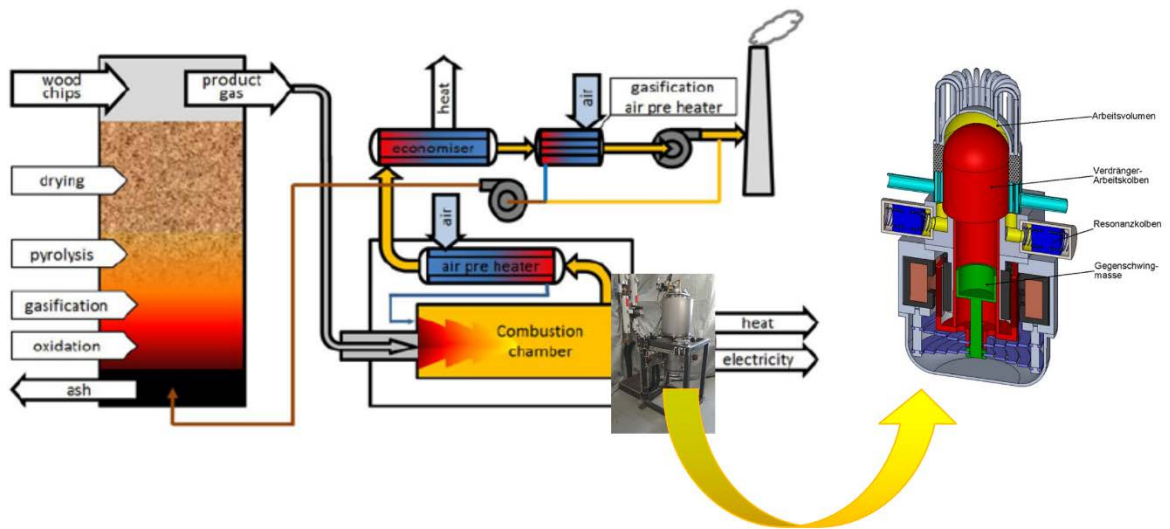




Rapport final

État de l'art et potentiel des technologies de brûleur à bois utilisées en association avec un moteur Stirling pour la micro-cogénération





Date : 04.06.2018

Lieu : Berne

Mandant :

Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme Systèmes énergétiques à combustion
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch
energieforschung@bfe.admin.ch

Mandataires :

SiB / HEIG-VD Centre St-Roch
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains
<http://sib.heig-vd.ch>

Auteurs :

Dr. Ing. Dipl. Jean-Baptiste Carré, HEIG-VD, jean-baptiste.carre@heig-vd.ch
Prof. Dr. Dipl. Ing. Roger Röthlisberger, roger.rothlisberger@heig-vd.ch

Responsable de domaine OFEN :

Dr. Carina Alles, carina.alles@bfe.admin.ch
Dr. Sandra Hermle, sandra.hermle@bfe.admin.ch

Chef de programme de l'OFEN :

Stephan Renz, info@renzconsulting.ch

Numéro du contrat de l'OFEN : SI/501623-01



Résumé

Ce rapport vise à revoir l'état de l'art des brûleurs à bois utilisés en micro-cogénération avec moteur Stirling, dans le but d'identifier les aspects potentiellement critiques inhérents à ce combustible, et à évaluer succinctement les technologies proposées par les sociétés Carboforce (qui propose un nouveau type de brûleur à bois émettant de très faibles quantités de polluants gazeux et particulaires), et Rudolf Schmid (qui propose un moteur Stirling à piston libre d'un nouveau genre, affranchi d'une partie des désavantages de ses prédécesseurs). Un autre objectif de ce rapport est d'offrir une évaluation du potentiel et de la compatibilité de nouveaux brûleurs à bois pour cette application. Finalement, il s'agit aussi de réaliser une pré-étude économique succincte pour évaluer la viabilité économique d'un tel produit. D'après l'étude effectuée, la conclusion du rapport est qu'une combinaison des technologies de Rudolf Schmid SA et de Carboforce Sàrl pourrait être prometteuse.

Zusammenfassung

In dieser Studie wurden der Stand der Technik von Holzbrennern für die Kombination mit Stirlingmotoren für die Anwendung als Mikro-Wärme-Kraft-Kopplungsanlage untersucht und die kritischen Aspekte identifiziert. Speziell untersucht wurden die von Carboforce Sarl vorgeschlagene neue Technologie eines Holzbrenners und der von der Rudolf Schmid AG entwickelte neue Typ eines Freikolbenstirlingmotors. Der Carboforce-Brenner zeichnet sich durch sehr geringe Mengen gasförmiger und partikelförmiger Schadstoffe aus und der Stirlingmotor von Schmid wurde von diversen Nachteilen seiner Vorgänger befreit. Die Kombination davon könnte deshalb technisch vielversprechend sein. Die Studie liefert zudem eine Bewertung des Potenzials und der Kompatibilität verschiedener neuer Holzbrenner für die Befuerung von Stirlingmotoren. Zum Schluss wurde im Rahmen einer Vorstudie die Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit eines solchen Produkts untersucht.

Summary

This report aims at reviewing the state of the art of Stirling engine micro-CHP wood burners, with the aim of identifying the potentially critical aspects inherent to this fuel, and to evaluate succinctly the technologies proposed by the companies. Carboforce (which proposes a new type of wood burner emitting very small quantities of gaseous and particulate pollutants), and Rudolf Schmid (which proposes a new free piston Stirling engine, freed from some of the disadvantages of its predecessors). Another objective of this report is to provide an assessment of the potential and compatibility of new wood burners for this application. Finally, this report carries out a succinct economic pre-study to evaluate the economic viability of such a product. According to the study, a combination of the technologies of Rudolf Schmid SA and Carboforce Sàrl could be promising.



[leere Seite, damit Inhaltsverzeichnis/Kapitel 1 auf ungerader Seite]



Sommaire

1	WP1 - état de l'art des brûleurs à bois utilisés ou ayant été utilisés sur des moteurs Stirling	7
1.1	Précédentes tentatives d'intégration de moteurs Stirling dans des chaudières à bois	7
1.1.1	Le moteur Stirling : Une théorie unique implémentée de nombreuses manières différentes	7
1.1.2	Deux technologies avec des limites différentes dominant le marché	7
1.2	Problèmes et faiblesses des moteurs Stirling utilisés dans des installations de cogénération au bois	9
1.3	Problèmes et faiblesses des brûleurs à bois utilisés dans des installations de cogénération au bois utilisant des moteurs Stirling	9
1.3.1	Adjonction de module, contre intégration plus avancée.....	9
1.3.2	Haute température ou basse température	10
1.3.3	Problèmes additionnels	12
1.4	Facteurs qui ont mis à mal le développement des projets de Stirling au bois précédents	12
1.5	Pollutions spécifiques à l'usage du bois comme combustible pour l'alimentation des moteurs Stirling.....	16
1.5.1	Emissions de polluants sous forme gazeuse et particulaire	16
1.5.2	Le chromate de potassium	17
2	WP2 - étude de la gazéification du bois et compatibilité de cette technique avec un moteur Stirling	19
2.1	La gazéification du bois	19
2.2	Le moteur Stirling à piston libre classique s'adapte mal au combustible bois	19
2.3	Avantage du moteur Stirling de Rudolf Schmid AG sur les moteurs à piston libre classique..	19
2.4	Avantage du procédé Carboforce sur les combustions constatées dans les produits précédents	21
3	WP3 - étude économique simplifiée	23
3.1	Rendement minimal de génération d'électricité à partir de bois pour atteindre une rentabilité économique	23
4	Conclusion générale	27
5	Bibliographie.....	29



Nomenclature

Lettres et symboles

A	Aire
C_v	Chaleur spécifique à volume constant
E	Énergie Travail
\dot{E}	Puissance Travail
L	Perte
\dot{L}	Puissance perdue
λ	Facteur d'air, dit « Lambda »
η	Rendement
Q	Énergie chaleur
\dot{Q}	Puissance chaleur
R	Constante des gaz parfaits
t	Temps
T	Température
V	Volume

Indices

an	Année
bois	Bois
c	Chaud
Carnot	Carnot
ch	Chaleur
el	Électrique
est	Estimation
inst	Installation
f	Froid
fumées	Fumées
fab	Fabricant
g	Global
gen	Générateur
max	Maximum
min	Minimum
reg	Régénérateur
St	Stirling, moteur Stirling
villa	Villa



1 WP1 - état de l'art des brûleurs à bois utilisés ou ayant été utilisés sur des moteurs Stirling

Le moteur Stirling est un moteur à combustion externe dont le fluide principal est un gaz soumis à un cycle comprenant quatre phases : chauffage isochore, détente isotherme, refroidissement isochore, puis enfin compression isotherme. C'est un cycle sans changement de phase du fluide de travail.

