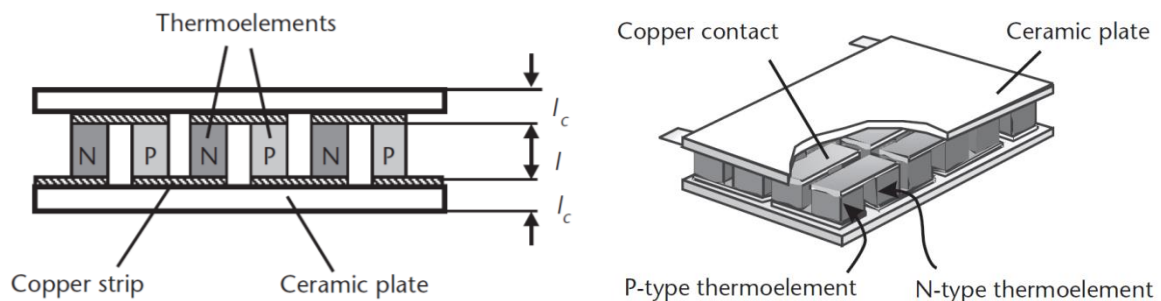


Figure 19 - Gauche : Série de trois couples thermoélectrique. Droite : Module thermoélectrique.

4.1.5. Les matériaux thermoélectriques utilisés

Dans la suite de ce travail, nous utilisons deux types de matériaux thermoélectriques :

- Le Tellure de Bismuth – Bi_2Te_3
- Le Fer Vanadium Aluminium – Fe_2VAl

- Tellure de Bismuth – Bi_2Te_3

Le tellure de bismuth est un matériau thermoélectrique très répandu. En effet, ce semi-conducteur possède de très bonnes caractéristiques thermoélectriques à température ambiante, ce qui le rend un très bon refroidisseur par effet Peltier. On en fait usage dans de nombreux systèmes de refroidissement comme par exemple les processeurs ou encore la réfrigération embarquée (avions, voitures, hôtels, etc.).

Cependant, ce matériau thermoélectrique possède des inconvénients majeurs, à savoir son coût dû à la rareté de ces éléments et sa toxicité [21]. Ces propriétés thermoélectriques se dégradent drastiquement au-delà des 300K, ce qui impose, pour la production d'électricité qui

se réalise à plus haute température, l'utilisation d'alliages de bismuth, d'antimoine, de tellure et de sélénium [22].

Dans le cadre du démonstrateur, nous avons utilisé des modules Bi-Te issus du fabricant Tellurex. Nous n'avons cependant pas la composition exacte de l'alliage utilisé.

- Fer Vanadium Aluminium – Fe₂VAl

Ce matériau thermoélectrique prometteur est encore au stade de la recherche, notamment au sein de l'UCL pour la mise en forme d'un module thermoélectrique. Les atouts de ce matériau sont d'une part son prix peu élevé puisqu'il s'agit de métaux abondants, et d'autre part ses bonnes caractéristiques physiques. L'alliage possède en effet des propriétés thermoélectriques intéressantes : il résiste bien à la montée en température et possède une conductivité électrique élevée. Ci-dessous, sont présentées ses caractéristiques en comparaison avec un alliage classique de Bi₂Te₃ ne pouvant pas monter en température [23]. Nous définissons également le facteur de mérite ZT :

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{\rho \lambda}$$

	Bi ₂ Te ₃	Fe ₂ VAl
Température moyenne T ₁ [K]	300	300
Coefficient Seebeck α [μV/K]	400	200
Résistivité électrique ρ [μΩm]	10	2,5
Conductivité thermique λ [W/mK]	1,5	10
Facteur de mérite ZT ₁ [/]	3,2	0,48
Température moyenne T ₂ [K]	/	600
Coefficient Seebeck α [μV/K]	/	100
Résistivité électrique ρ [μΩm]	/	2,5
Conductivité thermique λ [W/mK]	/	10
Facteur de mérite ZT ₂ [/]	/	0,24

Tableau 1 - Comparaison des caractéristiques physiques et thermoélectriques des matériaux Bi₂Te₃ et Fe₂VAl

Le facteur de mérite, représente bien la capacité des matériaux thermoélectriques à convertir de l'énergie. Il faut en effet que ces matériaux possèdent un grand coefficient Seebeck, une faible résistivité électrique et une faible conductivité thermique.

Notons qu'ici le facteur de mérite a été calculé avec T₁ = 300K et T₂ = 600K. Cependant, le Bi₂Te₃ contrairement au Fe₂VAl, possède des caractéristiques fortement dégradées au-delà de 300K, ce qui rend son usage inadéquat au-delà de cette température. Or, une telle température

moyenne n'est pas adaptée pour de la génération électrique, puisque typiquement la source froide se situera au-delà de 300K.

Bien que nous ayons présenté uniquement deux matériaux thermoélectriques, il existe une multitude de matériaux, chacun possédant de bonnes caractéristiques dans sa propre gamme de température. Nous verrons par la suite que la température est un des principaux paramètres qui influence la production d'électricité.

4.1.6. Le cout des matériaux thermoélectriques

- Bi_2Te_3

Le Tellure de Bismuth est composé d'éléments rares, ce qui rend son prix relativement élevé. Son prix est estimé entre 400 et 1000 USD/kg [52], ce qui représente à peu près 300 et 700 €/kg.

- Fe_2VAl

Un des moteurs du projet est le coût relativement bas du Fe_2VAl par rapport au Bi_2Te_3 . En effet, cette alliage Fe_2VAl est composé pour 58,9% de Fe, 26,87% de V et 14,23% d'Al.

Pour composer cet alliage, nous utilisons les matériaux suivants : du Fe pur à 0,5 €/kg, du Al pur à 1,4 €/kg, du Ferrovanadium à 19,2 €/kg (composé de 81,65% de V et 17,03% de Fe).

En respectant la stœchiométrie, le coût des matières premières pour composer le Fe_2VAl est indiqué dans le tableau ci-dessous :

	Fe pur	Al pur	Ferrovanadium	Total
Composition Fe_2VAl [%]	52,86	14,23	32,91	100
Prix [€/kg]	0,5	1,4	19,2	6,78

Tableau 2 - Composition et prix au kg pour l'alliage Fe_2VAl

Le prix des matières premières pour constituer les éléments thermoélectriques est de 6,78 €/kg, ce qui est environ 100 fois moins élevé que le Bi_2Te_3 .

- Cout de la mise en forme

En plus du coût des matières premières, il est nécessaire de les façonner. En effet, il faut fondre l'ensemble des composants pour former l'alliage et ensuite usiner les plots thermoélectriques.

La fonte des métaux est négligeable par rapport au prix de la découpe. Pour l'instant, le générateur thermoélectrique utilisé pour le démonstrateur a été découpé par électro-érosion par un sous-traitant. Le prix de cette découpe a été de 675€ pour environ 60 plots, ce qui représente un prix considérable. Nous pensons cependant que ce coût sera drastiquement réduit si la spin-off se dote d'une machine capable de produire des plots thermoélectriques en grande quantité.

4.1.7. Rendement et gamme de température

Dans ce chapitre, nous nous intéressons particulièrement aux générateurs thermoélectriques pour leur production d'électricité. Une des premières étapes pour analyser leur comportement est d'établir des schémas de principes et des circuits électriques équivalents.

Ci-dessous, nous avons représenté le schéma simplifié d'un générateur thermoélectrique. T_h et T_c représentent les températures chaude (T_{hot}) et froide (T_{cold}) au borne du générateur thermoélectrique. Cette différence de température entraine un flux de chaleur Q . Le générateur thermoélectrique possède une résistance électrique interne notée R_i . Afin de récupérer l'électricité, on connecte aux bornes du générateur un circuit possédant une résistance électrique de charge R_L (Load Resistance) et un interrupteur S (pouvant ouvrir ou fermer le circuit).

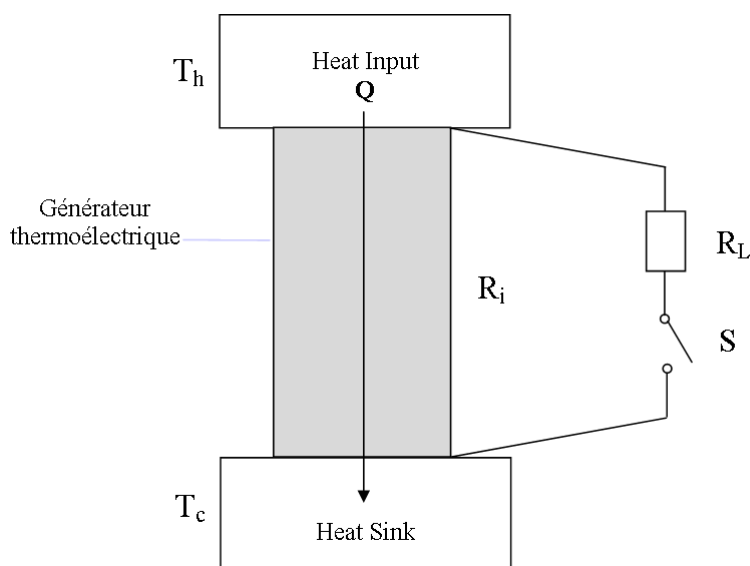


Figure 20 - Schéma simplifié d'un générateur thermoélectrique

Ce schéma peut également être représenté par un circuit équivalent comme illustré ci-dessous. Le générateur thermoélectrique est en fait vu comme une source de tension, qui dépend du coefficient de Seebeck α et la différence de température ΔT ($T_h - T_c$).

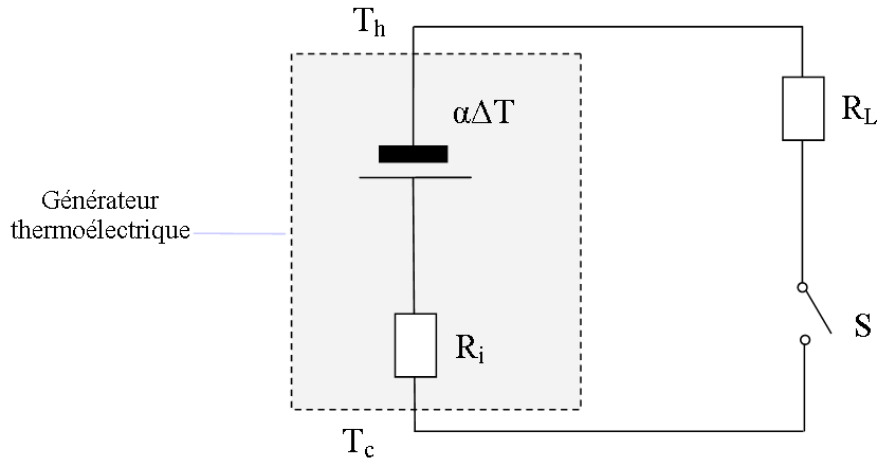


Figure 21 - Circuit équivalent du générateur thermoélectrique

Selon la théorie [23], avec un modèle simplifié négligeant les résistances thermiques et électriques des contacts, la puissance développée par le générateur P et son rendement ϕ peuvent être déterminés comme suit :

$$P = \frac{s}{(1+s)^2} \frac{\alpha^2 \Delta T^2}{R_i}$$

$$\phi = \frac{\Delta T}{T_h} \left(\frac{s}{(1+s) - \frac{\Delta T}{2T_h} + \frac{(1+s)^2}{ZT_h}} \right)$$

Avec

$s = \left(\frac{R_L}{R_i} \right)$: Rapport entre la résistance de charge et la résistance interne

Afin de maximiser la puissance fournie par le générateur, le facteur de charge s est égal à 1.

4.2. Les applications thermoélectriques

Les principaux avantages des systèmes thermoélectriques sont leur fiabilité, leur faible encombrement et leur fonctionnement sans pièces mobiles (peu d'entretien, pas de vibration, etc.). Cependant, vu leur faible rendement, les applications restent actuellement cantonnées à des domaines bien spécifiques comme vu précédemment.

L'objectif de ce travail est de valoriser les modules thermoélectriques par des applications à grande échelle où la source d'énergie à moyenne température (environ 300 – 400 °C) est gratuite. Actuellement, des applications de récupération d'énergie, notamment sur des lignes industrielles de traitement d'acier, sont à l'étude à l'UCL. Le travail ci-présent se focalise sur la concentration solaire, énergie gratuite pouvant monter à très haute température.

4.2.1. Les applications solaires concentrées thermoélectriques

Récemment, plusieurs recherches ont été menées afin de produire à la fois de l'électricité et dans certains cas, de la chaleur grâce à une génération thermoélectrique. Dans la grande majorité des cas, la source de chaleur se réalise par concentration solaire. Nous présentons ci-dessous quelques dispositions avec les rendements associés.

- Lentille Fresnel avec fluide caloporteur

Une étude publiée en avril 2014 [24] propose d'utiliser des lentilles de Fresnel afin de concentrer les rayons du soleil sur un fluide caloporteur : un récepteur de chaleur composé d'un réservoir d'huile. Cette source de chaleur est couplée à un générateur thermoélectrique lui-même refroidi par de l'eau issue d'un réservoir. La différence de température aux bornes du générateur produit ainsi un courant électrique.

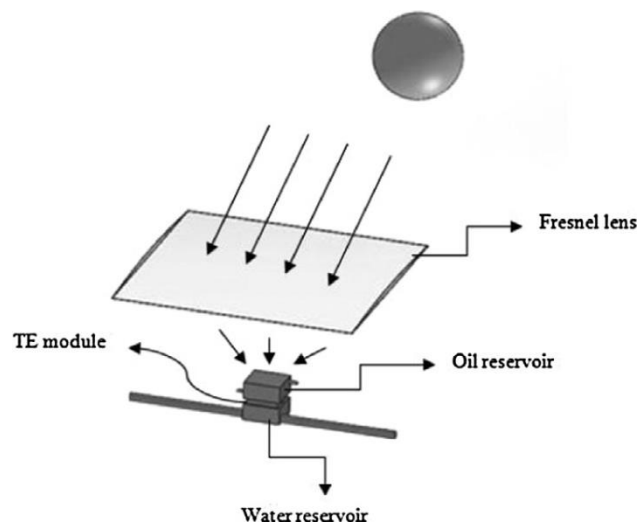


Figure 22 - Schéma expérimental d'un prototype avec une lentille Fresnel et un fluide caloporteur

Dans cette étude, le générateur thermoélectrique est basé sur un alliage de Bi_2Te_3 . Le générateur thermoélectrique, situé entre le réservoir d'huile et le réservoir d'eau, est également inclus dans une atmosphère sous vide grâce à une paroi en verre.

Les rendements obtenus sont d'environ 51% pour la génération thermique et 1,7% pour la génération électrique. Afin d'augmenter la puissance électrique générée, les auteurs proposent d'utiliser plusieurs lentilles afin de chauffer à plus haute température le fluide caloporteur.

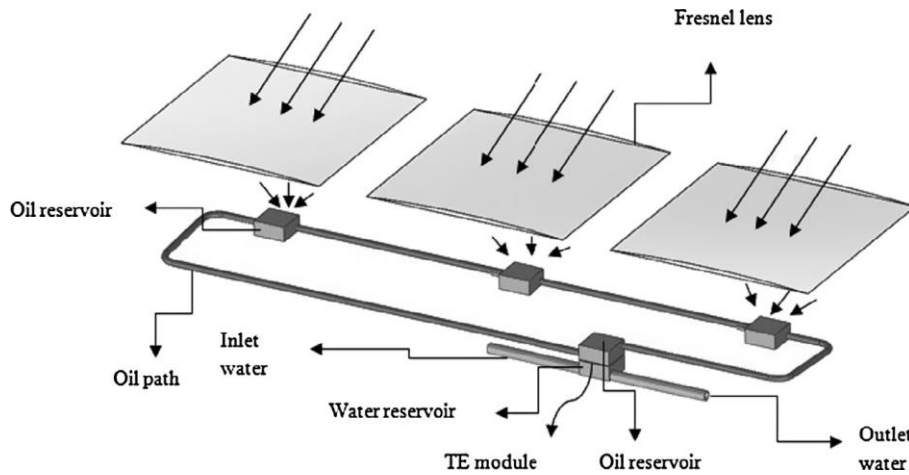


Figure 23 - Schéma proposé d'un prototype avec plusieurs lentille Fresnel et un fluide caloporteur

- Lentille Fresnel sans fluide caloporteur

Une autre étude publiée en avril 2014 [25] propose de concentrer les rayons solaires directement sur un récepteur de chaleur couplé à un générateur thermoélectrique. Ce dernier est ensuite refroidi par une circulation d'eau comme illustré ci-dessous.

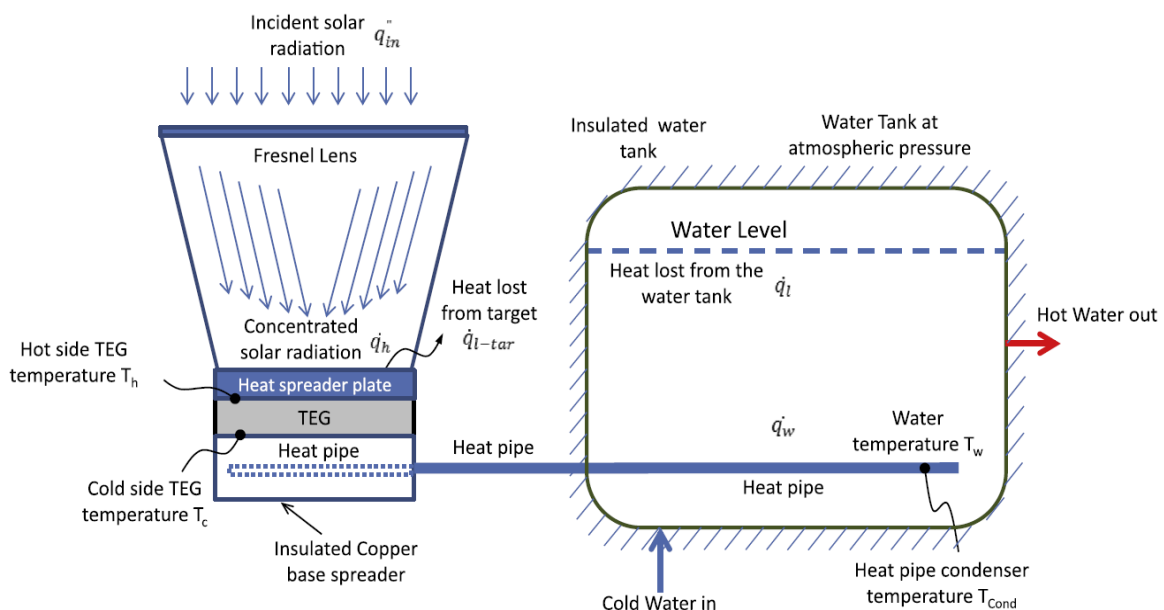


Figure 24 - Schéma proposé d'un prototype à concentration solaire thermoélectrique sans fluide caloporteur

Cependant, cette disposition n'a été analysée que théoriquement et les résultats théoriques sont validés par un essai en laboratoire, avec comme source de chaleur une résistance chauffante. Dans cette disposition, les rendements obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous, en fonction de la puissance générée par la résistance chauffante.

Puissance apportée [W]	ΔT [°C]	Rendement électrique [%]	Rendement thermique [%]
60	60	2,10	53,8
180	150	1,94	61,3

- Concentrateur cylindro-parabolique et refroidissement par fluide caloporteur

Une étude de 2011 [26] présente la modélisation et l'optimisation d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique, utilisant un fluide caloporteur pour refroidir le générateur thermoélectrique. Dans cette étude, ils obtiennent des rendements de 52% avec une concentration d'un facteur 100. Cependant, cette étude ne tient pas compte des modifications des propriétés des matériaux, qui à haute température, sont fortement dégradées.

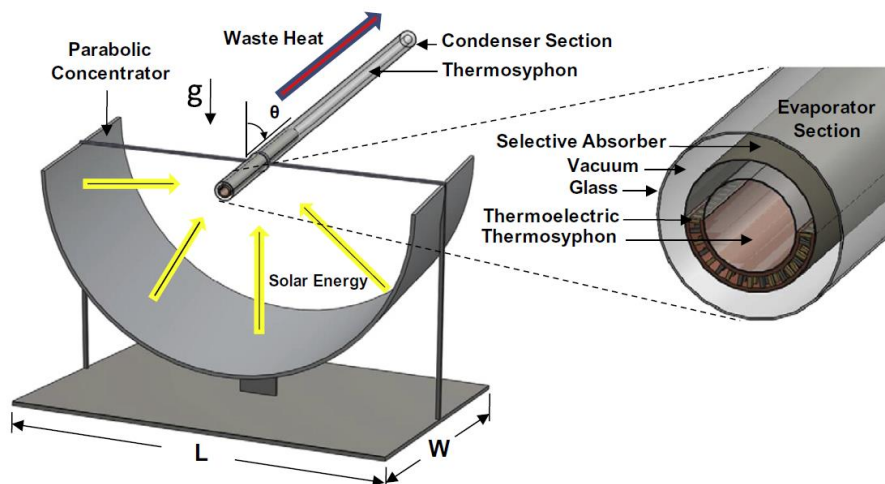


Figure 25 - Schéma de prototype de concentration cylindro-parabolique et refroidissement par fluide caloporteur

- Concentrateur parabolique et refroidissement par air

Une étude en 2010 [27] présente les résultats des tests effectués avec une concentration d'un facteur 669 grâce un concentrateur parabolique suivi d'une lentille de Fresnel. Le générateur thermoélectrique utilisé, composé de Bi_2Te_3 , a atteint 3% de rendement électrique. Par ailleurs, l'étude prétend qu'il est possible d'atteindre un rendement de 5,6% en utilisant une concentration d'un facteur 1209 et une nouvelle sorte de matériaux thermoélectriques.

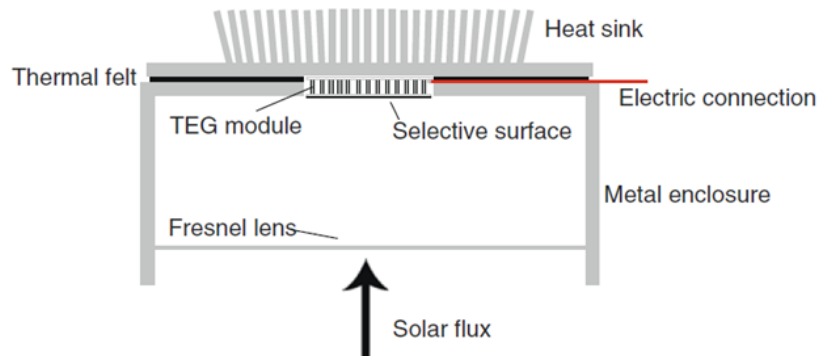


Figure 26 - Prototype avec concentration solaire parabolique suivie d'une lentille Fresnel. Refroidissement par air.

- Haute concentration et refroidissement par air

Une étude de 2012 [28] montre qu'il est possible d'atteindre des rendements électriques de 14,1% en amenant la partie chaude du générateur thermoélectrique à 1000°C. En estimant que les matériaux thermoélectriques vont continuer à s'améliorer ($ZT = 2$), des rendements de l'ordre de 25% pourront être atteints.

- Autres études et récapitulatif

Ci-dessous, un récapitulatif reprend les résultats de différentes études. Dans la plupart des cas, l'énergie thermique n'est pas récupérée. Le rendement électrique est noté $\eta_{\text{élec}}$ et le facteur de concentration optique ou thermique est noté C_{opt} ou C_{th} .

Auteur	Année	$\eta_{\text{élec}}$ [%]	Matériel thermoélectrique	Notes
Amatya [27]	2010	3	Bi_2Te_3	Expérimentale : $C_{\text{opt}} = 669$
Amatya [27]	2010	5,6	$(\text{InGaAs})_{1-x}(\text{InAlAs})_x$ et $(\text{AgSbTe})_x(\text{PbSnTe})_{1-x}$	Théorique : $C_{\text{opt}} = 1209$
Li [29]	2010	6,2	Bi_2Te_3	Théorique : $C_{\text{opt,th}} = 51$; $T_h = 524\text{ °C}$; $T_c = 330\text{ °C}$
Li [29]	2010	9,9	Skutterudite	Théorique : $C_{\text{opt,th}} = 242$; $T_h = 799\text{ °C}$; $T_c = 445\text{ °C}$
McEnaney [30]	2011	10	Skutterudite/bismuth telluride	Théorique : $C_{\text{opt}} = 45$
Fan [31]	2011	2,9	Bi_2Te_3	Expérimentale : $C_{\text{opt}} = 75$; $\Delta T = 109\text{ °C}$
Kraemer [32]	2012	5	Bi_2Te_3	Expérimentale : $C_{\text{th}} = 300$
Baranowski [28]	2012	14,1	Three-stage	Théorique : $T_h = 1000$
Baranowski [28]	2012	25	$ZT = 2$	Théorique : $T_h = 1500$

Tableau 3 - Récapitulatif des performances atteintes ou théoriques des rendements de conversion électrique par de la concentration solaire thermoélectrique.

Au cours de nos recherches, nous avons constaté que de nombreuses dispositions sont modélisées théoriquement, optimisées et testées. L'attrait pour les systèmes à concentration solaire thermoélectrique est en plein essor et les modèles pour estimer les performances de ceux-ci sont de plus en plus précis.

Notre travail s'insère dans cette tendance générale, avec cependant un accent plus prononcé dans l'élaboration concrète de telles solutions, notamment par la recherche de partenaires industriels.

5. Construction du démonstrateur

Dans cette section nous présentons les différents critères et étapes pour dimensionner et confectionner le démonstrateur. Cet historique tente surtout de montrer le travail et la logique qui a été suivie pour aboutir à ce prototype.

5.1. Objectifs du démonstrateur

Le principal objectif du démonstrateur est de démontrer la faisabilité du projet, en montrant de manière réelle les résultats obtenus. Par ailleurs, ces résultats expérimentaux peuvent être comparés aux calculs théoriques, permettant ainsi de valider ou non les hypothèses prises lors des estimations théoriques. Enfin, la construction d'un démonstrateur rentre dans la démarche de prototypage, démarche extrêmement importante en ce qui concerne les aspects entrepreneuriaux. Un prototype permet de crédibiliser le projet et permet aussi de se rendre compte rapidement des difficultés et ainsi de se focaliser sur les éléments à améliorer.

Lors de nos contacts avec des partenaires et des futurs clients, le prototype nous a fourni un réel avantage, sans lequel les partenaires auraient donné moins facilement leur confiance dans le projet.

5.2. Critères de dimensionnement

Plusieurs critères ont tout d'abord orienté le dimensionnement général : le démonstrateur devait être facilement transportable, relativement bon marché et être construit rapidement. Nous avons donc conçus l'entièreté du prototype avec des éléments simples.

Les deux éléments importants du démonstrateur sont le module thermoélectrique et le concentrateur solaire. Ces deux éléments doivent être sélectionnés simultanément puisque le but est d'atteindre une température chaude élevée mais qui ne dépasse cependant pas la température maximale du module thermoélectrique. Afin de mener le dimensionnement, nous avons utilisé le schéma ci-dessous, qui représente les flux de chaleur lorsque le démonstrateur est en régime :

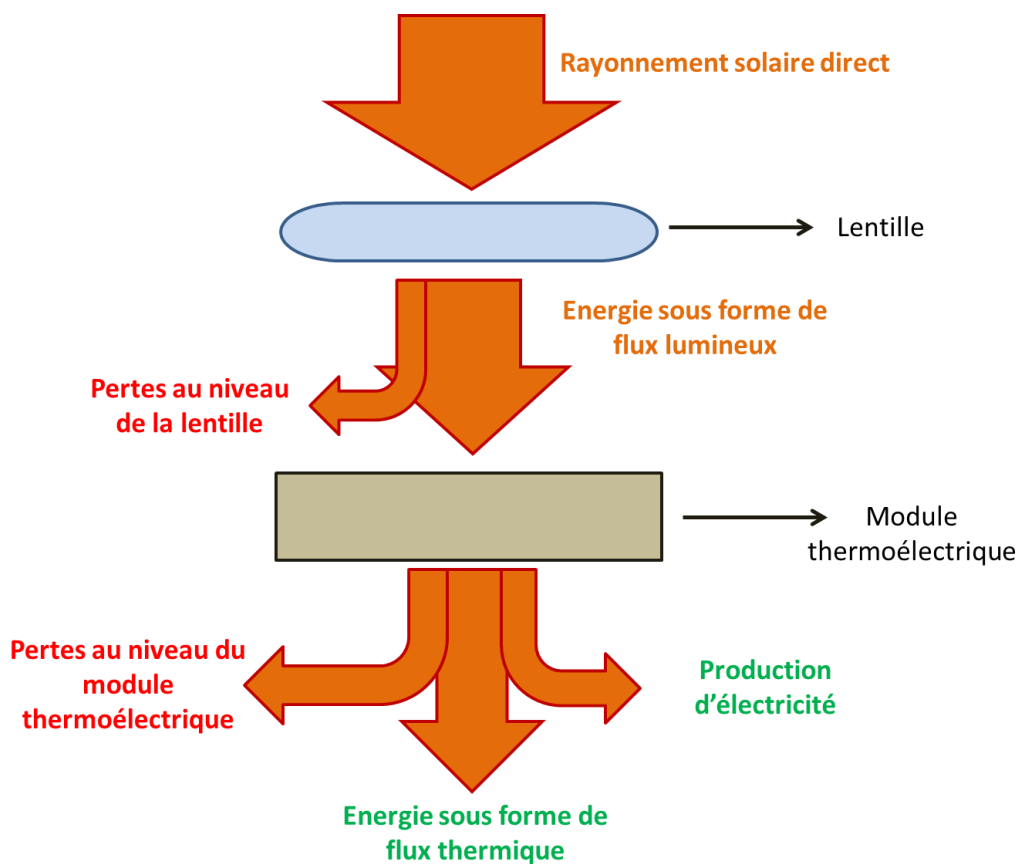


Figure 27 - Schéma de principe pour le dimensionnement

5.3. Données solaires utiles

Pour le dimensionnement du démonstrateur, il était important d'estimer la quantité de puissance qui est réceptionnée par le concentrateur solaire.

Ci-dessous sont reprises les données d'ensoleillement à Louvain-La-Neuve durant le mois de Mai disponibles sur le site <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis> (la table complète est également disponible en annexe) :

Heure	G	G _d	G _c	DNI	DNI _c	A	A _d	A _c
12 : 07	587	235	1000	345	812	588	237	999

Tableau 4 - Valeurs d'ensoleillement en Belgique durant le mois de Mai

G : Global irradiance on a fixed plane (W/m^2)

G_d : Diffuse irradiance on a fixed plane (W/m^2)

G_c : Global clear-sky irradiance on a fixed plane (W/m^2)

DNI : Direct normal irradiance (W/m^2)

DNI_c : Clear-sky direct normal irradiance (W/m^2)

A : Global irradiance on 2-axis tracking plane (W/m^2)

A_d : Diffuse irradiance on 2-axis tracking plane (W/m^2)

A_c : Global clear-sky irradiance on 2-axis tracking plane (W/m^2)

Etant donné que le concentrateur solaire ne concentre que le rayonnement direct, nous pouvons utiliser la valeur du DNI_c égale à 812 W/m^2 . La valeur du Direct Normal Irradiation (DNI) représente l'ensoleillement normal direct, c'est-à-dire la part du rayonnement solaire capté par une surface orientée perpendiculairement au rayon du soleil. L'indice 'c' représente l'irradiation pour un ciel serein (ciel dégagé).

5.4. Le concentrateur solaire

Pour le choix du concentrateur, il s'est avéré qu'une lentille de Fresnel était adéquate, tant au niveau pratique pour l'expérience, qu'au niveau du coût de cette dernière.

Nous avons donc trouvé deux fournisseurs qui semblaient fiables et qui proposait une lentille à un prix abordable :

Fournisseur	Dimensions [cm x cm]	Ouverture [m ²]	Puissance [W]
Green Power Science	91,44 x 68,58	0,627	458,21
Lentille de Fresnel	43,1 x 40,1	0,173	126,43

Tableau 5 - Lentilles de Fresnel disponibles

Pour calculer la puissance de chaque lentille, nous multiplions simplement l'ouverture par la puissance reçue du soleil qui est de 812W/m² (voir chapitre 2 : DNI_c), à laquelle nous retirons 10% (pertes par réflexion et réfraction) pour tenir compte uniquement de la transmission.

5.5. Le générateur thermoélectrique

Une fois la puissance lumineuse concentrée, il faut l'apporter au générateur. Pour ce faire, nous considérerons que les rayons du soleil sont concentrés sur une plaque de cuivre peinte en noire. Ensuite, par contact thermique, le flux de chaleur sera transmis de ce récepteur de chaleur vers le module thermoélectrique. Nous devons donc estimer les pertes au niveau du récepteur de chaleur, c'est à dire la plaque de cuivre peinte en noire. Nous avons considéré trois pertes principales :

- Pertes par réflexion
- Pertes par radiation
- Pertes par convection

Notons que nous ne considérons pas le transfert thermique par conduction comme une perte, puisque c'est ce dernier qui permet au module thermoélectrique de produire de l'énergie.

5.5.1. Pertes par réflexion

Le récepteur étant de couleur noir, nous considérons qu'il absorbe 90% du rayonnement, les 10% restants étant réfléchis [33].

5.5.2. Pertes par radiation

En ce qui concerne les pertes par radiation, nous les estimons en utilisant une relation simplifiée : un coefficient de radiation linéaire h_r [34]. Par souci de simplicité, nous considérerons ici une température constante du récepteur solaire, égale à 250°C, bien que cette température dépende de l'ensemble du système.

$$h_r = 4\sigma\varepsilon\overline{T}_h^3$$

Où

$\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$: La constante de Stefan – Boltzmann

$\varepsilon = 0,25$: Emissivité d'une plaque de cuivre peinte en noire [33]

$\overline{T}_h = 250 [^\circ C]$: La température moyenne du récepteur de chaleur

Nous obtenons donc :

$$h_r = 0,89 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

En considérant une surface de récepteur $S = 55 \times 55 \text{ mm}$, nous pouvons alors déterminer la perte totale par radiation en supposant une température du ciel $T_{sky} = 20^\circ C$ [34] :

$$q_r = S * h_r * (\overline{T}_h - T_{sky}) = 0,003025 * 0,89 * (250 - 20) = 0,62 \text{ W}$$

5.5.3. Pertes par convection

Pour déterminer les pertes par convection du récepteur, nous utilisons un coefficient de transfert thermique par convection [34] pour des applications extérieures :

$$h_w = 10 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Nous pouvons alors déterminer la perte totale par convection en supposant une température ambiante $T_{amb} = 20^\circ C$:

$$q_c = S * h_w * (\overline{T} - T_{amb}) = 0,003025 * 10 * (523 - 293) = 6,96 \text{ W}$$

5.5.4. Récapitulatif des pertes

Lentilles	Pertes par réflexion [W]	Pertes par radiation [W]	Pertes par convection [W]	Pertes totales [W]	Puissance transmise au module [W]
1 : Green Power Science	45,82	0,62	6,96	53,40	404,81
2 : Lentille de Fresnel	12,64	0,62	6,96	20,22	106,21

Tableau 6 - Récapitulatif des pertes par réflexion, radiation, convection pour les deux lentilles Fresnel

5.5.5. Sélection du module thermoélectrique

Après avoir estimé la puissance transmise au module thermoélectrique P [W], nous pouvons sélectionner le générateur thermoélectrique adéquat.

Au départ, il était question d'utiliser des modules peltier (module de refroidissement), ces modules thermoélectriques répandus pouvant également servir de générateur. Dans le tableau ci-dessous, les modules sont dénommés comme suit : $L \times l \times H_{mm}$ C2-L-X où L , l et H représentent respectivement la longueur, largeur et hauteur du module en mm, C2 est la gamme de module Cooler Tellurex et X est le numéro d'article.

Grâce aux informations présentes dans leur fiche technique (Cf. Annexe 4 Fiche technique module thermoélectrique) nous avons tout d'abord calculé leur conductance thermique K [W/K] [35]. Nous rappelons ici que le système est en régime, ce qui signifie que le flux de chaleur entrant par la face supérieure du module est égal au flux de chaleur sortant du module. Connaissant ce flux de chaleur, nous pouvons déterminer la différence de température aux bornes du module thermoélectrique ΔT [°C] = P / K .

Lentille	Puissance transmises au module	55x55x3,75mm C2-55-2812		50x50x4,3mm C2-50-1514		40x40x3,5mm C2-40-1509		40x40x3,8mm C2-40-1507		40x40x4,2mm C2-40-1504	
N°	P [W]	K	ΔT	K	ΔT	K	ΔT	K	ΔT	K	ΔT
1	404,21	1,93	209	1,18	344	0,77	529	0,56	719	0,39	1044
2	106,21		55		90		139		189		274

Tableau 7 - Calcul des résistances thermiques et de la différence de température aux bornes des modules Peltier.

Ce tableau nous montre qu'avec la gamme de modules disponibles, il est possible d'utiliser la petite lentille (N°2) en utilisant le module ayant la conductivité thermique la plus faible (0,39 [W/K] pour le module 40x40x4,2mm). Nous atteignons en effet une température de 274 °C, ce qui se rapproche assez bien des 250°C précédemment supposés.

Cependant, ces modules peltier ne peuvent normalement pas être utilisés au-delà d'une certaine température, à savoir pour ces modules environ 100°C. Le fournisseur propose donc des générateurs thermoélectriques pouvant monter jusqu'à 330°C. En revanche, les fiches techniques de ces générateurs ne donnent pas la possibilité de calculer la conductivité thermique de la même manière que pour les modules peltier.

Nous avons donc décidé de commander deux générateurs thermoélectriques possédant à peu près les mêmes dimensions géométriques, l'un plus grand, l'autre plus petit. En effet, nous supposons que la conductance serait à peu près équivalente : générateur thermoélectrique 30x30x4,3mm - et 56x56x4,8mm – G2-56-0375. Notons ici que G2 est la gamme Generator de Tellurex. Avec ces deux générateurs différents, il sera également possible d'effectuer deux séries de tests qui pourront être comparées.