1.1 Précédentes tentatives d'intégration de moteurs Stirling dans des chaudières à bois

1.1.1 Le moteur Stirling : Une théorie unique implémentée de nombreuses manières différentes

Le but de cette étude n'est pas de répertorier tous les types de moteurs Stirling existants, mais de se concentrer sur les moteurs ayant ou ayant eu une utilisation commerciale pour des puissances électriques supérieures au kilowatt, et qui ont été associés avec une combustion de bois comme source chaude. Cependant, il est utile de mentionner que les moteurs Stirling, bien que tous issus du cycle thermodynamique élaboré par Robert Stirling au 19^{ème} siècle, se présentent en plusieurs familles qui sont autant de branches technologiques. En mettant de côté quelques branches très marginales telles que le moteur Stirling à 4 pôles ou le moteur fluidyne, les moteurs Stirling peuvent être séparés en 2 grandes familles : les moteurs Stirling cinématiques, de type alpha, alpha à double effet, bêta, et gamma, et les moteurs à pistons ou/et déplaceur libre, tels que le moteur Stirling Martini (à piston libre), Ringbom (à déplaceur libre), ou encore le moteur « à piston libre » (en Anglais, « free piston Stirling engine », à piston et déplaceur libre, comme son nom ne l'indique pas).

Les moteurs Stirling utilisés dans les applications industrielles étudiées ci-après sont tous basés soit sur des moteurs à piston libre ou une variante de ce dernier, soit sur un moteur alpha, alpha double-effet, ou bêta.

1.1.2 Deux technologies avec des limites différentes dominent le marché

Les deux types de moteurs qui dominent le marché, très différents dans leur conception, possèdent des limites et des avantages/inconvénients qui leur sont propres. Les moteurs bêta sont restés très marginaux et incorporés dans des machines au faible rendement électrique d'installation. Ils combinent plusieurs des désavantages des moteurs alpha, tout en étant peu compatibles avec l'usage de récupérateur de chaleur, qui permettent d'augmenter significativement le rendement du cycle Stirling. Les moteurs alpha et alpha double-effet sont en général des moteurs nécessitant plus de maintenance et fonctionnent avec une lubrification (huile ou graisse). Les moteurs à pistons libres sont en général conçus pour ne nécessiter aucune lubrification et sont en général scellés à vie, ce qui est un avantage au niveau de la maintenance car le moteur n'a en théorie besoin d'aucune intervention et a un taux de fuite du fluide de travail de zéro ou très proche de zéro. Par contre, les moteurs à piston libre sont limités au niveau de la température de la source chaude (550°C pour les moteurs Qnergy et Microgen, par exemple, d'après Rudolf Schmid AG [1]), ce qui limite le rendement du cycle Stirling, alors que les moteurs alpha ou alpha double-effet ne sont pas limités à ces faibles températures (le moteur de Sunmachine fonctionnait par exemple à plus haute température, avec une gazéification du bois ; nous estimons que la source chaude du moteur était à une température d'au moins 850°C ; de la même manière, le moteur de BioEnergieSysteme/Mawera tournait aussi à des températures élevées alors que la chaleur était prélevée dans une chambre de combustion à 1000°C). Une haute température de source chaude, soit d'au moins 850°C, permet de meilleurs rendements du cycle Stirling mais implique des problématiques différentes au niveau des matériaux. Par exemple, il est alors éventuellement plus facile à ces températures de générer des chromates de potassium [2], un composé toxique et corrosif en



milieu aqueux, lors de la combustion du bois si les pièces utilisées sont en acier inoxydable, ou il peut être nécessaire de changer les pièces en contact avec ces hautes températures au bout de quelques années car les aciers ainsi chauffés perdent progressivement leurs propriétés mécaniques et de protection à l'oxydation [3].


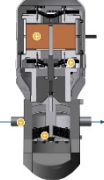
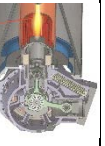




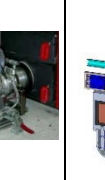
Dans les applications utilisant une combustion de bois comme source de chaleur, les moteurs de Qnergy [4] et de Microgen corporation [5] sont aujourd'hui intégrés dans des produits commercialisés. Il faut aussi mentionner le moteur Stirling de type alpha [6] de la société Sunmachine, et les moteurs alpha double-effet de SPM [7], de BIOS BioEnergieSysteme [8], et de Stirling DK [9], et le moteur bêta de Hoval [10] dont les projets ont été abandonnés ou ne sont plus commercialisés. Les compagnies Sunmachine, SPM, et Stirling DK n'existent plus. BioEnergieSysteme semble toujours être active dans le secteur de la biomasse [11], notamment, mais plus dans le domaine des moteurs Stirling actuellement. Le Tableau 1 montre les différents moteurs commercialisés ou ayant été commercialisés sur lesquels se concentre cette étude. Il existe de nombreux autres produits incluant des moteurs Stirling, mais ces derniers n'ont pas ou peu été utilisés dans des applications utilisant une combustion de bois comme source chaude du cycle Stirling [12] et sont par conséquent exclus de cette étude.

Afin de comparer entre eux les différents cas commerciaux recensés malgré le peu d'information disponible sur des produits qui ne sont plus fabriqués aujourd'hui, et dont une part des fabricants n'existent plus, il est choisi de redéfinir le rendement électrique de l'installation afin de mettre les produits étudiés sur un pied d'égalité. Le rendement électrique de l'installation, défini via l'Équation 2, est recalculé à partir de la puissance chaleur du bois $\dot{Q}_{bois,est}$, estimée via l'Équation 1. Cette puissance chaleur est définie égale à la somme de la puissance chaleur de l'installation, telle que donnée par le fabricant, $\dot{Q}_{ch,fab}$, et de la puissance électrique de l'installation, telle que donnée par le fabricant $\dot{E}_{el,fab}$, le tout divisé par le rendement global de l'installation, $\eta_{g,fab}$. Ainsi, le rendement électrique global de l'installation $\eta_{el,inst,est}$ est défini par la puissance électrique donnée par le fabricant $\dot{E}_{el,fab}$, divisé par la puissance chaleur apportée par le bois $\dot{E}_{bois,est}$. De même, le rendement thermique de l'installation est redéfini selon l'Équation 3.

$$\text{Équation 1 : } \dot{Q}_{bois,est} = \dot{E}_{bois,est} = \frac{\dot{Q}_{ch,fab} + \dot{E}_{el,fab}}{\eta_{g,fab}}$$

$$\text{Équation 2 : } \eta_{el,inst,est} = \frac{\dot{E}_{el,fab}}{\dot{E}_{bois,est}}$$

$$\text{Équation 3 : } \eta_{ch,inst,est} = \frac{\dot{Q}_{ch,fab}}{\dot{E}_{bois,est}}$$

Visuel								
Société	Microgen Corp. + ÖkoFEN	Qnergy + ÖkoFEN	Sunmachine	SPM + KWB	Mawera + BIOS BioEnergieSysteme	Stirling DK	Hoval	Rudolf Schmid AG
Type	Piston libre [13]	Piston libre [14]	Alpha [6]	Alpha double-effet [15]	Alpha double-effet [16]	Alpha double-effet [9]	Bêta [10]	Résonant à piston libre [17]



Le Tableau 2 établit une comparaison des systèmes concernés par cette étude et permet de montrer que les systèmes forment des familles technologiques. Il y a la famille de machines dont les moteurs Stirling fonctionnent à relativement haute température (moteurs alpha, ou alpha double effet) et dont les moteurs sont intégrés à leur source chaude de manière plus ou moins étroite, et qui se caractérisent par des rendements électriques d'installation supérieurs à 10%, et la famille des machines à moteurs à piston libre, dont le rendement électrique d'installation est inférieur à 10%, qui sont relativement peu intégrés dans leur source chaude, et qui fonctionnent à des températures plus basses. L'on notera aussi que la machine de Rudolf Schmid, ayant un rendement de 24% au propane, se distingue aussi par un rendement significativement élevé, qui est sans doute dû en grande partie à son utilisation de hautes températures de source chaude couplée avec une intégration avancée du moteur Stirling dans sa source de chaleur.

1.2 Problèmes et faiblesses des moteurs Stirling utilisés dans des installations de cogénération au bois

Les problèmes des moteurs Stirling utilisés dans les installations au bois sont de plusieurs types. Comme les moteurs Stirling utilisant d'autres sources chaudes qu'une combustion de bois, ils sont soumis à des défis d'usure des parties mobiles, et à des fuites plus ou moins grandes du fluide de travail. Les moteurs alpha et alpha double-effet, au même titre que la grande majorité des moteurs Stirling dit « cinématiques », sont plus sujets à ces problématiques car ce sont en général des moteurs qui ne sont pas scellés dans des enceintes hermétiques et soudées, et utilisent une lubrification pour limiter les usures. En effet, la plupart de machines concernées fonctionnent en général avec une lubrification, ce qui implique une usure de pièces, bien que réduite par la lubrification, mais aussi des maintenances. Les moteurs à piston libre sont souvent lubrifiés à vie, voire fonctionnent sans lubrification, et sont en général scellés à vie. Comme mentionné à la Section 2.1.2, les aciers inoxydables, réfractaires ou non, perdent peu à peu leurs propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion à haute température, ce qui constitue une faiblesse pour les moteurs Stirling. Ces dégradations peuvent être accentuées si le carburant est du bois car les substances impliquées dans le processus de combustion peuvent dans certaines conditions constituer un milieu défavorable aux matériaux utilisés. Les pièces d'usure thermique peuvent avoir des durées de vie de quelques années (3 à 6 ans en moyenne), mais en tout cas pas les 20 ans de durée de vie escomptés pour l'installation. Dans le domaine des moteurs Stirling à bois, les moteurs alpha, alpha double-effet, et les moteurs à piston libre sont utilisés. Les moteurs alpha et alpha double-effet peuvent travailler à haute température alors que les moteurs à piston libre sont limités à 550°C au niveau de leur source chaude [1]. Cette limitation diminue les rendements électriques des moteurs à piston libre, comme en témoignent les équations de rendement du cycle de Stirling et de Carnot (Équation 11 et Équation 12). Si le carburant dont la combustion alimente la source chaude en énergie est du bois, comme détaillé Section 2.5.1, les températures dans la chambre de combustion gagneraient à être comprise entre 950 et 1300°C, ce qui incite à de hautes températures de source chaude pour le moteur Stirling et implique les problèmes mentionnés ci-avant.

1.3 Problèmes et faiblesses des brûleurs à bois utilisés dans des installations de cogénération au bois utilisant des moteurs Stirling

1.3.1 Adjonction de module, contre intégration plus avancée

Les systèmes les moins intégrés adjoignent un module Stirling à une chaudière classique et obtiennent des rendements électriques de moins de 10%. C'est le cas notamment de Hoval, KWB (Figure 2) et ÖkoFEN (Figure 3). Comme illustré Figure 1, l'adjonction d'un module a pour conséquence qu'une part significative, voire majoritaire, de l'énergie-chaleur dégagée par la combustion du bois ne passe pas



par le cycle Stirling, ce qui implique que même avec un Stirling techniquement parfait, avec un rendement théorique maximal, le rendement électrique de l'installation resterait faible. Par ailleurs, Sunmachine (Figure 4) a développé sa source chaude autour de son moteur Stirling, l'intégrant avec ce dernier autant que possible. Toute la chaleur dégagée par le bois passe par le cycle Stirling ou finit en pertes thermique par rayonnement ou via les fumées (ces pertes sont bien entendu à éviter). L'intégration réalisée par Sunmachine est critiquable sur plusieurs points et est à revoir pour développer un produit fiable et performant dans le temps, mais cette intégration a le mérite d'avoir posé un premier pas dans la bonne direction. De même, les moteurs des installations de Mawera et Stirling DK donnent de meilleurs rendements notamment grâce à une meilleure intégration du cycle dans les machines, notamment avec une exploitation des fumées plus conséquente que dans les cas de KWB et ÖkoFEN. En particulier, la chaleur des gaz de combustion est utilisée de manière bien plus intégrée, comme illustré en Figure 6. La chaleur des fumées y est essentiellement récupérée pour chauffer l'air primaire ou secondaire de la combustion. L'énergie chaleur des fumées ne semble y être récupérée sur l'eau du système de chauffage qu'afin de récupérer l'énergie qui ne peut être récupérée sur les gaz.

1.3.2 Haute température ou basse température

Les moteurs Stirling à piston libre installés dans les machines d'ÖkoFEN fonctionnent à basse température, ce qui explique le choix d'être resté sur les technologies de combustion éprouvées que ce fabricant utilise. La source chaude du cycle Stirling est assurée par la combustion de pellets de bois dans un foyer volcan. Paradoxalement, KWB, qui avait un moteur Stirling pouvant fonctionner à plus haute température, est resté, comme ÖkoFEN, sur une source chaude à basse température assurée par la combustion de pellets de bois dans un foyer volcan (une flamme nécessite un facteur d'air plus grand, ce qui implique des températures des fumées plus faible, et une moins bonne homogénéité des conditions de température). Le choix de ce type de foyer a pour conséquence une source chaude globalement plus froide, et donc, selon l'Équation 11 et l'Équation 12, des rendements de cycle Stirling plus faibles. Du côté de Mawera et Stirling DK, certaines photographies et schémas dans les documents ayant pu être retrouvés, telles que la Figure 5 et la Figure 6, et la similarité de leurs produits, laissent penser que leur procédé de combustion était basé sur une gazéification du bois dont le gaz était brûlé dans une chambre de combustion via un procédé sans flamme, avec recirculation des gaz de combustion dans le cas de Stirling DK.

Constante des gaz parfaits	R	J/(mol.K)	8.31	
Fluide de travail	N/A	N/A	Hélium	
Pression moyenne du gaz dans le cycle Stirling	N/A	bara	30	
Température de la source chaude	T_c	°C	850	550
Température de la source froide	T_f	°C	100	
Volume molaire maximum du fluide de travail	V_c	m ³ /mol	3E-03	2E-03
Volume molaire minimum du fluide de travail	V_f	m ³ /mol	1E-03	1E-03
Capacité calorifique molaire à volume constant	C_v	J/(mol.K)	12.49	
Rendement théorique du cycle Stirling sans régénérateur (rendement min théorique)	$\eta_{St,min}$	%	21%	16%
Efficacité du régénérateur	η_{reg}	%	40%	40%
Rendement théorique du cycle Stirling avec régénérateur imparfait	$\eta_{St,reg}$	%	29%	22%
Rendement théorique du cycle Stirling avec régénérateur parfait (max théorique)	$\eta_{St,max}$ $= \eta_{Carnot}$	%	67%	55%

Tableau 2 : Estimation des rendements électriques théoriques



Compagnie	Modèle	Stirling	Type de moteur	Gaz de travail	Puissance Thermique	Puissance électrique	Rendement global annoncé	Rendement électrique	Rendement thermique	Date de début du projet	Date de fin du projet	Etat du projet	Photo	Site web
Equation	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Equation 3	Equation 2	%	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Unité	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	%	%	%	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Rudolf Schmid (CH)	N/A (propane)	Rudolf Schmid AG	Résonant à piston libre	He	5	1.8	90%	24%	66%	?	N/A	Développement		https://www.stirling.ch/
Sunmaschine (DE)	Sunmaschine Pellet (pellets)	oSun	Alpha	N2	10.5	3	90%	20%	70%	2001 ?	2011	Abandonné		http://www.bhk-w-prinz.de/sunmac hine-pellet-bhk-w-mit-stirlingmotor/14\$1
Stirling DX (DK)	N/A (plaquettes)	Stirling DK	Alpha double effet	He	205	35	85%	12%	73%	1997 ?	2012	Abandonné		https://da.dk/sites/default/files/Stirling%20DK%20Commercial%20Update%20ver%204%20.pdf
Mawera (AT)	N/A (plaquettes)	BIOS BioEnergie Systeme	Alpha double effet	He	230	35	88%	12%	77%	1998 ?	2005 ?	Abandonné		http://www.biosbioenergie.at/en/electricity-from-biomass/stirling-engine.html
ÖkoFEN (AT)	Pellematic e_max (pellets)	Qnergy	Piston libre	He	55	4.5	90%	7%	83%	2013	N/A	Commercial		http://www.oko-fen-e.com/fr/pellematic_e_max/
ÖkoFEN (AT)	Pellematic smart_e 0.6 (pellets)	Microgen Corporation	Piston libre	He	9	0.6	102%	6%	96%	2010	N/A	Commercial		http://www.oko-fen-e.com/fr/pellematic_smart_e/
KWB (AT)	Basé sur une chaudière EasyFire (pellets)	SPM	Alpha double effet	?	15	1	90%	6%	84%	2003	2010	Abandonné		http://lenni.ch/waermeerkraftkopplung-stirling.html
Hoval (LU)	Basé sur une chaudière Agrolit (bûches)	Hoval	Bêta	?	35	1	80%	2%	78%	2002	2012	Abandonné		http://www.akvt.de/ft2011/Junterlagen/A4-Hoval.pdf
Hoval (LU)	Basé sur une chaudière Biolyt (pellets)	Hoval	Bêta	?	50	1	80%	2%	78%	2005	2012	Abandonné		http://www.akvt.de/ft2011/Junterlagen/A4-Hoval.pdf
Hoval (LU)	Basé sur une chaudière Purolyt (bûches)	Hoval	Bêta	?	50	1	80%	2%	78%	2000	2012	Abandonné		http://www.akvt.de/ft2011/Junterlagen/A4-Hoval.pdf