5.6. Eléments du démonstrateur

5.6.1. Lentille et générateur

Voici les éléments réellement utilisés pour le prototype :

- Lentille Fresnel Ronde : Edmund Optics : Diamètre : 464 mm - Ouverture : 0,169m²
- Générateur thermoélectrique : Tellurex : 30x30x4,3 mm – G2-30-0313 (G)
- Générateur thermoélectrique : Tellurex : 56x56x4,8 mm – G2-56-0375 (p)

Les fiches techniques de ces trois éléments sont disponibles en annexes.

En ce qui concerne les deux générateurs thermoélectriques, nous les nommerons par la suite par la lettre « G » pour le grand module, et la lettre « p » pour le petit module.

5.6.2. Structure

En ce qui concerne la structure accueillant la lentille, les plans réalisés pour la conception sont présentés ci-dessous. La lentille est en fait insérée dans les rainures d'un cadre en aluminium. Ensuite, ce cadre est fixé par deux boulons sur deux montants, le cadre pouvant ainsi pivoter. Les deux montants en aluminium possèdent à leur base une plaque épaisse en aluminium, assurant ainsi la stabilité de l'ensemble.

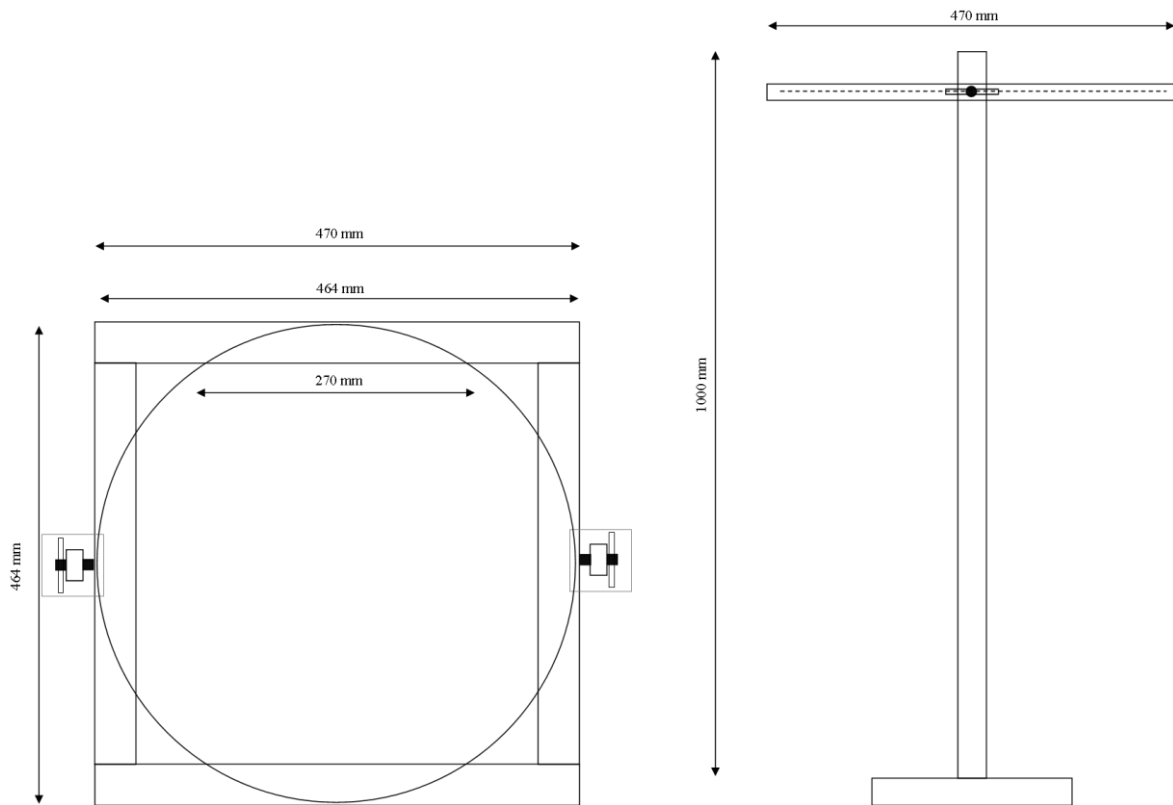


Figure 28 – Gauche : Plan du cadre accueillant la lentille – Droite : Plan d'ensemble du concentrateur solaire

6. Caractérisation des modules thermoélectriques

Dans cette partie plus expérimentale, nous caractérisons les modules thermoélectriques utilisés pour le démonstrateur. Les expériences sont en effet menées avec trois modules thermoélectriques différents. Deux modules Bi_2Te_3 commandés chez Tellurex et un module Fe_2VAl confectionné au sein du labo de l'UCL.

6.1. Banc de test des modules Bi_2Te_3

Les deux modules commandés chez Tellurex sont des générateurs thermoélectriques et ils disposent d'une fiche technique décrivant la puissance délivrée selon les températures chaudes « T_h » et froides « T_c ». Les résultats sont également fonction de la résistance de charge « load resistance : R_L ». Les fiches techniques de ces deux modules sont disponibles dans les annexes de la partie technique. Notons cependant que les fiches présentes en annexes (également disponibles sur le site internet de Tellurex) ont été mises à jour par rapport à celles reçues avec les modules. En effet, dans ces dernières, les hauteurs des modules ne sont pas les mêmes : elles sont de 4,3 mm pour le module G2-56-0375 et de 3,3 mm pour le module G2-30-0313. En mesurant les hauteurs des modules, nous avons trouvé des valeurs se situant entre les deux fiches techniques, nous utiliserons dès lors les fiches techniques mises à jour disponibles sur le site.

Les tests réalisés sur ces modules sont principalement conduits pour vérifier l'exactitude de ces fiches techniques et également mieux connaître les performances lors d'une expérience qui ne respecte pas les conditions optimales de tests (principalement un bon serrage du dispositif).

Ci-dessous, le schéma de principe illustre le montage de la partie thermoélectrique, avec d'une part la partie chauffante qui apporte l'énergie, d'autre part la partie refroidissante qui dissipe l'énergie en maintenant une température constante et enfin, entre ces deux parties, le module thermoélectrique par lequel circule un flux de chaleur.

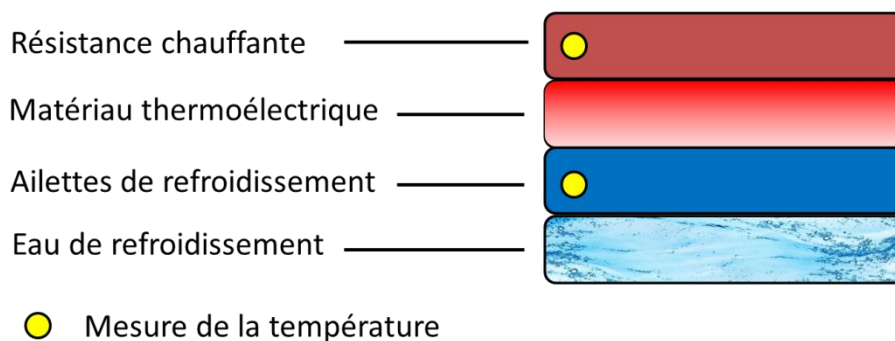


Figure 29 - Schéma de principe du test des modules thermoélectriques

En ce qui concerne la partie chauffante, nous avons utilisé une résistance chauffante alimentée par une source de courant de 9V et à 9A, ce qui donne une puissance délivrée de 81W.

En ce qui concerne la partie refroidissante, nous avons utilisé des ailettes de refroidissement sur lesquelles circule une eau à température ambiante d'environ 17°C.

Avant d'effectuer les mesures, il est important d'attendre que le système se mette à l'équilibre. En effet, le flux de chaleur apporté par la résistance chauffante fait monter en température la face supérieure du module thermoélectrique, tandis que les ailettes de refroidissement dissipent cette chaleur par la face inférieure du module. Lorsque ces deux températures T_h et T_c sont constantes, le flux de chaleur qui traverse le module sera également constant. Il est alors possible de relever toutes les mesures du système, à savoir : T_h , T_c , le courant traversant le module (I) et la tension aux bornes du module (V).

Ci-dessous, le schéma électrique représente le montage et les différents points de mesure.

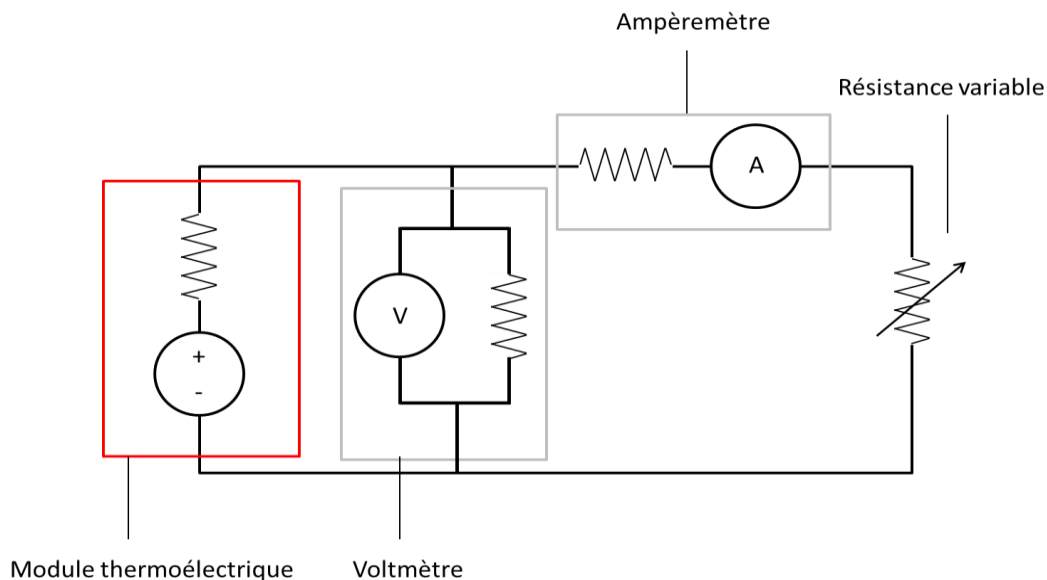


Figure 30 - Schéma électrique de la caractérisation des modules thermoélectriques

Sur le schéma électrique, on notera que le module thermoélectrique est modélisé par une source de tension ainsi qu'une résistance interne (R_i) qui est indiquée dans la fiche technique. L'ampèremètre est modélisé par une résistance interne qui sera déterminée lors de la mesure en court-circuit (point 4). Le voltmètre est modélisé par une résistance interne qui est relativement bien plus grande que les autres résistances, nous faisons dès lors l'hypothèse qu'aucun courant n'y circule. Enfin, la résistance variable permet de modifier la résistance de charge R_L . Cette résistance variable peut soit être infinie lors de la mesure en circuit ouvert (point 1), ou bien être nulle lors de la mesure en court-circuit (point 4). On notera que la résistance de charge R_L est simplement calculée avec la formule $V = RI$, ce qui correspond en fait à la résistance variable additionnée à la résistance interne de l'ampèremètre : $R_L = R_{var} + R_{amp}$.

Pour les caractérisations des deux modules, le mode opératoire est similaire :

- 1) Mesure de la tension à vide en circuit ouvert ($R_{\text{var}} = \infty \Omega$)
- 2) Mesure de la tension et du courant avec une résistance variable
- 3) Mesure de la tension et du courant avec une résistance de 1Ω ($R_{\text{var}} = 1 \Omega$)
- 4) Mesure de la tension et du courant en court-circuit ($R_{\text{var}} = 0 \Omega$)

6.2. Caractérisation du module G2-56-0375 (Grand module : G)

Durant cette série d'essais, la température chaude s'est maintenue à environ $T_h = 97,7^\circ\text{C}$ et la température froide à environ $T_c = 25,3^\circ\text{C}$. La différence de température aux bornes du module est donc d'environ $72,4^\circ\text{C}$.

Disposition	Voltage mesurée [V]	Courant mesuré [A]	Résistance de charge [Ω]
1) Circuit ouvert	1,70	0,00	∞
2) Résistance variable	1,53	0,12	12,75
	1,05	0,42	2,50
	0,74	0,57	1,30
3) Résistance 1Ω	0,58	0,54	1,07
4) Court-circuit	0,1	1,00	0,10

Tableau 8 - Tableau de mesure pour le module G : $T_h = 97,7^\circ\text{C}$; $T_c = 25,3^\circ\text{C}$

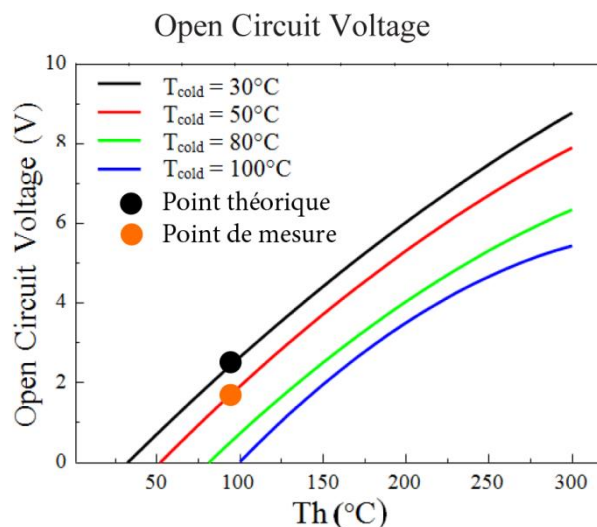


Figure 31 - Comparaison entre la fiche technique et la mesure expérimentale en circuit ouvert pour le module A

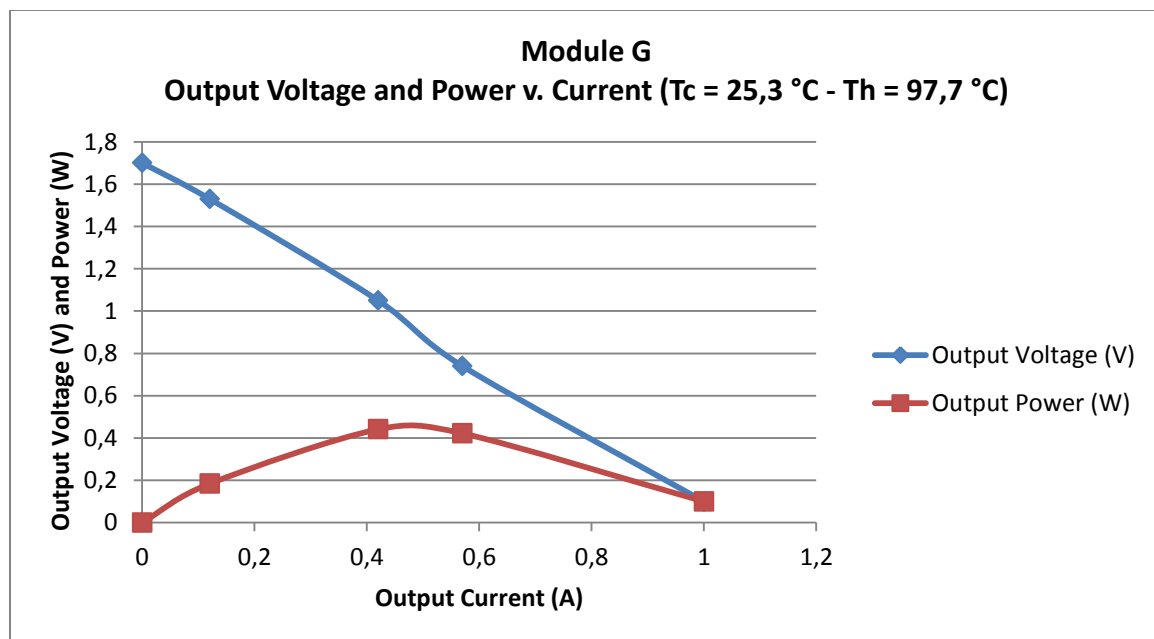
Nous plaçons le point de mesure avec $T_h = 97,7^\circ\text{C}$; $T_c = 25,3^\circ\text{C}$ et $V = 1,7 \text{ V}$ sur le graphique disponible dans la fiche technique pour les mesures en circuit ouvert pour le module G. On remarque que notre point de mesure se trouve en-dessous des caractéristiques données pour la courbe $T_c = 30^\circ\text{C}$ (courbe proche de $T_c = 25,3^\circ\text{C}$). En effet, dans la fiche technique, à cette différence de température la tension est d'environ $2,9 \text{ V}$ au lieu des $1,7 \text{ V}$ mesurés expérimentalement.

Cette différence, entre mesure expérimentale et fiche technique, peut en partie être expliquée avec l'inexactitude des mesures. Par exemple, les mesures de température du côté chaud et froid sont en réalité toujours sur- ou sous-estimées puisque les mesures sont prises au-delà des faces du module thermoélectrique, comme le suggère la Figure 29 - Schéma de principe du test des modules thermoélectriques à la page 39. Nous avons donc probablement une température T_h plus chaude et une température T_c plus froide que ce qui est réellement appliqué sur les faces du module. De plus, bien que la température froide soit relativement stable, la température chaude variait de 1 à 2 °C pendant l'expérience.

Par ailleurs, les fiches techniques couvrent une gamme de température allant de 30 à 300 °C, les mesures expérimentales sont donc à la limite inférieure de cette gamme de température. Nous pouvons penser que les caractéristiques dans les fiches techniques ont probablement été lissées et extrapolées pour les extrémités de cette gamme de température, fournissant dès lors une moins grande précision comparée à des caractéristiques prises au milieu de la gamme.

Enfin, les valeurs données dans les fiches techniques sont mesurées dans des conditions idéales, notamment avec un serrage adéquat qui améliore les contacts thermiques entre la source de chaleur, le module et le puits de chaleur. Le meilleur échange thermique qui en résulte améliore significativement les performances.

Ci-dessous les résultats des mesures avec les dispositions 1 (en circuit ouvert), 2 (lorsque la résistance varie) et 4 (en court-circuit) sont présentées. On observe une courbe de puissance tout à fait classique, avec un sommet à environ 0,5 W. A titre de comparaison, la fiche technique spécifie une puissance de 16,2 W lorsque $T_h = 300$ °C et $T_c = 30$ °C. Enfin, à titre informatif, comparé au 81W dissipés dans la résistance chauffante, le rendement du système est de 0,62%.



La mesure effectuée avec la résistance de 1 Ω (disposition 3) ne colle pas avec les autres mesures expérimentales, c'est pourquoi elle a été écartée. En plus de nous donner le point tout à droite, la disposition 4 nous donne par ailleurs une valeur d'environ 0,1 Ω pour la résistance de l'ampèremètre : $R_{amp} = 0,1 \Omega$.

6.3. Caractérisation du module G2-30-0313 (petit module : p)

Durant cette série d'essais, la température chaude s'est maintenue à environ $T_h = 129,3 \text{ }^\circ\text{C}$ et la température froide à environ $T_c = 21,7^\circ\text{C}$. La différence de température aux bornes du module est donc d'environ $107,6 \text{ }^\circ\text{C}$.

Disposition	Voltage mesurée [V]	Courant mesuré [A]	Résistance de charge [Ω]
1) Circuit ouvert	2,77	0,00	∞
2) Résistance variable	1,79	0,14	12,78
	1,40	0,20	7,00
	1,00	0,26	3,85
	0,85	0,29	2,93
	0,54	0,33	1,64
	0,24	0,39	0,62
3) Résistance 1 Ω	0,40	0,36	1,11
4) Court-circuit	0,04	0,41	0,10

Tableau 9 - Tableau de mesure pour le module p : $T_h = 129,3 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_c = 21,7 \text{ }^\circ\text{C}$

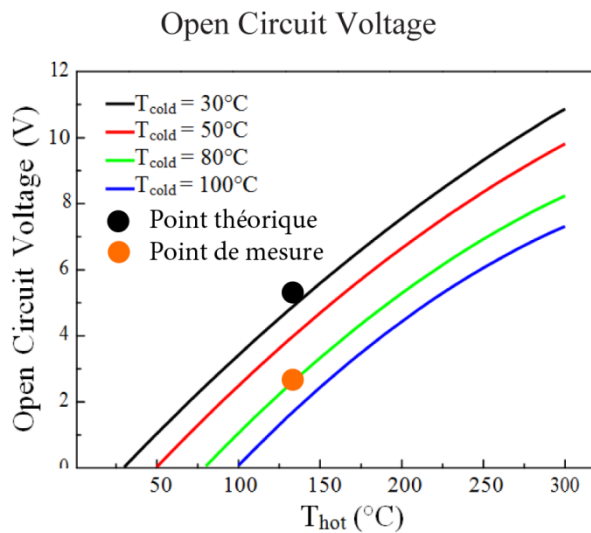


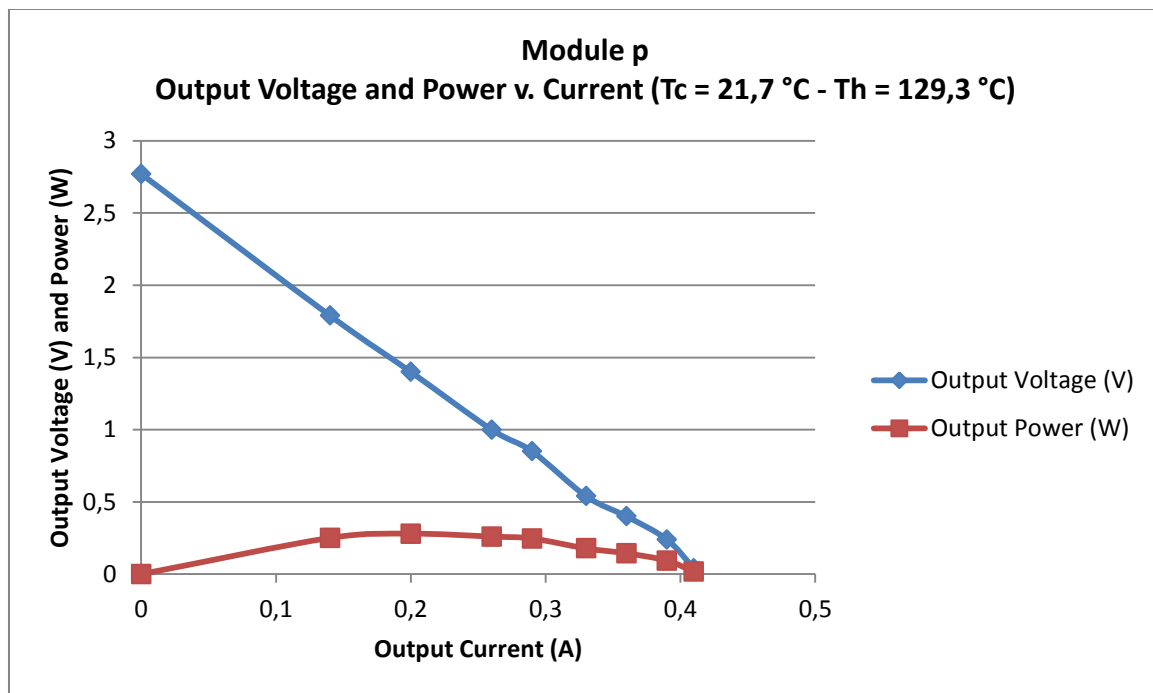
Figure 32 - Comparaison entre la fiche technique et la mesure expérimentale en circuit ouvert pour le module B

Nous plaçons le point de mesure avec $T_h = 129,3 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_c = 21,7 \text{ }^\circ\text{C}$ et $V = 2,77 \text{ V}$ sur le graphique disponible dans la fiche technique pour les mesures en circuit ouvert pour le module p. A nouveau, le point de mesure se trouve en-dessous des caractéristiques données (en imaginant le point d'intersection avec $T_h = 129,3 \text{ }^\circ\text{C}$ et $T_c = 21,7^\circ\text{C}$ qui est une courbe parallèle et légèrement plus que la courbe $T_c = 30^\circ\text{C}$). Le point de mesure théorique, à cette

différence de température, devrait alors être d'environ 5 V au lieu des 2,77 V mesurés expérimentalement.

La différence entre la performance expérimentale et la fiche technique peut également être expliquée par le manque de précision des mesures expérimentales et le manque de précision de la fiche technique. De plus, avec la plus petite taille du module, les échanges thermiques sont certainement moins homogènes, ce qui fausse davantage les mesures en températures.

Ci-dessous, les résultats des mesures avec les dispositions 1 (en circuit ouvert), 2 (lorsque la résistance varie), 3 (avec une résistance de 1 Ω) et 4 (en court-circuit). Cette fois-ci, la courbe de puissance ne possède pas un maximum très marqué, avec un sommet à environ 0,3 W. A titre de comparaison, la fiche technique spécifie une puissance de 5,4 W lorsque $T_h = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $T_c = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Enfin, à titre informatif, comparé au 81W dissipés dans la résistance chauffante, le rendement du système est de 0,37%.



Cette fois-ci la mesure effectuée avec la disposition 3 coïncident très bien avec les autres résultats. En ce qui concerne la disposition 4, la mesure donne à nouveau une valeur d'environ 0,1 Ω pour la résistance de l'ampèremètre : $R_{amp} = 0,1\text{ }\Omega$.

6.4. Estimation des résistances thermiques

Afin d'estimer les résistances thermiques des modules, nous considérerons que toute l'énergie de la résistance chauffante est dissipée via le module thermoélectrique, à savoir 81 W. En effet, la résistance chauffante était entourée d'isolant lors de l'expérimentation.

La résistance thermique R_{th} peut être estimée comme suit :

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{Q}$$

Avec

ΔT : La différence de température au borne du module thermoélectrique

$Q = 81 \text{ [W]}$: Le flux de chaleur traversant le module thermoélectrique

Module	$\Delta T \text{ [}^\circ\text{C]}$	$R_{th} \text{ [}^\circ\text{C/W]}$
Module G (56x56mm)	72,4	0,89
Module p (30x30mm)	107,6	1,33

Tableau 10 - Mesures expérimentales des résistance thermiques des modules thermoélectriques

6.5. Conclusion des caractérisations des modules

Cette série d'expériences nous a montré qu'aux températures étudiées, les performances expérimentales en termes de courant et tension se trouvent en-dessous des caractéristiques présentes dans les fiches techniques. Lors des tests avec le démonstrateur, nous aurons ainsi une meilleure appréciation des résultats trouvés, puisque les conditions de tests seront assez similaires.

7. Test du démonstrateur

Dans cette section nous présenterons tout d'abord la mise en place du banc de test avec une description de l'ensemble des éléments, ensuite les résultats avec leur analyse et enfin, une discussion sur les pistes d'amélioration possibles.

7.1. Mise en place du banc de test

Les tests réalisés avec le démonstrateur sont sensiblement similaires aux tests réalisés lors de la caractérisation des modules thermoélectriques. Cependant, les principales différences résident d'une part, dans l'apport de chaleur qui s'effectue dans ce cas avec la lentille Fresnel au lieu de la résistance chauffante, et d'autre part, dans le refroidissement qui s'effectue avec une boîte à eau plutôt que les ailettes de refroidissement. Par ailleurs, pour le démonstrateur, les mesures de températures ont été prises sur les plaques de cuivre supplémentaires positionnées de part et d'autre du module thermoélectrique, avec des sondes de températures sans gaine. En revanche, ce sont des sondes de type coaxial qui ont été utilisées lors de la caractérisation des modules thermoélectriques. Les mesures de températures n'étant donc pas similaires, on peut s'attendre à des différences notoires comme nous le verrons dans l'analyse des résultats.

7.1.1. Disposition du banc de test

Le banc de test est constitué de trois éléments principaux :

- 1) Le concentrateur solaire (lentille de Fresnel)
- 2) Le récepteur de chaleur et le générateur thermoélectrique
- 3) Le refroidisseur

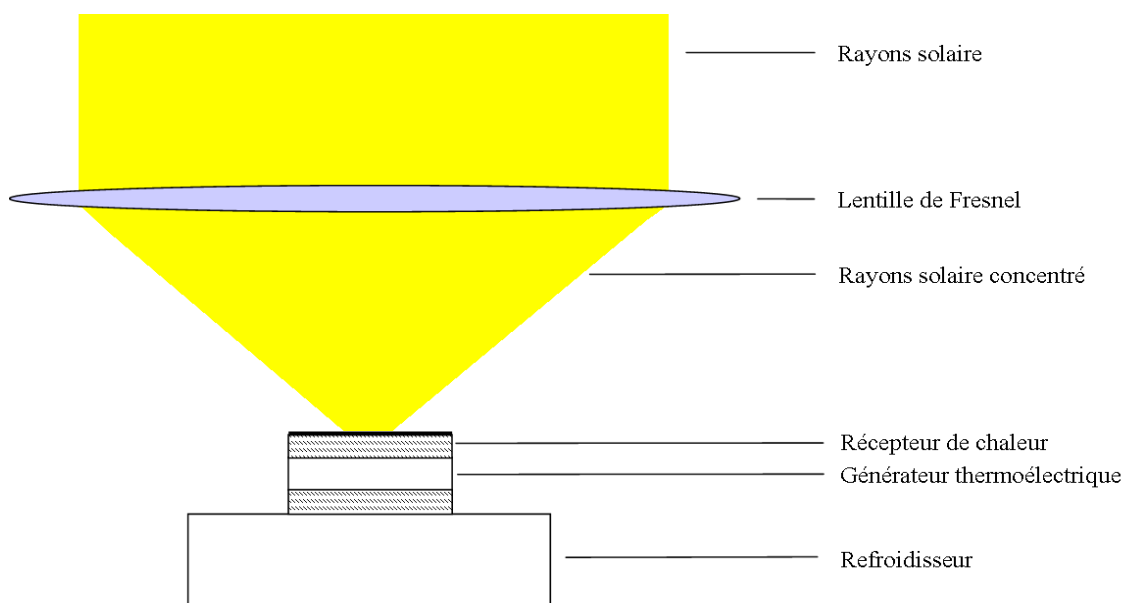


Figure 33 - Schéma général du banc de test, vue en coupe

Ci-dessus, le schéma de principe du banc de test en vue en coupe est présenté. La figure ci-dessous présente une photographie du banc de test lors du premier jour d'essai. On peut y observer les trois éléments principaux : le concentrateur solaire, les parties 'récepteur de chaleur' et 'générateur thermoélectrique' et enfin le système de refroidissement. Par ailleurs, sur la partie supérieure du chariot se trouve l'appareillage de mesure, composé de trois sondes de température avec affichage numérique (T_h , T_c , T_{eau}), un générateur de courant/tension pour l'alimentation de la pompe, un multimètre servant à mesurer la tension générée par le module thermoélectrique (V_{OC}) et un luxmètre.

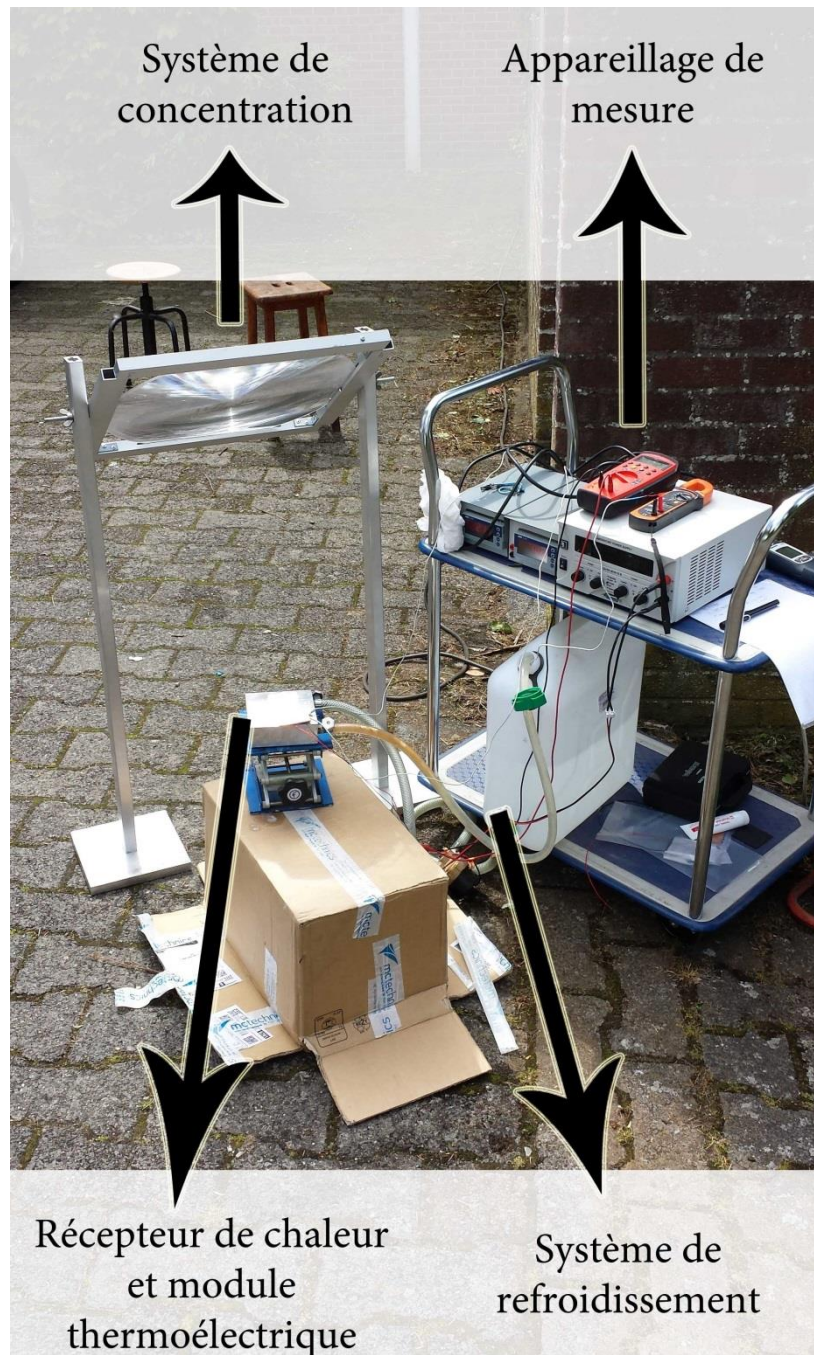


Figure 34 - Photographie du banc de test

Ci-dessous, un second schéma général représente en vue de haut, les parties 'récepteur et module thermoélectrique' et le système de refroidissement. La température de l'eau de refroidissement est prise à l'intérieur du réservoir d'eau, on la note T_{eau} .

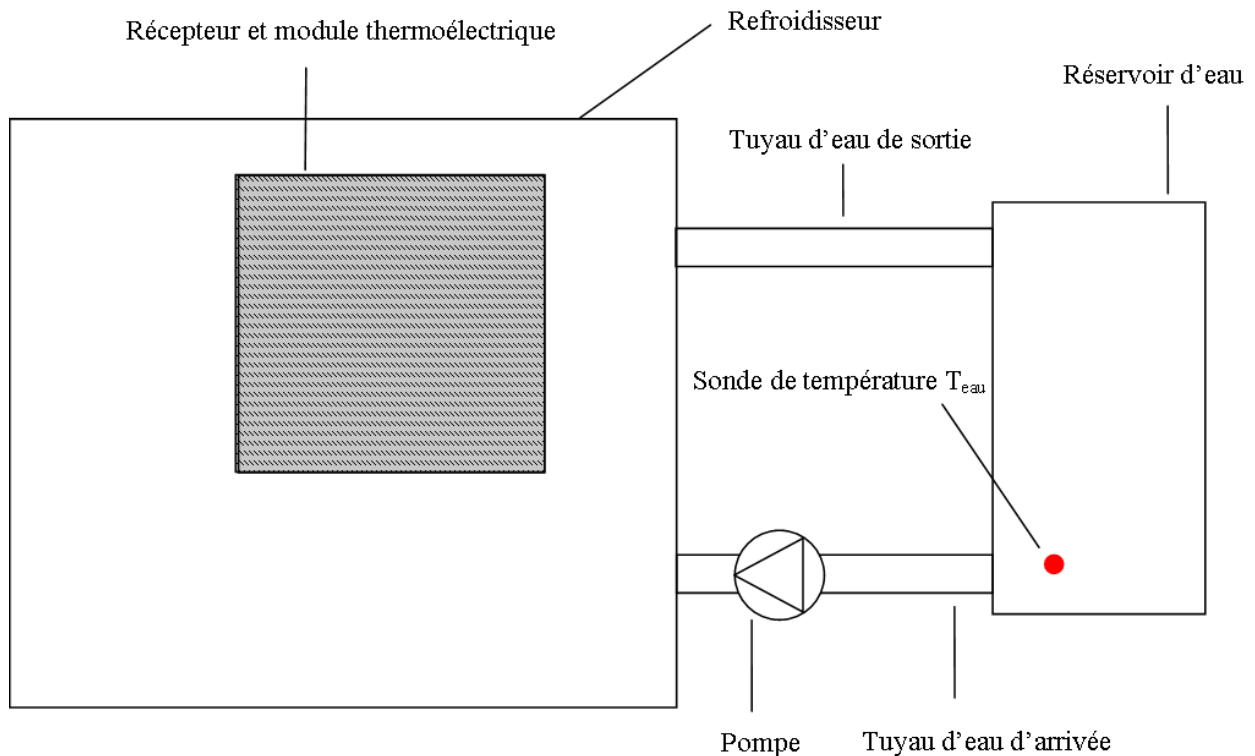


Figure 35 - Schéma de principe du banc de test, vue en plan

Enfin, ci-dessous, deux derniers schémas représentent le détail du récepteur de chaleur et le générateur thermoélectrique. On notera que le récepteur de chaleur est composé d'une plaque de cuivre. Les deux sondes de températures mesurent la température du côté chaud et du côté froid du générateur. Le premier schéma représente la disposition lorsque le module thermoélectrique est entouré de deux plaques de cuivre : une plaque de cuivre du côté chaud, et une plaque de cuivre du côté froid. Dans cette disposition, les mesures de température sont respectivement appelée T_h et T_{C2} .