Tableau 3 : Principaux projets de machines de cogénération au bois utilisant un moteur Stirling



Cette manière de procéder assure de hautes températures des gaz et une homogénéité meilleure dans la chambre de combustion, et permet de meilleurs rendements électriques de l'installation. Le niveau d'intégration des produits de ces compagnies était plus avancé que dans les cas d'ÖkoFEN et de KWB, comme l'illustre la Figure 6 ; notamment, la gestion des fumées sur ces machines était déjà particulièrement intéressante, impliquant un préchauffage de l'air et une recirculation des gaz de combustion. Il est probable que le facteur d'air de ces installations soit assez faible ($\lambda < 1.3$), bien qu'aucun document ne permette de l'attester avec certitude.

1.3.3 Problèmes additionnels

Les brûleurs classiques utilisés dans les installations (Figure 7) génèrent différentes difficultés. La première est que ces brûleurs génèrent des particules, notamment dans les phases de démarrage et d'arrêt des installations. Ces particules encrassent les échangeurs de chaleur, créant une couche isolante autour des tubes (Figure 8). De plus, si la combustion a lieu à trop haute température (~1300-1400°C pour la plupart des bois), les cendres peuvent devenir difficiles à évacuer et forment des mâchefers (Figure 9).

1.4 Facteurs qui ont mis à mal le développement des projets de Stirling au bois précédents

Il semble que dans le cas de Stirling DK, ce sont des questions de santé économique qui ont menés à l'arrêt du produit [9]. Dans le cas de Mawera, cela semble être l'absence d'un marché en phase avec son activité et les gammes de puissance dans lesquelles Mawera se spécialise [20]. Dans le cas de KWB et Hoval, l'arrêt de l'activité semble être liée à un manque de compétitivité sur le marché visé pour les produits en question, au rendement électrique trop faible pour financer le coût du produit. Dans le cas de Sunmachine, des problèmes techniques et économiques sont sans doute la cause de la chute de la société [2], avec comme KWB, un manque de compétitivité sur le marché visé pour les produits en question.

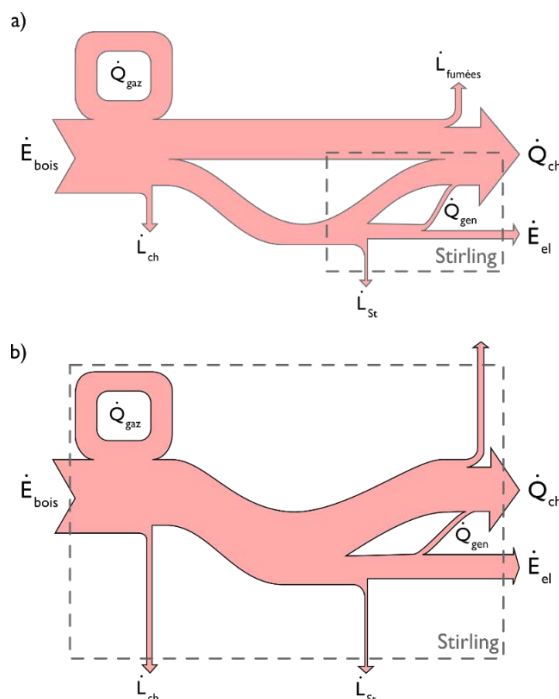


Figure 1 : Stirling et énergie bois : 2 types d'intégration

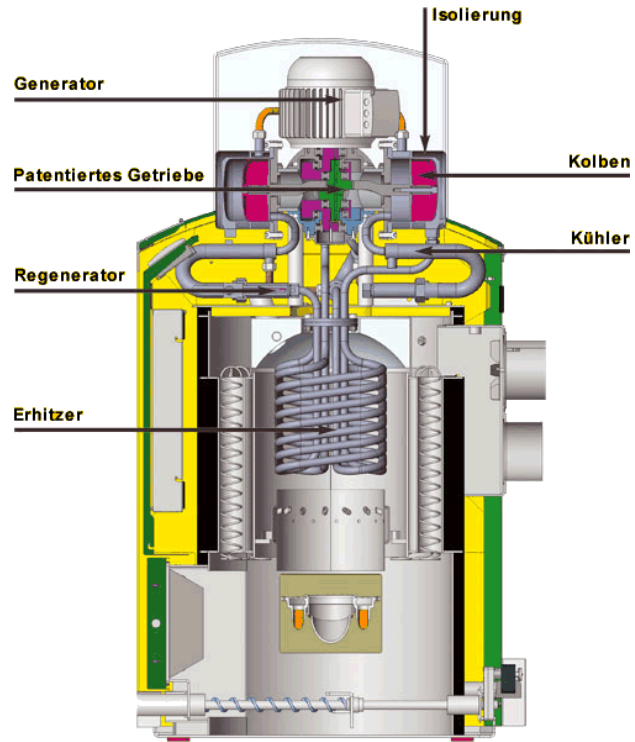


Figure 2 : Moteur Stirling de la société SPM intégré dans une chaudière KWB Easyfire [15]

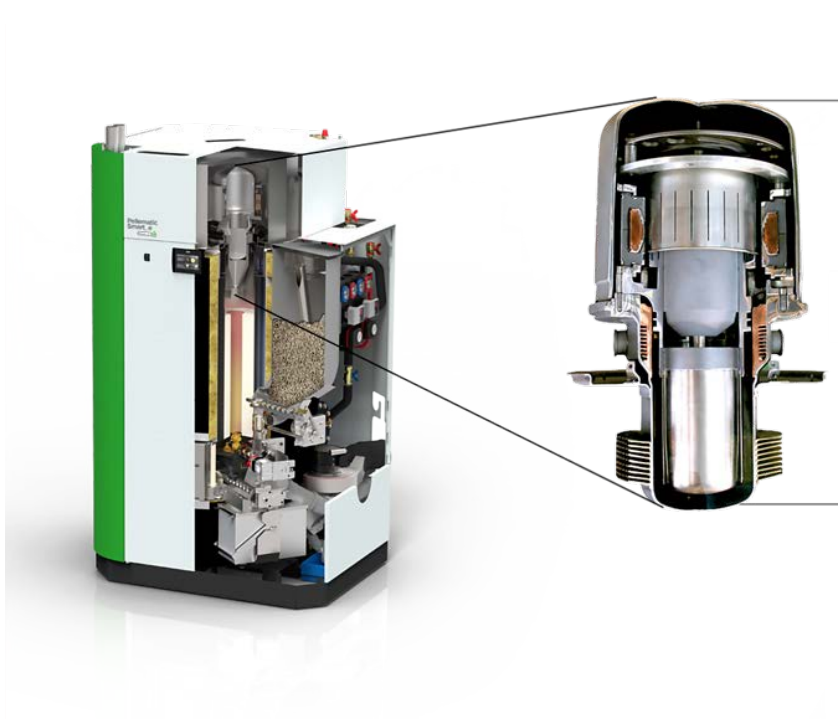


Figure 3 : Moteur Stirling de la société Qnergy intégré dans une chaudière ÖkoFEN Pellematic Smart_e [13]



Figure 4 : Moteur Stirling et système CHP développé par la société SunMachine [6]

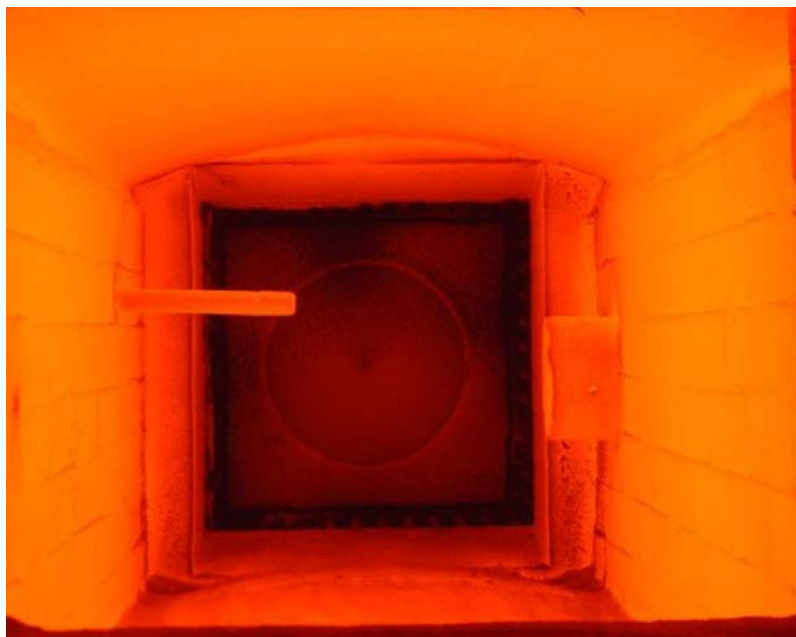


Figure 5 : Chambre de combustion de la chaudière CHP de Mawera [18]

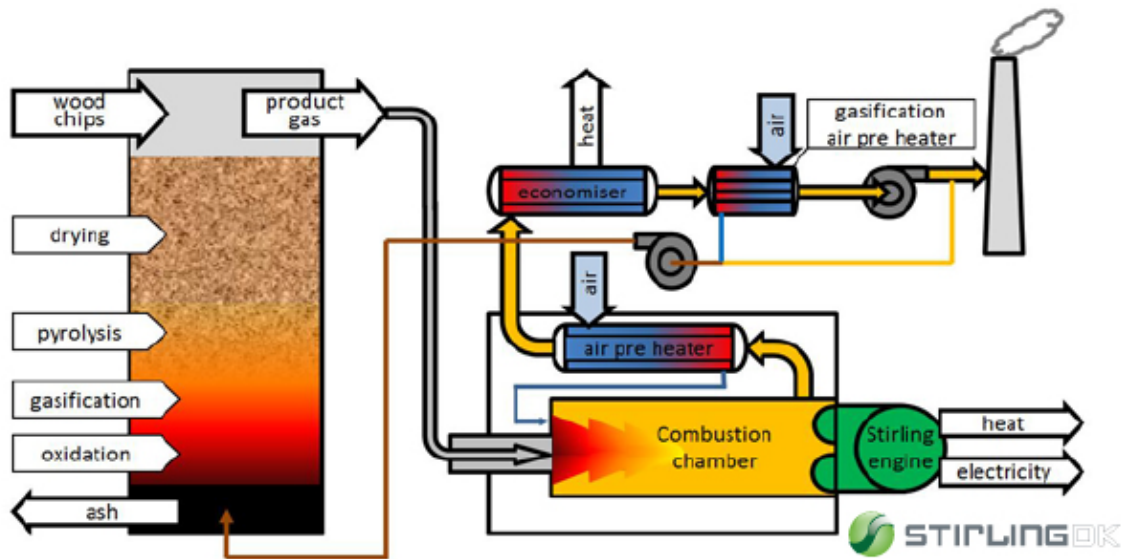


Figure 6 : Intégration du moteur Stirling de Stirling DK dans leur procédé de combustion [9]

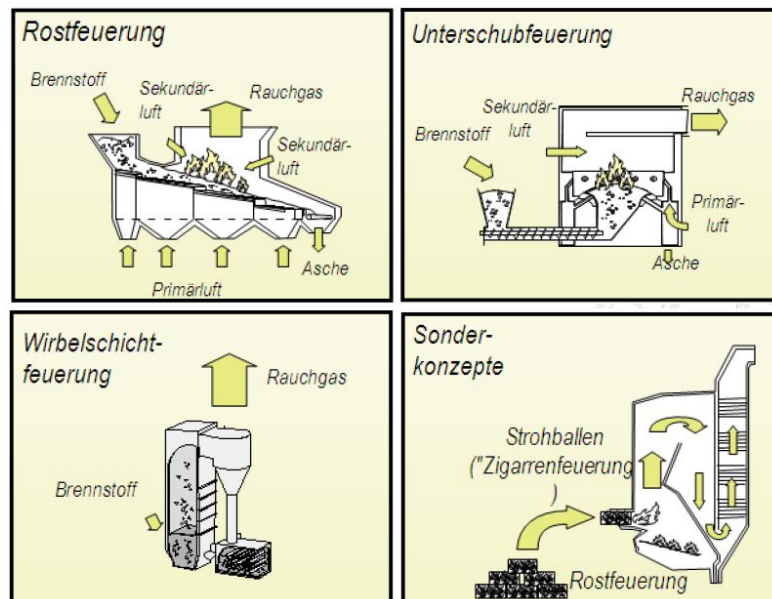


Figure 7 : Principaux types de brûleurs utilisés [19]

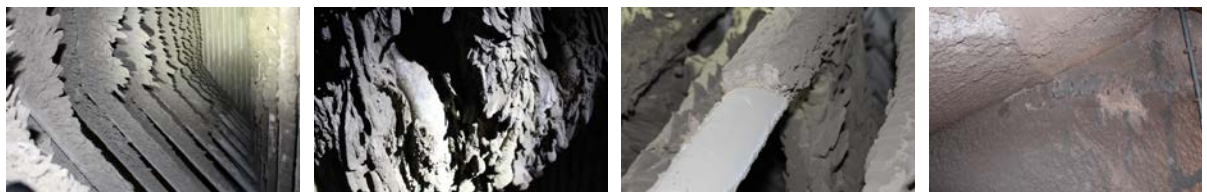


Figure 8 : Encrasement des échangeurs [19]



Figure 9 : Génération de mâchefers à haute température [19]

Dans le cas des brûleurs générant des quantités de particules fines non négligeables, chez KWB, Hoval, ÖkoFEN, et Sunmachine notamment, le brûleur est une cause de problème et est responsable de besoin en maintenance, et de baisse du rendement du produit, et donc de son attractivité économique. Chez Mawera et Stirling DK, le brûleur, plus propre [9], ne semble pas en cause. La qualité du moteur Stirling est rarement évoquée dans les documentations rassemblées. Aussi, il est difficile de conclure sur ce point. Cependant, il semble que les besoins en lubrification des moteurs cinématiques alpha et bêta, le besoin de maintenance, et les problèmes d'étanchéité du fluide de travail soient des facteurs pénalisants pour ces moteurs. Par contre, leur adaptation au puissance importante (bon rapport puissance sur volume) et leur capacité à fonctionner à des températures élevées sont clairement des atouts pour ces moteurs, qui s'intègrent mieux dans des installations conséquentes. Les moteurs Stirling à piston libre actuellement sur le marché fonctionnent à plus basse température et ont donc des rendements électriques plus faibles, mais répondent techniquement mieux aux besoins d'installations domestiques de petite puissance.

1.5 Pollutions spécifiques à l'usage du bois comme combustible pour l'alimentation des moteurs Stirling

1.5.1 Emissions de polluants sous forme gazeuse et particulaire

Les oxydes d'azote émis lors de la combustion de biomasse sont principalement le monoxyde d'azote (NO), le dioxyde d'azote (NO₂) et le protoxyde d'azote (N₂O) ; ces oxydes sont des polluants atmosphériques et contribuent à l'effet de serre et au dérèglement climatique ; ils sont acidifiants et



eutrophisants. Le bois contient naturellement entre 0.1 et 1% d'azote qui s'ajoutent à l'azote de l'air apporté pour la combustion. Ces atomes d'azote peuvent réagir avec l'oxygène de l'air (et d'autres molécules, comme c'est le cas avec les Prompt NOx) de 3 manières différentes (trois familles d'oxydes d'azote : Fuel NOx, Thermal NOx, et Prompt NOx) et former des oxydes d'azote. Pour limiter les émissions d'oxydes d'azote, il convient de diminuer le facteur d'air autant que possible ($\lambda \approx 1$), et travailler dans une gamme de température appropriée, soit au-dessus de 950°C (pour éviter la formation de N₂O, notamment), et en dessous de 1300°C [21].