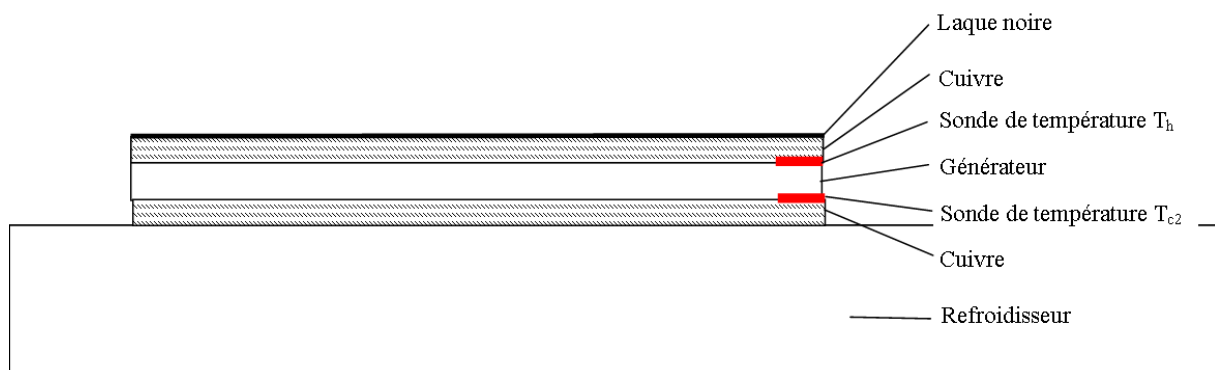


Figure 36 – Disposition NGC : Schéma du récepteur de chaleur avec peinture noire réfractaire (N), le grand module thermoélectrique (G) et une plaque de cuivre du côté froid (C).

Le second schéma représente la disposition du banc de test lorsqu'aucune plaque de cuivre n'est disposée du côté froid, c'est-à-dire sous le générateur thermoélectrique. Dans cette disposition, les mesures de température se dénomment : T_h pour le côté chaud, et T_{C1} pour le côté froid. Egalement, le dispositif ne comporte pas de peinture noire sur la plaque de cuivre. Nous avons donc deux paramètres variables pour effectuer différentes dispositions : la présence ou non de peinture noire, la présence ou non de plaque de cuivre du côté froid.

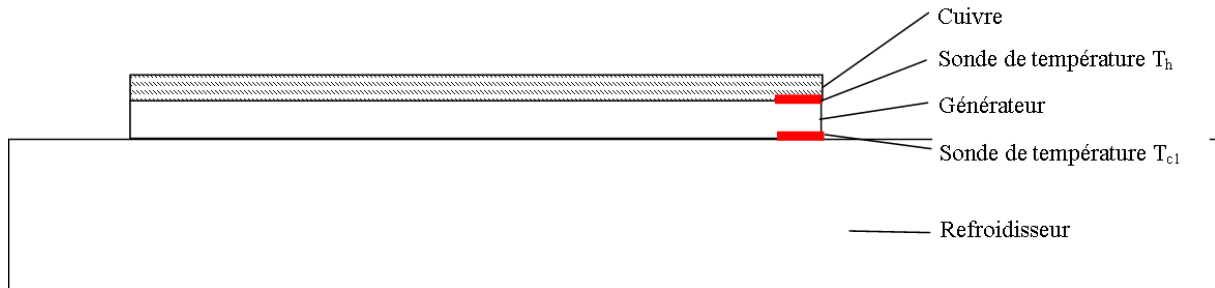


Figure 37 – Disposition CG/ : Schéma du récepteur de chaleur avec une plaque de cuivre sans peinture (C), le grand module (G) et sans plaque de cuivre du côté froid (/)

Afin de simplifier la dénomination des différentes dispositions, nous leur attribuons un jeu de trois caractères :

- 1) Le premier caractère représente l'absorbeur : soit la lettre « N » lorsque l'absorbeur est peint en noir ou la lettre « C » lorsque l'absorbeur est une simple plaque de cuivre.
- 2) Le deuxième caractère représente le module : soit la lettre « G » pour le grand module, soit la lettre « p » pour le petit module, soit la lettre « F » pour le module Fe_2VAl .
- 3) Le troisième caractère représente la face inférieure du module : soit la lettre « C » lorsque qu'il y a une plaque de cuivre du côté froid, soit le caractère « / » lorsqu'il n'y a pas de plaque de cuivre du côté froid.

Exemple dénomination	1) Présence de peinture noire	2) Module	3) Présence d'une plaque de cuivre du côté froid
NGC	Oui : N	Grand : G	Oui : C
Cp/	Non : C	Petit : p	Non : /
NF/	Oui : N	Fe_2VAl : F	Non : /

Tableau 11 - Tableau récapitulatif des différentes dispositions de tests

Ci-dessous, un récapitulatif des dénominations pour les différentes mesures :

Dénomination	Descriptif
T_h	Température du côté chaud du générateur
T_{C1}	Température du côté froid contre le refroidisseur
T_{C2}	Température du côté froid contre la plaque de cuivre
T_{eau}	Température du réservoir d'eau
V_{OC}	Tension en circuit ouvert générée par le générateur thermoélectrique

Tableau 12 - Tableau récapitulatif des acronymes pour les mesures

7.2. Les différents éléments du banc de test

7.2.1. Le concentrateur solaire

Le concentrateur solaire, déjà présenté précédemment, est principalement constitué d'une lentille de Fresnel utilisée pour concentrer les rayons du soleil sur le récepteur de chaleur. La plus grande difficulté est de maintenir la surface de la lentille perpendiculairement au rayonnement solaire. Pour ce faire, l'axe de rotation horizontale fut fort utile pour s'orienter précisément sur la hauteur du soleil. En effet, en modifiant l'inclinaison de la lentille, les contours du spot lumineux sont également modifiés. Il est donc aisé d'ajuster cette inclinaison jusqu'à obtenir un spot lumineux tout à fait net et de forme circulaire.

Notons que lorsque l'inclinaison de la lentille se modifie, la distance horizontale entre le concentrateur et le point focal se modifie également (voir Figure 39, page 51). Cette distance horizontale peut être ajustée avec la position du récepteur solaire, lui-même reposant sur un statif de chimie facilement déplaçable. En revanche, en ce qui concerne l'orientation de l'axe vertical, le réglage en azimuth est bien plus délicat à réaliser. Il est en effet nécessaire de bouger l'ensemble du concentrateur, opération difficilement précise puisque les deux montants principaux ne sont pas rigides entre eux.

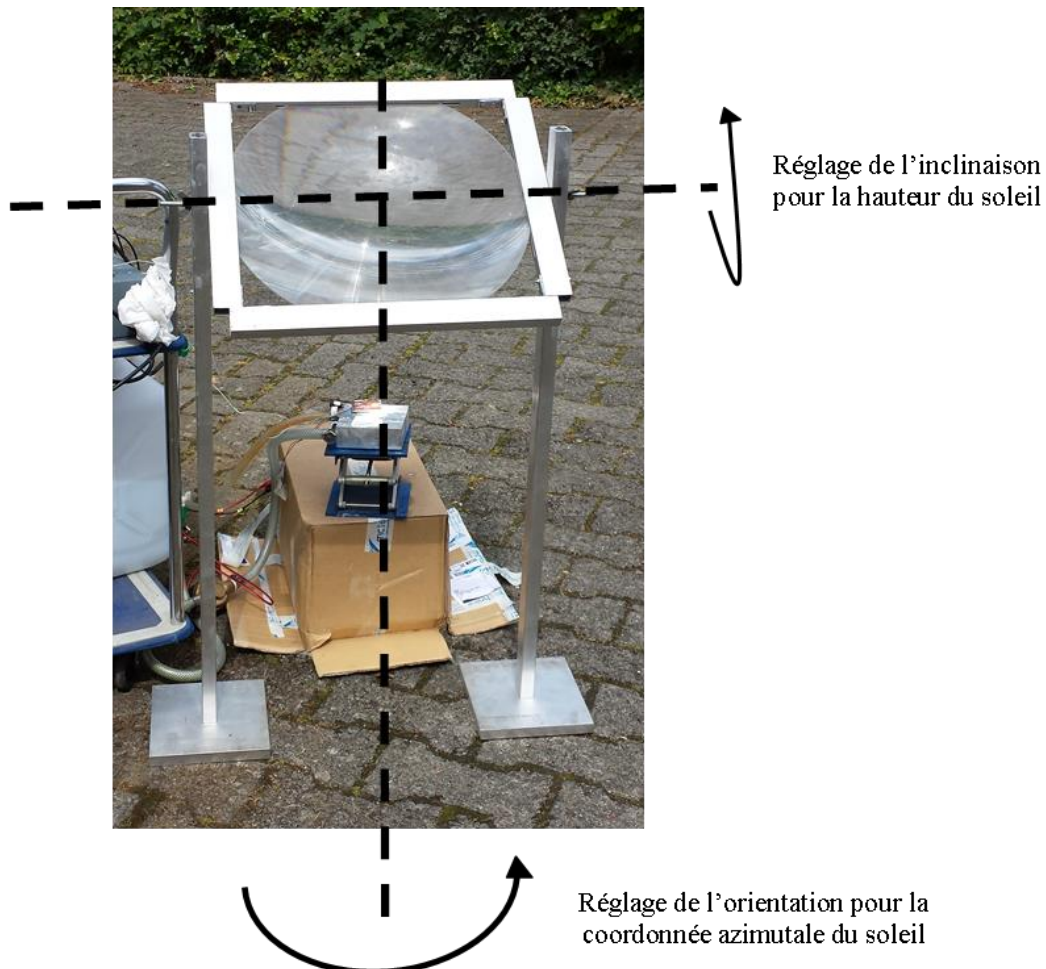


Figure 38 - Régler de l'inclinaison et de l'orientation du concentrateur solaire

Enfin, les deux derniers paramètres à régler est la hauteur et la distance horizontale du récepteur de chaleur par rapport à la lentille. En effet, l'absorbeur doit se trouver à l'emplacement du point focal de la lentille. La distance focale constante de 61 cm se situe sur la médiatrice du plan de la lentille, l'orientation de cette droite varie cependant en fonction de la hauteur du soleil. Il faut donc régulièrement adapter la hauteur de l'absorbeur solaire en fonction de l'inclinaison de la lentille comme l'illustre le schéma ci-dessous. Pour ce faire, nous disposons d'un statif de chimie à hauteur réglable. En ce qui concerne la distance horizontale, nous pouvons facilement déplacer le statif de chimie qui était lui-même déposé sur une caisse en carton.

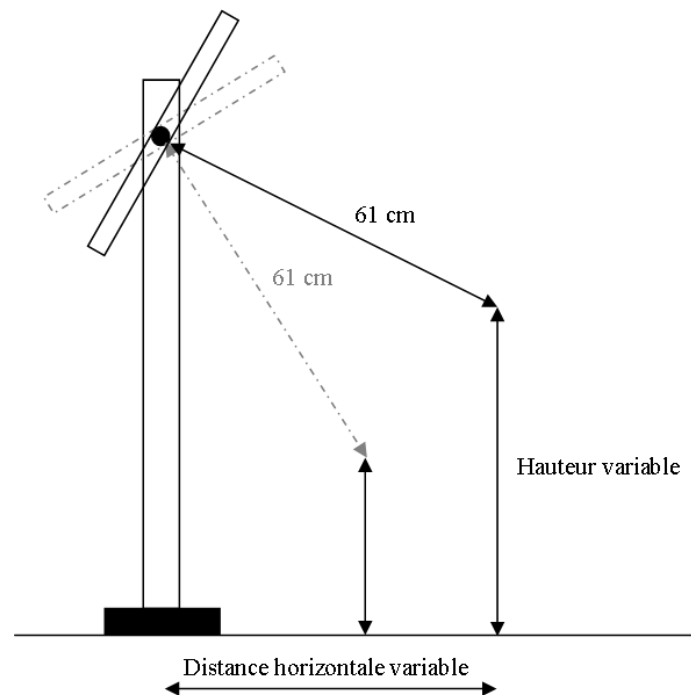


Figure 39 - Modification de la hauteur et de la distance horizontale du point focal en fonction de l'inclinaison

7.2.2. L'absorbeur de chaleur

L'absorbeur ou récepteur de chaleur est constitué d'une plaque de cuivre carrée de 55mm de côté et de 3mm d'épaisseur. Nous avons décidé d'utiliser deux types de plaque de cuivre différentes : soit avec une peinture noire réfractaire² (N), soit sans peinture (C). Les dimensions de ces plaques de cuivre réceptrices de chaleur correspondent en fait aux dimensions du grand module thermoélectrique (Module G : 56x56mm). Bien que le point focal n'excède pas 20mm de diamètre, le fait d'avoir des relativement grandes plaques de cuivre fut d'une grande utilité. En effet, malgré les calibrations très régulières du point focal, autant la taille du spot que son emplacement sur le récepteur se modifiaient rapidement. La petite taille du spot par rapport au récepteur nous laissait alors une bonne marge de manœuvre.

² <https://www.gamma.be/fr/assortiment/hammerite-laque-pour-metal-refractaire-noir-400ml/p/B461192>

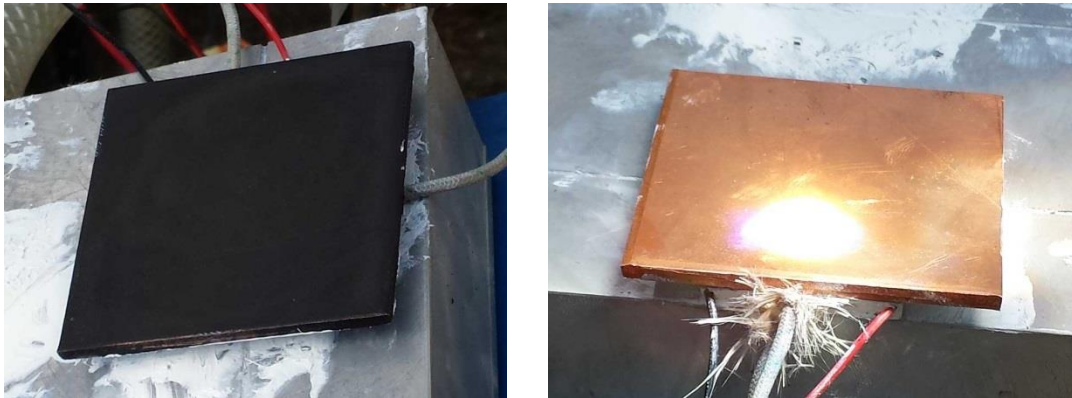


Figure 40 – Les deux types d'absorbeur de chaleur. Gauche : Plaque de cuivre avec couche de peinture noire réfractaire (N). Droite : Plaque de cuivre simple (C)

7.2.3. Le générateur thermoélectrique

En ce qui concerne le générateur thermoélectrique, nous avons à disposition trois différents modules. Les deux premiers sont des générateurs issus du commerce (fournisseur Tellurex) et ont fait l'objet d'une caractérisation au chapitre précédent. Le troisième générateur est constitué de matériau Fe_2VAl et a été assemblé au laboratoire de l'UCL. Pour assurer le bon contact thermique entre le générateur et les plaques de cuivre, nous avons utilisé une pâte thermique, comme illustrée ci-dessous.



Figure 41 - Générateur thermoélectrique et plaque de cuivre enduit de pâte thermique

Pour rappel, afin de faciliter la dénomination des différents modules thermoélectriques, nous leur attribuons les lettres suivantes :

Dénomination	Description
p : petit module	Module Tellurex 30x30x4,3mm : G2-30-0313
G : Grand module	Module Tellurex 56x56x4,8mm : G2-56-0375
F : Module Fe_2VAl	Module Fe_2VAl

Tableau 13 - Dénomination des générateurs thermoélectriques

7.2.4. Le système de refroidissement

Le refroidisseur est composé d'une boîte à eau en aluminium, laquelle est parcourue en son intérieur par des serpentins. La circulation d'eau était assurée par un circulateur lui-même raccordé à un réservoir d'environ 10 L. Une sonde de température relevait la température de ce réservoir d'eau T_{eau} .



Figure 42 – De bas en haut : Récepteur et module thermoélectrique, boîte à eau et statif de chimie réglable

7.3. Résultats obtenus

7.3.1. Premier jour de tests

Le premier test s'est déroulé le jeudi 15 mai 2014 entre 12h et 14h30, par une météo variable, avec de nombreuses éclaircies mais ne dépassant jamais les 3 à 4 min d'ensoleillement direct. Lorsque l'ensoleillement était direct, nous mesurons 54 645 Lux, tandis que lorsque le soleil était obstrué par un nuage nous mesurons des puissances lumineuses aux alentours de 18 000 Lux. Rappelons ici que la lumière diffuse ne peut pas être concentrée, le récepteur solaire montait donc en température uniquement lors des éclaircies.

Ce jour-là, deux dispositions du banc de test ont été réalisées. La première disposition se compose de l'absorbeur en cuivre simple (C) tandis que la deuxième disposition se compose de l'absorbeur peint en noir (N). Dans les deux cas, c'est le petit module thermoélectrique qui est employé (p), sans plaque de cuivre du côté froid (/). Ci-dessous, le tableau de mesures pour ces deux dispositions :

Disposition	Heure	T_h [°C]	T_{cl} [°C]	T_{eau} [°C]	V_{oc} [V]
Cp/	12h	120	24	24	1,8
Np/	14h	250	54,5	25	4,5

Tableau 14 - Mesures obtenues le premier jour de tests.

Etant donné que les éclaircies furent à chaque fois de courte durée, les températures n'ont pas eu le temps de se stabiliser. Cependant, nous avons pu clairement observer l'effet très bénéfique de la peinture noire sur le récepteur de chaleur. En effet, la montée en température fut bien plus rapide grâce à une meilleure absorption.

Cette première série de tests nous a surtout permis de nous familiariser avec le banc de test. En effet, le dispositif requiert une constante adaptation, précise et délicate car les sondes de température ne peuvent pas être bousculées, puisqu'elles sont simplement coincées entre le générateur et les plaques de cuivre ou le refroidisseur.

7.3.2. Deuxième jour de tests

Le deuxième jour de tests s'est déroulé le vendredi 16 mai 2014 entre 9h et 13h, par une météo ensoleillée. Lorsque l'ensoleillement était direct, nous mesurons 54 645 Lux, sauf en tout début de journée où nous avons mesuré 53 365 Lux (vers 9h du matin). Lors de ces tests, les températures du récepteur ont eu le temps de se "stabiliser" en atteignant une température maximale, même si comme on le verra plus loin, de nombreux paramètres empêchaient d'atteindre une température constante.

Les tests conduits ont débuté avec une plaque de cuivre peinte en noir pour le récepteur (N), avec le grand module du commerce (G) et une plaque de cuivre du côté froid (C), c'est-à-dire la disposition NGC. Ne disposant que de deux sondes de température, nous avons donc effectué trois essais pour mesurer trois couples de température (T_h , T_{c1} , T_{c2})

N°	Disposition	Heure	T_h [°C]	T_{c1} [°C]	T_{c2} [°C]	T_{eau} [°C]	V_{oc} [V]
1	NGC	9h30	-	36,7	62,5	23	1,78
2	NGC	9h40	133	-	50,6	24	1,85
3	NGC	9h50	124	36,0	-	25	1,74

Tableau 15 - Mesures obtenues le deuxième jour de tests : tests 1, 2 et 3

Une deuxième série de tests a ensuite été effectuée en retirant la plaque de cuivre du côté froid (/). Le test N°5, en disposition NG/, a consisté à mesurer la température du récepteur (T_h) en deux endroits différents, afin de voir la répartition de chaleur sur celui-ci. Le test N°6 a été effectué avec le récepteur sans peinture noire (C), c'est-à-dire en disposition CG/.

N°	Disposition	Heure	T_h [°C]	T_{c1} [°C]	T_{eau} [°C]	V_{oc} [V]
4	NG/	10h00	125	33,9	27	1,72
5	NG/	10h10	139 / 101	-	27	1,70
6	CG/	10h20	70	33,8	28	0,945

Tableau 16 - Mesures obtenues le deuxième jour de tests : tests 4, 5 et 6

Ensuite, pour le petit module issu du commerce (module p), nous avons effectué la même série de tests, excepté la mesure de température en deux endroits différents sur le récepteur. En effet, la taille du module thermoélectrique – plus petite que le récepteur de chaleur – rendait cette mesure impossible à réaliser.

N°	Disposition	Heure	T _h [°C]	T _{c1} [°C]	T _{c2} [°C]	T _{eau} [°C]	V _{oc} [V]
1bis	NpC	11h20	-	42	66	28	2,42
2bis	NpC	11h30	177	-	61,5	29	2,78
3bis	NpC	11h50	215	36,0	-	29	3,80

Tableau 17 - Mesures obtenues le deuxième jour de tests : test 1bis, 2bis et 3bis

N°	Disposition	Heure	T _h [°C]	T _{c1} [°C]	T _{eau} [°C]	V _{oc} [V]
4bis	Np/	12h30	260	35,7	31	3,60
6bis	Cp/	12h50	144	35,3	31	2,98

Tableau 18 - Mesures obtenues le deuxième jour de tests : test 4bis et 6bis

Nous avons également effectué un test avec le module en Fe₂Val (module F).

N°	Disposition	Heure	T _h [°C]	T _{c1} [°C]	T _{eau} [°C]	V _{oc} [V]
7	NF/	10h40	237	46,3	28	0,0148

7.4. Paramètres variables

Un des premières observations à tirer est la non-concordance entre les tests pour une même disposition. En effet, les dispositions NGC et NpC ont été répétées toutes deux à trois reprises (tests 1, 2, 3 et 1bis, 2bis, 3bis) et les résultats obtenus ne coïncident pas, surtout pour la disposition NpC où T_h a été mesuré une fois à 177°C et une autre fois à 215°C, alors que la disposition était pourtant identique.

De telles différences peuvent-être expliquées par de nombreux paramètres variables :

- La vitesse du vent
- Le contact thermique
- La position du spot de lumière
- Le refroidisseur
- L'apport de chaleur

7.4.1. La vitesse du vent

La vitesse du vent est un paramètre essentiel, surtout lorsque le récepteur se trouve à haute température. Cette observation a pu être vérifiée à de nombreuses reprises, en effet, nous étions très attentifs pour observer la stabilisation de la température, nous suivions donc de près la température du récepteur (T_h). Lorsque le vent soufflait nous pouvions apercevoir instantanément soit une décélération de la montée en température, soit un abaissement de la température.

7.4.2. Le contact thermique

Les contacts thermiques sont également un critère essentiel. Ceux-ci pouvaient varier de manière sensible, puisqu'à chaque changement de disposition, les plaques de cuivre et les sondes sont positionnées autrement. Cela signifie donc une quantité et une répartition différente de pâte thermique, et également, un écartement plus ou moins grand en fonction de la position de la sonde, qui possède une certaine épaisseur. Lorsque l'on appliquait une pression sur l'ensemble du dispositif, nous pouvions clairement observer une diminution en température de la sonde mesurant le côté froid et une augmentation de la température pour la sonde mesurant le côté chaud. Les sondes ayant un meilleur contact thermique se rapprochaient alors plus de la température réelle.

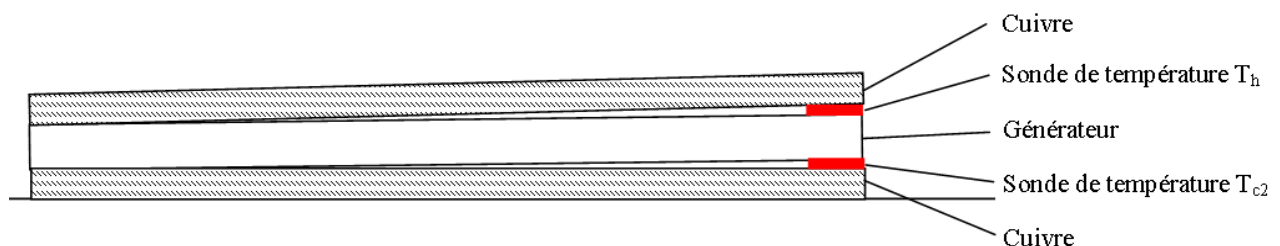


Figure 43 - Défaut de contact thermique du aux sondes de température

7.4.3. La position du spot de lumière

La position du spot de lumière concentrée est également un critère important, bien que celui-ci ait été mieux maîtrisé que les deux critères précédents. En effet, nous pouvons ajuster son emplacement de manière assez précise en translatant légèrement l'ensemble 'récepteur-module-refroidisseur'. Nous essayons toujours de viser le centre des modules thermoélectrique. C'est-à-dire, le milieu du récepteur lorsqu'il s'agissait du grand module, ou bien l'emplacement du petit module pour les tests avec ce dernier. Le spot de lumière était donc centré sur le récepteur pour les tests avec le grand module et décentré pour le test avec le petit module.

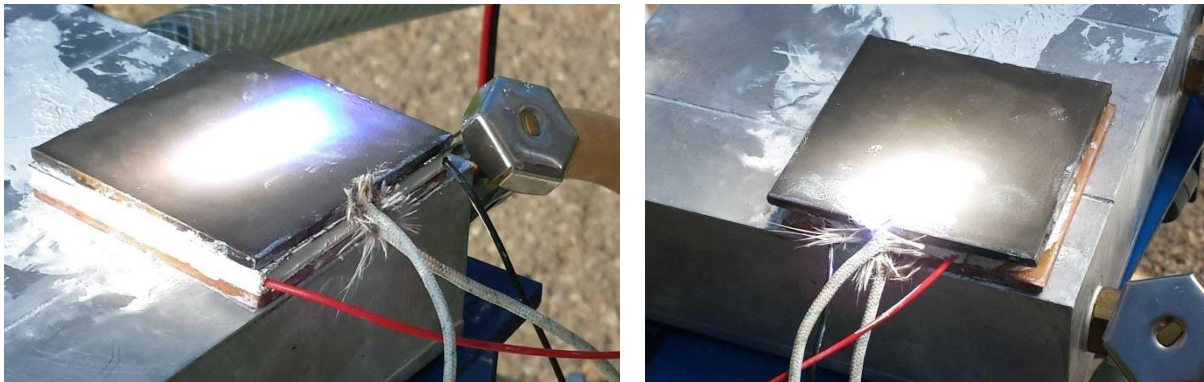


Figure 44 – Gauche : Spot de lumière centré sur le grand module. Droite : Spot de lumière centré sur le petit module.

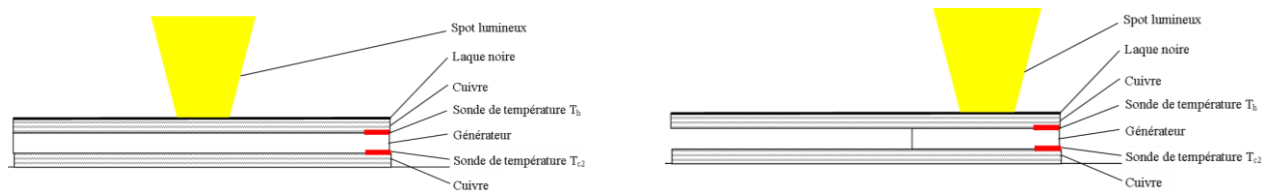


Figure 45 - Coupe du dispositif : Module B (schéma de gauche) et module A (schéma de droite)

Selon la position de ce spot de lumière, la répartition de la chaleur sur le récepteur est différente comme l'illustre la photographie ci-dessous, prise lors du test pour mesurer la répartition de température lorsque le spot de lumière est décentré. La sonde sous le spot lumineux mesure une température de 139 °C et la sonde à son opposé mesure une température de 101 °C (test N°5). Nous observons donc un gradient de température relativement important au sein du récepteur.

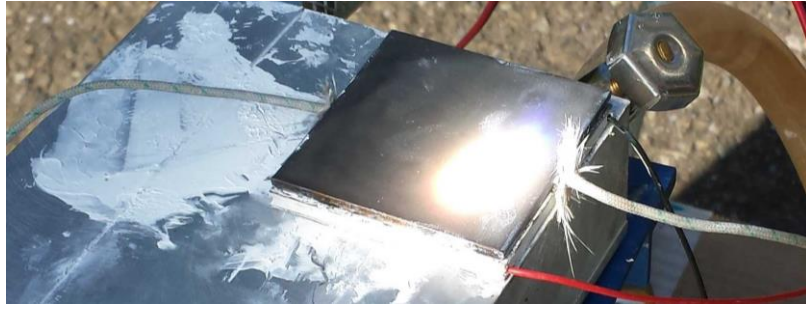


Figure 46 - Mesure de T_h à deux endroits distincts du récepteur, relevant le gradient de température (139°C et 101 °C)

7.4.4. Le refroidisseur

Le débit de la pompe ne semblait pas toujours constant, bien que l'alimentation en courant et en tension délivrait une puissance constante. En effet, le déplacement des tuyaux et du refroidisseur engendrait des modifications du débit. Le circulateur d'eau délivrait également plus ou moins de débit sans causes particulières. Ces variations entraînent bien évidemment une différence dans la puissance de refroidissement. Enfin, la position du récepteur de chaleur et du module thermoélectrique par rapport au refroidisseur cause également des modifications dans la puissance de refroidissement. Dans la grande majorité des cas, le récepteur se trouvait à l'extrémité de la boîte à eau, par souci de facilité lors du positionnement des sondes. Cependant, un meilleur refroidissement aurait été possible en positionnant le dispositif de manière centré sur la boîte à eau.

7.4.5. L'apport de chaleur

Le concentrateur solaire étant réglé manuellement, sa surface ne peut pas être à chaque instant perpendiculaire aux rayons solaires, cela résulte alors dans une surface d'interception plus ou moins grande. Par ailleurs, bien que le temps fût dégagé, de légers nuages obstruaient de temps en temps le rayonnement direct, engendrant ainsi une baisse de température significative du récepteur.

7.5. Analyse des résultats

Nous tirerons ci-dessous quelques analyses qui seront toutefois nuancées par la grande variabilité des mesures décrites ci-avant.

7.5.1. Approche générale

Le but de l'analyse est de pouvoir comparer des modèles théoriques aux mesures expérimentales afin de mieux comprendre les phénomènes en jeu et de pouvoir améliorer les rendements du prototype.

Pour comparer les résultats, nous allons décomposer chaque élément du prototype afin d'en déterminer son fonctionnement et d'estimer les pertes associées au passage d'un élément à l'autre. Le schéma d'analyse ci-dessous illustre les différentes étapes à considérer.

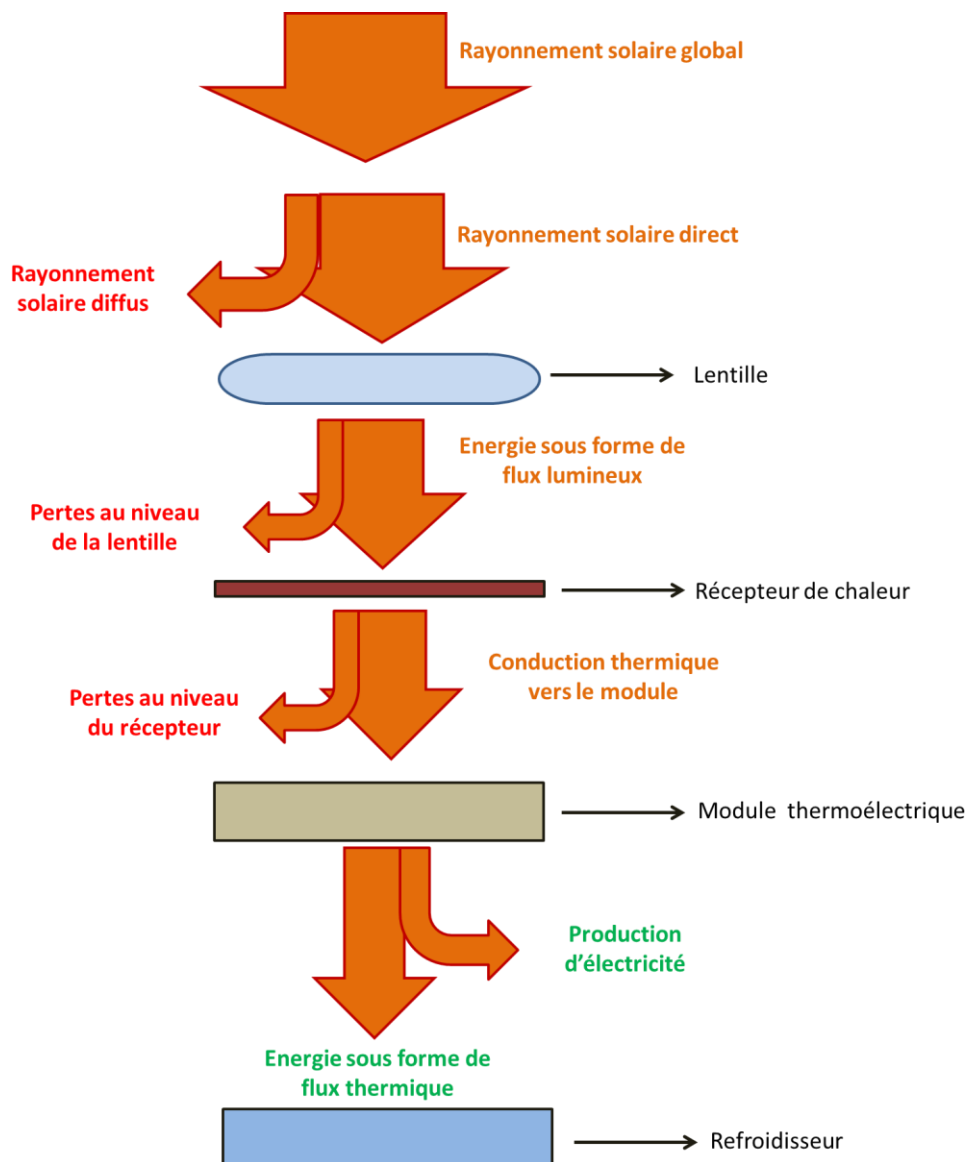


Figure 47 - Schéma d'analyse pour les calculs théoriques du démonstrateur

7.5.2. L'apport de chaleur

- Ouverture de la lentille

En ce qui concerne l'apport de chaleur, nous considérerons que la surface de la lentille est continuellement perpendiculaire aux rayons du soleil, ce qui donne une surface totale captée de 0,169 m² (diamètre de la lentille = 464mm). Pour être précis, il faut y soustraire les segments circulaires obstrués par les profilés en aluminium de 30 mm de largeur. Nous calculons donc la distance « d » entre le centre du cercle et le profilé. Ensuite, nous pouvons calculer l'angle « θ » qui intercepte l'arc de cercle et la superficie « S » du segment circulaire. Enfin, nous calculons l'ouverture nette de la lentille « A » :

$$d = \frac{470 - 2 * 40}{2} = 195 \text{ mm}$$

$$\theta = 2 \arccos\left(\frac{d}{R}\right) = 2 \arccos\left(\frac{195}{232}\right) = 1,145 \text{ rad}$$

$$S = \frac{R^2}{2} (\theta - \sin\theta) = 0,00631 \text{ m}^2$$

$$A = 0,169 - 4 * S = 0,144 \text{ m}^2$$

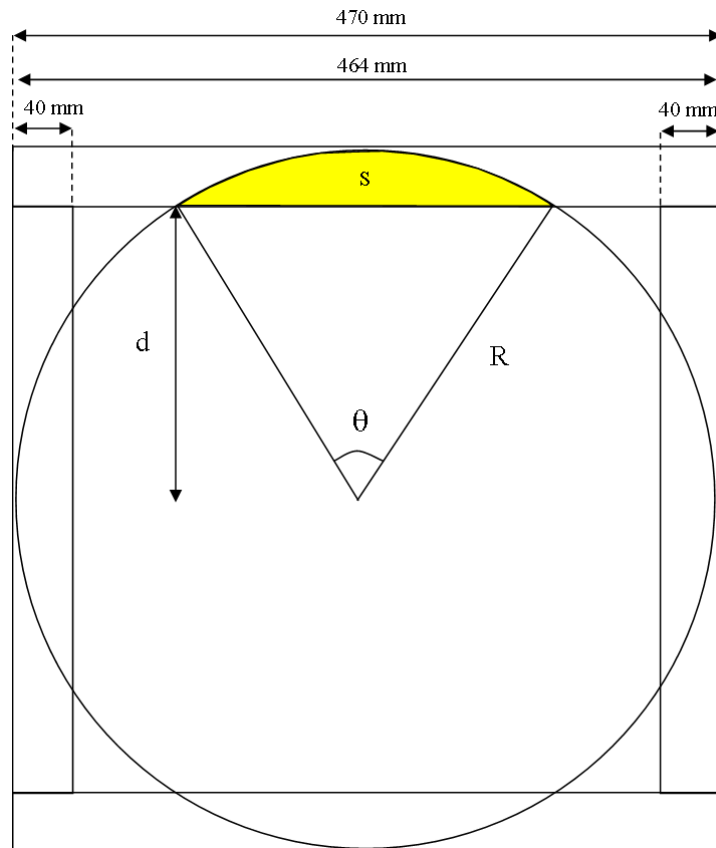


Figure 48 - Schéma de la géométrie de la lentille dans son cadre d'aluminium

- Puissance solaire

En ce qui concerne la puissance solaire, elle vaut théoriquement 999 W/m², par temps dégagé, en supposant une surface orientée perpendiculairement au soleil à Louvain-la-Neuve durant le mois de mai (voir chapitre Source Solaire : Ac). Pour être plus précis, la puissance solaire se nomme éclairement énergétique E_e.