1.5.2 Le chromate de potassium

Un acier inoxydable est un alliage d'acier, comportant donc à ce titre moins de 1,2% de carbone, et composé d'au moins 10.5% de chrome, ce qui lui donne la propriété d'être peu sensible à la corrosion dans nombre de conditions de pH et de température. Dans le cas des aciers inoxydables réfractaires, l'alliage est composé d'un pourcentage de chrome plus élevé que dans les alliages inoxydables classiques, et d'éléments à hauts points de fusion tels que le vanadium ou le tungstène. Sunmachine, sur la fin de la vie de la société, avait eu des problèmes de génération de chromate de potassium dans ses machines, un composé toxique, écotoxique, fortement soluble dans l'eau, formant alors une solution très oxydante ([2], [22]). L'usage des aciers inoxydables réfractaires dans les foyers de combustion ou proche de ces derniers est lié au fait que la technologie autour de la combustion de la biomasse tend aujourd'hui à rechercher des échanges de chaleur à haute température. Ce choix est généralement guidé par une recherche d'efficacité et de limitation des émissions de polluants [23] et est appelé à se généraliser dans les prochaines années, selon notre vision du marché et des développements actuels, qui tendent à aller vers une gazéification du bois et une combustion haute température des gaz produits. Bien qu'aucune étude n'ait particulièrement apporté des conclusions relatives à la génération de chromate, ou de dichromate de potassium dans le cas d'une combustion de bois dans un foyer en acier inoxydable, des indices indiquent que cette formation est liée à la présence d'eau liquide retournant dans le foyer alors qu'il contient des cendres [24]. Les méthodes d'extraction du chrome de son minerai le plus courant à l'état naturel, la chromite [25]–[28], et le comportement des aciers inoxydables aux phénomènes de corrosion en milieu aqueux basique ([22], [29], [30]) laissent penser qu'en présence d'un tel milieu à basse température, contenant de la soude et du potassium provenant des cendres du bois (les cendres sont par nature basiques, alors que les condensats de fumées sont par nature acides), l'oxyde de chrome présent à la surface de l'acier inoxydable réagit avec le potassium présent pour former des chromates de potassium. Il est aussi possible que ce phénomène se produise à haute température lors de la combustion (il s'agit alors une fusion alcaline), alors que la température de la chambre de combustion est relativement proche du point de fusion de l'acier, en présence de cendres contenant du potassium et du carbonate de calcium. Ces phénomènes sont peu décrits dans la littérature. Cependant, le fait que cette génération de chromate de potassium n'ait été détecté que dans de rares applications laisse envisager des pistes pour ne pas être affecté par le problème. Il semblerait qu'une bonne évacuation des condensats, un décentrage correct, et l'usage d'aciers réfractaires de qualité adaptée, changés au besoin si ce sont des pièces d'usure thermique, apportent de bonnes perspectives de protection contre la génération de chromate de potassium.

Dans le cas de la Sunmachine, la Figure 4 laisse penser que les cendres sont évacuées via les fumées ou qu'elles encrassent l'échangeur du moteur Stirling. Les condensats, à cause de la forme et de l'orientation de la chambre de combustion, ont tendance à se concentrer au bas de l'échangeur de chaleur, ce qui peut résulter en la formation de la solution fortement oxydante évoquée précédemment. Dans le contexte du moteur Stirling de Rudolf Schmid, nous préconiserons donc en particulier de positionner l'échangeur orienté vers le bas (comme chez ÖkoFEN), afin de favoriser l'évacuation des condensats. Le procédé de combustion proposé par Carboforce ne générant que très peu de particules, les échangeurs de chaleur fumée-air et fumée-fumée, évoqués à la section 1.3.3, seraient relativement protégés contre le phénomène susnommé, du fait de leur encrassement limité, voire nul. De plus, la



combustion dans le procédé de Carboforce se déroulant par phases, il semble que la question du décentrage pourra être adressée dans de bonnes conditions, et ainsi limiter l'exposition des cendres à un milieu aqueux. Au regard de ces éléments, le risque de génération de chromate de potassium nous semble relativement faible lors de l'association des technologies de Rudolf Schmid et de Carboforce.



2 WP2 - étude de la gazéification du bois et compatibilité de cette technique avec un moteur Stirling

2.1 La gazéification du bois

La gazéification du bois est un procédé de combustion qui implique un lit de bois dans lequel l'on retrouve une zone d'oxydation, une zone de pyrolyse, une zone de réduction des charbons, et une zone de séchage du bois. Ces zones sont alimentées en air via un apport d'air primaire, et le taux d'oxygène y est décroissant. En sortie, le taux d'oxygène est de zéro ou presque (air primaire : $\lambda < 1$). Les gaz de combustion sortant de ces zones sont des gaz en partie carburants composés de diverses molécules. En général, ils sont oxydés via un apport d'air secondaire, afin d'obtenir une combustion et récupérer de la chaleur, ou raffinés et traités pour être utilisés dans un moteur à combustion interne.

2.2 Le moteur Stirling à piston libre classique s'adapte mal au combustible bois

Les moteurs à piston libre classiques s'adaptent mal à la combustion du bois car ils nécessitent de travailler à relativement basse température, ce qui implique de brûler le bois de telle manière que les fumées soient à relativement basse température, ou de ne pas faire passer l'entier de l'énergie-chaleur développée par le brûleur par le moteur Stirling, notamment en prélevant d'abord une part de l'énergie pour chauffer l'eau du circuit de chauffage. Cette manière de procéder contraint à une combustion émettant plus de polluants gazeux et particulaires [31].

2.3 Avantage du moteur Stirling de Rudolf Schmid AG sur les moteurs à piston libre classique

Au contraire des moteurs Stirling à piston libre classiques, le moteur de Rudolf Schmid permet de fonctionner à haute température, autorisant ainsi d'exploiter un brûleur à bois dont la zone secondaire a une température comprise entre 950 et 1300°C, comme expliqué section 1.5.1, ce qui permet une source chaude du cycle Stirling de l'ordre de 850°C. De plus, le système actuel de Rudolf Schmid au propane propose d'ores-et-déjà une intégration préliminaire relativement avancée avec la source chaude, notamment avec un préchauffage du comburant et une chambre de combustion sans flamme participant aux bonnes performances constatées avec le propane comme carburant. Le moteur de Rudolf Schmid semble permettre de rendre disponible les avantages des moteurs cinématiques, plutôt constatés d'ordinaire à des puissances élevées, à des puissances domestiques et semble pouvoir ouvrir la voie à une application de cogénération domestique par moteur Stirling avec une combustion de bois. En effet, le moteur en question n'a pas besoin de lubrification, nécessite peu voire pas de maintenance, pourra être étanche au fluide de travail, et, grâce à une intégration avancée avec la source chaude et des températures de fonctionnement élevées, permettrait de maintenir avec le bois des performances proches de celles constatées au propane. Comme détaillé dans l'étude économique préliminaire proposée à la Section 3, il apparaît qu'un rendement électrique d'installation minimal, de l'ordre de 20%, soit nécessaire pour permettre de financer le surcoût impliqué par le moteur Stirling par rapport à une installation à bois standard. Bien qu'élevé, ce rendement semble possible à maintenir avec le moteur de Rudolf Schmid.

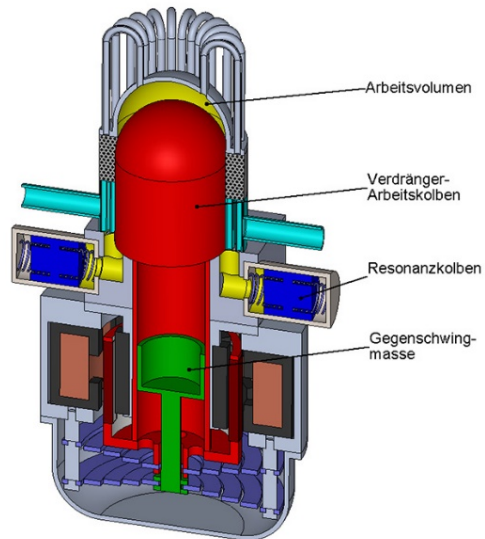


Figure 10 : Schéma de principe du moteur Stirling résonant à piston libre de la société Rudolf Schmid



Figure 11 : Moteur Stirling résonant à piston libre de la société Rudolf Schmid



2.4 Avantage du procédé Carboforce sur les combustions constatées dans les produits précédents

Avec du gaz naturel comme combustible, il est possible d'atteindre de plus hautes températures adiabatiques de combustion et ainsi profiter de sources chaudes plus chaudes, et donc d'obtenir des rendements moteur théoriquement plus élevés qu'avec une combustion de biomasse (2000°C avec $\lambda = 1$, pour une Viessmann Vitowin, une machine de cogénération Stirling au gaz naturel, 1600°C avec $\lambda = 1.3$ pour une Sunmachine fonctionnant avec des pellets de bois, et 800°C avec $\lambda = 2.5$ pour une ÖkoFEN Smart_e fonctionnant au bois [19], [32]). Un cycle Stirling alimenté en énergie par une combustion de biomasse sera du coup de 5 à 12% moins efficace pour produire de l'électricité ([19], [32], Tableau 3), et aura des rendements de chauffage du moteur Stirling plus faibles (~60% pour un Vitowin, ~50% pour une Sunmachine, et ~25% pour une Smart_e). Le procédé Carboforce semble utiliser les principes de combustion efficace observés sur les installations les plus performantes, telles celles de Stirling DK et Mawera : gazéification, recirculation des gaz de combustion, combustion sans flamme, faible facteur d'air. Il n'est pas possible de connaître en détail comment fonctionne le procédé de combustion Carboforce pour des raisons de secret industriel, mais les mesures effectuées à la HEIG-VD par notre institut sur ce procédé semblent indiquer que le procédé permet d'atteindre de faibles émissions et serait adaptable au moteur Stirling de Rudolf Schmid, et son intégration avec la chambre de combustion actuelle.



[leere Seite, damit Inhaltsverzeichnis/Kapitel 1 auf ungerader Seite]



3 WP3 - étude économique simplifiée

3.1 Rendement minimal de génération d'électricité à partir de bois pour atteindre une rentabilité économique

Tout d'abord, on constate, comme illustré par le Tableau 4, qu'au prix du kilowattheure de bois actuel (~ 23 ct/kWh), il n'est pas rentable de générer de l'électricité à partir de pellets seulement pour exploiter l'électricité ainsi convertie. Dans le cas des plaquettes, la rentabilité commence à peine à un rendement électrique d'installation de 20%, en ne considérant que le prix du kilowattheure de bois (c'est-à-dire en ne considérant aucun coût lié à l'installation ou à son amortissement).

Rendement électrique	%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Prix moyen de l'électricité produite à partir de plaquettes	CHF/kWh	0.83	0.41	0.28	0.21	0.17	0.14
Prix moyen de l'électricité produite à partir de pellets	CHF/kWh	1.69	0.85	0.56	0.42	0.34	0.28

Tableau 4 : Coût de production du kWh d'électricité à partir de bois, si la chaleur n'est pas valorisée

En considérant les hypothèses de travail évoquée dans le Tableau 5, c'est-à-dire, en considérant les besoins d'une villa-type de 200 m², avec les prix actuels du bois et de l'électricité à l'achat et à la vente, il apparait, comme illustré sur la Figure 12 et dans le Tableau 6, que le pic de rentabilité est observé pour un rendement électrique d'installation de 22.5% environ, avec une autoconsommation de 100% de l'électricité produite. Les formules utilisées pour les calculs sont détaillées dans les équations ci-dessous (Équation 4 à Équation 10). Cette rentabilité économique maximale permet de définir la somme maximale gagnée sur la durée de vie du produit, permettant de financer le surcoût de l'installation. Avec les hypothèses considérées, la somme disponible est de 11.6 kCHF au maximum, ce qui est en théorie suffisant pour financer le surcoût d'un système de cogénération domestique. Le prix d'une machine a cogénération de chaleur et électricité fonctionnant au bois et équipée d'un moteur Stirling serait de 10 kCHF à 20 kCHF supérieur au prix d'une chaudière à bois fournissant le même service de chauffage (selon les prévisions de coût estimées par Rudolf Schmid et selon [33]–[35]), aussi la somme disponible est plutôt dans la tranche basse des estimations de surcoût, mais correspond environ cependant au surcoût en première estimation, estimé par Rudolf Schmid pour leur machine (12 à 15 kCHF). Aussi, bien que la somme disponible soit un peu faible, il parait intéressant de considérer la rentabilité comme possible, en particulier car les prix d'achat ou de vente de l'électricité peuvent devenir plus favorables à la cogénération à partir de bois à l'avenir et car les coûts de production du moteur Stirling et du système attendant peuvent certainement encore être optimisés.

Puissance électrique du moteur Stirling	kW	\dot{E}_{el}	2	
Energie chaleur nécessaire pour chauffer la villa-type	kWh/(m2.an)	$Q_{ch,villa}$	60	



Energie électrique nécessaire pour les usages de la villa-type	kWh/an	$E_{el,villa}$	4000	
Surface de la villa-type considérée	m2	A_{villa}	200	
Prix de rachat de l'électricité sur le réseau	CHF/kWh		0.05	
Prix de la tonne de plaquettes forestière	CHF/tonne		166	233
Prix de la tonne de pellets	CHF/tonne		300	365
Prix moyen de la tonne de plaquettes forestière	CHF/tonne		190	
Prix moyen de la tonne de pellets	CHF/tonne		330	
Prix moyen du kWh d'électricité acheté sur le réseau	CHF/kWh		0.23	
Energie contenue dans 1 kg de plaquettes (20-30% d'humidité)	kWh/kg		3.3	3.9
Energie contenue dans 1 kg de pellets (5-10% d'humidité)	kWh/kg		4.4	4.6
Prix moyen du kWh de bois, à partir de plaquettes	CHF/kWh		0.041	
Prix moyen du kWh de bois, à partir de pellets	CHF/kWh		0.0846	0.0846

Tableau 5 : Conditions de l'analyse économique préliminaire

Équation 4

$$\dot{E}_{bois} = \eta_{el} \dot{E}_{el}$$

Équation 6

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{E}_{bois} - \dot{L}_{fumées} - \dot{L}_{st} - \dot{L}_{ch} - \dot{E}_{el}$$

Équation 8

$$\dot{L}_{fumées} = 10\% \dot{E}_{bois}$$

Équation 10

$$\eta_{el} = \frac{\dot{E}_{el}}{\dot{E}_{bois}}$$

Équation 5

$$\eta_{ch} = \frac{\dot{Q}_{ch}}{\dot{E}_{bois}}$$

Équation 7

$$t_{ch,an} = \frac{Q_{ch,villa}}{\dot{Q}_{ch}}$$

Équation 9

$$t_{el,an} = t_{ch,an} \dot{E}_{el}$$

Équation 11

$$\eta_{st} = \frac{R (T_c - T_f) \ln \left(\frac{V_c}{V_f} \right)}{(1 - \eta_{reg}) C v (T_c - T_f) + R T_c \ln \left(\frac{V_c}{V_f} \right)}$$

Équation 12

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

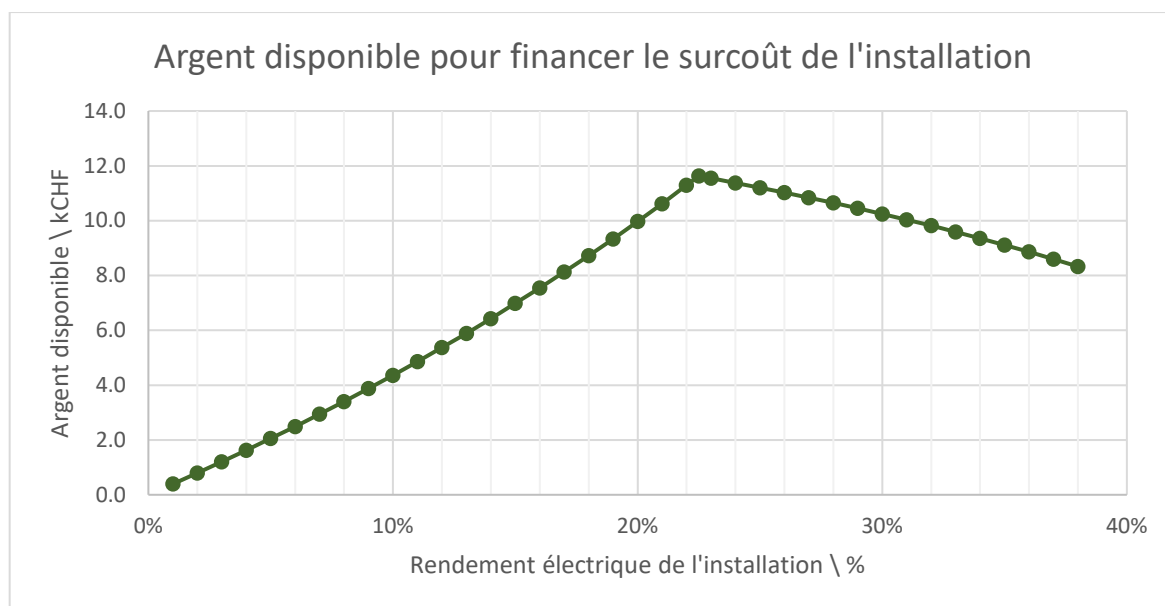


Figure 12 : Somme maximale disponible pour le financement des surcoûts de l'installation