Lors du test, le luxmètre mesurait un éclairement lumineux E de 54 645 Lux. Pour convertir cet éclairement lumineux [lumen/m²] en éclairement énergétique [W/m²] nous pouvons utiliser l'approximation suivante [36] :

$$1 [Lux] \cong 0,0079 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$54\,645 [Lux] \cong 432 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Selon un autre auteur [37], nous pouvons utiliser l'efficacité lumineuse K pour ensuite connaître l'éclairement énergétique E_e [W/m²] :

$$\Phi_v : \text{Flux lumineux [lumen]}$$

$$\Phi_e : \text{Flux énergétique [W]}$$

$$K : \text{Efficacité énergétique} \left[\frac{\text{lumen}}{W} \right]$$

$$K = \frac{\Phi_v}{\Phi_e} \cong 100 \left[\frac{\text{lumen}}{W} \right]$$

$$\Phi_e = \frac{\Phi_v}{K} \cong \frac{54\,645}{100} \left[\frac{\frac{\text{lumen}}{m^2}}{\frac{\text{lumen}}{W}} \right]$$

$$E_e = \frac{\Phi_e}{m^2} \cong 546 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Le calcul pour ces deux valeurs de l'éclairement énergétique, 432 et 546 [W/m²] sont fort différentes de la valeur théorique 999 [W/m²]. Nous pensons dès lors que le luxmètre utilisé est défaillant et qu'il ne pouvait pas afficher de valeurs supérieures à 54 645 Lux (bien que dans sa notice d'utilisation la valeur maximale soit de 90 000 Lux). Par ailleurs, le luxmètre ne nous donne pas la répartition entre le rayonnement diffus et le rayonnement direct. Or, la lentille Fresnel concentre uniquement le rayonnement direct. Enfin, les valeurs affichées par le luxmètre étaient pratiquement tout le temps de 54 645 Lux (sauf lorsque des nuages obstruaient le soleil ou en début de matinée), indice supplémentaire nous amenant à confirmer que le Luxmètre était à sa capacité maximum.

Dès lors, une valeur plus appropriée d'éclairement énergétique est la valeur de 812 W/m² disponible dans la table de PVGIS (voir chapitre Source Solaire : DNIC). En annexe, la table complète présente la variation de la valeur du DNIC en fonction de l'heure : il est environ égal à 797 W/m² à 10h30, possède un maximum de 812 W/m² vers midi et redescend à environ 802 W/m² à 13h. Les tests s'étant déroulés entre 10h30 et 13h, nous prenons donc comme approximation la moyenne pondérée de l'éclairement énergétique :

$$E_e \cong \frac{0,5 * 797 + 812 + 0,5 * 802}{2} = 806 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

- Rendement optique de la lentille

En ce qui concerne le rendement optique de la lentille, nous avons à disposition un graphique présentant le coefficient de transmission de la lentille (voir annexe : Fiche technique lentille Fresnel).

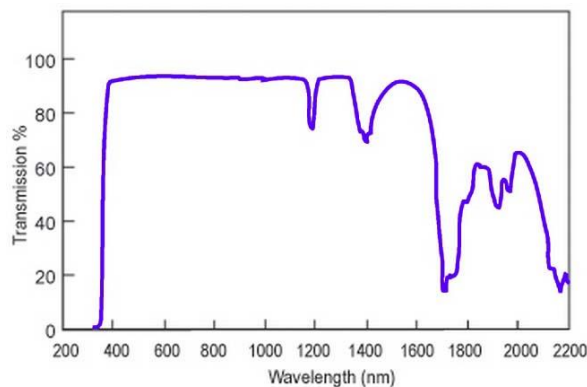


Figure 49 - Coefficient de transmission de la lentille en fonction de la longueur d'onde

Le coefficient de transmission de la lentille pour les longueurs d'onde entre 400 et 1100 nm est d'environ 92%. Or, comme présenté dans le chapitre 1, le soleil possède un spectre allant de 250 à environ 2500 nm, plage de longueur d'onde où la lentille possède un coefficient variable. Utiliser ce coefficient de 92% pour toute la plage conduirait donc à une surestimation.

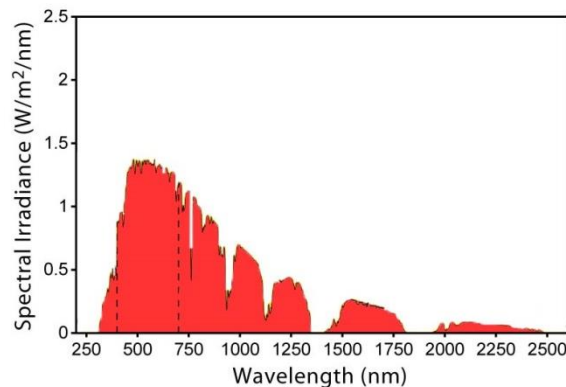


Figure 50 - Spectre de radiation solaire au niveau de la mer

Afin de mieux visualiser l'interaction entre les deux graphiques, nous les avons superposés. On remarque en fait que les creux coïncident relativement bien, à part pour les infrarouges à partir de 1600 nm.

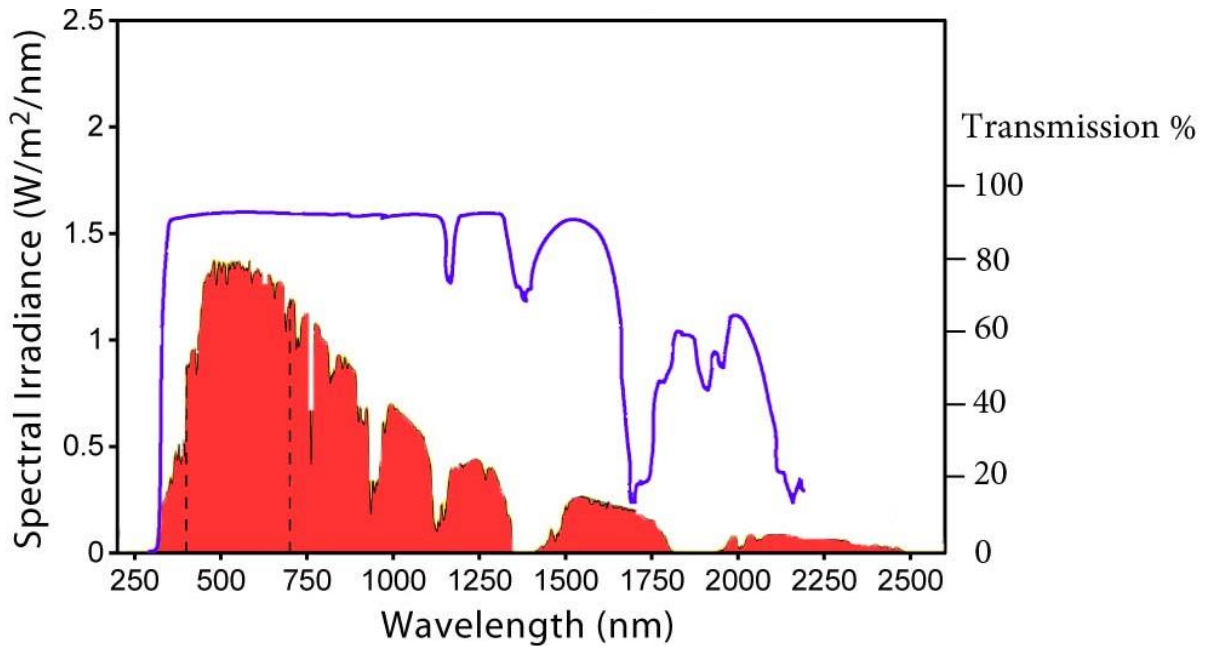


Figure 51- Superposition du spectre solaire et du facteur de transmission de la lentille

Afin de calculer précisément le facteur de transmission global, il serait nécessaire de multiplier les deux fonctions, et pour cela, avoir recours à des valeurs numériques relativement précise. En ce qui concerne le spectre solaire, des valeurs numériques sont disponibles, comme par exemple les tables de Wiebelt et Henderson [34]. En revanche, nous ne disposons pas de valeurs précises pour la transmission de la lentille. Dès lors, nous avons considéré comme approximation une transmission de 90%, valeur standard dans la littérature pour ce genre d'optique.

$$\eta_{opt} = 0,9$$

Connaissant à présent l'ouverture nette de la lentille (A), l'éclairement énergétique (E_e) et le rendement optique de la lentille (η_{opt}), nous pouvons calculer l'apport de chaleur amené par le récepteur solaire :

$$Q_{len} = A * E_e * \eta_{opt} = 0,144 * 806 * 0,9 = 104 \text{ W}$$

7.5.3. Les pertes au niveau du récepteur

Tout comme dans le dimensionnement du démonstrateur, nous considérerons trois pertes principales :

- Pertes par réflexion
- Pertes par radiation
- Pertes par convection

- Pertes par réflexion

En ce qui concerne les pertes par réflexion, nous les avons estimées à 10% lors du dimensionnement du démonstrateur. Cette valeur correspond à la réflexion d'une laque noire sélective. Dans notre cas, il ne s'agit pas d'une peinture sélective, nous prendrons donc comme approximation pour le facteur de réflexion (ρ) une valeur de 20%. Il serait néanmoins possible de connaître précisément cette réflexion en faisant une analyse sur un banc photométrique.

Etant donné que le cuivre est un matériau opaque, son facteur de transmission est nul ($\tau = 0$). Nous avons donc la relation suivante :

$$\alpha = 1 - \rho - \tau = 1 - \rho$$

où ρ : Facteur de réflexion
 α : Facteur d'absorption
 τ : Facteur de transmission

Dans le cas de la plaque de cuivre peinte en noir, nous avons donc :

$$\alpha_{cu_{noir}} = 1 - \rho = 1 - 0,20 = 0,80$$

Dans le cas de la plaque de cuivre nu, le facteur d'absorption α varie entre 0,05 pour du cuivre poli [33] jusqu'à 0,65 pour du cuivre avec une finition brute [38]. Nous prendrons une valeur intermédiaire, indiquée dans une table de facteur d'absorption [34] :

$$\alpha_{cu_{nu}} = 0,35$$

- Pertes par radiation

En ce qui concerne les pertes par radiation (q_r), nous pouvons utiliser l'expression suivante :

$$q_r = S * \epsilon * \sigma * (\overline{T}_h^4 - T_{sky}^4)$$

Avec

$S = 30,25 [cm^2]$: Surface du récepteur de chaleur

$\epsilon = 0,25$: Coefficient d'émissivité du récepteur de chaleur

$\sigma = 5,6697.10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$: La constante de Stefan – Boltzmann

$\overline{T}_h$: La température moyenne du récepteur de chaleur

$T_{sky} = 20 [^\circ C]$: Température du ciel et des environs

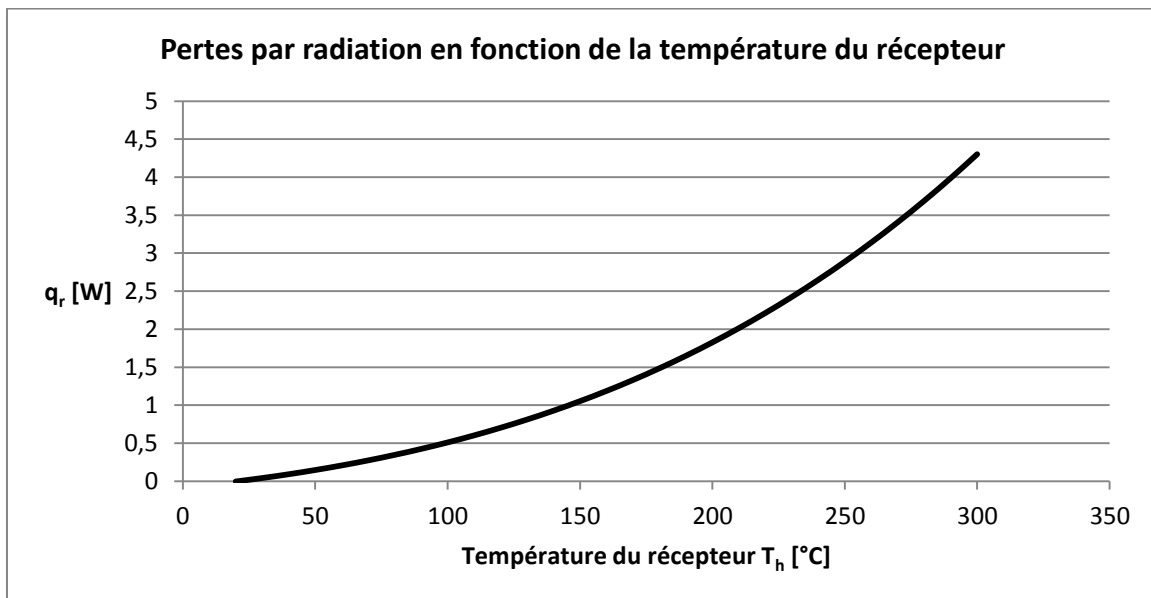


Figure 52 - Pertes par radiation en fonction de la température du récepteur ($T_{sky} = 20^\circ C$)

- Pertes par convection

Les pertes par convection peuvent être estimées avec la relation suivante :

$$q_c = S * h_w * (\overline{T}_h - T_{amb})$$

Avec

h_w : Coefficient de convection pour des applications extérieures

$T_{amb} = 20^\circ C$: Température de l'air ambiante

Lors du dimensionnement du démonstrateur, nous avons pris un coefficient de convection constant utilisé pour des applications extérieures : h_{wind} . Afin d'être plus précis, nous pouvons calculer les pertes par convection naturelle et par convection forcée (avec le vent).

- Coefficient de convection naturelle

Dans le cas de la convection naturelle, pour la face supérieure d'une plaque horizontale, le coefficient de convection h peut être déterminé comme suit [39] :

$$h = Nu \frac{k}{L}$$

Avec

$$k = 0,0261 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right] : \text{Conductivité de l'air}$$

$$L = \frac{\text{Aire}}{\text{Périmètre}} = \frac{0,055 * 0,055}{4 * 0,055} = 0,01375 [m] : \text{Dimension caractéristique}$$

Nu : Nombre de Nusselt

$$Nu = 0,54 (Gr * Pr)^{0,25} \text{ pour } Ra \text{ entre } 2.10^4 \text{ et } 10^6$$

$$Nu = 0,15 (Gr * Pr)^{0,33} \text{ pour } Ra \text{ entre } 10^6 \text{ et } 10^{11}$$

$Ra = (Gr * Pr)$: Nombre de Rayleigh

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} : \text{Nombre de Prandtl}$$

$$Gr = g * B * (T_h - T_{amb}) * \frac{L^3}{\nu^2} : \text{Nombre de Grashof}$$

$$B = 0,0034 \left[\frac{1}{K} \right] : \text{Coefficient d'expansion de l'air}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{m^2}{s} \right] : \text{Viscosité cinématique}$$

$$\mu = 0,0000185 \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right] : \text{Viscosité dynamique de l'air}$$

$$\rho_{ref} = 1,201 \left[\frac{kg}{m^3} \right] : \text{Masse volumique de l'air à } 20^\circ C$$

$$\rho = \rho_{ref} * \left(\frac{293}{T_f + 273} \right) : \text{Masse volumique de l'air à } T_f$$

$$T_f = \frac{T_h + T_{amb}}{2} [^\circ C] : \text{Température de la couche mince}$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \left[\frac{m^2}{s} \right] : \text{Diffusivité thermique}$$

$$c_p = 1007 \left[\frac{J}{kgK} \right] : \text{Chaleur spécifique de l'air}$$

Selon cette méthode de calcul, nous pouvons observer que le coefficient de convection varie en fonction de la température comme illustré sur le graphique ci-dessous :

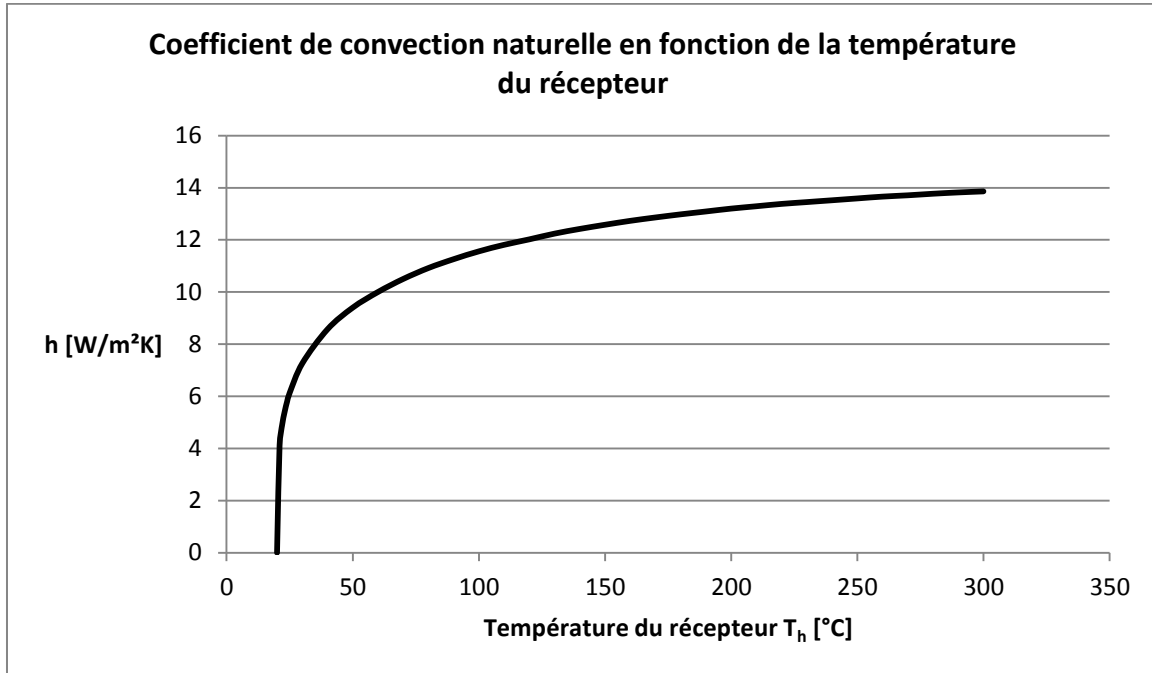


Figure 53 - Coefficient de convection naturelle en fonction de la température du récepteur ($T_{amb} = 20\text{ °C}$)

- Coefficient de convection forcée

Le coefficient de convection varie par contre en fonction de la vitesse du vent. Nous utilisons donc une expression tenant compte de la vitesse du vent pour une plaque horizontale lisse et un vent parallèle à la face supérieure de la plaque [40] :

$$Nu = 0,0723 * Re^{0,773} * Pr^{\frac{1}{3}}$$

Avec

$$Re = \frac{VL}{\nu} : \text{Nombre de Reynolds}$$

$$V : \text{Vitesse du vent en } \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$L = 4 * \frac{A}{P} = 4 * \frac{0,055 * 0,055}{4 * 0,055} = 0,055 [m] : \text{Dimension caractéristique}$$

En utilisant cette expression, nous observons que la vitesse du vent engendre une importante variation dans les pertes par convection, comme illustré dans le graphique ci-dessous. En supposant que l'air arrivant sur la plaque reste constamment à 20°C, nous obtenons un coefficient h indépendant de la température de la plaque.

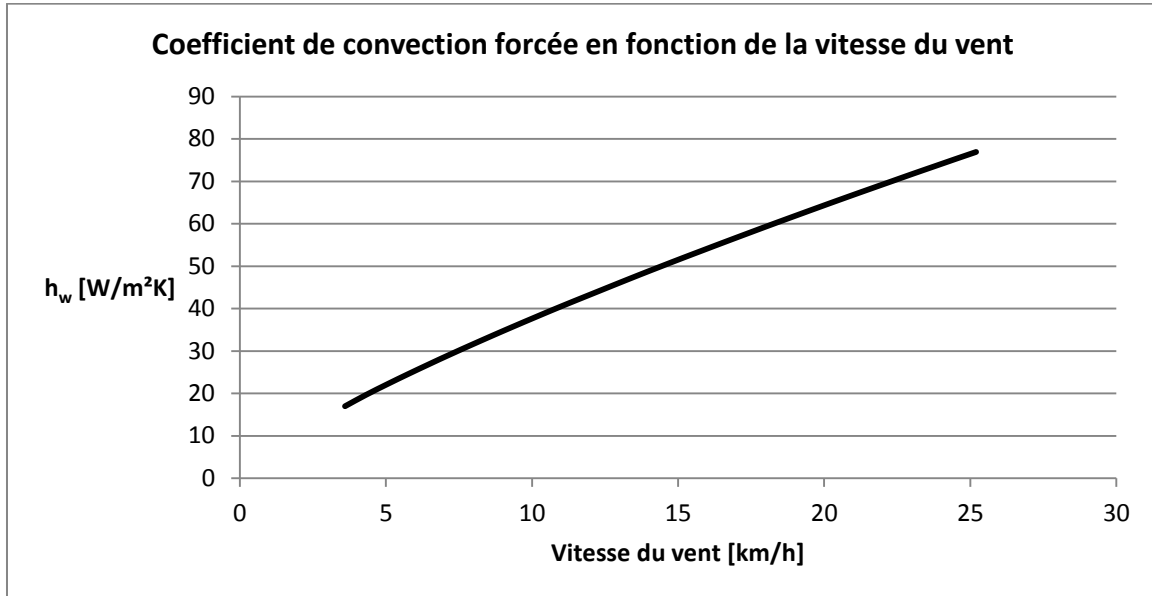


Figure 54 - Coefficient de convection forcée en fonction de la vitesse du vent

A présent que nous connaissons de manière plus précise les coefficients de convection naturelle et de convection forcée, nous pouvons déterminer les pertes par convection :

$$q_c = S * h_w * (\overline{T_h} - T_{amb})$$

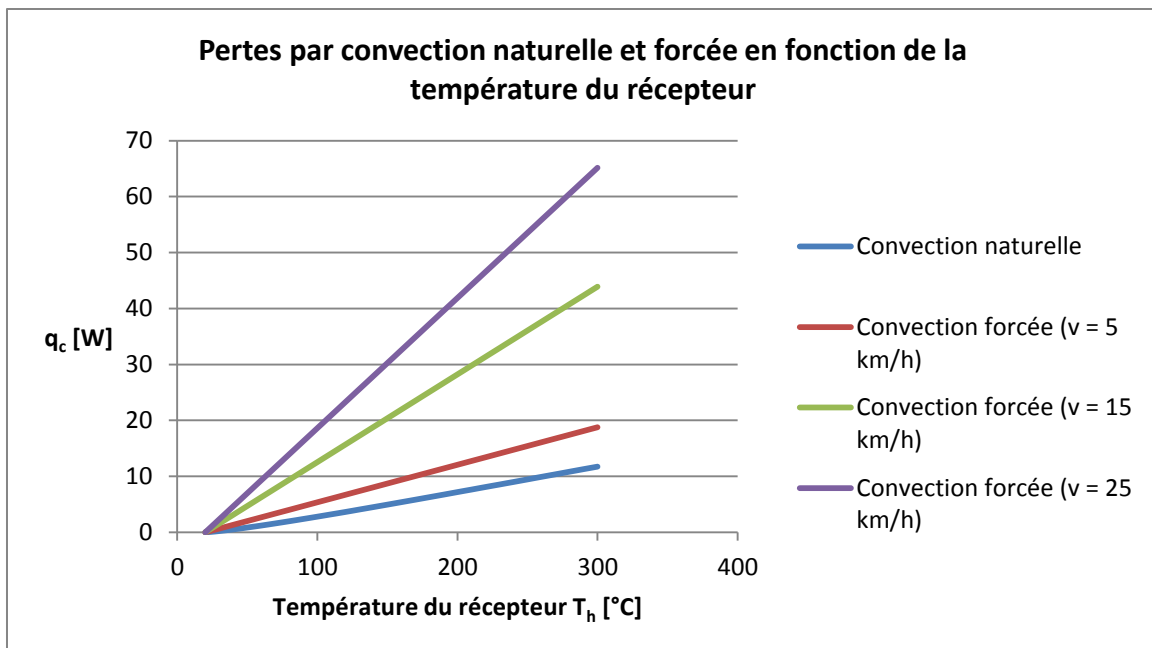


Figure 55- Pertes par convection naturelle et convection forcée en fonction de la température du récepteur ($T_{amb} = 20^{\circ}C$)

7.5.4. Conduction thermique du module thermoélectrique

Après avoir calculé les pertes au niveau du récepteur de chaleur, nous pouvons à présent estimer le flux de chaleur traversant le module thermoélectrique.

Comme indiqué dans le chapitre sur le dimensionnement du démonstrateur, nous ne connaissons pas la résistance thermique des générateurs thermoélectriques. Nous utiliserons dès lors la mesure expérimentale de la résistance thermique réalisée lors de la caractérisation des prototypes : $R_{th-mesuré}$

Module	$R_{th-mesuré} [^{\circ}C/W]$
Module p (30x30x4,3mm)	1,33
Module G (56x56x4,8mm)	0,89

Tableau 19 - Résistances thermiques mesurées expérimentalement pour les deux générateurs issus du commerce

Le flux de chaleur estimé traversant le module sera de :

$$Q_{estimé} = \frac{\Delta T}{R_{th-mesuré}}$$

7.5.5. Comparaison entre théorie et expérience

Afin de comparer les résultats théoriques et les mesures expérimentales, nous nous focaliserons sur les tests N°4, 6, 4bis et 6bis. Ces tests ont été conduits sans plaque de cuivre du côté froid (/) et avec en cuivre nu (C) ou avec récepteur en cuivre peint en noir (N). T_h est la température entre le récepteur et le côté chaud du module thermoélectrique. T_{C1} est la température entre le côté froid du module et le refroidisseur.

N°	Disposition	Heure	T_h [°C]	T_{C1} [°C]	T_{eau} [°C]	V_{oc} [V]
4	NG/	10h00	125	33,9	27	1,72
6	CG/	10h20	70	33,8	28	0,945
4bis	Np/	12h30	260	35,7	31	3,60
6bis	Cp/	12h50	144	35,3	31	2,98

Tableau 20 - Mesures expérimentales des tests 4, 6, 4bis et 6bis

Pour chacun de ces tests, nous allons calculer les différentes pertes théoriques et ainsi déterminer le flux de chaleur restant qui traverse théoriquement le module thermoélectrique.

Le tableau récapitulatif présente les différentes expressions et données utilisées :

Apport de chaleur par la lentille	$Q_{len} = 104$ [W]
Flux de chaleur absorbé	Disposition 2 : $Q_a = 104 * 0,35 = 36,4$ [W] Disposition 3 : $Q_a = 104 * 0,80 = 83,2$ [W]
Pertes par radiation	$q_r = S * \epsilon * \sigma * (\overline{T}_h^4 - T_{sky}^4)$ avec $T_{sky} = 293$ K $S = 30,25$ cm ² $\epsilon = 0,25$ $\sigma = 6,67.10^{-8}$ [W/m ² K ⁴]
Pertes par convection	$q_c = S * h_w * (\overline{T}_h - T_{amb})$ avec $T_{amb} = 293$ K Vent faible : $h_w = 20$ [W/m ² K] Vent moyen : $h_w = 50$ [W/m ² K] Vent fort : $h_w = 75$ [W/m ² K]
Flux de chaleur théorique	$Q_{théorique} = Q_a - q_r - q_c$
Flux de chaleur traversant le générateur (estimation)	$Q = \frac{\Delta T}{R_{th-mesuré}} = \frac{T_h - T_{c1}}{R_{th-mesuré}}$

Tableau 21 - Expressions et données pour les calculs théoriques des pertes

En ce qui concerne les pertes par convection, nous les avons déterminées pour trois vitesses de vent différentes, à savoir : 5, 15 et 25 km/h. Le flux de chaleur théorique est simplement la soustraction entre le flux de chaleur après réflexion et les pertes par radiation et convection. Le flux de chaleur estimé, traversant le générateur thermoélectrique, est quant à lui déduit des mesures de température aux bornes de celui-ci (T_h et T_{c1}) et de la résistance thermique mesurée lors de la caractérisation des modules ($R_{th-mesuré}$).

$$Q_{théorique} = Q_a - q_r - q_c$$

$$Q_{estimé} = \frac{\Delta T}{R_{th-mesuré}}$$

N°	Disposition	Flux de chaleur absorbé Q_a [W]	Pertes par radiation q_r [W]	Pertes par convection q_c [W]	Flux de chaleur théorique [W]	Flux de chaleur estimé [W]
4	NG/	83,2	0,76	6,35 15,88 23,82	76,1 66,6 58,6	102,4
6	CG/	36,4	0,28	3,03 7,56 11,34	33,1 28,6 24,8	40,7
4bis	Np/	83,2	3,14	14,52 36,30 54,45	65,5 43,8 25,6	168,6
6bis	Cp/	36,4	0,98	7,50 18,76 28,13	27,9 16,7 7,3	81,7

Tableau 22 - Calcul théorique du flux de chaleur traversant le module thermoélectrique et comparaison avec son estimatif

On remarque que les pertes par convection sont significatives lorsque la vitesse du vent augmente. Cependant, les mesures de température étaient prises lorsque le système atteignait un maximum, c'est-à-dire lorsque la vitesse du vent était nulle ou faible. On considérera par la suite uniquement les pertes par convection dues à un vent faible, c'est-à-dire la plus petite perte pour chacune des dispositions.

On remarque par ailleurs, que le flux de chaleur estimé est bien plus grand que le flux de chaleur théorique, surtout pour les tests avec le petit module (p). Calculons alors la résistance thermique théorique ($R_{th-théorique}$) des modules, grâce au flux de chaleur théorique et aux températures mesurées aux bornes du module.

$$R_{th-théorique} = \frac{\Delta T}{Q_{théorique}} = \frac{T_h - T_{c1}}{Q_{théorique}}$$

La comparaison entre la résistance thermique théorique $R_{th\text{-théorique}}$ et la résistance thermique mesurée $R_{th\text{-mesurée}}$ est illustrée dans le tableau ci-dessous.

Disposition	Résistance thermique calculée : $R_{th\text{-théorique}}$ [°C/W]	Résistance thermique mesurée : $R_{th\text{-mesuré}}$ [°C/W]	Différence [%]
3-G	1,20	0,89	26
2-G	1,09	0,89	19
3-p	3,42	1,33	61
2-p	3,89	1,33	66

Tableau 23 - Comparaison entre les résistances thermiques théorique et mesurée

Cette grande différence est sans doute due aux contacts thermiques entre le module thermoélectrique, le récepteur et le refroidisseur. En effet, lors de la caractérisation des deux modules thermoélectriques et de la mesure de leur résistance thermique, les contacts thermiques avec le module étaient meilleurs pour deux raisons principales :

- 1) L'absence de sonde aux bornes du module thermoélectrique
- 2) L'application d'une pression sur le dispositif

Le défaut de contact thermique est illustré à la page 56 à la Figure 43 - Défaut de contact thermique du aux sondes de température. Par ailleurs, dans le cas du petit module, ce défaut de contact thermique se fait davantage ressentir étant donné la surface de contact plus limitée. Par ailleurs, lors de la caractérisation des modules, la résistance chauffante appliquait une certaine pression sur les modules thermoélectriques, améliorant ainsi la conductance thermique du dispositif. Les résistances thermiques lors des tests sont donc plus grandes que celles mesurées lors de la caractérisation des modules.

En outre, dans les fiches techniques figurent l'approximation du flux de chaleur traversant les modules thermoélectriques sous une différence de température donnée. Le calcul de la résistance thermique $R_{th\text{-idéal}}$ pour les deux modules est présenté dans le tableau suivant. On y compare également la résistance thermique mesurée lors de la caractérisation des modules :

Module	T_h [°C]	T_c [°C]	Q [W]	$R_{th\text{-idéal}}$ [°C/W]	$R_{th\text{-mesuré}}$ [°C/W]	$R_{th\text{-théorique}}$ [°C/W]
G	300	30	113	0,42	0,89	1,20
G	250	80	70	0,41	0,89	1,09
p	300	30	337	1,25	1,33	3,42
p	250	80	196	1,15	1,33	3,89

Tableau 24 - Comparaison entre les résistances thermiques idéales (fiche technique), mesurées (caractérisation des générateurs) et théoriques (bilan thermique théorique).

Les résultats de ce tableau nous indiquent bien que la résistance thermique augmente lorsque les conditions idéales ne sont pas appliquées, notamment une pression adéquate. Les pressions appliquées sur le dispositif sont optimales lors de la détermination des performances des

générateurs thermoélectrique chez Tellurex (Fiche technique : $R_{th-idéal}$). En revanche, lors de la caractérisation des modules au laboratoire, les pressions appliquées étaient moins adéquates ($R_{th-mesuré}$) et lors des tests avec le démonstrateur elles étaient nulles ($R_{th-théorique}$).

Enfin, une autre manière de confronter les résultats obtenus, est de comparer les performances des modules lors des tests par rapport aux performances idéales reprises dans les fiches techniques. Nous avons donc repositionné les points de mesures de la tension en circuit ouvert (V_{OC}) sur les graphiques donnés dans les fiches techniques :

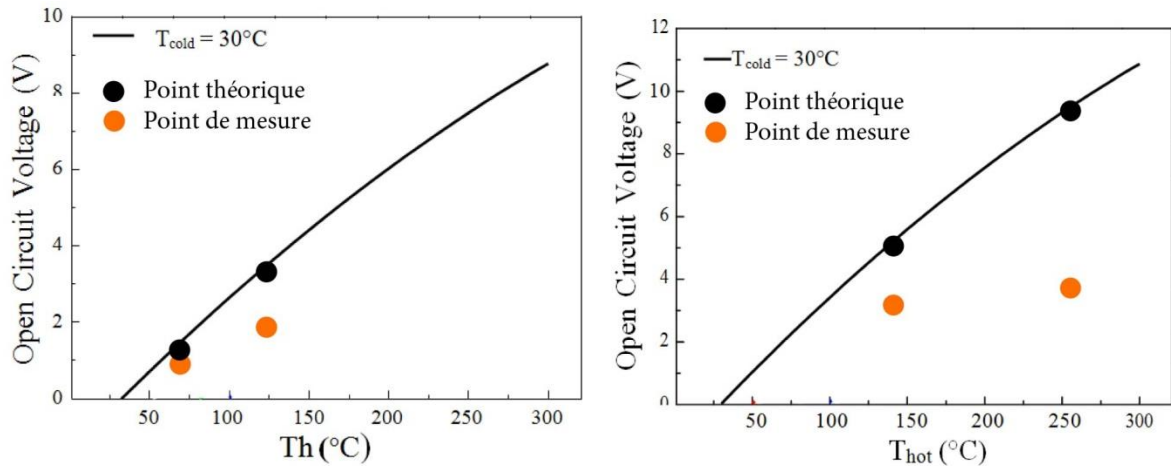


Figure 56 - Comparaison des points de mesures et théoriques (dans la fiche technique selon une disposition idéale) pour les dispositions NG/ et CG/ (graph de gauche) et pour les dispositions Np/ et Cp/ (graph de droite)

Sur base de ces deux graphiques, nous pouvons également quantifier les différences entre la situation idéale (fiche technique) et les tests avec le démonstrateur.

Disposition	Tension idéale (fiche technique) : $V_{OC-ideal}$ [V]	Tension mesurée (tests) : $V_{OC-tests}$ [V]	Différence [%]
NG/	3,40	1,72	49
CG/	1,75	0,945	46
Np/	9,50	3,60	62
Cp/	5,00	2,98	40

Tableau 25 - Comparaison entre les tensions en circuit ouvert idéales (fiche technique) et mesurées lors des tests.

A nouveau, on constate des différences significatives entre les performances attendues et celles obtenues lors de l'expérimentation. Lors de la caractérisation des modules, nous avons également pu constater une nette différence entre les performances des fiches techniques et les performances mesurées. Ces différences sont sans doute dues aux mêmes raisons, à savoir l'imprécision des mesures expérimentales et des fiches techniques, et le moins bon échange thermique dû à l'absence de serrage.

7.5.6. Rendement global du démonstrateur

Il est intéressant de calculer le rendement global du démonstrateur. C'est-à-dire, le ratio entre la puissance captée et la puissance produite.

Nous considérerons que la puissance consommée est égale au total de la puissance captée par la lentille :

$$P_{captée} = A * P_{solaire} = 0,144 \text{ m}^2 * 999 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 144 \text{ [W]}$$

En ce qui concerne la puissance produite, il y a d'une part la puissance électrique, et d'autre part la puissance thermique.

- Puissance électrique

La puissance électrique est déterminée par :

$$P_{élec} = \frac{\left(\frac{V_{oc}}{2}\right)^2}{R_L}$$

Avec

V_{oc} : Tension mesurée en circuit ouvert

R_L : Résistance de charge

La résistance de charge optimale dépend des températures aux bornes du générateur thermoélectrique. Cette résistance est trouvée dans les fiches techniques présentes en annexe.

N°	Disposition	T _h [°C]	T _{c1} [°C]	Résistance de charge [Ω]	V _{oc} [V]	P _{élec} [W]
4	NG/	125	33,9	4,35	1,72	0,17
6	CG/	70	33,8	4,10	0,945	0,05
4bis	Np/	260	35,7	1,15	3,60	2,82
6bis	Cp/	144	35,3	1,00	2,98	2,22
7	NF/	237	46,3	0,045	0,0148	0,001

Tableau 26 - Calcul de la puissance électrique produite par les générateurs thermoélectriques

- Puissance thermique

En ce qui concerne la puissance thermique, nous considérerons que toute la puissance traversant le module thermoélectrique est ensuite transférée au refroidisseur, servant ainsi à chauffer l'eau. Nous pouvons dès lors reprendre les flux de chaleurs calculés précédemment pour une convection avec un vent faible.

N°	Disposition	P _{thermique} [W]
4	NG/	76,1
6	CG/	33,1
4bis	Np/	65,5
6bis	Cp/	27,9
7	NF/	67,5

Tableau 27 - Puissance thermique produite pour chaque disposition.

- Récapitulatif

Le tableau de synthèse ci-dessous présente les rendements en conversion électrique et thermique, ainsi que les rendements totaux pour chaque disposition.

$$\eta_{elec} = \frac{P_{elec}}{P_{captée}} ; \quad \eta_{th} = \frac{P_{thermique}}{P_{captée}} ; \quad \eta_{tot} = \eta_{elec} + \eta_{th}$$

N°	Disposition	Rendement électrique	Rendement thermique	Rendement total
4	NG/	0,12%	52,84%	52,96%
6	CG/	0,03%	22,98%	23,02%
4bis	Np/	1,96%	45,51%	47,47%
6bis	Cp/	1,54%	19,39%	20,93%
7	NF/	0,00%	46,87%	46,87%

Tableau 28 – Rendement électrique et thermique pour chaque disposition

On constate tout d'abord que la conversion en électricité est très faible pour les modules G et F, due à la faible différence de température pour le module G et aux faibles performances du module F. Ensuite, les dispositions N bénéficient d'un rendement thermique nettement supérieur grâce à la plaque de cuivre de noir. Le rendement global est largement dicté par le rendement thermique vu la faible production d'électricité.

Les rendements thermiques restent bien évidemment des approximations, basées sur l'estimation des différentes pertes au niveau du récepteur de chaleur. Par ailleurs, la puissance thermique transférée au refroidisseur se réalise à basse température (environ 34°C), température favorisant l'échange thermique mais trop basse pour un quelconque usage industriel.

7.6. Les pistes d'améliorations

Les pistes d'améliorations sont très nombreuses. Nous citerons ci-dessous les principales.

7.6.1. Système de serrage

Un système de serrage adéquat permet le bon contact thermique entre le récepteur de chaleur, le générateur thermoélectrique et le refroidisseur. Ce système de serrage doit cependant éviter tout pont thermique entre le récepteur de chaleur et le refroidisseur, ce qui entrainerait bien évidemment une perte de rendement global non négligeable.

7.6.2. Protection contre la convection

Comme nous l'avons vu précédemment, la convection est le facteur principal de pertes, surtout lorsque la vitesse du vent est importante. Pour empêcher cette convection, un système sous vide avec une paroi en verre pourrait être imaginé.

7.6.3. Autres améliorations

Si le système de concentration solaire est assez précis, la taille du récepteur de chaleur peut-être réduite afin d'éliminer au maximum les pertes par radiation. Idéalement, le récepteur solaire devrait avoir la même taille que le générateur solaire. Le générateur solaire quant à lui, doit être dimensionné en fonction de l'apport de chaleur, dans le but de maximiser la production d'énergie.

Une bonne isolation du système est également nécessaire pour notamment éviter les transferts thermiques directs entre le récepteur de chaleur et le refroidisseur.

Ci-dessous, le schéma d'un prototype intégrant ces quelques améliorations est présenté :

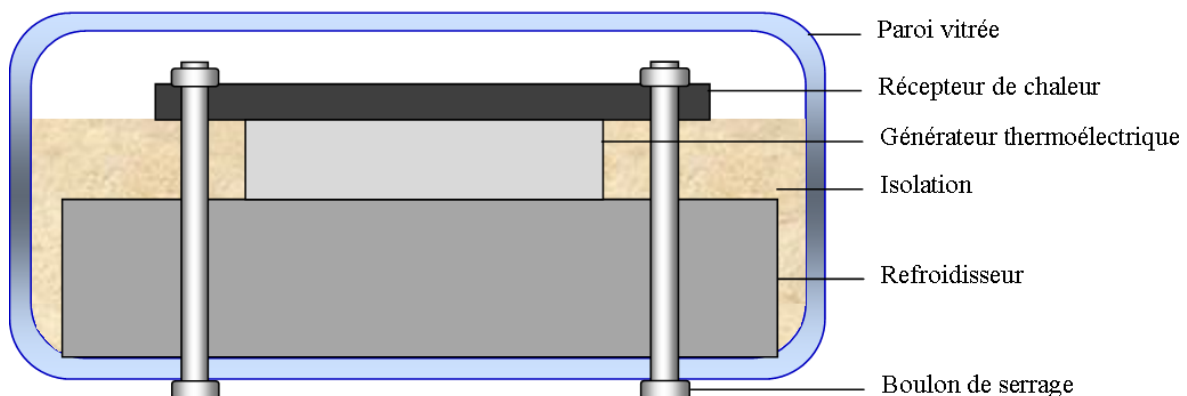


Figure 57 - Schéma d'un prototype amélioré

7.7. Rendement global idéalisé

Nous souhaitons également analyser les rendements dans le cas d'un prototype idéal, c'est-à-dire sans pertes par convection, des pertes par radiation minimisées et un contact thermique idéal entre le récepteur de chaleur, le générateur thermoélectrique et le refroidisseur.

Pour ce prototype idéal, nous prenons comme générateur thermoélectrique le module G (G2-56-0375). Nous considérons que la température du récepteur atteint $T_h = 250^\circ\text{C}$ et que la température du refroidisseur est de $T_c = 80^\circ\text{C}$. Pour une telle différence de température, le flux de chaleur qui traverse le module est d'environ $P_{\text{thermique}} = 196 \text{ W}$ (voir fiche technique). Cette puissance est transformée en partie en électricité et le reste est intégralement transmis au refroidisseur. Dans ces conditions, le générateur produit une puissance électrique $P_{\text{élec}} = 5,9 \text{ W}$ (voir fiche technique).

En ce qui concerne le récepteur de chaleur, nous considérons qu'il s'agit d'une plaque de cuivre recouverte de chrome noir, possédant un facteur d'absorption $\alpha = 0,95$ et une émissivité $\epsilon = 0,10$ [33]. Avec ces caractéristiques, les pertes par radiation serait de :

$$q_r = S * \epsilon * \sigma * (\overline{T_h}^4 - T_{sky}^4) = 1,20 \text{ [W]}$$

Avec

$$S = 0,056 * 0,056 = 0,003136 \text{ [m}^2\text{]} \\ T_{sky} = 293 \text{ [K]}$$

En ce qui concerne l'apport de chaleur apporté par la lentille, nous savons qu'il doit être d'environ :

$$Q_{len} = \frac{Q_a}{\alpha} = \frac{P_{thermique} + q_r}{\alpha} = 207,6 \text{ [W]}$$

En supposant que le rendement optique de la lentille est toujours de $\eta_{opt} = 0,90$, nous déterminons la quantité de puissance solaire concentrée nécessaire :

$$Q_{sol-direct} = \frac{Q_{len}}{\eta_{opt}} = 230,6 \text{ [W]}$$

Enfin, en supposant un éclairement énergétique de $E_e = 806 \text{ W/m}^2$, nous déterminons la surface d'ouverture de la lentille et également la puissance totale captée par la lentille (rayonnement direct et diffus par temps clair) :

$$A = \frac{Q_{sol-direct}}{E_e} = 0,286 \text{ m}^2 \\ P_{captée} = A * 999 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 286 \text{ [W]}$$

- Récapitulatif

Ci-dessous, un tableau récapitulatif représente le rendement électrique, thermique et total d'un tel prototype idéal. Le même raisonnement a été conduit pour ce générateur lorsque les températures aux bornes sont de 300 et 30 °C.

$$\eta_{elec} = \frac{P_{elec}}{P_{captée}} ; \quad \eta_{th} = \frac{P_{thermique} - P_{elec}}{P_{captée}} ; \quad \eta_{tot} = \eta_{elec} + \eta_{th}$$

T _h [°C]	T _c [°C]	Rendement électrique	Rendement thermique	Rendement total
250	80	2,06 %	66,50 %	68,56 %
300	30	3,30 %	65,32 %	68,62 %

Tableau 29 - Rendements du prototype idéalisé

Il est intéressant de constater qu'au plus la différence de température est grande, au plus la production d'électricité est importante. Par ailleurs, par cette augmentation de température, le rendement thermique ne varie quasiment pas. En effet, d'une part les pertes par radiation au mètre carré augmentent étant donné une température de récepteur plus haute. D'autre part, en contrepartie, la plus grande concentration solaire diminue la taille relative du récepteur de chaleur par rapport au récepteur solaire, ce qui diminue globalement les pertes par radiation.

Ci-dessous, le schéma général d'analyse est repris, en indiquant pour chaque étape les pertes.

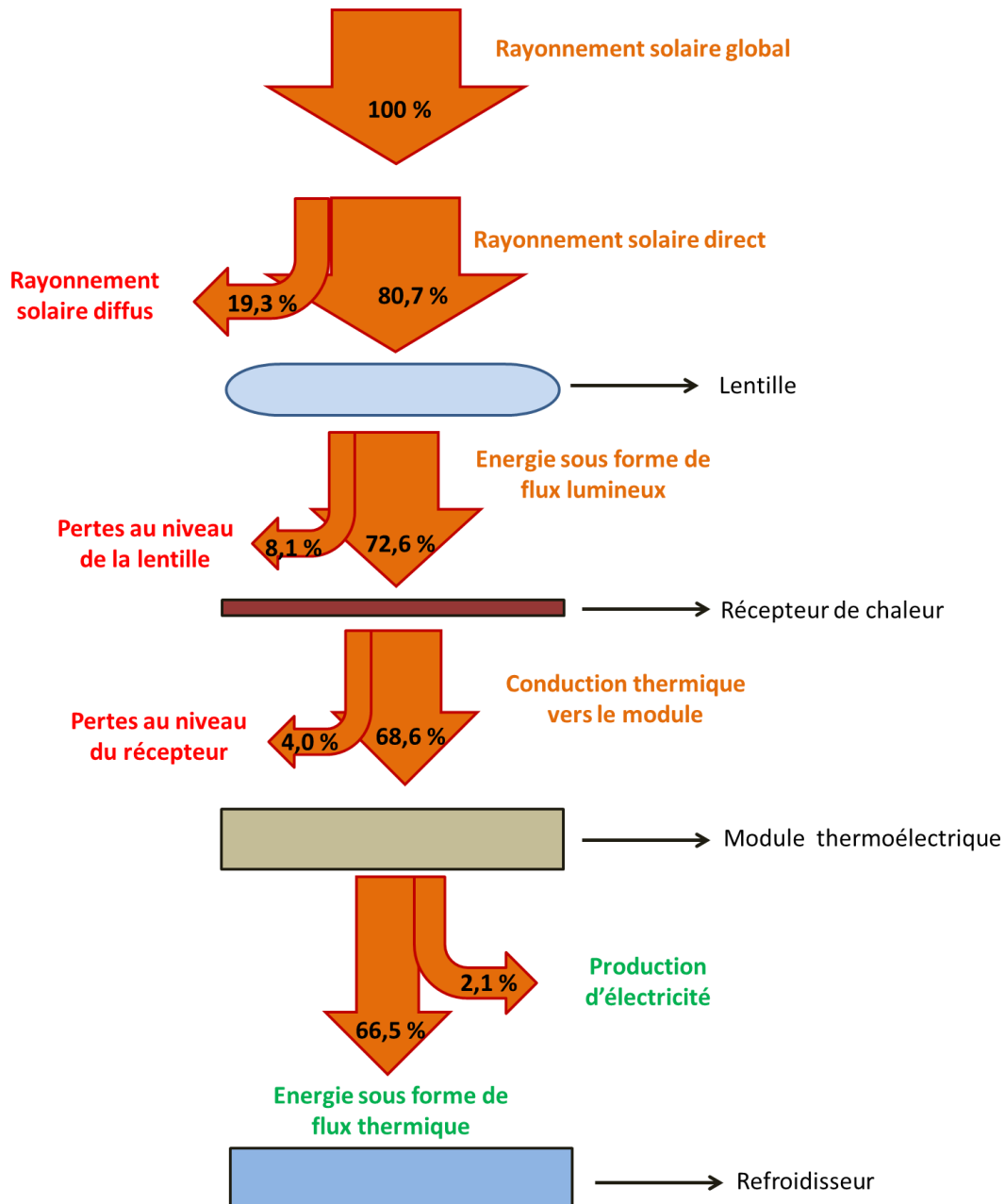


Figure 58 - Schéma d'analyse général pour un prototype idéal avec $T_h = 250\text{ °C}$ et $T_c = 80\text{ °C}$

8. Etude de cas

Dans ce chapitre, nous abordons la réalisation complète d'une centrale solaire à concentration utilisant les matériaux thermoélectriques développés par l'UCL, à savoir les alliages de Fe_2VAl .

8.1. Mise en contexte

Après avoir sélectionné la zone géographique du Maroc, et plus précisément l'industrie du textile, nous avons pris contact avec plusieurs industriels. L'un d'eux, Monsieur Laraki, directeur de la société Blancatex, a fait suite à notre demande d'information.

Cette entreprise textile située à Casablanca possède trois ateliers principaux. Les deux premiers sont la filature et le tissage consistant à tisser des fils afin de produire du tissu. Le troisième atelier est le finissage. Une fois le tissu brut préparé, cette opération consiste en plusieurs étapes, comme apprêter, laver et sécher les tissus. Ces trois étapes sont fortement consommatrices en chaleur, et notamment en eau chaude.

L'entreprise textile souffre actuellement des prix élevés de l'énergie au Maroc et le coût de ses consommations pèsent lourdement dans son bilan. A titre indicatif, le tableau ci-dessous indique les consommations annuelles moyennes en vapeur d'eau et en électricité :

Consommation électrique [kWh]	1 400 000
Consommation d'eau chaude [m^3]	6000
Consommation de fuel [TEP]	200

Tableau 30 - Consommation annuelle de l'entreprise Blancatex

Le coût de l'énergie a représenté environ 8 % du chiffre d'affaire en 2010 et 2011. Actuellement, ce pourcentage est d'environ 12%, à cause d'une production réduite ces dernières années.

L'entreprise étant située en plein centre de Casablanca, il n'existe pas de terrain disponible à proximité. Une des possibilités est donc d'implémenter des concentrateurs solaires sur le toit du bâtiment. Le toit se compose en fait de quatre surfaces rectangulaires de 120m^2 (rectangle d'environ $8 \times 15\text{m}$) séparées par un petit muret. La surface totale du toit est donc de 480m^2 .



Figure 59 - Photographie du toit de l'entreprise Blancatex : 2 surfaces d'environ 8 x 15 m

8.2. Premier estimatif

Très rapidement, nous pouvons estimer l'énergie qu'une centrale solaire pourrait produire en étant située sur ce toit. Nous avons donc pris des hypothèses fortes afin d'avoir rapidement un ordre de grandeur.

8.2.1. Production d'énergie

En ce qui concerne l'énergie solaire reçue par un système de tracker solaire, nous utiliserons une valeur moyenne de DNI (Direct Normal Insolation) de 5 kWh/m²/jour [41]. Cette valeur correspond à un ensoleillement direct de 1825 kWh/m²/an.

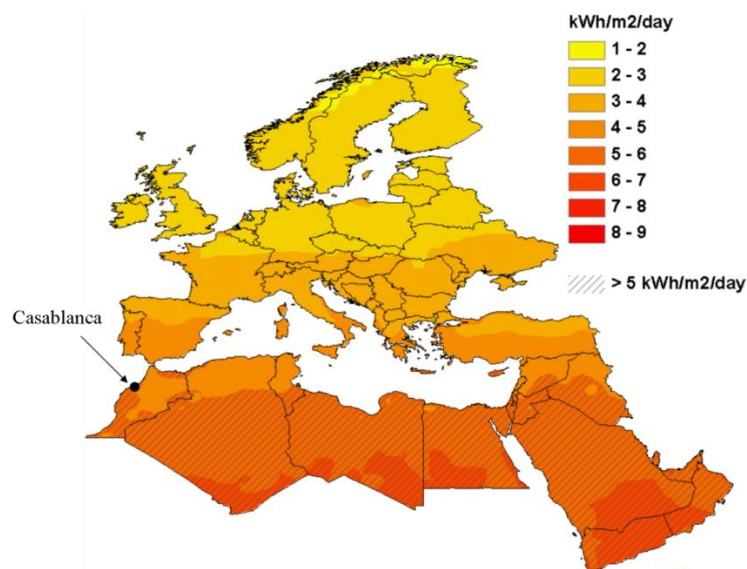


Figure 60 - Gisement solaire : DNI journalier en kWh/m²/jour

Nous supposons, en première approximation, que la surface réellement utilisée par les concentrateurs solaires est de 50% de l'espace disponible. Cela représente donc une surface effective de 240m². Ensuite, à nouveau en première approximation, nous supposons que les rendements de conversion de l'ensoleillement direct sont de 45% pour le thermique et de 5% pour l'électrique.

Grâce à ces premières hypothèses, le tableau ci-dessous montre la quantité de chaleur et d'électricité produite par l'usine solaire sur le toit de l'entreprise Blancatex :

Ensoleillement direct [kWh/m ² /an]	1825
Surface effective des concentrateurs solaires [m ²]	240
Rendement thermique ensoleillement direct [%]	45
Rendement électrique ensoleillement direct [%]	5
Energie thermique produite [kWh]	197 100
Energie électrique produite [kWh]	21 900

Tableau 31 - Approximation de l'énergie produite par la centrale sur le toit de Blancatex

8.2.2. Economie réalisée

A présent, il est possible d'estimer les économies en consommation de carburant et d'électricité réalisées par l'entreprise. Ci-dessous, un tableau reprend les prix d'achat de l'entreprise pour le fuel et l'électricité. Afin que ces chiffres soient plus parlants, ils sont exprimés en euros, bien que la devise d'achat locale soit le Dirham :

Fuel [€/TEP]	517,43
Électricité heures creuses [€/kWh]	0,044
Électricité heures pleines [€/kWh]	0,067
Électricité heures de pointes [€/kWh]	0,102

Tableau 32 - Prix de l'énergie achetée par l'entreprise Blancatex

Sachant qu'une TEP (Tonne d'Equivalent Pétrole) correspond à 11 630 kWh [42], l'énergie thermique économisée par Blancatex correspond à 16,95 TEP. En supposant que le prix d'achat moyen de l'électricité est de 0,067 €/kWh, nous pouvons calculer les économies réalisée en un an :

Économie en fuel [€/an]	8 769
Économie en électricité [€/an]	1 473
Économie énergétique totale [€/an]	10 242
Économie énergétique totale en 30 ans [€]	307 260

Tableau 33 – Estimatif de l'économie annuelle réalisée par Blancatex

En supposant que la durée de vie de la centrale solaire est de 30 ans, l'économie totale réalisée est d'environ 300 000€. Cependant, cette économie ne tient pas compte de l'inflation du prix de l'énergie, ce qui pourrait la rehausser quelque peu.

8.2.3. Borne supérieure pour le cout de la puissance installée

L'économie totale précédemment calculée est une borne supérieure du coût total maximum de l'usine solaire, c'est-à-dire, les coûts de la conception, de l'achat et la production des composants, de l'installation, de la maintenance et du démantèlement. Notre stratégie consiste à proposer une solution énergétique qui diminue la facture énergétique du client, il faut donc que le cout total de l'usine solaire ne dépasse pas les économies réalisées.

Egalement, il est intéressant d'estimer cette borne supérieure pour le coût de la puissance installée exprimée en [€/W]. En considérant un éclaircissement standard de 1000 W/m² et un rendement global de 50%, la puissance totale installée pour la centrale solaire est de 120 kW :

$$\text{Puissance totale installée} = 1000 \left[\frac{W}{m^2} \right] * 0,5 * 240 [m^2] = 120 [kW]$$

En divisant l'économie totale réalisée en 30 ans par la puissance totale installée, une borne supérieure du coût d'installation est estimée à 2,5 €/W :

$$\text{Borne supérieure du cout de la puissance installée} = \frac{300\,000 \text{ [€]}}{120\,000 [W]} = 2,5 \left[\frac{\text{€}}{W} \right]$$

A titre de comparaison, une étude de 2008 calcule les coûts initiaux d'installation entre 4 et 5 €/W pour une centrale solaire à concentration cylindro-parabolique (CCP ou PTSC) en Espagne avec une puissance installée³ entre 30 et 80 MW. Les centrales solaires thermodynamique CCP sont sensiblement similaires à la centrale solaire qui serait installée sur le toit de Blancatex [43]. Cependant, la comparaison effectuée dans le tableau ci-dessous est uniquement illustrative, puisque les deux coûts présentés représentent des centrales solaires de taille et de technologie différente.

Borne supérieure du cout de la puissance installée pour la centrale de Blancatex [€/W]	2,5
Cout initial de la puissance installée pour une centrale CPC en 2008 en Espagne [€/W]	4 - 5

Tableau 34 - Comparaison entre la borne supérieure du coût de la puissance installée pour la centrale de Blancatex et les coûts actuels pour une centrale CCP

³ La puissance installée, ou puissance nominale, est la puissance électrique pouvant être délivrée par la centrale. Dans le cas de la centrale Hybrid Power, nous parlerons également de puissance installée pour désigner à la fois la puissance thermique et électrique.

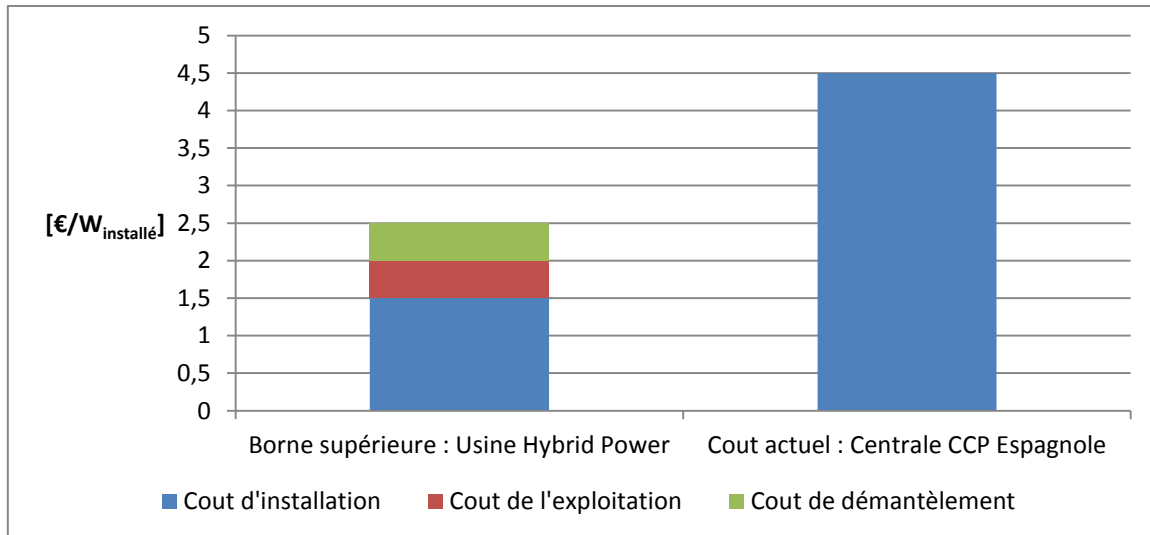


Figure 61 – Puissance installée : Borne supérieure des coûts d'installation, de maintenance et de démantèlement de l'usine Hybrid Power comparé aux coûts d'installation actuel d'une usine CCP espagnole [€/W_{installé}]

Néanmoins, on constate que la borne supérieure de 2,5 €/W est dépassée par le coût initial de puissance installée de 4-5 €/W de son homologue espagnol. De plus, cette borne supérieure de 2,5 €/W comprend également les frais d'exploitation et de démantèlement, frais non compris dans le coût d'installation initial. Par ailleurs, ces coûts d'installation entre 4-5 €/W sont calculés sur base d'une centrale solaire de grande puissance entre 30 et 80 MW, profitant ainsi d'une réduction de coût par rapport à de petites installations.

Cependant, il faut nuancer cette comparaison, puisque les centrales solaires thermodynamiques à concentration cylindro-paraboliques possèdent une infrastructure plus lourde, notamment avec l'installation d'une turbine à vapeur. Enfin, ce coût calculé en Espagne dépend bien évidemment de l'ensemble du contexte socio-économique. Nous pouvons espérer atteindre des coûts d'installation plus bas, notamment par une main d'œuvre locale moins coûteuse et un abaissement du coût général de la technologie CCP.

Pour tenir compte de la différence de technologie entre une usine Hybrid Power et une usine CCP, nous pouvons calculer le coût de la puissance solaire totale qui est captée. Pour cela, nous supposons que l'usine Hybrid Power possède un rendement de conversion $\eta_{\text{conversion}} = 50\%$ et que l'usine CCP possède un rendement de conversion $\eta_{\text{conversion}} = 20\%$ [19]. Pour calculer cette puissance solaire captée P_{solaire} , il suffit de diviser la puissance installée $P_{\text{installée}}$ par le rendement de conversion $\eta_{\text{conversion}}$:

$$P_{\text{solaire}} = \frac{P_{\text{installée}}}{\eta_{\text{conversion}}}$$

Le graphique ci-dessous présente la puissance solaire pour les deux mêmes centrales. Comparé au graphique précédent, pour la centrale CCP, le coût d'installation pour un Watt de puissance solaire est cinq fois plus bas que le coût d'un Watt de puissance installée. Pour Hybrid Power, ce coût de puissance solaire est deux fois plus bas que le coût de puissance installé. Dès lors, pour la puissance solaire, les coûts d'installation actuellement réalisés pour la centrale Espagnole sont plus bas que la borne supérieure de Hybrid Power fixée par le prix de vente. Cette constatation nous laisse penser que, technologiquement parlant, il est possible de construire la centrale Hybrid Power en-dessous de la borne supérieure fixée par le prix de vente.

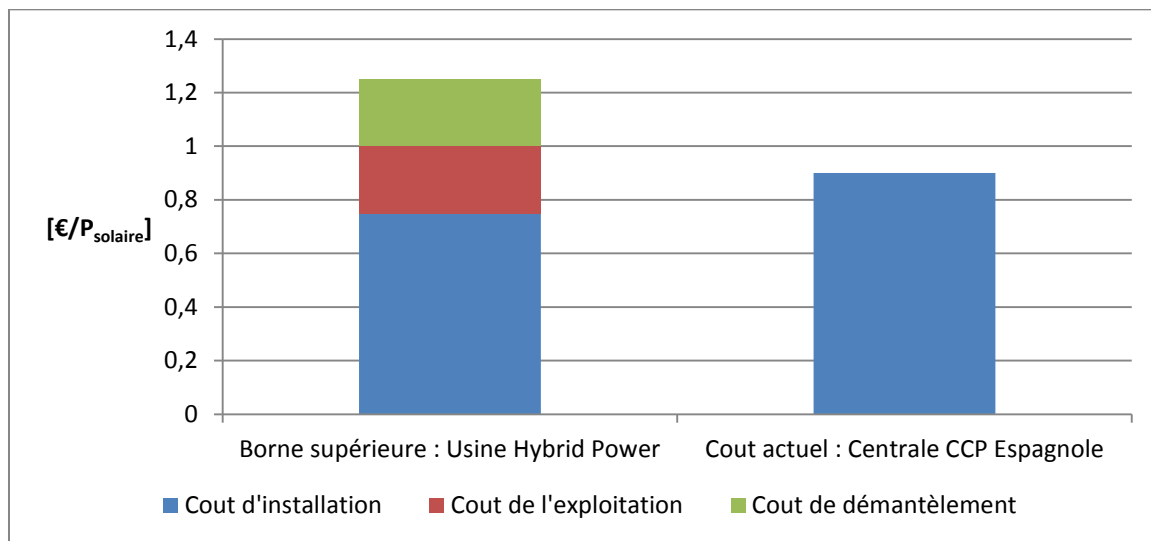


Figure 62 – Puissance solaire : Borne supérieure des coûts d'installation, de maintenance et de démantèlement de l'usine Hybrid Power comparés aux coûts d'installation d'une usine CCP espagnole [€/W]

Pour conclure, par ce premier estimatif, les économies réalisées par l'installation d'une centrale solaire atteignent un niveau de coût semblable aux technologies actuelles de concentration solaire. Il faut cependant étudier de manière plus précise les coûts d'installation, d'exploitation et de démantèlement pour déterminer la véritable rentabilité du projet.

8.3. Implémentation de la solution solaire

Dans les sections suivantes, nous étudierons de manière plus précise l'implémentation de l'usine solaire, notamment l'implémentation des concentrateurs solaires.

8.3.1. Principe de la centrale solaire

Une centrale solaire consiste à capter les rayons du soleil pour les focaliser en un point grâce à un concentrateur optique. Dans notre cas, à ce point focal sera situé le générateur thermoélectrique qui montera ainsi en température et produira de l'électricité. Sur la seconde face du générateur thermoélectrique, un fluide caloporteur, comme de l'huile, absorbe la chaleur traversant le générateur thermoélectrique. Ensuite, cette huile chauffée, circulant en circuit fermé, vient alimenter un échangeur de chaleur afin de fournir en énergie un processus industriel. L'huile est généralement préférée comme fluide caloporteur car elle possède un point d'ébullition plus élevé que l'eau et est moins volatile [44].

8.3.2. Principe et objectif du concentrateur solaire

Le principal objectif d'un concentrateur solaire est de focaliser le rayonnement solaire sur une faible surface afin de diminuer au maximum les pertes.

Il existe plusieurs types de concentrateurs. Ils peuvent être réflecteurs ou réfracteurs, former une image ou non, posséder une surface cylindrique ou de révolution, et être segmentés ou continus [34]. De manière générale, les concentrateurs ne formant pas d'image ont un facteur de concentration faible (en-dessous de 10) et les concentrateurs linéaires formant une image ont un facteur de concentration moyen (entre 10 et 100). Les facteurs de concentration élevés peuvent par exemple être obtenus avec les fours solaires. Pour notre application solaire, nous nous concentrerons sur des facteurs de concentration moyens.

$$C_{opt} : \text{Facteur de concentration optique} = \frac{\text{Surface d'ouverture}}{\text{Surface du récepteur}}$$

Au plus le facteur de concentration est élevé, au plus la température atteinte au point focal est élevée. Or une énergie délivrée à plus haute température possède une valeur intrinsèque plus élevée qu'une énergie à plus basse température. Cependant, augmenter le facteur de concentration équivaut également à augmenter les coûts en termes de précision optique et de tracker solaire.

8.3.3. Concentrateur cylindro-parabolique

Le choix des concentrateurs solaires s'est porté sur les concentrateurs cylindro-paraboliques car ils possèdent un niveau de technologie très mature, abaissant ainsi leur coût d'acquisition [44]. Par ailleurs, ce type de concentrateur focalise les rayons sur une ligne, ce qui permet d'avoir un système de tracking uniaxial.

Il existe trois systèmes de tracking uniaxial différent : Nord-Sud, Est-Ouest, et incliné et parallèle à l'axe de la Terre. Les systèmes de tracking sont également accompagnés d'un ajustement mécanique, soit programmé en fonction du parcours du soleil dans le ciel, soit recherchant la position du soleil avec un capteur. L'idéal consiste à concevoir un système d'ajustement préprogrammé et une légère correction avec un capteur qui réalise un alignement parfait [34].

Généralement, le tracker Est-Ouest possède une meilleure performance globale annuelle que le tracker Nord-Sud qui collecte plus d'énergie durant l'été et moins durant les autres saisons [44]. Il est donc intéressant de choisir l'orientation Nord-Sud lorsque la consommation est plus forte durant l'été, ce qui n'est pas le cas de l'entreprise Blancatex.

8.3.4. Géométrie du concentrateur cylindro-parabolique

Ci-dessous, le schéma représente la géométrie classique d'un concentrateur cylindro-parabolique [45]. La surface de réflexion AOB capte les rayons du soleil de manière parallèle à l'axe de la parabole OF ou avec un angle d'acceptance δ . On suppose que la surface AOB possède une réflexion spéculaire et que les rayons du soleil arrivent de manière parallèle entre eux. De cette manière, tous les rayons arrivant de manière parallèle à l'axe de la parabole OF sont réfléchis au point focal F. C'est par exemple le cas des rayons arrivant le long de la droite S. Si les rayons possèdent un angle d'incidence δ , comme pour la droite S', la réflexion se réalise selon l'axe AM qui possède également un angle δ par rapport à l'axe AF. L'absorbeur est un tube circulaire dont le centre se situe précisément au point focal F.

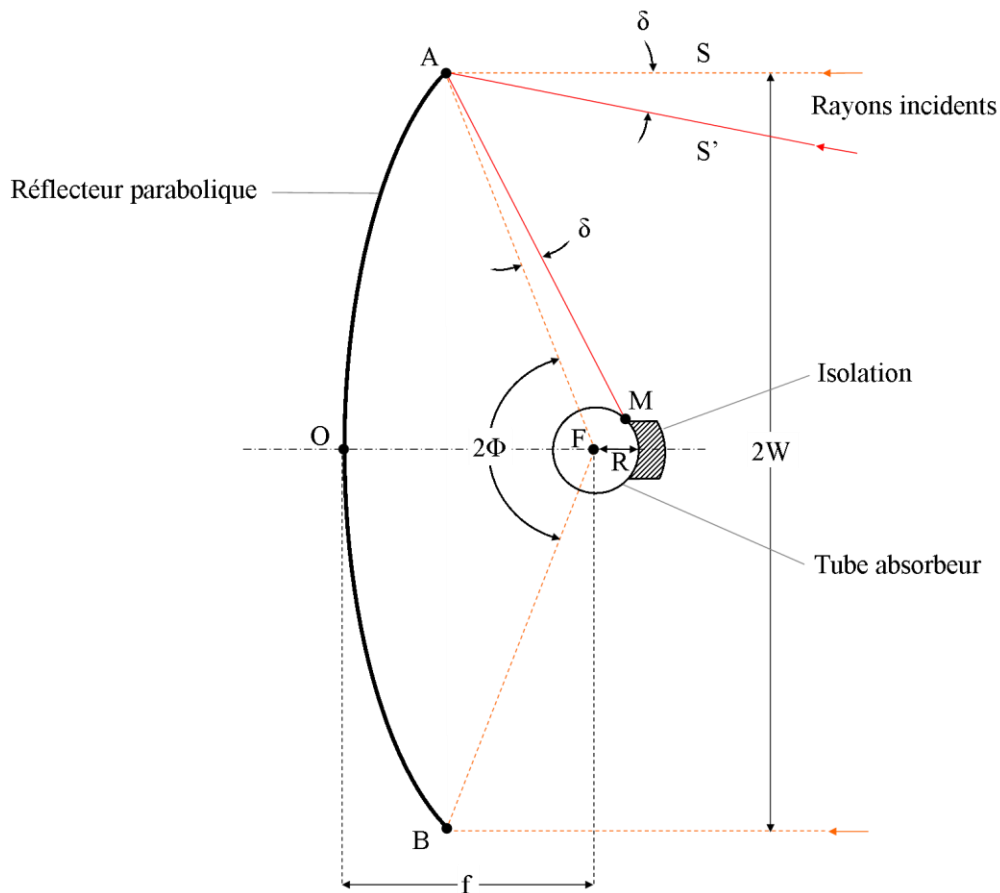


Figure 63 - Géométrie du concentrateur cylindro-parabolique

Afin de choisir la géométrie du concentrateur, il faut tenir compte de trois aspects essentiels :

- Le facteur de concentration optique
- La facilité de tracking
- Le coût de la surface réfléchissante, de la structure porteuse et du système de tracking

Le facteur de concentration optique sera déterminé avec le niveau de température souhaité au niveau de l'absorbeur. Le système de tracking se doit d'être simple afin de réduire au maximum son coût. De même, la surface de réflexion doit être optimisée sachant que c'est l'un des principaux coûts.

Pour analyser la géométrie de manière plus précise, nous pouvons identifier les paramètres suivants :

- L'ouverture effective : $2W - 2R$
- L'angle d'ouverture : ϕ
- La surface de réflexion : $2S$
- L'angle d'acceptance : δ
- Diamètre minimum de l'absorbeur : $2 R_{\min}$
- Le temps de tracking : T
- Facteur de concentration : C_{opt}

- L'ouverture effective

L'ouverture effective est égale à la largeur de la surface réfléchive $2W$ moins la largeur de l'ombre de l'absorbeur $2R$ (cf. Figure 63 page 88).

$$\text{Ouverture effective} = 2W - 2R$$

Avec

$2W$: Largeur de la surface réfléchive [m]

$2R$: Diamètre de l'absorbeur [m]

- L'angle d'ouverture

L'angle d'ouverture ϕ , est égal à la moitié de l'angle sous-tendu par les bords de la surface de réflexion (cf. Figure 63 page 88). Il ne faut donc pas confondre cet angle d'ouverture avec l'angle d'ouverture total de la parabole 2ϕ .

- La surface de réflexion

La surface de réflexion est donnée par l'expression suivante [46] :

$$2S = 2f \left[\frac{1}{\cos\left(\frac{\phi}{2}\right)} \operatorname{tg}\left(\frac{\phi}{2}\right) + \ln \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\phi}{2}\right)} + \operatorname{tg}\left(\frac{\phi}{2}\right) \right) \right]$$

Avec

f : Distance focale sur l'axe de la parabole [m]

Le coût du concentrateur étant directement lié à la surface de réflexion, il est intéressant d'analyser le ratio de la surface de réflexion par rapport à la surface projetée (surface normale aux rayons incidents du soleil). Ce ratio nous donne une idée de l'efficacité du récepteur par rapport à une surface captée de manière perpendiculaire au soleil.

$$\frac{2S}{2W} : \frac{\text{Surface de réflexion}}{\text{Surface projetée}}$$

En utilisant l'équation pour une parabole horizontale et l'expression du rayon [34], il est possible d'exprimer la demi-hauteur de la parabole W en fonction de l'angle d'ouverture :

$$W = \frac{2 * f \sin \phi}{1 + \cos \phi}$$

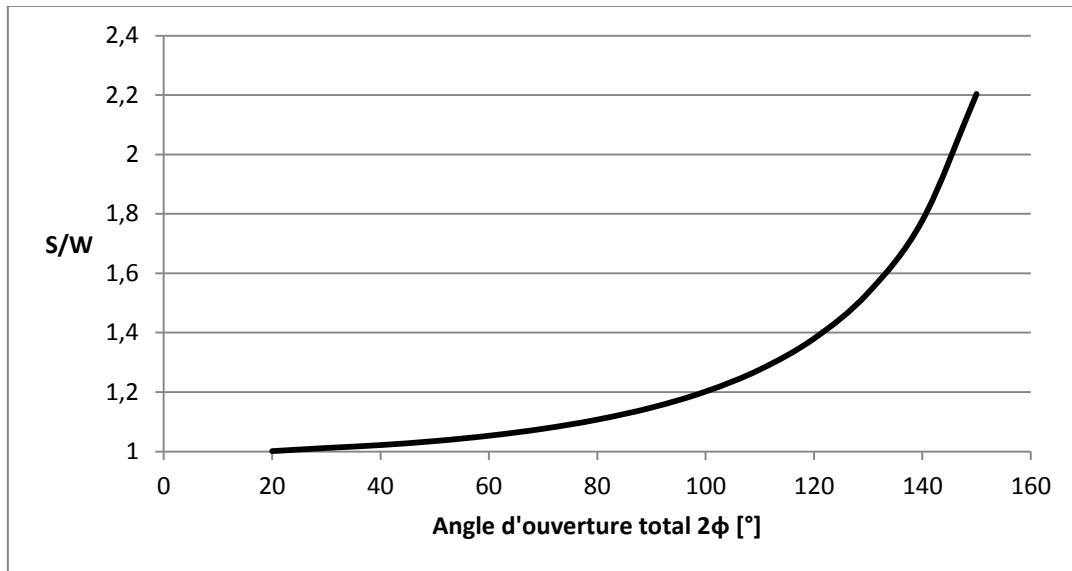


Figure 64 - Variation du ration Surface du réflecteur/Surface projetée en fonction de l'angle d'ouverture ϕ

On constate qu'au-delà d'un certain angle d'ouverture, l'augmentation de la surface de réflexion n'entraîne qu'une faible augmentation de la surface captée normale au soleil. Un angle d'ouverture total raisonnable se situe dès lors aux alentours de 140 °C.