Rendement électrique de l'installation	%	η_{el} (Équation 10)	6%	7%	12%	20%	22.5%	24%	38%
Puissance chaleur disponible	kW	\dot{E}_{bois} (Équation 4)	33.3	28.6	16.7	10.0	8.9	8.3	5.3
Pertes chaleur de la chaudière	kW	\dot{L}_{ch}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pertes non récupérables sous forme de chaleur du moteur Stirling	kW	\dot{L}_{st}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pertes thermiques du générateur récupérables sous forme de chaleur	kW	\dot{Q}_{gen}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pertes de chaleur via les fumées	kW	$\dot{L}_{fumées}$ (Équation 8)	3.3	2.9	1.7	1.0	0.9	0.8	0.5
Puissance chaleur utilisée pour le chauffage et l'ECS	kW	\dot{Q}_{ch} (Équation 6)	28.0	23.7	13.0	7.0	6.0	5.5	2.7
Rendement chaleur de l'installation	%	η_{ch} (Équation 5)	84%	83%	78%	70%	68%	66%	52%
Temps de fonctionnement de la chaudière pour assurer le besoin en chauffage	h/an	$t_{ch,an}$ (Équation 7)	429	506	923	1714	2000	2182	4385
Pourcentage de temps dans l'année où fonctionne la chaudière	%/an		5%	6%	11%	20%	23%	25%	50%
Energie électrique générée pendant le fonctionnement de la chaudière	kWh/an	$\dot{E}_{el,an}$	857.1	1012.0	1846.2	3428.6	4000.0	4363.6	8769.2
Pourcentage de la consommation électrique couvert	%/an		21%	25%	46%	86%	100%	109%	219%
Economie réalisée en consommant l'électricité produite	CHF/an		124.6	147.1	268.4	498.5	581.5	569.0	416.4
Argent disponible pour financer le surcoût de l'installation	kCHF		2.5	2.9	5.4	10.0	11.6	11.4	8.3

Tableau 6 : Analyse économique préliminaire en fonction du rendement électrique de l'installation



[leere Seite]



4 Conclusion générale

Le moteur Stirling à piston libre résonant proposé par Rudolf Schmid, au contraire des moteurs à piston libre classiques, permet de fonctionner avec une source chaude de 850°C, ce qui le rend adapté à une chambre de combustion des gaz de bois à une température comprise en 950°C et 1300°C (permettant ainsi de minimiser la formation de polluants atmosphériques et la génération de mâchefers). Le procédé de combustion utilisé pour l'application serait composé d'une zone de gazéification, et d'une chambre de combustion sans flamme à haute température, avec un facteur d'air aussi faible que possible. Il pourrait utiliser un système de recirculation des fumées. Le procédé de combustion respectant les points cités ci-avant devrait émettre peu de polluants atmosphériques. Le procédé Carboforce semble proposer ces éléments sans que nous puissions le confirmer. Le moteur Stirling et sa source de chaleur devront être intégrés ensemble et l'énergie chaleur des fumées devrait être utilisée pour préchauffer l'air entrant et les gaz de bois, alors que le transfert sur l'eau du réseau de chauffage ne serait utilisé que pour récupérer l'énergie qui n'a pas pu être récupérée sur les gaz. L'installation devra impérativement atteindre un rendement électrique d'installation de 18-20% pour financer un surcoût d'installation d'environ 10 kCHF. Bien qu'élevé, ce rendement semble possible à atteindre avec le moteur de Rudolf Schmid. Ce dernier semble apporter les avantages des moteurs cinématiques, plutôt utilisés d'ordinaire à des puissances élevées, à des puissances domestiques et semble pouvoir ouvrir la voie à une application de cogénération domestique par moteur Stirling avec une combustion de bois. Le moteur en question n'a pas besoin de lubrification, ne nécessite peu voire pas de maintenance, pourra être étanche au fluide de travail, et, grâce à une intégration avancée avec la source chaude et des températures de fonctionnement élevées, permettrait de maintenir avec le bois des performances proches de celles constatées au propane et ainsi atteindre le rendement nécessaire à la rentabilité du produit.



[leere Seite, damit Inhaltsverzeichnis/Kapitel 1 auf ungerader Seite]



5 Bibliographie

- [1] R. Schmid et J. P. Budliger, « COMBINED HEAT and POWER (CHP) for RESIDENTIAL HOMES : the RESONANCE STIRLING SYSTEM », p. 8.
- [2] « Kaufbeuren / Kempten: Sunmachine hat noch ein Problem », *all-in.de - das Allgäu online!* [En ligne]. Disponible sur: https://www.all-in.de/kempten-allgaeu/c-lokales/sunmachine-hat-noch-ein-problem_a790950. [Consulté le: 19-avr-2018].
- [3] S. E. Messki, « Etude des mécanismes d'oxydation des alliages FeCrAl et de l'acier AISI 316L à haute température (700-1300°C). Influence du mode d'introduction du lanthane et du Cerium. Protection par des couches d'oxydes thermiques contre la corrosion aqueuse », p. 221.
- [4] Qnergy, « Qnergy OEM Product ».
- [5] Microgen Engine Corporation, « Engines - Microgen Engine Corporation ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.microgen-engine.com/products/engines/>. [Consulté le: 30-avr-2018].
- [6] Sunmachine, « Plaquette produit "Sunmachine Pellet" - cogénération à moteur Stirling - granulés de bois ». 2007.
- [7] K. W. Stanzel, « Stromerzeugung im Einfamilienhaus - Strom und Wärme zu Hause selbst aus Holzpellets erzeugen », 2006.
- [8] BIOS-BIOENERGY, « Electricity from biomass – BIOS BIOENERGIESYSTEME – Stirling Engine ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.bios-bioenergy.at/en/electricity-from-biomass/stirling-engine.html>. [Consulté le: 30-avr-2018].
- [9] Stirling DK, « Stirling DK Introduction », mars-2012.
- [10] Hoval, « Einbindung von Stirling-Motoren in Stückholz- und Pelletskessel ».
- [11] BIOS-BIOENERGY, « Electricity from biomass – BIOS BIOENERGIESYSTEME – CURRENT EU-PROJECTS ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.bios-bioenergy.at/en/current-eu-projects.html>. [Consulté le: 30-avr-2018].
- [12] P. K. Pradip, « Commissioning and Performance Analysis of WhisperGen Stirling Engine », University of Windsor, 2016.
- [13] ÖkoFEN, « LE PROJET PELLEMATIC SMART_e - présentation du projet ». 2015.
- [14] ÖkoFEN, « Présentation du projet Pellematic E_max ». 2017.
- [15] « Moteurs Stirling bois à pellets ou granulés + cogénération - Page 7 », *Forums des énergies: chauffage, isolation, maison, inventions, technologies, renouvelables, solaire, bois, électricité, transports électriques, voitures plus propres...* [En ligne]. Disponible sur: <https://www.econologie.com/forums/energies-renouvelables/moteurs-stirling-bois-a-pellets-ou-granules-cogeneration-t5703-60.html>. [Consulté le: 30-avr-2018].
- [16] I. Obernberger, H. Carlsen, et F. Biedermann, « Description of the biomass CHP technology based on Stirling engines: BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, Graz », 2005.
- [17] Rudolf Schmid AG, « Freikolben-Resonanzstirling - Rudolf Schmid AG », *stirling.ch*.
- [18] « Biomasse-Verstromung mittels Stirlingmotor - Grundlagen und praktische Erfahrungen ».



- [19] Various authors, « Stirling-Forum 2016, Garching ; Workshop diaporama “Festbrennstoffe für Stirlingmotoren” », 2016.
- [20] SEBES, ADIT, « Actualité du moteur Stirling 2003 - ADIT - Autriche, première centrale électrique et thermique combinée à moteur Stirling (MAWERA) ». 2003.
- [21] Nussbaumer, Th, « Biomass Combustion: Basic Principles and Application of Grate-