- Le diamètre de l'absorbeur

Le diamètre minimum de l'absorbeur est donné par l'expression ci-dessous [47] :

$$2 R_{min} = \frac{4f \sin \delta}{1 + \cos \phi} [m]$$

- Le temps de tracking

Avec cette dimension minimale pour le diamètre du tube $2 R_{\min}$, l'absorbeur capte tous les rayons incidents compris entre $\pm \delta$ par rapport à l'axe de la parabole. C'est-à-dire que si le concentrateur solaire est statique, il ne faut pas ajuster l'axe du concentrateur par rapport à la position du soleil tant que la déviation angulaire ne dépasse pas δ . Lorsque cet angle d'acceptance est suffisamment grand, le concentrateur solaire peut-être ajusté de manière périodique. L'intervalle entre ces deux ajustements est appelé le temps de tracking et est défini comme suit [48] :

$$T = 8 * \delta [min]$$

- Le facteur de concentration optique

Selon la géométrie vue précédemment, le facteur de concentration peut-être réécrit sous cette forme [49] :

$$C_{opt} = \frac{1 - \frac{\sin \delta}{\sin \phi}}{\pi \frac{\sin \delta}{\sin \phi} \left(\frac{\phi + 90 - \delta}{180} \right)}$$

Le tableau ci-dessous présente les différentes valeurs du facteur de concentration optique en fonction de l'angle d'acceptance δ et de l'angle d'ouverture ϕ :

Angle d'ouverture ϕ (°)	Angle d'acceptance δ (°)				
	0,50	1,00	2,5	5,00	7,50
90	36,3	18,0	7,08	3,43	2,21
80	37,8	18,8	7,38	3,58	2,31
70	38,3	19,0	7,47	3,62	2,33
60	37,7	18,7	7,32	3,53	2,27
50	35,6	17,7	6,90	3,31	2,11
40	32,1	15,9	6,17	2,92	1,84
30	27,0	13,3	5,10	2,36	1,44
20	20,0	9,78	3,65	1,60	0,91

Tableau 35 - Variation du facteur de concentration optique en fonction de l'angle d'acceptance et de l'angle d'ouverture

On remarque que le plus grand facteur de concentration est trouvé pour un angle d'acceptance le plus faible et avec un angle d'ouverture égale à environ 70 °. Bien que la diminution de l'angle d'acceptance augmente considérablement le facteur de concentration, un très faible angle d'acceptance implique une augmentation considérable des coûts. Ce surcoût est dû à la plus grande qualité des optiques et la plus grande robustesse du support afin d'éviter la

moindre déviation lors de charges dues au vent. Nous supposons qu'une valeur économiquement acceptable de l'angle d'acceptance est de 1° . Avec un angle d'ouverture de 70° , nous retrouvons donc un facteur de concentration de 19 :

$$\text{Angle d'ouverture: } \phi = 70^\circ$$

$$\text{Angle d'acceptance: } \delta = 1^\circ$$

$$C_{opt} = 19$$

Pour la suite des déterminations des paramètres géométriques, nous considérerons que les facteurs principaux sont la facilité de mise en œuvre et du démantèlement, le coût de fabrication ou d'achat des composants du système, une structure légère, une maintenance aisée, etc. Il nous semble donc opportun de recourir à des dimensions de concentrateur qui puissent être manipulées facilement et qui permettent également une production à grande échelle à faible coût. C'est pourquoi nous fixons de manière arbitraire une largeur de concentrateur égale à 2m.

$$2W = 2 [m]$$

Grâce à cette largeur $2W$ et l'angle d'ouverture de 70° , nous déterminons la distance focale f :

$$f = \frac{W(1 + \cos\phi)}{2\sin\phi} = 0,71 [m]$$

Nous déterminons ensuite le diamètre du tube absorbeur :

$$2R = \frac{4f \sin\delta}{1 + \cos\phi} = 3,7 [cm]$$

Ci-dessous, la géométrie, non à l'échelle, du concentrateur avec les différentes mesures est illustrée :

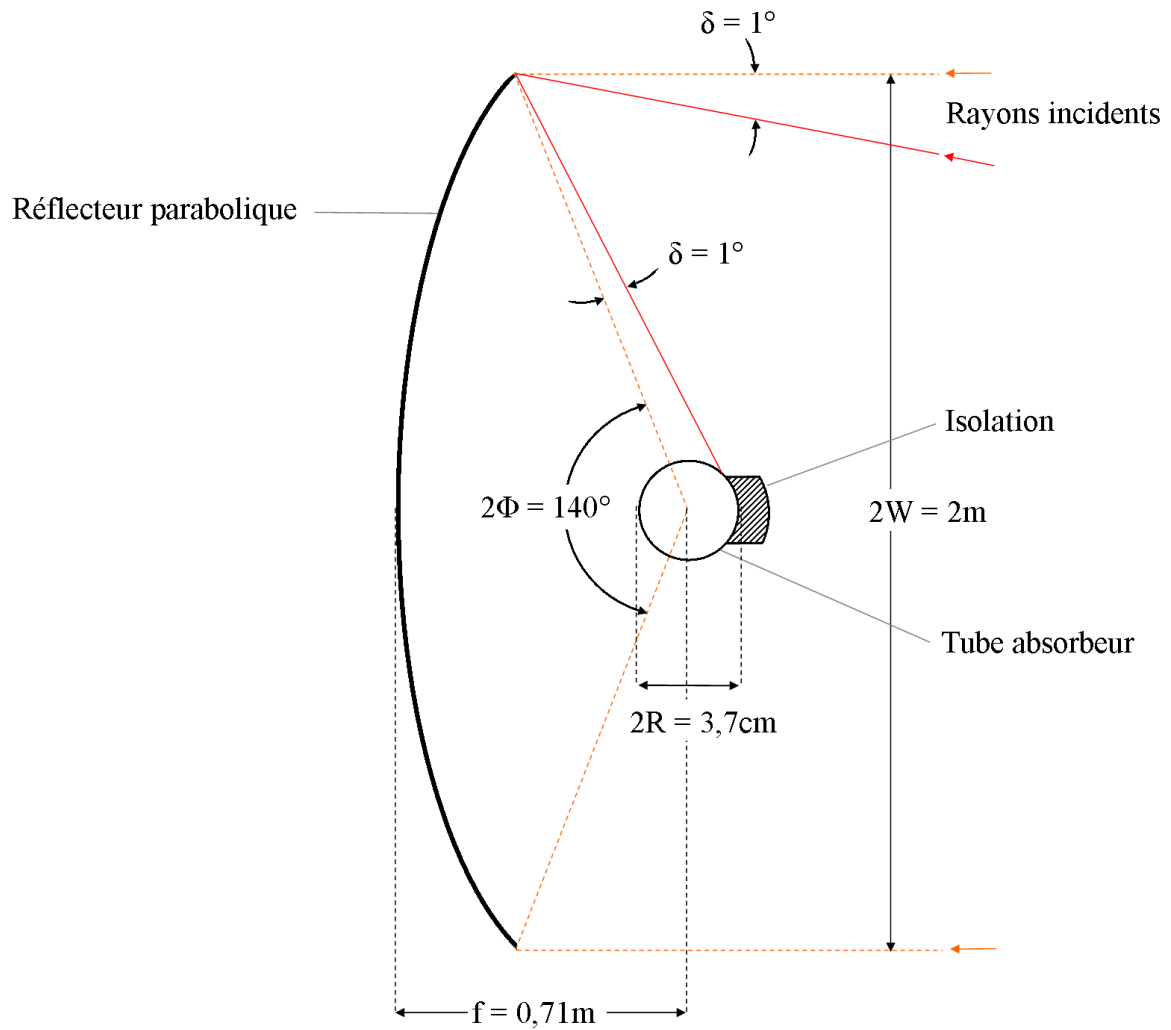


Figure 65 - Schéma non à l'échelle du concentrateur cylindro-parabolique

8.3.5. Disposition des concentrateurs sur le toit

Comme vu précédemment, le toit de l'entreprise de Blancatex se compose de quatre surfaces d'environ 120 m² séparée par un muret. Ci-dessous est illustrée l'implémentation des concentrateurs solaires pour deux surfaces de 120 m² fusionnées ensemble, donnant ainsi une surface de toit de 16 x 15 m. A titre illustratif, un concentrateur cylindro-parabolique du marché est également présenté [50].

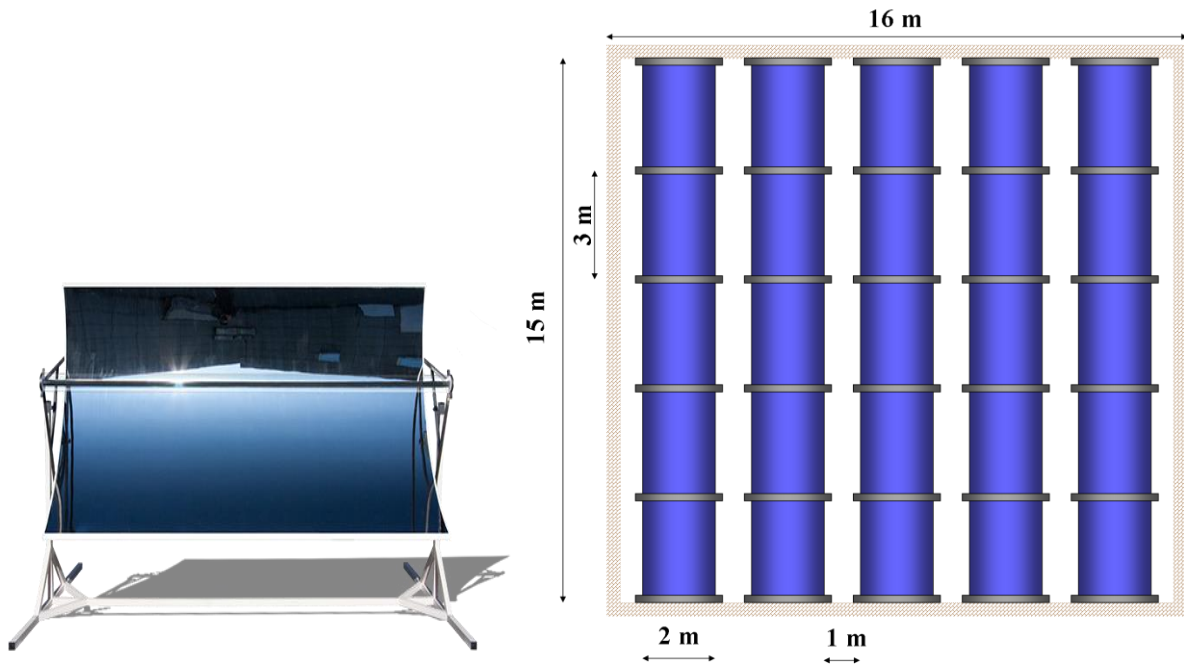


Figure 66 - Gauche : Concentrateur solaire cylindro-parabolique (2 x 3m). Droite : Implémentation des concentrateurs sur le toit de Blancatex, vue en plan.

La centrale solaire se composera donc de deux unités, possédant chacune 5 rangées de concentrateurs. Chaque rangée de concentrateur étant soutenue par des supports rotatifs espacés de 3 m.

Ci-dessous, un tableau reprend les caractéristiques de la centrale solaire :

Dimension en plan d'un concentrateur	2 x 3 [m]
Nombre de concentrateurs	50
Longueur total des concentrateurs	150 [m]
Surface total des concentrateurs	300 [m ²]

Tableau 36 – Dimensions caractéristiques de la centrale solaire

8.4. Bilan thermique de la centrale solaire

A présent que nous connaissons la géométrie des concentrateurs solaires, nous pouvons déterminer la suite du système. Pour dimensionner le système, nous fixons en cours de développement quelques paramètres. Nous effectuons le bilan thermique sur 1m courant de concentrateur solaire. Nous supposons également que le système est en régime.

8.4.1. Pertes optiques

Comme illustré précédemment, les rayons du soleil sont tout d'abord réfléchis sur le réflecteur cylindro-parabolique. On fixera de manière standard une perte optique par réflexion de 10%, comportant notamment le coefficient de réflexion et l'imprécision optique du réflecteur cylindro-parabolique [51].

Le rendement optique du réflecteur est donc de $\eta_{Opt, \text{réflecteur}} = 90\%$.

Une fois les rayons réfléchis, ils traversent une paroi en verre du type Pyrex avant d'être concentrés sur le tube absorbeur. Généralement, le coefficient de transmission d'un tel tube en verre est de $\eta_{Opt, \text{tube en verre}} = 90\%$ [32]. Le rendement optique total est donc de :

$$\eta_{Opt, total} = \eta_{Opt, \text{réflecteur}} * \eta_{Opt, \text{tube en verre}} = 0,9 * 0,9 = 0,81$$

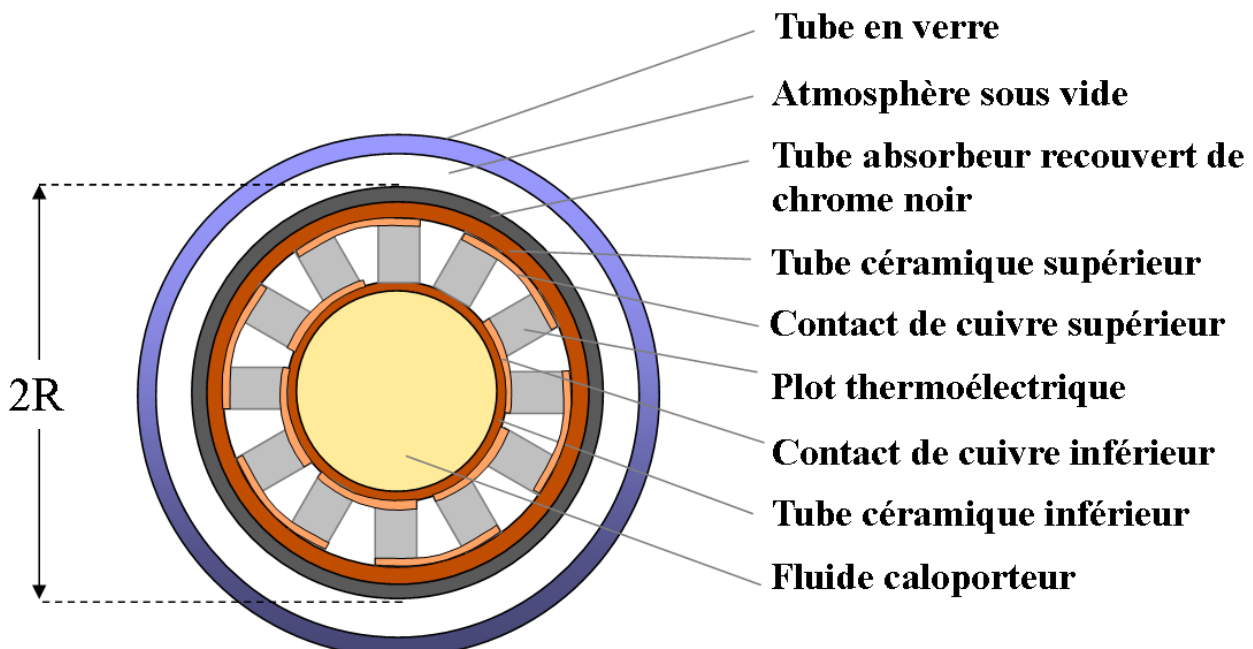


Figure 67 - Schéma de l'absorbeur de chaleur, des plots thermoélectriques et du système de refroidissement

8.4.2. Pertes par réflexion

Nous considérons que l'absorbeur est composé d'un tube en acier recouvert de chrome noir, possédant un facteur d'absorption $\alpha = 0,95$ et une émissivité $\varepsilon = 0,10$ [33].

$$\alpha = 0,95$$

8.4.3. Apport de chaleur par le concentrateur

Afin de connaître l'éclairement énergétique maximum, nous avons recherché les données utiles sur le site de PVGIS [5]. Toutes les tables d'éclairement se trouvent en annexes.

Heure	G	G _d	G _c	DNI	DNI _c	A	A _d	A _c
12 : 07	919	176	1040	755	931	935	179	1060

Tableau 37 - Valeurs d'ensoleillement au Maroc durant le mois de Juin

Le mois de juin est le plus ensoleillé de l'année au Maroc. Vers midi, par temps dégagé, le rayonnement direct sur une surface perpendiculaire au soleil est de 931 W/m² :

$$DNI_c = 931 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

La surface effective captée par le concentrateur est de :

$$A = (2W - 2R) * 1 = (2 - 0.037) * 1[m] = 1,96 [m^2]$$

En retirant les pertes optiques et les pertes par réflexion, on obtient le flux de chaleur absorbé par le tube absorbeur Q_a :

$$Q_a = A * DNI_c * \eta_{opt} * \alpha = 1,96 * 931 * 0,81 * 0,95 = 1406 W$$

8.4.4. Température maximale

La température maximale atteinte par l'absorbeur ne doit pas dépasser les 400 °C. En effet, les propriétés du générateur thermoélectrique se dégradent fortement au-delà de cette température. Le module thermoélectrique ne sera donc pas conçu pour fonctionner au-dessus de cette température maximale.

$$T_h = 400 [^{\circ}C]$$

8.4.5. Pertes par convection

En supposant un système sous vide, les pertes par convection peuvent être éliminées en grande partie. Nous négligerons donc ces pertes.

8.4.6. Pertes par radiation

Le calcul des pertes par radiation se réalise de la même manière que dans le chapitre précédent. Nous considérerons ici uniquement les pertes par radiation de l'absorbeur et les pertes par radiation des autres éléments, notamment des matériaux thermoélectriques pouvant être négligés [32].

Bien que le tube absorbeur soit isolé en partie, nous considérerons que l'entièreté de sa surface est à 400°C et qu'elle rayonne vers l'atmosphère. A nouveau, nous calculons les pertes pour un mètre courant :

$$q_r = S * \epsilon * \sigma * (\overline{T}_h^4 - T_{sky}^4) = 154 [W]$$

Avec

$$S = 2\pi R * 1 = \pi * 0,0371 [m] * 1 [m] = 0,117 [m^2]$$

$$\epsilon = 0,10$$

$$\sigma = 6,67.10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$$

$$\overline{T}_h = 673 [K]$$

$$T_{sky} = 293 [K]$$

8.4.7. Flux de chaleur traversant le générateur

Dans ces conditions d'éclairement maximum, le flux de chaleur traversant le générateur est simplement déterminé par le flux de chaleur absorbé soustrait du flux de chaleur radié :

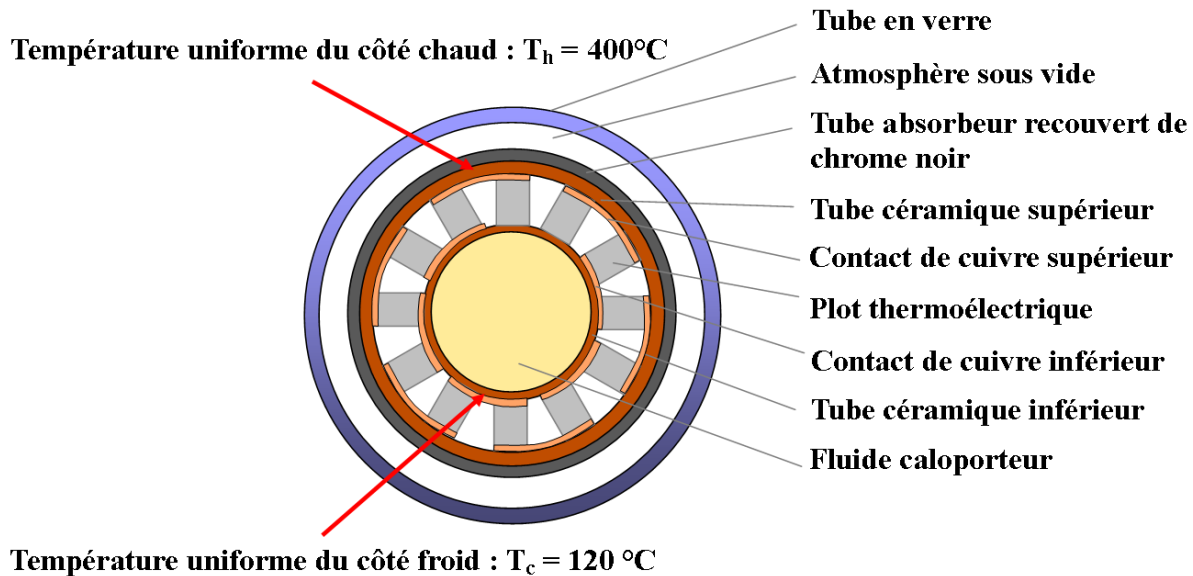
$$Q = Q_a - q_r = 1406 - 154 = 1252 [W]$$

8.4.8. Résistance thermique maximale

Puisque nous connaissons la température et le flux de chaleur traversant le module, nous pouvons donc déduire la résistance thermique maximale du générateur thermoélectrique en supposant que $T_c = 120^\circ C$:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{400 - 120}{1253} = 0,2235 \left[\frac{K}{W} \right]$$

Notons bien évidemment que les résistances thermiques du tube absorbeur, du tube céramique supérieur et des contacts de cuivre supérieurs ont été négligées étant donné leur relativement grande conductance thermique par rapport aux plots thermoélectriques. Ainsi, nous supposons que la température du côté chaud est uniforme dans le tube absorbeur, le tube en céramique supérieur, les contacts de cuivre supérieurs et la face chaude des plots thermoélectriques. Le schéma ci-dessous représente ce fonctionnement en régime maximal :



8.4.9. Récapitulatif

Ci-dessous, le récapitulatif du bilan thermique lorsque le système fonctionne en régime avec l'ensoleillement maximum.

Eclairement énergétique	$DNI_c = 931 \text{ [W/m}^2\text{]}$
Flux de chaleur absorbé	$Q_a = 1406 \text{ [W]}$
Température maximale côté chaud	$T_h = 400 \text{ [}^\circ\text{C]}$
Pertes par radiation	$q_r = 154 \text{ [W]}$
Flux de chaleur traversant le générateur	$Q = Q_a - q_r = 1252 \text{ [W]}$
Température côté froid	$T_c = 120^\circ\text{C}$
Résistance thermique maximale du générateur	$R_{th,max} = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{T_h - T_c}{Q} = 0,2235 \left[\frac{\text{K}}{\text{W}} \right]$

Tableau 38 - Récapitulatif des pertes et du flux de chaleur traversant le module pour un absorbeur cylindrique

8.5. Dimensionnement des générateurs thermoélectriques

Dans la section précédente, nous avons déterminé les caractéristiques que doit posséder le générateur thermoélectrique lorsqu'il fonctionne à son plus haut régime, en déduisant une résistance thermique maximale $R_{th,max}$. Nous pouvons dès lors dimensionner les plots thermoélectriques qui composeront le générateur.

8.5.1. Propriétés physiques des matériaux thermoélectriques

Nous savons que les propriétés du Fe_2VAl se modifient avec la température. Cependant, afin de simplifier les calculs, nous supposons que l'alliage possède des caractéristiques constantes, comme indiquées dans le tableau ci-dessous :

Température du côté chaud	$T_h = 400$ [°C]
Température du côté froid	$T_c = 120$ [°C]
Température moyenne	$T_m = 260$ [°C]
Coefficient Seebeck	$\alpha = 100$ [$\mu V/K$]
Résistivité électrique	$\rho = 2,5$ [$\mu\Omega m$]
Conductivité thermique	$\lambda = 10$ [W/mK]
Facteur de mérite	$ZT_m = 0,21$

Tableau 39 - Propriétés du Fe_2VAl utilisées pour le dimensionnement

8.5.2. Résistance thermique du générateur circulaire

La résistance thermique du générateur a été précédemment calculée pour un mètre courant du dispositif. Etant donné que la conductivité thermique du matériau est fixée, il reste donc uniquement deux paramètres à déterminer. Premièrement, la section totale « A_t » des plots thermoélectriques et deuxièmement leur longueur « l ». Ci-dessous, l'équation qui régit la résistance thermique de l'ensemble des plots du générateur :

$$R_{th} = \frac{l}{\lambda A_t} = 0,2235 \left[\frac{K}{W} \right]$$

Avec

l : Longueur des plots thermoélectriques [m]
 A_t : Section totale des plots thermoélectriques [m^2]

En fixant plusieurs longueurs de plots, nous pouvons déterminer la section totale à prévoir.

Ci-dessous, un tableau présente la section totale, ainsi que le nombre de plots nécessaires de forme parallélépipède rectangle possédant une base carrée de 1x1cm. De même, on y indique le ratio entre la surface du tube absorbeur ($S = 0,117 \text{ m}^2$) et la section totale des plots « A_t » :

$$\frac{A_t}{S} = \frac{\text{Section totale des plots thermoélectriques}}{\text{Surface du tube absorbeur}}$$

Longueur des plots : l [cm]	15	10	5	1	0.5
Section nécessaire : A_t [cm ²]	671	447	224	45	22
Nombre de plots l x 1 x 1 [cm]	671	447	224	45	90
Section des plots/ Surface du tube [%]	57,36	38,24	19,12	3,82	1,91

Tableau 40 - Dimensionnement des plots thermoélectrique pour le générateur cylindrique

Pour avoir un bon contact thermique entre le tube absorbeur et le tube intérieur où circule le fluide caloporteur, il est nécessaire d'avoir un ratio A_t/S suffisamment élevé, environ égale à 50%. Cependant, en augmentant la section A_t , la résistance R_{th} diminue. Pour augmenter la résistance thermique, il faut donc augmenter la longueur des plots thermoélectriques. Or, étant donné les dimensions restreintes du tube absorbeur ($2R = 3,7 \text{ cm}$), la longueur des plots ne peut guère dépasser 1cm.

La géométrie cylindrique proposée ne semble donc pas convenir. En effet, la surface d'échange du tube absorbeur S est trop importante et les dimensions intérieures sont trop petites pour développer des plots thermoélectriques suffisamment longs.

8.5.3. Absorbeur plan

Afin de réduire la surface d'échange avec l'extérieur, nous pouvons changer la géométrie de l'absorbeur d'une forme circulaire à une forme plane.

L'expression ci-dessous détermine la dimension de l'absorbeur plan « L » [34]. Egalement, pour réduire la taille de celui-ci, nous avons diminué l'angle d'acceptance « δ » à $0,5^\circ$.

$$\text{Largeur de l'absorbeur plan : } L = \frac{2 r \sin \delta}{\cos(\phi + \delta)} = 0,0553 \text{ [m]}$$

$$\text{Surface de l'absorbeur plan : } S = 0,0553 \text{ [m}^2\text{]}$$

Avec

$$\text{Rayon maximum de la parabole : } r = \frac{2f}{1 + \cos \phi} = 1,058 \text{ [m]}$$

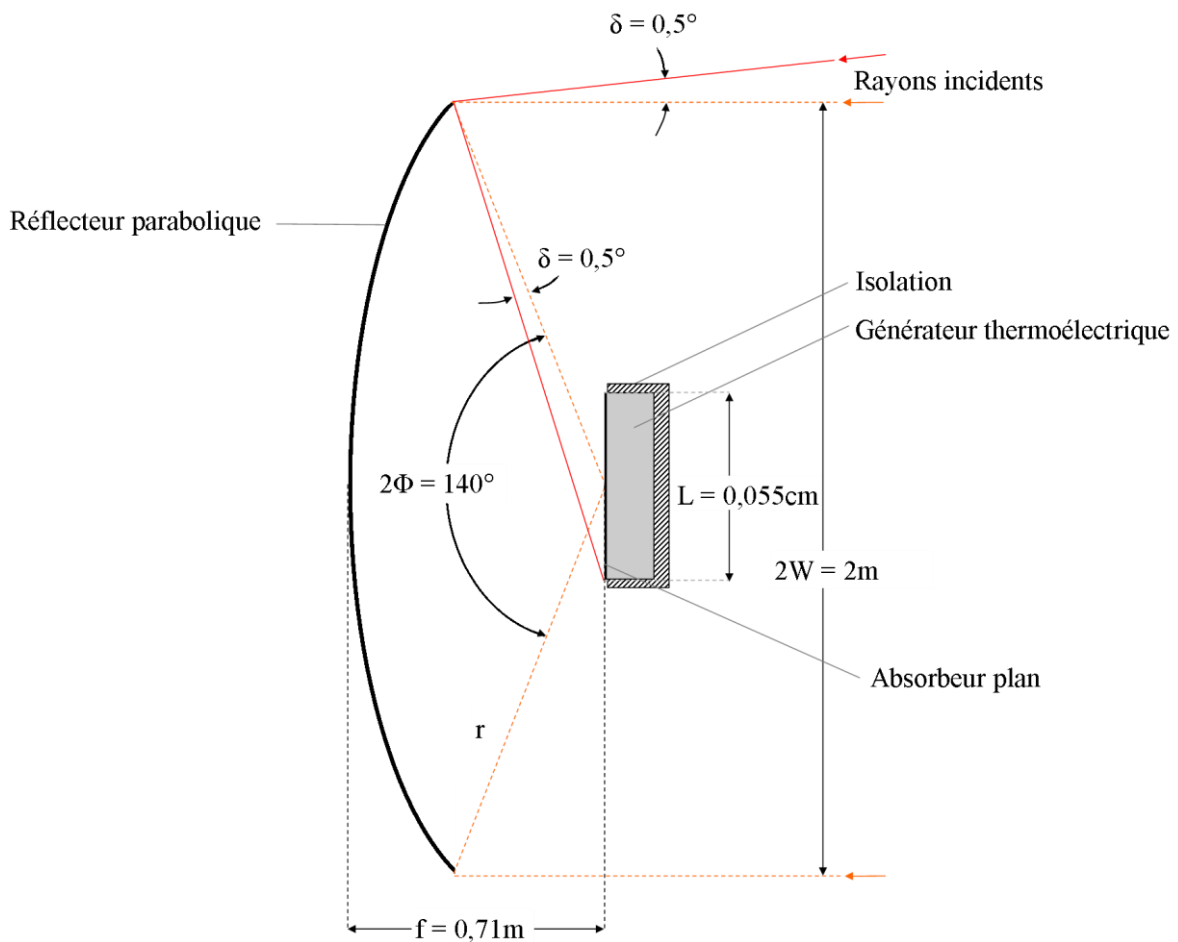


Figure 69 - Schéma non à l'échelle du concentrateur cylindro-parabolique et de l'absorbeur plan

Avec cette nouvelle géométrie pour l'absorbeur, nous pouvons recalculer, comme précédemment, le flux de chaleur traversant le module thermoélectrique et la résistance maximale lors du régime maximum. Le tableau suivant présente les résultats.

Eclairement énergétique	$DNI_c = 931 [W/m^2]$
Surface effective captée	$A = 1,945 [m^2]$
Flux de chaleur absorbé	$Q_a = 1393 [W]$
Température maximale côté chaud	$T_h = 400 [^{\circ}C]$
Pertes par radiation	$q_r = 73 [W]$
Flux de chaleur traversant le générateur	$Q = Q_a - q_r = 1320 [W]$
Température côté froid	$T_c = 120 [^{\circ}C]$
Résistance thermique maximale du générateur	$R_{th,max} = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{T_h - T_c}{Q} = 0,2121 \left[\frac{K}{W} \right]$

Tableau 41 - Récapitulatif des pertes et du flux de chaleur traversant le module pour un absorbeur plan

8.5.4. Résistance thermique du générateur plan

A présent que nous connaissons la résistance maximale du générateur plan lors de son fonctionnement en régime maximum, nous pouvons dimensionner les plots thermoélectriques, comme illustré au tableau suivant :

Longueur des plots : l [cm]	6	3	2	1	0.5
Section nécessaire : A_t [cm ²]	283	141	94	47	24
Nombre de plots l x 1 x 1 [cm]	283	141	94	47	24
Section des plots/ Surface de l'absorbeur plan [%]	51,14	25,57	17,05	8,52	4,26

Tableau 42 - Dimensionnement des plots thermoélectrique pour le générateur plan

Avec cette nouvelle géométrie, nous ne sommes pas limités par la hauteur des plots. Nous considérerons donc par la suite que le générateur thermoélectrique sera composé de 283 plots de 6 x 1 x 1 cm.

Sachant que les 283 plots sont répartis sur une surface de 5,5 cm de large et 100 cm de long, les schémas d'une disposition adaptée sont présentés ci-dessous.

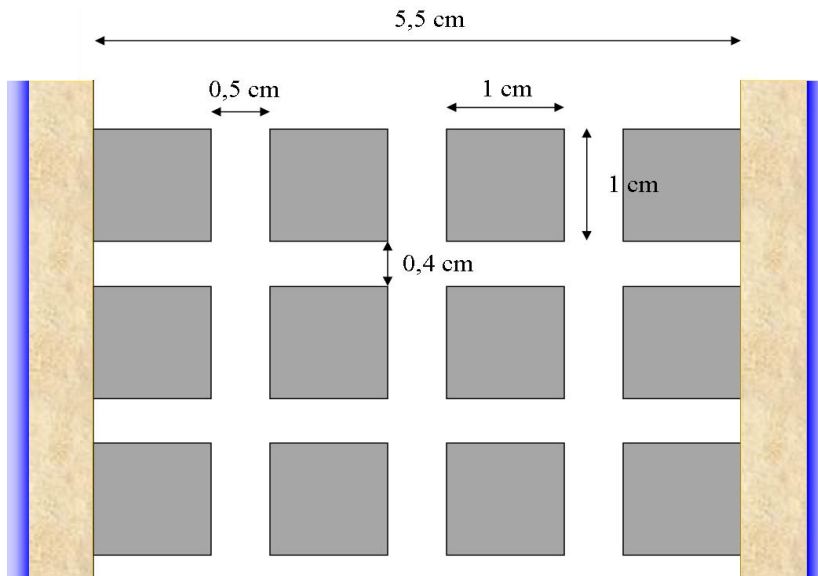


Figure 70- Vue en plan de la disposition des plots thermoélectriques

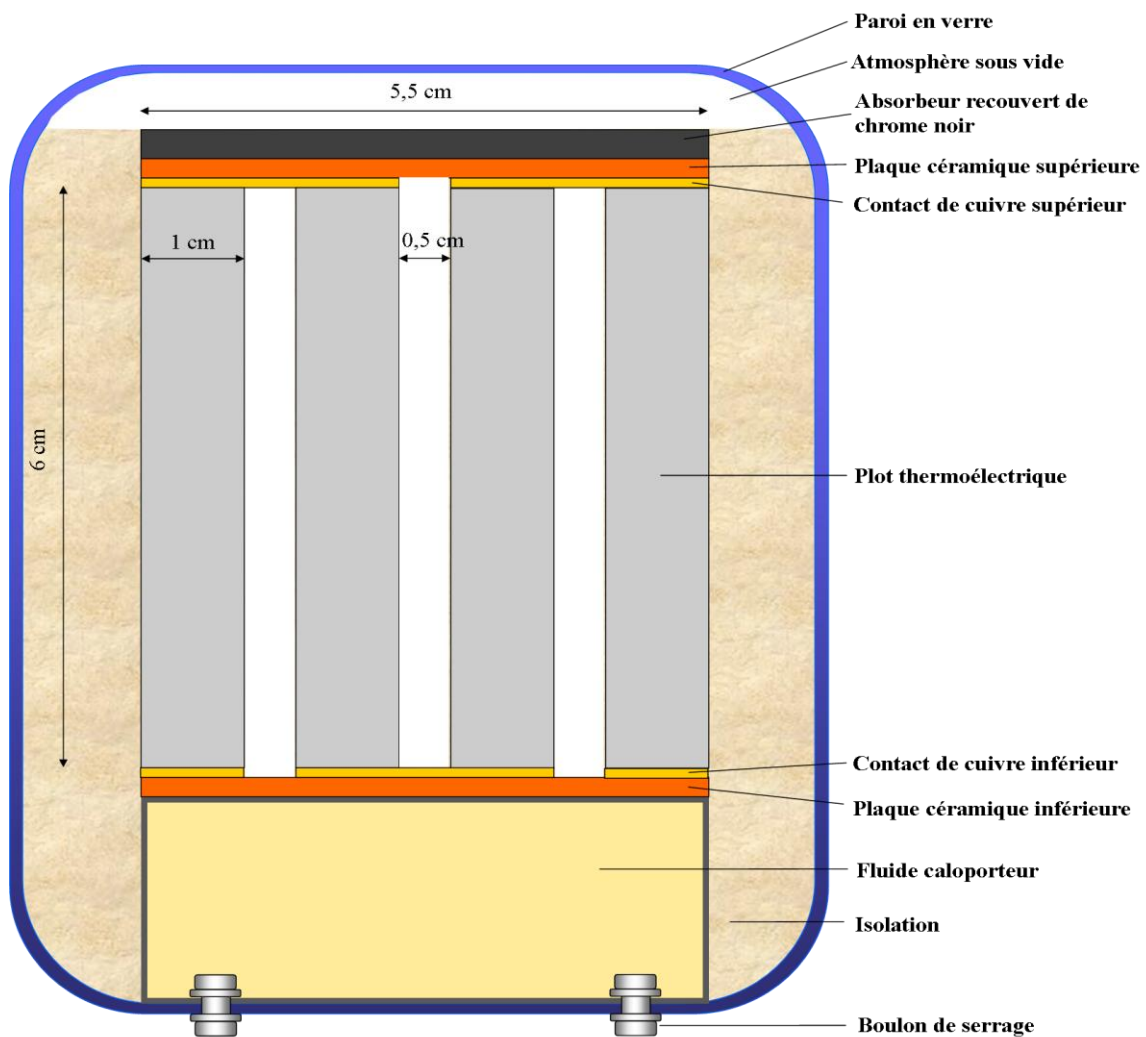


Figure 71 - Vue en coupe du générateur thermoélectrique

8.6. Rendement du générateur thermoélectrique

Avant de calculer la puissance produite par le générateur thermoélectrique, le tableau ci-dessous synthétise ses caractéristiques pour un mètre courant.

Résistance thermique	$R_{th} = 0,2121 \left[\frac{K}{W} \right]$
Section totale A_t	283 [cm ²]
Dimensions des plots	6 x 1 x 1 [cm]
Coefficient Seebeck	$\alpha = 100 \text{ } [\mu\text{V/K}]$
Résistivité électrique	$\rho = 2,5 \text{ } [\mu\Omega\text{m}]$
Conductivité thermique	$\lambda = 10 \text{ } [\text{W/mK}]$

Tableau 43 - Caractéristiques pour un mètre courant de générateur thermoélectrique.

8.6.1. Puissance maximale produite par le générateur

La puissance produite par le générateur peut être déterminée grâce à l'expression suivante [23] :

$$P = \frac{s}{1 + s^2} \frac{\alpha^2}{\rho} \frac{A_t \Delta T^2}{(n + l) \left(1 + \frac{2rl_c}{l} \right)^2}$$

Avec

$\Delta T = (T_h - T_c)$: Différence de température au borne du générateur

$s = \frac{R_L}{R_i} = 1$: Facteur de puissance

R_L : Résistance de charge

R_i : Résistance interne

$n = 0,1 \text{ } [mm]$: Coefficient de contact électrique

$r = 0,2$: Coefficient de contact thermique

$l_c = 0,7 \text{ } [mm]$: Epaisseur de la plaque céramique

$l = 6 \text{ } [mm]$: Longueur des plots thermoélectriques

Nous considérerons par la suite que le facteur de puissance « s » est égal à l'unité, afin de maximiser la puissance. Egalement, nous fixons les valeurs des paramètres « n », « r » et « l_c » [23].

- Puissance électrique maximale

Lorsque le générateur est à son régime maximal, le flux de chaleur qui le traverse est de $Q = 1320 \text{ W}$. La différence de température aux bornes de ce dernier est alors de $\Delta T = 280^\circ\text{C}$. Il est donc possible de déterminer directement la puissance électrique produite :

$$Q = 1320 [W]$$

$$\Delta T = T_h - T_c = 400 - 120 = 280 [^{\circ}C]$$

$$P = 36,6 [W]$$

- Puissance thermique

Nous considérons que la puissance thermique transmise au fluide caloporteur est égale à la puissance traversant le générateur thermoélectrique déduit de la puissance électrique produite. En d'autres termes, nous négligeons les différentes pertes par conduction, radiation et convection au niveau du dispositif.

$$Q_{th} = Q - P = 1283 [W]$$

8.6.2. Puissance variable

Lorsque l'ensoleillement n'est pas maximum, le générateur ne fonctionne pas à plein régime. Il faut dès lors parcourir les différentes étapes afin de connaître le flux de chaleur qui traverse le générateur.

Etant donné que les pertes par radiation dépendent de la température T_h , il est nécessaire d'itérer plusieurs fois avant que le bilan énergétique soit équilibré. Nous fixons néanmoins la température du côté froid $T_c = 120^{\circ}C$, en supposant que le débit est automatiquement réglé pour garder une température constante.

Ci-dessous, le tableau présente les résultats pour différents éclaircissements.

DNI _c [W/m ²]	T _h [°C]	q _r [W]	Q [W]
300	211,5	17,6	431
400	242,0	23,2	575
500	272,3	29,9	718
600	302,4	37,7	860
700	332,3	46,8	1001
800	361,8	57,2	1140
900	391,1	69,0	1278
931	400	73,0	1320

Tableau 44 - Température du côté chaud, pertes par radiation et flux de chaleur traversant le générateur pour différents éclaircissements, $T_c = 120^{\circ}C$.

Grâce à la température du côté chaud T_c et au flux de chaleur traversant le générateur thermoélectrique, nous pouvons calculer la puissance électrique et thermique comme précédemment :

$$P = \frac{s}{1 + s^2} \frac{\alpha^2}{\rho} \frac{A_t \Delta T^2}{(n + l) \left(1 + \frac{2rl_c}{l}\right)^2}$$

$$Q_{th} = Q - P = 1283 \text{ [W]}$$

Ci-dessous, le tableau et le graphique représentent les puissances électriques et thermiques produites par le dispositif pour différent éclairement DNI_c . Le rendement de conversion électrique du générateur est défini comme étant le ratio entre la puissance électrique produite (P) et le flux de chaleur traversant le module (Q) :

$$\text{Rendement de conversion électrique du générateur : } \eta_{c-e} = \frac{P}{Q}$$

DNI_c [W/m ²]	Puissance électrique : P [W]	Rendement de conversion électrique du générateur : η_{c-e} [%]	Puissance thermique : Q _{th} [W]
300	3,9	0,91	427
400	6,9	1,21	568
500	10,8	1,51	707
600	15,5	1,80	845
700	21,0	2,1	980
800	27,3	2,39	1113
900	34,3	2,68	1244
931	36,6	2,77	1283

Tableau 45 – Puissance électrique, rendement de conversion électrique et puissance thermique du générateur pour différents éclairagements pour un mètre courant de concentrateur cylindro-parabolique.

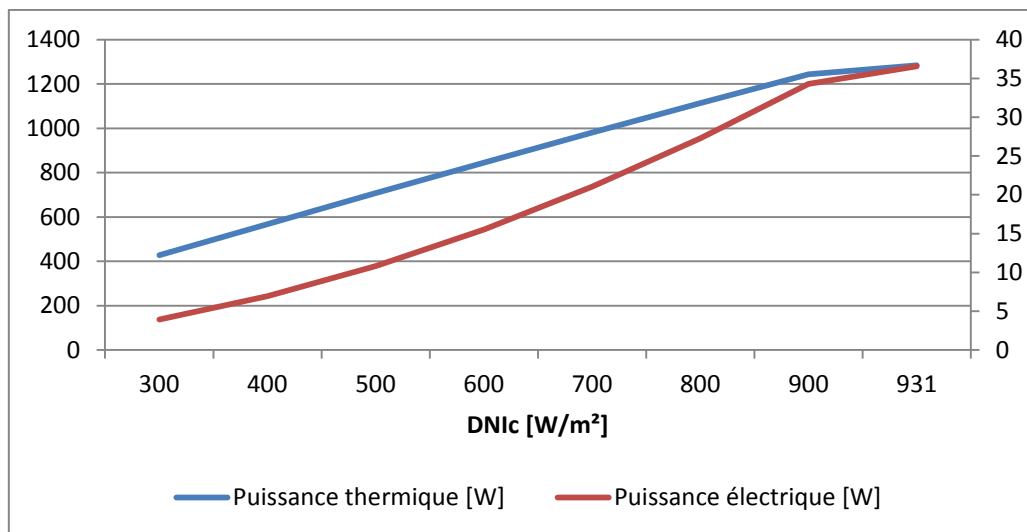


Figure 72 – Répartition de la puissance électrique et thermique du générateur pour différents éclairagements pour un mètre courant de concentrateur cylindro-parabolique.

8.7. Production annuelle

Après avoir étudié la variabilité de la production thermique et électrique en fonction de l'ensoleillement direct (DNI_c), nous pouvons estimer la production annuelle d'un tel dispositif situé sur le toit de l'entreprise Blancatex.

8.7.1. Eclairement moyen

Pour estimer la puissance produite, nous utilisons le DNI (Direct normal irradiance) donné dans les tables de PVGIS [W/m²]. Ces tables sont disponibles pour chaque mois de l'année et donne une valeur du DNI en fonction du moment de la journée.

Les graphiques ci-dessous présentent les valeurs du DNI pour le mois de Janvier et Juin et également les valeurs du DNI_c pour le mois de Juin. Notons que le DNI est une valeur moyenne de l'ensoleillement direct sur une surface orientée perpendiculairement au soleil. En revanche, le DNI_c est la valeur du DNI lorsque le ciel est dégagé (clear sky), le DNI_c ne représente donc pas la valeur moyenne sur le mois.

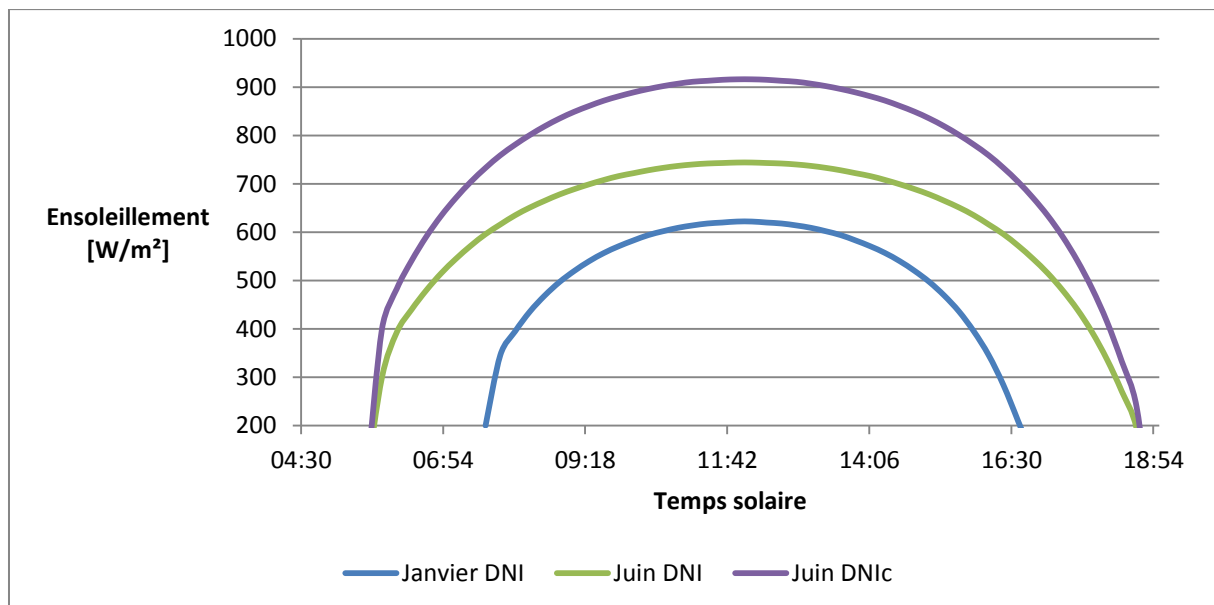


Figure 73 – Eclairement direct moyen (DNI) ou par temps dégagé (DNI_c) pour les mois de Janvier et Juin.

L'utilisation de la valeur moyenne de l'éclairement direct (DNI), sera donc une approximation pour le calcul de la puissance électrique. En effet, lorsque l'ensoleillement direct est maximal (DNI_c), le rendement de conversion électrique est plus important. L'utilisation d'une valeur moyenne gomme donc ces périodes de fonctionnement maximales et diminue par conséquent la puissance électrique produite. Cependant, notons que l'utilisation de cet éclairement direct moyen reste une bonne approximation.

8.7.2. Puissance thermique et électrique mensuelle

Pour calculer la production thermique et électrique, il faut calculer, pour chaque valeur du DNI, le flux de chaleur thermique et la puissance électrique produite. En utilisant la méthode de calcul présentée précédemment, nous obtenons donc une courbe de la puissance thermique et électrique moyenne mensuelle en fonction du temps.

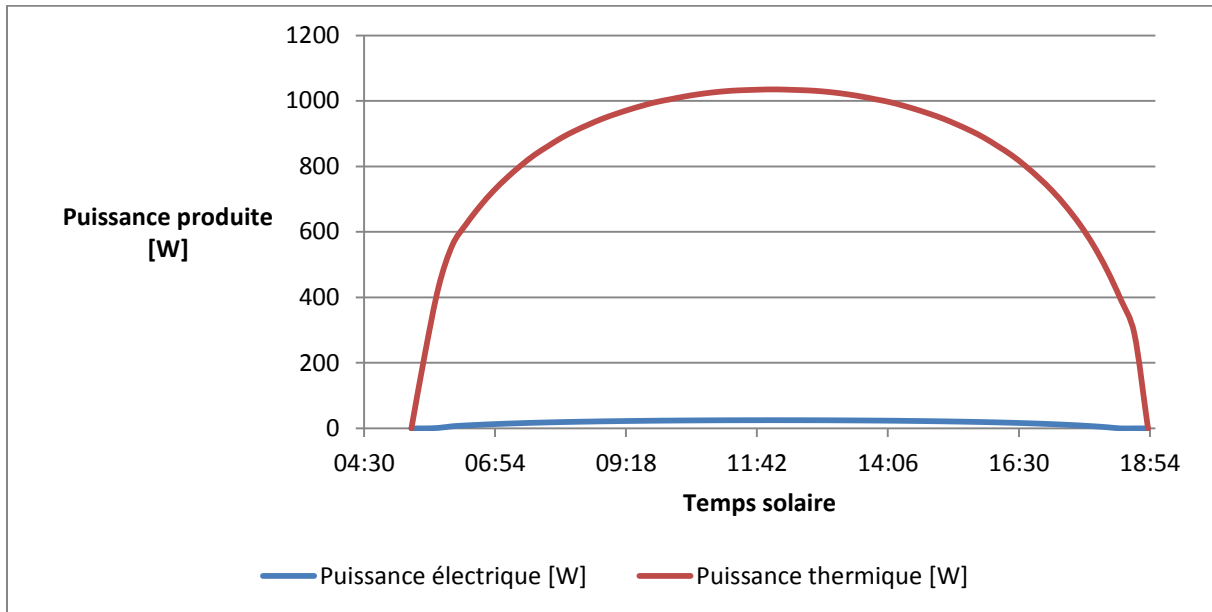


Figure 74 – Puissance électrique et thermique durant un jour moyen du mois de Juin, pour un mètre courant de concentrateur cylindro-parabolique.

8.7.3. Production annuelle

En intégrant les courbes de puissance thermique et électrique mensuelle, nous déterminons l'énergie thermique et électrique produites pour un mètre courant de concentrateur cylindro-parabolique. Nous déterminons l'énergie totale produite par la centrale sachant que la centrale comporte 150 m de concentrateurs (voir Tableau 36 – Dimensions caractéristiques de la centrale solaire à la page 94). Ci-dessous, un tableau reprend les valeurs pour les 12 mois de l'année :

	Energie électrique produite [kWh]		Energie thermique produite [kWh]	
	Pour un mètre	Pour la centrale	Pour un mètre	Pour la centrale
Janvier	4,48	672	212	31 746
Février	4,75	713	225	33 697
Mars	5,96	894	282	42 284
Avril	6,03	904	285	42 739
Mai	6,78	1017	320	48 074
Juin	7,61	1141	360	53 928
Juillet	7,38	1108	349	52 367
Août	6,86	1029	324	48 659
Septembre	6,11	916	289	43 325
Octobre	4,88	732	231	34 608
Novembre	4,47	670	211	31 681
Décembre	4,30	645	203	30 510
Total	69,6	10 442	3 291	493 618

Tableau 46 – Energie électrique et thermique par mois et annuel, pour un mètre courant de concentrateur cylindro-parabolique.

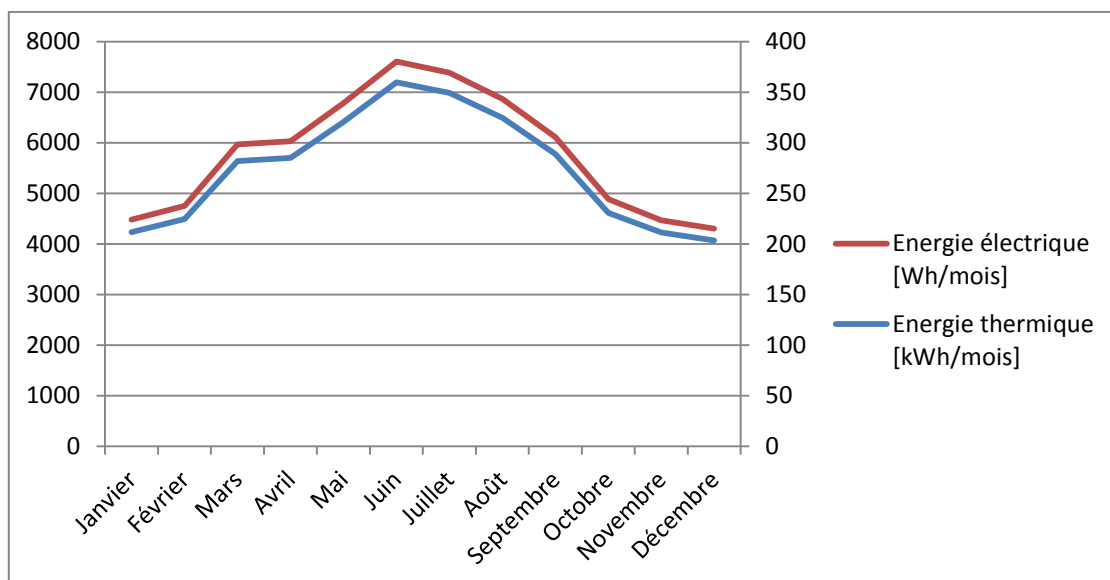


Figure 75 – Energie électrique et thermique produite par mois, pour un mètre courant de concentrateur cylindro-parabolique.

8.8. Rendement global

Le rendement de conversion global est défini comme étant le rapport entre l'énergie totale captée par les concentrateurs solaires et l'énergie totale produite :

$$\text{Rendement de conversion global : } \eta_{\text{conversion-global}} = \frac{\text{Energie totale produite}}{\text{Energie totale captée}}$$

Nous séparons ce rendement de conversion global en deux parties : le rendement de conversion électrique et le rendement de conversion thermique.

L'énergie totale captée est déterminée par l'ensoleillement global captée par les concentrateurs solaires. Nous utiliserons pour cela les valeurs présentes dans les tables de PVGIS : « A: Global irradiance on 2-axis tracking plane (W/m²) ». Pour chaque mois de l'année, nous intégrons donc ces valeurs d'ensoleillement global. Ci-dessous, le tableau présente les rendements de conversion thermiques et électrique.

	A : Global normal irradiance [kWh/m ²]	DNI : Direct Normal Irradiance [kWh/m ²]	Rendement de conversion électrique : $\eta_{\text{conversion-électrique}}$	Rendement de conversion thermique : $\eta_{\text{conversion-thermique}}$
Janvier	229	151	0,98%	46,17%
Février	243	161	0,98%	46,17%
Mars	288	202	1,04%	48,96%
Avril	295	204	1,02%	48,26%
Mai	323	229	1,05%	49,66%
Juin	347	257	1,09%	51,76%
Juillet	337	250	1,09%	51,76%
Août	318	232	1,08%	51,06%
Septembre	291	206	1,05%	49,66%
Octobre	246	165	0,99%	46,87%
Novembre	229	151	0,98%	46,17%
Décembre	224	145	0,96%	45,47%
Total	3370	2352	1,03%	48,83%

Tableau 47 – Rendement de conversion électrique et thermique pour un mètre carré de solution solaire.

Ces résultats nous montrent que pour la région de Casablanca, les rendements globaux varient peu pendant l'année. En effet, on observe une différence de performance de seulement 12% entre le mois de Juin et le mois de Décembre.

En réalité, la météorologie au Maroc est relativement constante, et le ratio DNI/A, ensoleillement direct sur ensoleillement global, varie peu durant toute l'année. Il est en effet égal à 66% au mois de Décembre et 74% au mois de Juin. De manière global, la part du rayonnement direct est de 70%, les pertes dues à la diffusion sont donc de 30%.

Le schéma ci-dessous représente le bilan énergétique global durant toute une année pour l'usine de Blancatex.

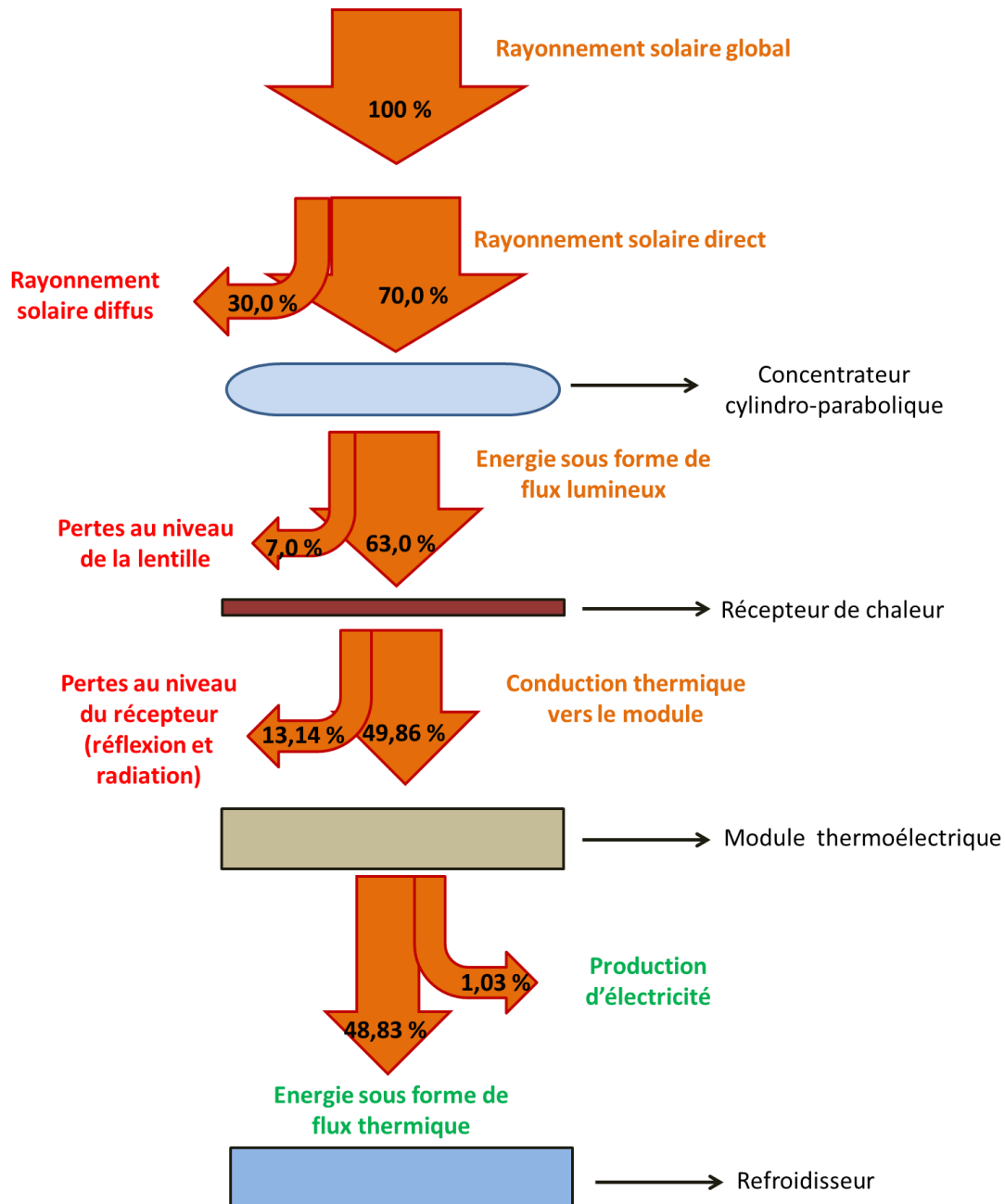


Figure 76 - Bilan global annuel de l'usine solaire à Casablanca pour $T_c = 120\text{ °C}$.

On notera que les pertes au niveau du récepteur sont relativement importantes par rapport aux pertes totales. En effet, la température du côté froid est fixée à 120 °C , ce qui entraîne des pertes par radiation importantes surtout lorsque l'ensoleillement direct est faible.

8.9. Récapitulatif

Nous donnons ici le récapitulatif de l'ensemble des performances de la centrale.

Ensoleillement global [kWh/m ² /an]	3370
Ensoleillement direct [kWh/m ² /an]	2352
Surface effective des concentrateurs solaires [m ²]	300
Rendement de conversion thermique global [%]	48,83
Rendement de conversion électrique global [%]	1,03
Energie thermique produite [kWh]	493 600
Energie électrique produite [kWh]	10 442

Tableau 48 - Récapitulatif de l'énergie produite par la centrale sur le toit de Blancatex

En intégrant la météorologie locale, le rendement global annuel de cette centrale serait donc d'environ 1% pour la conversion électrique et 49% pour la conversion thermique. Cela représente, pour un m² de concentrateur solaire, une production annuelle de 33,7 kWh/m²/an d'électricité et de 1651,3 kWh/m²/an de chaleur en considérant une température froide de 120°C. A titre de comparaison, dans des conditions d'ensoleillement similaire, une installation photovoltaïque produit environ 220 kWh/m²/an.

Nous pouvons à présent estimer de manière beaucoup plus précise les économies réalisées par l'entreprise Blancatex grâce à la centrale solaire.

Économie en fuel [€/an]	21 960
Économie en électricité [€/an]	700
Économie énergétique totale [€/an]	22 660
Économie énergétique totale en 30 ans [€]	679 800

Tableau 49 – Estimatif de l'économie annuelle réalisée par Blancatex

Notons que par rapport à l'estimatif réalisé précédemment, les principales différences résident dans la surface de concentrateur, l'ensoleillement direct et le rendement de conversion électrique. Ces différences engendrent une production d'énergie thermique doublée et une production électrique diminuée par deux. Au global, vu le peu d'apport électrique, l'économie énergétique est également doublée.

Néanmoins, de nombreux facteurs doivent encore être précisés. Notamment le facteur d'ombre qui prend en compte l'ombre portée d'un concentrateur sur son voisin. Ce facteur d'ombre réduira fortement les performances de la centrale étant donné la disposition des concentrateurs très resserrés. Pour réduire au maximum ce facteur d'ombre, il est nécessaire d'écarter les rangées de concentrateurs. Cependant l'espace disponible sur le toit de l'entreprise Blancatex est déjà complètement occupé, ce qui force donc à retirer des rangées de concentrateurs, perdant ainsi de la puissance installée.

Un second facteur important est l'inertie thermique de l'ensemble du dispositif. En effet, nous avons considéré durant toute cette étude un système en régime, cependant, l'inertie thermique, notamment du fluide caloporteur, joue un rôle important dans l'établissement du bilan thermique. Afin de tenir compte de ce paramètre, il faudrait dès lors prévoir une analyse dynamique du système.

Quoiqu'il en soit, les rendements thermiques estimés au départ sont fort proches de ceux calculés dans cette étude de cas. Cependant, le rendement électrique est bien plus bas que prévu. Il semble donc essentiel d'améliorer les propriétés des matériaux thermoélectriques afin d'avoir un rendement de conversion électrique plus haut.

En effet, le faible taux de production électrique couvre difficilement tous les frais engendrés pour l'implémentation d'éléments thermoélectriques, notamment la fabrication des matériaux thermoélectriques, la conception des générateurs et la nécessité de dispositifs électriques comme onduleur. Dans le cas de la concentration solaire, le coût des matériaux sur lesquels est concentrée l'énergie, devient négligeable par rapport aux coûts totaux de l'installation solaire. Il est donc préférable d'opter pour des matériaux à haute performance, en dépit de leur coût plus élevé. Dans la section suivante, nous montrons quels sont les rendements de conversion électrique lorsqu'il est fait usage de matériaux thermoélectriques possédant de meilleures performances.

8.10. Rendement idéalisé

Comme nous l'avons vu précédemment, la production électrique est faible par rapport à l'énergie totale captée. Une manière pour améliorer ce rendement électrique consiste à utiliser des matériaux thermoélectrique possédant un meilleur facteur de mérite ZT .

En conservant exactement la même disposition mais en changeant les propriétés du matériau thermoélectrique, nous calculons le rendement de conversion électrique comme suit [23] :

Rendement de conversion électrique du générateur : η_{c-e}

$$\eta_{c-e} = \frac{\frac{\Delta T}{T_h}}{\left(1 + \frac{2rl_c}{l}\right)^2 \left(2 - 0.5 \left(\frac{\Delta T}{T_h}\right) + \left(\frac{4}{ZT_h}\right) \left(\frac{l+n}{l+2rl_c}\right)\right)}$$

Ci-dessous, nous avons calculé ce rendement en fonction de différentes propriétés du matériau qui modifient le facteur de mérite mais sans changer le coefficient de conduction thermique λ afin que le bilan thermique soit conservé. Nous avons dès lors considéré le cas avec l'ensoleillement maximal, c'est-à-dire avec $T_h = 400^\circ\text{C}$ et $T_c = 120^\circ\text{C}$.

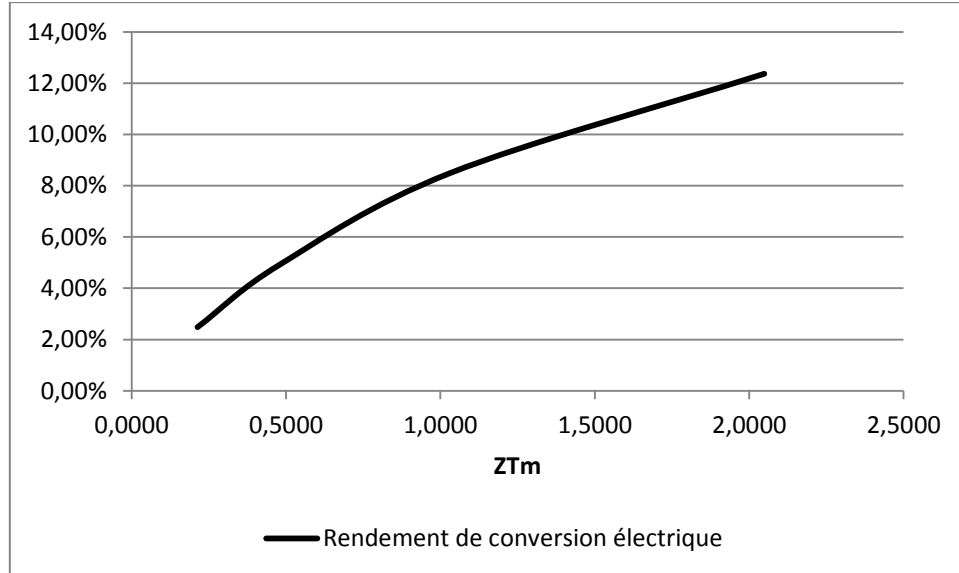


Figure 77 - Rendement de conversion électrique en fonction du facteur de mérite ZT

Actuellement, avec les propriétés du Fe_2VAl , nous nous trouvons à 2,77% de rendement pour un ZT d'environ 0,21. En améliorant les propriétés du matériau thermoélectrique, le rendement de conversion augmente également rapidement.

9. Conclusion

A l'issue de cette partie technique, nous pouvons tirer plusieurs enseignements qui influenceront de manière significative le développement du projet Hybrid Power.

Tout d'abord, nous avons effectué des tests avec un prototype comportant une lentille de Fresnel et des générateurs thermoélectriques Bi_2Te_3 issus du commerce. Par temps clair, les rendements de conversions globaux ont été de 2% pour l'électricité et de 45% pour le thermique avec une température chaude de 260°C et une température froide de 36°C.

Nous avons ensuite étudié un prototype comportant une série d'améliorations, notamment un système de serrage adapté et une atmosphère sous vide. Dans ce cas, par temps clair, les rendements de conversions électrique et thermique sont respectivement de 3,3% et 65,32% avec une température chaude de 300°C et une température froide de 30°C. Dans le cas d'un régime plus adapté à la production d'énergie thermique, les rendements sont respectivement de 2,1% et 66,5% avec une température chaude de 250°C et une température froide de 80°C.

Nous avons également mené une étude de cas pour l'installation d'une petite centrale pilote à destination d'une usine textile à Casablanca. En intégrant la météorologie locale, le rendement global annuel de cette centrale serait de 1% pour la conversion électrique et 49% pour la conversion thermique. Cela représente, pour un m^2 de concentrateur solaire, une production annuelle de 33,7 kWh/ m^2 /an d'électricité et de 1651,3 kWh/ m^2 /an de chaleur en considérant une température froide de 120 °C.

Ces résultats nous semblent fort peu prometteurs pour de la production électrique. En effet, le faible taux de production couvre difficilement tous les frais engendrés pour l'implémentation d'éléments thermoélectriques, notamment la fabrication des matériaux thermoélectriques, la conception des générateurs et la nécessité de dispositifs électriques comme un onduleur. On notera que le coût des matières thermoélectriques est totalement négligeable par rapport aux coûts totaux d'installation dans le cas de la concentration solaire. La quantité de matériaux utilisée étant relativement faible, leurs performances priment par rapport à leur coût au kilo.

En revanche, en ce qui concerne la partie thermique, nous avons pu calculer les économies réalisées si notre solution solaire remplace le fuel qui est actuellement utilisé. L'économie annuelle en fuel pour un m^2 de concentrateur solaire serait de 42€/an/ m^2 . Avec un coût d'installation estimé à 500€/m², le retour sur investissement serait de 12ans. La technologie de concentration solaire cylindro-parabolique est en plein essor, nous pouvons donc nous attendre à une réduction de plus en plus importante de leur coût d'acquisition, rendant ainsi les projets solaires plus rentables.

Nous sommes donc sceptiques quant au développement des solutions solaires thermoélectriques à court terme. Par contre, il existe une réelle opportunité dans le développement de concentrateurs solaires thermiques dans les pays comme le Maroc, où la technologie possède un potentiel important et est encore largement sous-exploitée.

10. Bibliographie et webographie

- [1] HECHT, E. (trad. BECHERRAWY, T., MARTIN J.), *Physique*, De Boeck Supérieur, 1999.
- [2] NEUBOURG, G., *L'énergie solaire photovoltaïque ou thermique*, Association de Promotion des Energies Renouvelables APERe, Octobre 2010.
- [3] Ensoleillement, Energie Plus, in <http://www.energieplus-lesite.be/>.
- [4] Observatoire des énergies renouvelables, *Baromètre EurObserv'Er 2012*, 2013.
- [5] Joint Research Center, *PVGIS*, in <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>, mise à jour le 10 Février 2012.
- [6] GEST, H., *History of the word photosynthesis and evolution of its definition*, Photosynthesis Research, vol. 73, no 1-3, juillet 2002, p. 7-10.
- [7] BRYANT, D. A., FRIGAARD, N.-U., *Prokaryotic photosynthesis and phototrophy illuminated*, Trends in Microbiology, vol. 14, no 11, Novembre 2006, p. 488-496.
- [8] WILKIN, B., *Solaire thermique*, Association de Promotion des Energies Renouvelables APERe asbl, présentation UCL novembre 2013, p.11.
- [9] Energie solaire thermique, in http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_thermique, mis à jour le 19 Mai 2014.
- [10] COURTECUISSÉ, M., *Un emploi dans le photovoltaïque coûte cher et n'est pas pérenne*, L'Expansion, 31 janvier 2011.
- [11] Bilan électrique 2012, in http://www.rte-france.com/uploads/Mediatheque_docs/vie_systeme/annuelles/Bilan_electrique/RTE_bilan_electrique_2012.pdf.
- [12] Le plus grand parc solaire de France mis en service, in <http://www.loractu.fr/nancy/2582-toul-54-le-plus-grand-parc-solaire-de-france-mis-en-service.html>.
- [13] Mildura 154MW project, in www.solarsystems.com.au.
- [14] Les centrales à capteurs cylindro-parabolique, in http://www.ecosources.info/dossiers/Centrale_solaire_thermique_capteurs_cylindro-paraboliques, mise à jour non citée.

- [15] Les centrales solaires à miroir de Fresnel, in http://www.ecosources.info/dossiers/Centrale_miroir_Fresnel_solaire_thermodynamique, mise à jour non citée.
- [16] Les centrales à capteurs paraboliques, in http://www.ecosources.info/dossiers/Centrale_solaire_thermique_capteurs_cylindro-paraboliques, mise à jour non citée.
- [17] Liste des centrales solaires thermodynamiques, in http://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_centrales_solaires_thermodynamiques, mise à jour le 2 mars 2014.
- [18] International Energy Agency, in www.iea.org.
- [19] KARNI, J., The thermoelectric alternative, News and Views – Solar Energy, 2011.
- [20] DE JAEGER, E., JACQUES, P., MATAGNE, E., *LELEC 2670 Sources d'énergie électrique renouvelables ou non conventionnelles – Convertisseurs thermoélectriques*, cours UCL.
- [21] Fiche international de sécurité chimique, in <http://www.cdc.gov/niosh/ipcsnfrn/nfrn0986.html>.
- [22] Tellurure de Bismuth, in [http://fr.wikipedia.org/wiki/Tellurure_de_bismuth\(III\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Tellurure_de_bismuth(III)).
- [23] MIN, G., Thermoelectric Module Design Under a Given Thermal Input : Theory and Example, Journal of Electronic Materials, Vol. 42, No. 7, 2013,p.2239, 2241.
- [24] HASAN NIA, M., ABBAS NEJAD, A., GOUDARZI, A.M., VALIZADEH, M., SAMADIAN, P., *Cogeneration solar system using thermoelectric module and fresnel lens*, Energy Conversion and Management 84 (2014) 305–310.
- [25] DATE, A., DATE, A., DIXON, C., AKBARZADEH, A., *Theoretical and experimental study on heat pipe cooled thermoelectric generators wit water heating using concentrated solar thermal energy*, ScienceDirect, Solar Energy 105 (2014) 656–668.
- [26] MILJKOVIC, N., WANG, E. N., *Modeling and optimization of hybrid solar thermoelectric systems with thermosyphons*, Solar Energy 85 2843–2855, 2011.
- [27] AMATYA, R., RAM, R.J., *Solar Thermoelectric Generator for Micropower Applications*, Journal of ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 39, No. 9, 2010.
- [28] BARANOWSKI, L. L., SNYDERB, G. J., TOBERER E. S., *Concentrated solar thermoelectric generators*, Energy and Environmental Science - 5 9055, 2012.

- [29] LI, P., CAI, L., ZHAI, P., TANG X., ZHANG, Q. NIINO, M., *Design of a Concentration Solar Thermoelectric Generator*, Journal of ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 39, No. 9, 2010.
- [30] MCENANEY, K., KRAEMER, D., REN, Z., CHEN G., *Modeling of concentrating solar thermoelectric generators*, Journal of Applied Physics 110 - 074502, 2011.
- [31] FAN, H., SINGH, R., AKBARZADEH, A., *Electric Power Generation from Thermoelectric Cells Using a Solar Dish Concentrator*, Journal of ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 40, No. 5, 2011.
- [32] KRAEMER, D., MCENANEY, K., CHIESA, M., CHEN, G. , *Modeling and optimization of solar thermoelectric generators for terrestrial applications*, Solar Energy 86 1338–1350, 2012, p.1343, 1344.
- [33] WILKIN, B., *Solaire thermique* , Association de Promotion des Energies Renouvelables APERe asbl, présentation UCL novembre 2013, p.22.
- [34] DUFFIE J. A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley-Interscience Publication, 1980,p.54, p. 123, 156, 204, 282, 289, p.308.
- [35] Zhaoxia, L., *A simple method to estimate the physical characteristics of a thermoelectric cooler from vendor datasheets*, Electronics Cooling Magazine - TECs, August, 2008.
- [36] HOSSAIN, M. A., *Performance evaluation of solar pump*, Department of Mechanical Engineering MIST, Décembre 2011.
- [37] SÈVE, R., *Science de la couleur : Aspects physiques et perceptifs*, Marseille, Chalagam, 2009, p.312.
- [38] Table of absorptivity and emissivity of common materials and coatings, in <http://www.solarmirror.com/fom/fom-serve/cache/43.html> , mise à jour non-citée.
- [39] Natural Convection on Isothermal Heated Horizontal Plate Facing Up, in <http://www.thermal-wizard.com/tmwiz/convect/natural/hup-isot/hup-isot.htm>, MAYA HTT, mise à jour non-citée.
- [40] RABADIYA, A.V., RAVINDRA K., *Comparative Analysis of Wind Loss Coefficient (Wind Heat Transfer Coefficient) For Solar Flat Plate Collector*, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, September 2012, p.464.
- [41] UMMEL, K., WHEELER, D., *Desert Power : The Economics of Solar Thermal Electricity for Europe, North Africa, and the Middle East*, Center for Global Development, December, 2008.

- [42] *Manuel sur les statistiques de l'énergie*, International Energy Agency, p. 193, tableau A3.4.
- [43] SALAZAR, C., M., *An Overview of CSP in Europe, North Africa and the Middle East*, CSP Today, Octobre 2008, p.11.
- [44] BARLEV, D., VIDU, R., STROEVE, P., *Innovation in concentrated solar power*, Solar Energy Materials & Solar Cells 95 2703–2725, 2011, p.2704, p.2706.
- [45] KANDLIKAR, G., *Geometrical aspects of a cylindrical parabolic concentrator*, Department of Mechanical Engineering Indian Institute of Technology, Bombay.
- [46] TABOR, H., *Stationary mirror systems for solar collectors*, Solar Energy, 2 1 27-33, 1958.
- [47] RABL, A., *Comparison of solar concentrators*, Solar Energy, 18 2 93-111, 1976.
- [48] LOF, G.O., Duffie, J.A., *Optimisation of focusing solar collector design*, ASME Trans., Ser. A 85 221-228, 1963.
- [49] HASSAN, K.E., El Rafaie, M.F., *Theoretical performance of cylindrical parabolic solar concentrators*, Solar Energy, 15 3 219-244, 1973.
- [50] Helioclim, Concentrateur cylindro-parabolique, in <http://www.helioclim.fr/>.
- [51] GUERRAICHE, D., BENDERRADJI, A., BENMOUSSA H., *Facteurs optiques et géométriques caractérisant un concentrateur cylindro-parabolique*, Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°2 229 – 238, 2011.
- [52] Bismuth telluride (Bi₂Te₃), Wuhan Taixin Functional Material Co., Ltd., in [http://chinataixin.by-trade-shows.com/Bismuth-telluride-Bi₂Te₃-.html](http://chinataixin.by-trade-shows.com/Bismuth-telluride-Bi2Te3-.html).
- [53] MCENANEY, K., *Modeling of Solar Thermal Selective Surface and Thermoelectric Generator*, MIT thesis, 2010.
- [54] 156 millions d'euros pour les projets internationaux de Solairedirect, in <http://www.latribune.fr/green-business/l-actualite/20130719trib000776573/156-millions-d-euros-pour-les-projets-internationaux-de-solairedirect.html#xtor=EPR-2-%5BGGreen+Business%5D-20130723>.
- [55] Plataforma Solar de Almería, in <http://www.psa.es/webeng/gen/index.php>.
- [56] Ernest Matagne, Energie solaire photovoltaïque, in <http://perso.uclouvain.be/ernest.matagne/SOLAIRE/INDEX.HTM>.

- [57] MICHIELS, C., VINEL, M., Étude de la faisabilité d'un système de récupération d'énergie pour l'industrie sidérurgique basé sur la technologie thermoélectrique, mémoire UCL ingénieur civil électromécanicien 2013.
- [58] IOFFE, A.F., *Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling*, London : Infosearch, 1957.
- [59] ROWE, D.M. and BHANDARI, C.M., *Modern Thermoelectrics*, London : Holt, Rinehart and Winston, 1983.
- [60] ROWE, D.M., eds., *CRC Handbook of Thermoelectric*, New York : CRC Press, 1995.
- [70] GOLDSMID, J.H., *Electronic Refrigeration*, London : Pion Limited, 1986.
- [71] TRIEB F., MÜLLER-STEINHAGEN, H., *Concentrating solar power for seawater desalination in the Middle East and North Africa*, ScienceDirect, 19 December 2006.
- [72] VIEBAHN, P., LECHON, Y., TRIEB, F., *The potential role of concentrated solar power (CSP) in Africa and Europe—A dynamic assessment of technology development, cost development and life cycle inventories until 2050*, Energy Policy 39 4420–4430, 2011.
- [73] Ibrahima KONATE, *Rapport d'évaluation du projet de la central solaire d'Ouarzazate – phase I*, Banque africaine de développement, Avril 2012.
- [74] Rayonnement solaire, in http://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_solaire, mis à jour le 20 Mars 2014.
- [75] Energie solaire, in http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire, mis à jour le 12 Mai 2014.
- [76] Edmund Optics, *18.25" Diamete, 24" Focal Length Fresnel Lens* , in <http://www.edmundoptics.eu/optics/optical-lenses/fresnel-lenses/fresnel-lenses/43-924> , mise à jour non citée.
- [77] Thermoélectricité, in <http://fr.wikipedia.org/wiki/Thermo%C3%A9lectricit%C3%A9>.
- [78] Module Peltier, in http://fr.wikipedia.org/wiki/Module_Peltier.

11. Liste de contacts

Pascal Jacques	Professeur IMMC/IMAP
Geoffrey Roy	Doctorant IMMC/IMAP
Camille van der Rest	Doctorante IMMC/IMAP
Marc Sinnaeve	Responsable du Laboratoire IMMC/IMAP
Jonathan Lorfevre	Assistant du Laboratoire IMMC/IMAP
Ernest Matagne	Professeur émérite EPL
Christian Eugène	Professeur émérite EPL
Magali Bodart	Professeur LOCI
Samuel Paulus	Chargé de mission 1,2,3 Go
Frédéric Chomé	Coach 1,2,3 Go – Factor-X
Philippe Dockier	Coach 1,2,3 Go – Go Score
Thierno Diallo	Coach 1,2,3 Go
Laetitia Vermeulen	Coach 1,2,3 Go – Conseillère Job'in
Eric Bazzoni	Responsable du service Ligne Fibres Burgo Group
Frédéric Dethier	Ingénieur environnement – Materne
Benjamin Wilkin	Chercheur APERe
Jonathan Leloux	Chercheur APERe
Romain Delamare	Chercheur ICT/ELEN
Denis Flandre	Professeur ICT/ELEN
Ratan Kotipalli	Chercheur ICT/ELEN
Alain Cornet	Professeur IMCN/NAPS
Christophe Guisset	Entrepreneur Enelys
Frédéric Ooms	Responsable LTTO
Laurent Van den Hove	Responsable juridique LTTO
Rachid Laraki	CEO Blancatex
Nacer Lahlou	Directeur de projet Tenor Structure et construction

12. Annexes techniques

12.1. Average Daily Solar Irradiance – Louvain-La-Neuve - Belgium - May

PVGIS Estimates of average daily profiles

Results for: May

Solar radiation database used: PVGIS-CMSAF

Inclination of plane: 35 deg.

Orientation (azimuth) of plane: 0 deg.

Time	G	G _d	G _c	DNI	DNI _c	A	A _d	A _c
04:37	27	27	18	0	0	64	25	113
04:52	41	40	28	0	0	111	46	198
05:07	54	54	37	0	0	164	71	294
05:22	68	66	46	0	0	209	88	377
05:37	80	79	55	0	0	251	104	453
05:52	101	90	79	163	383	290	118	522
06:07	127	103	118	183	431	325	132	583
06:22	154	116	162	202	474	356	145	638
06:37	183	129	210	218	512	385	156	686
06:52	212	140	260	233	547	411	167	729
07:07	242	152	312	246	578	435	177	767
07:22	271	162	366	258	607	456	186	801
07:37	301	172	420	269	633	475	194	831
07:52	329	181	474	279	656	492	201	857
08:07	357	189	528	288	677	507	207	880
08:22	384	196	580	296	696	520	212	900
08:37	410	202	630	303	713	531	217	917
08:52	434	208	679	310	729	542	221	932
09:07	457	213	725	316	742	550	224	945
09:22	478	217	768	321	755	558	227	956
09:37	497	221	809	326	766	564	230	965
09:52	515	224	846	330	775	570	231	973
10:07	531	227	879	333	784	574	233	980
10:22	544	229	909	336	791	578	234	985
10:37	556	231	934	339	797	581	235	990
10:52	567	232	956	341	802	583	235	993
11:07	575	233	973	343	806	585	236	996
11:22	581	234	987	344	809	586	236	998
11:37	585	235	995	345	811	587	236	999

11:52	587	235	1000	345	812	588	237	999
12:07	587	235	1000	345	812	588	237	999
12:22	585	235	995	345	811	587	236	999
12:37	581	234	987	344	809	586	236	998
12:52	575	233	973	343	806	585	236	996
13:07	567	232	956	341	802	583	235	993
13:22	556	231	934	339	797	581	235	990
13:37	544	229	909	336	791	578	234	985
13:52	531	227	879	333	784	574	233	980
14:07	515	224	846	330	775	570	231	973
14:22	497	221	809	326	766	564	230	965
14:37	478	217	768	321	755	558	227	956
14:52	457	213	725	316	742	550	224	945
15:07	434	208	679	310	729	542	221	932
15:22	410	202	630	303	713	531	217	917
15:37	384	196	580	296	696	520	212	900
15:52	357	189	528	288	677	507	207	880
16:07	329	181	474	279	656	492	201	857
16:22	301	172	420	269	633	475	194	831
16:37	271	162	366	258	607	456	186	801
16:52	242	152	312	246	578	435	177	767
17:07	212	140	260	233	547	411	167	729
17:22	183	129	210	218	512	385	156	686
17:37	154	116	162	202	474	356	145	638
17:52	127	103	118	183	431	325	132	583
18:07	101	90	79	163	383	290	118	522
18:22	80	79	55	0	0	251	104	453
18:37	68	66	46	0	0	209	88	377
18:52	54	54	37	0	0	164	71	294
19:07	41	40	28	0	0	111	46	198
19:22	27	27	18	0	0	64	25	113
19:37	13	13	9	0	0	29	10	53

The time shown is local solar time. To find GMT time, add -0.31 hours

G: Global irradiance on a fixed plane (W/m^2)

G_d : Diffuse irradiance on a fixed plane (W/m^2)

G_c : Global clear-sky irradiance on a fixed plane (W/m^2)

DNI: Direct normal irradiance (W/m^2)

DNI_c : Clear-sky direct normal irradiance (W/m^2)

A: Global irradiance on 2-axis tracking plane (W/m^2)

A_d : Diffuse irradiance on 2-axis tracking plane (W/m^2)

A_c : Global clear-sky irradiance on 2-axis tracking plane (W/m^2)

PVGIS © European Communities, 2001-2012

Reproduction is authorised, provided the source is acknowledged.

12.2. Average Daily Solar Irradiance – Casablanca – Maroc - June



Photovoltaic Geographical Information System

European Commission
Joint Research Centre
Ispra, Italy

Average Daily Solar Irradiance

PVGIS Estimates of average daily profiles

Location: 33°31'45" North, 7°23'5" West, Elevation: 145 m a.s.l.,

Inclination of plane: 0 deg.

Orientation (azimuth) of plane: 0 deg.

Radiation estimates

Time	G	Gd	Gc	DNI	DNlc	A	Ad	Ac
05:22	66	47	56	209	258	312	98	341
05:37	103	62	93	288	355	422	128	463
05:52	144	76	136	355	437	510	147	562
06:07	189	90	184	410	505	584	163	644
06:22	235	102	234	457	563	645	175	713
06:37	283	113	287	497	613	696	185	770
06:52	331	124	341	531	655	740	193	819
07:07	380	133	395	561	692	776	199	860
07:22	427	141	449	588	724	807	203	895
07:37	474	149	503	611	752	833	206	924
07:52	519	155	556	631	777	855	207	949
08:07	563	160	607	649	800	873	208	970
08:22	605	165	656	665	819	887	207	987
08:37	645	168	703	679	836	899	206	1000
08:52	683	171	748	691	852	909	204	1010
09:07	718	173	790	702	865	916	202	1020
09:22	751	175	830	712	877	922	199	1030
09:37	781	176	866	720	888	926	197	1040
09:52	808	177	899	728	897	930	194	1040
10:07	832	177	929	734	905	932	191	1050
10:22	854	177	956	740	912	933	188	1050
10:37	872	177	978	744	917	934	186	1050
10:52	888	177	998	748	922	935	183	1050
11:07	900	177	1010	751	926	935	182	1050
11:22	910	177	1020	753	928	935	180	1050
11:37	916	176	1030	755	930	935	179	1050
11:52	919	176	1040	755	931	935	179	1060
12:07	919	176	1040	755	931	935	179	1060
12:22	916	176	1030	755	930	935	179	1050
12:37	910	177	1020	753	928	935	180	1050
12:52	900	177	1010	751	926	935	182	1050
13:07	888	177	998	748	922	935	183	1050
13:22	872	177	978	744	917	934	186	1050
13:37	854	177	956	740	912	933	188	1050
13:52	832	177	929	734	905	932	191	1050
14:07	808	177	899	728	897	930	194	1040
14:22	781	176	866	720	888	926	197	1040
14:37	751	175	830	712	877	922	199	1030
14:52	718	173	790	702	865	916	202	1020
15:07	683	171	748	691	852	909	204	1010
15:22	645	168	703	679	836	899	206	1000
15:37	605	165	656	665	819	887	207	987
15:52	563	160	607	649	800	873	208	970
16:07	519	155	556	631	777	855	207	949
16:22	474	149	503	611	752	833	206	924

Photovoltaic Geographical Information System

European Commission
Joint Research Centre
Ispra, Italy

16:52	202	121	257	246	516	405	149	681
17:07	169	108	204	225	472	372	137	627
17:22	137	94	153	202	423	334	124	565
17:37	106	80	108	175	367	292	110	494
17:52	78	66	69	144	303	244	93	412
18:07	54	51	37	110	231	191	76	321
18:22	38	38	26	0	0	125	47	210
18:37	24	24	17	0	0	67	23	113

G: Global irradiance on a fixed plane (W/m²)

Gd: Diffuse irradiance on a fixed plane (W/m²)

Gc: Global clear-sky irradiance on a fixed plane (W/m²)

DNI: Direct normal irradiance (W/m²)

DNIc: Clear-sky direct normal irradiance (W/m²)

A: Global irradiance on 2-axis tracking plane (W/m²)

Ad: Diffuse irradiance on 2-axis tracking plane (W/m²)

Ac: Global clear-sky irradiance on 2-axis tracking plane (W/m²)

12.3. Average Montly Solar Irradiance – Casablanca – Maroc



Photovoltaic Geographical Information System

European Commission
Joint Research Centre
Ispra, Italy

Incident global irradiation for the chosen location

Location: 33°31'45" North, 7°23'5" West, Elevation: 145 m a.s.l.,

Optimal inclination angle is: 31 degrees

Annual irradiation deficit due to shadowing (horizontal): 0.0 %

Month	Hh	Hopt	H(90)	DNI	lopt	TL	D/G
Jan	3190	5000	4870	4880	59	3.1	0.34
Feb	4020	5540	4660	5180	51	3.6	0.34
Mar	5440	6540	4380	6500	38	2.7	0.30
Apr	6350	6620	3180	6570	21	3.7	0.31
May	7240	6790	2310	7390	8	3.6	0.29
Jun	7910	7040	1900	8290	-1	3.4	0.26
Jul	7730	7070	2090	8050	3	4.0	0.26
Aug	7040	7040	2890	7480	16	4.0	0.27
Sep	5900	6720	3990	6660	32	3.8	0.29
Oct	4380	5710	4440	5320	46	3.7	0.33
Nov	3390	5080	4740	4870	57	3.3	0.34
Dec	2900	4740	4820	4690	62	2.6	0.35
Year	5460	6160	3680	42400000	31	3.5	0.29
Hh: Irradiation on horizontal plane (Wh/m2/day) 00000							

Hopt: Irradiation on optimally inclined plane (Wh/m2/day)

H(90): Irradiation on plane at angle: 90deg. (Wh/m2/day)

DNI: Direct normal irradiation (Wh/m2/day)

lopt: Optimal inclination (deg.)

TL: Linke turbidity (-)

D/G: Ratio of diffuse to global irradiation (-)

12.4. Fiche technique module thermoélectrique – Tellurex G2-56-0375



Discover What's Possible

1462 International Drive • Traverse City, Michigan 49686 • 877-774-7468 • www.tellurex.com

ISO 9001:2008

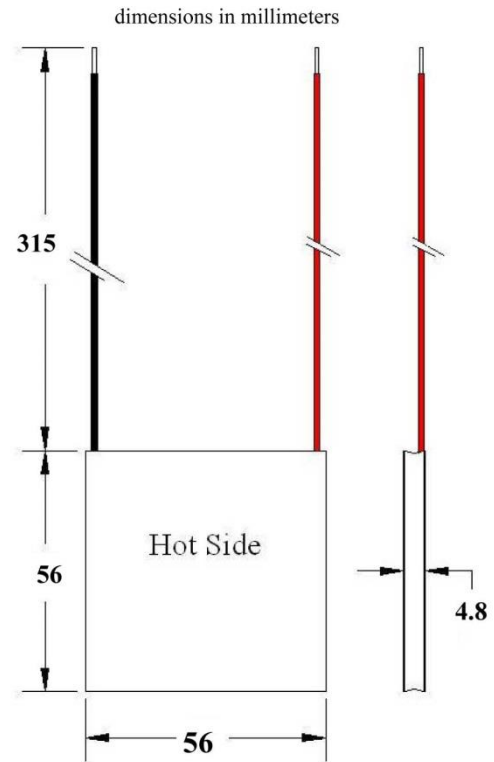
G2-56-0375 Thermoelectric Power Generation Module Specifications

The proprietary bonding technique used to assemble Tellurex power generation modules enables them to be used in unequaled temperature ranges with unequaled thermal cycling capabilities. The G2 thermoelectric power generation module alloy is tuned for optimal operation in the temperature range of 200-250°C and can withstand continuous operating temperatures of 330°C.

Standard configuration is:

- Teflon insulated leads 300 to 330 mm (12 to 13 inches) stripped ends approx. 6mm (1/4 inch)
- 56 mm by 56 mm (2.205 inches by 2.205 inches)
- Silicone perimeter seal dielectric protection
- Black graphite thermal interface material applied to hot and cold side
(hot side indicated by embossed graphite)

Performance Specifications	Optimum*	Application**	
Parameter	$T_{hot} 300^{\circ}C$ $T_{cold} 30^{\circ}C$	$T_{hot} 250^{\circ}C$ $T_{cold} 80^{\circ}C$	(explanation of parameter)
Open circuit voltage	8.8	5.3	No load voltage measured at TEG
Matched load voltage	4.4	2.7	Voltage output when load resistance equals internal resistance
Matched load current	3.68	2.2	Current output when load resistance equals internal resistance
Matched load power	16.2	5.9	Power resultant at the load ($P=I \times V$)
Matched load resistance	1.19	1.28	Internal resistance of TEG module at the operating temperature
Heat flow through TEG	~337	~196	Approximate watts of heat flowing through the thermoelectric generator
Heat flux density	~10.8	~6.3	Approximate watts of heat per square centimeter
AC resistance (@27°C)	0.6 ohms		Internal resistance measured at room temperature



Operation Cautions:

- T_{hot} not to exceed 400°C intermittent
- T_{cold} not to exceed 175°C
- Do not apply heat without adequate heat sink

*Optimum specification is an example of material performance

**Application specification is an example of a typical assembly performance

Contact us...we're ready to help:

Sales offices: +1 877-774-7468
 Web: www.tellurex.com
 Email: sales@tellurex.com
 Mail: 1462 International Drive
 Traverse City, Michigan

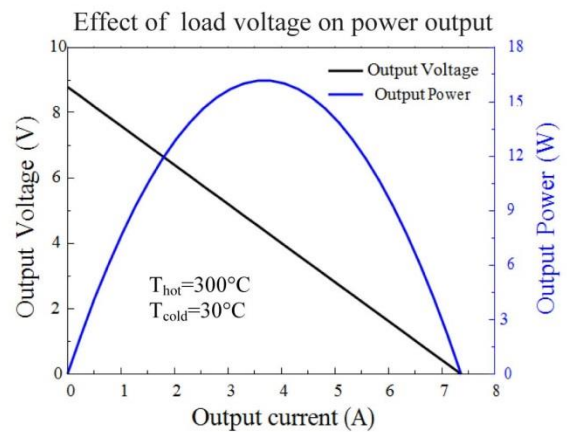
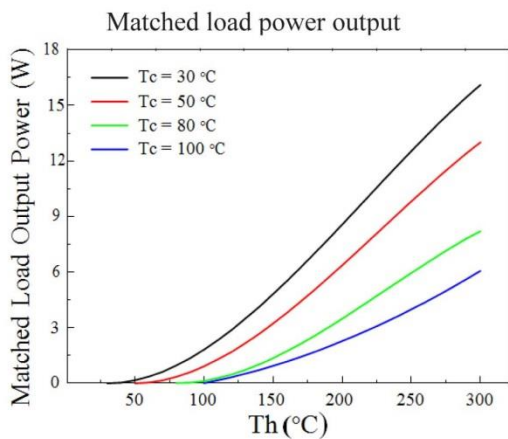
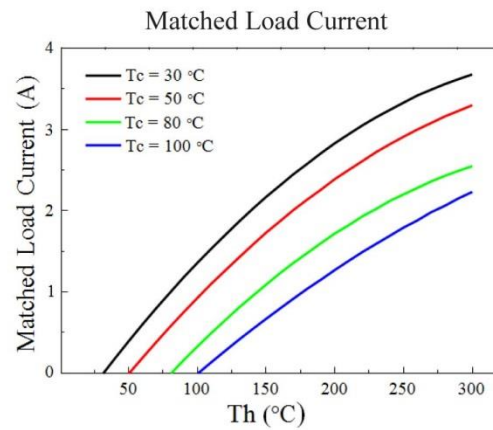
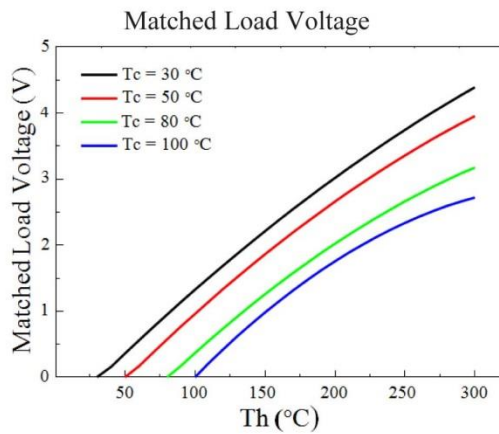
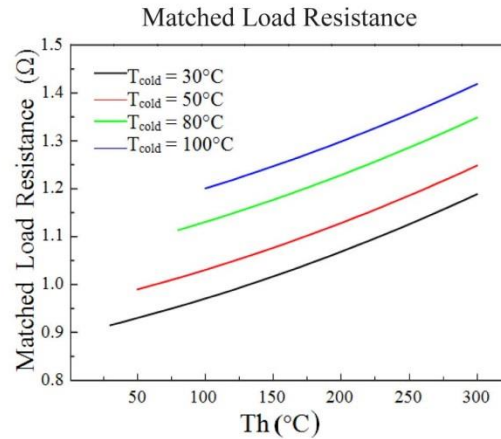
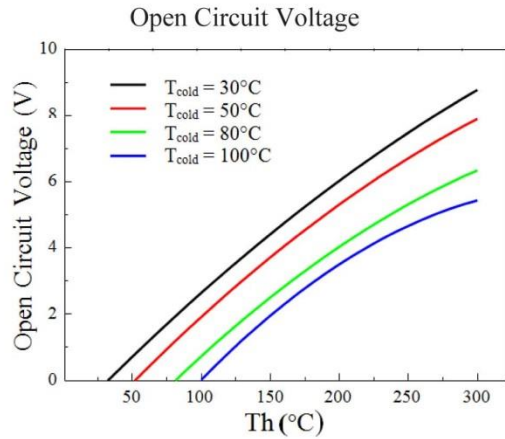


Discover What's Possible

1462 International Drive • Traverse City, Michigan 49686 • 877-774-7468 • www.tellurex.com

ISO 9001:2008

G2-56-0375 Thermoelectric Power Generation Module Specifications



Performance Graphs and specifications are based on tests and measurements in controlled laboratory conditions.
Actual performance in applications may be influenced by conditions not present in laboratory testing.
Specifications and materials are subject to change without notice.

12.5. Fiche technique module thermoélectrique – Tellurex G2-30-0313



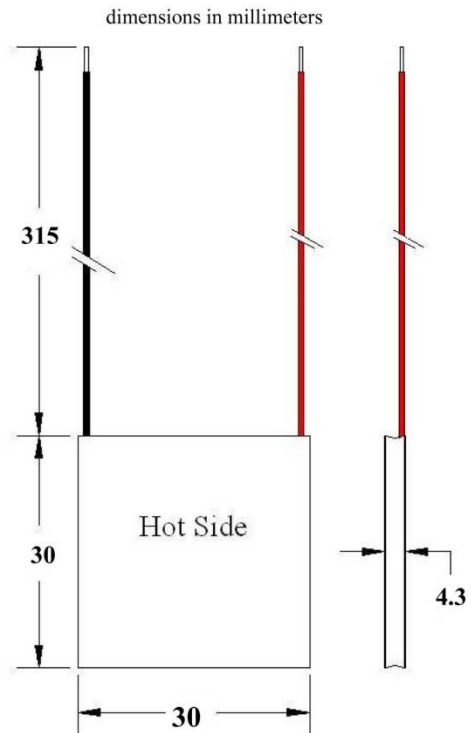
G2-30-0313 Thermoelectric Power Generation Module Specifications

The proprietary bonding technique used to assemble Tellurex power generation modules enables them to be used in unequaled temperature ranges with unequaled thermal cycling capabilities. The G2 thermoelectric power generation module alloy is tuned for optimal operation in the temperature range of 200-250°C and can withstand continuous operating temperatures of 330°C.

Standard configuration is:

- Teflon insulated leads 300 to 330 mm (12 to 13 inches) stripped ends approx. 6mm (1/4 inch)
- 30 mm by 30 mm (1.181 inches by 1.181 inches)
- Silicone perimeter seal dielectric protection
- Black graphite thermal interface material applied to hot and cold side (hot side indicated by embossed graphite)

Performance Specifications	Optimum*	Application**	
Parameter	T_{hot} 300°C T_{cold} 30°C	T_{hot} 250°C T_{cold} 80°C	(explanation of parameter)
Open circuit voltage	10.8	6.8	No load voltage measured at TEG
Matched load voltage	5.4	3.4	Voltage output when load resistance equals internal resistance
Matched load current	1.0	0.61	Current output when load resistance equals internal resistance
Matched load power	5.4	2.1	Power resultant at the load ($P=I \times V$)
Matched load resistance	5.4	5.7	Internal resistance of TEG module at the operating temperature
Heat flow through TEG	~113	~70	Approximate watts of heat flowing through the thermoelectric generator
Heat flux density	~12.6	~7.8	Approximate watts of heat per square centimeter
AC resistance (@27°C)	3.4 ohms		Internal resistance measured at room temperature



Operation Cautions:

- T_{hot} not to exceed 400°C intermittent
- T_{cold} not to exceed 175°C
- Do not apply heat without adequate heat sink

*Optimum specification is an example of material performance

**Application specification is an example of a typical assembly performance

Contact us...we're ready to help:

Sales offices: +1 877-774-7468
 Web: www.tellurex.com
 Email: sales@tellurex.com
 Mail: 1462 International Drive
 Traverse City, Michigan

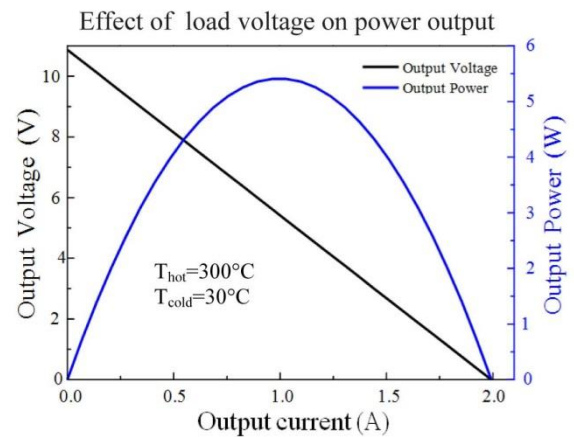
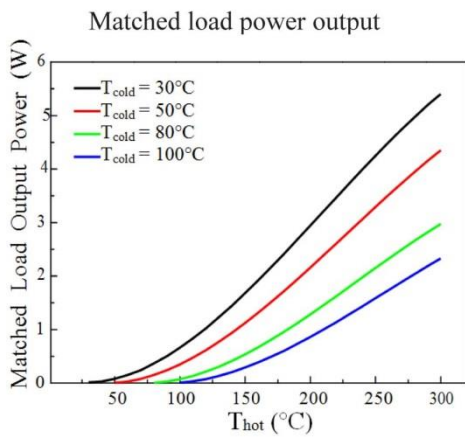
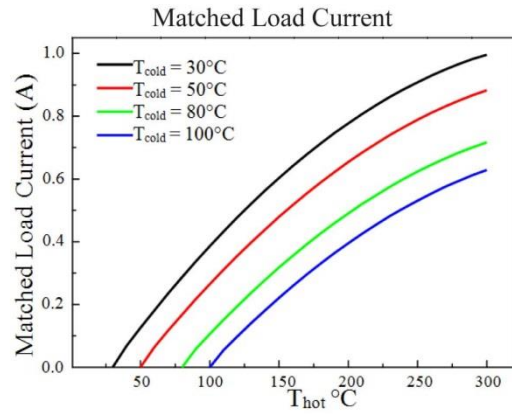
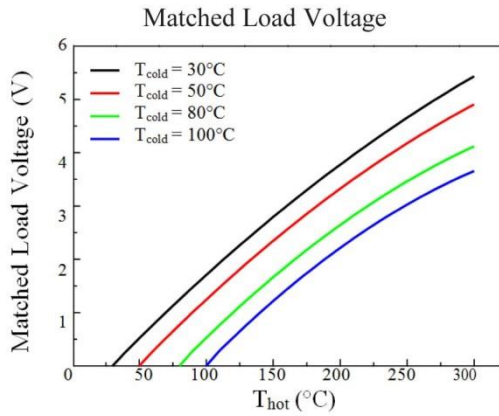
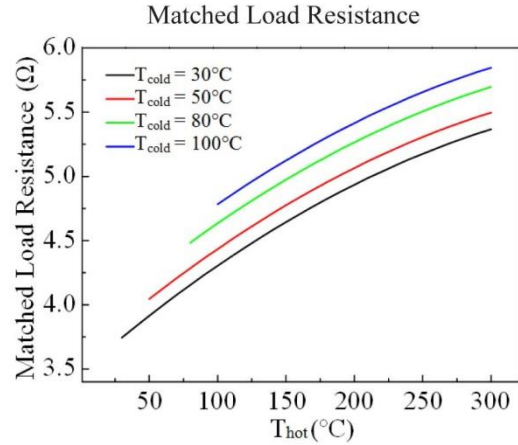
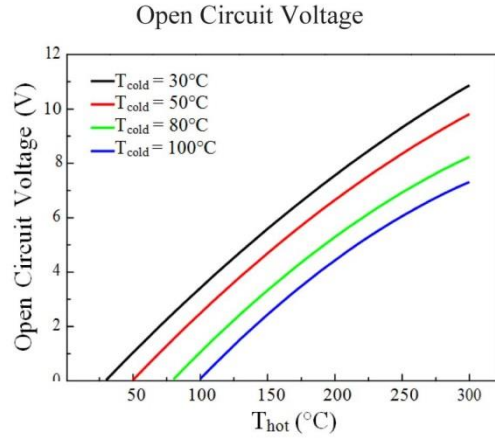


Discover What's Possible

1462 International Drive • Traverse City, Michigan 49686 • 877-774-7468 • www.tellurex.com

ISO 9001:2008

G2-30-0313 Thermoelectric Power Generation Module Specifications



Performance Graphs and specifications are based on tests and measurements in controlled laboratory conditions.
Actual performance in applications may be influenced by conditions not present in laboratory testing.
Specifications and materials are subject to change without notice.

12.6. Fiche technique lentille Fresnel

18.25" Diameter, 24" Focal Length, Fresnel Lens



Stock No. #43-924

In Stock:

[View Legend](#)**£124.00**

1 - 10 for £124.00

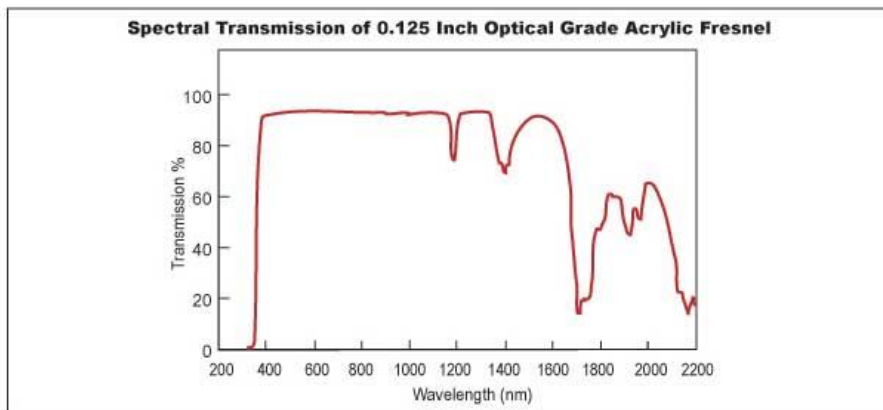
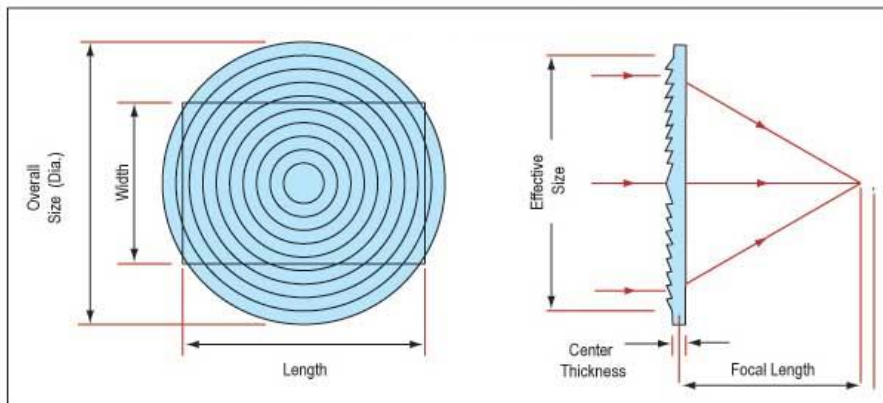
11 - 49 for £111.60

50 or more [Request Quote](#)Quantity **ADD TO CART****REQUEST QUOTE**[View Product Family](#) | [Live Chat](#) | [Add to Wish List](#)

Specifications

Groove Density (grooves/inch)	50
Diameter (inches)	18.25
Effective Diameter (inches)	18.25
Effective Focal Length EFL (inches)	24.00
Center Thickness CT (inches)	0.13
Dimensional Tolerance (inches)	±0.05
Thickness Tolerance (%)	±40
Transmission (%)	92 (from 400-1100nm)
Index of Refraction n_d	1.49
Operating Temperature (°C)	80 (Maximum)
RoHS	Exempt (View Certificate)

Technical Images



Collège des Doyens - Place des Doyens, 1 bte L2.01.02, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique www.uclouvain.be/cpme

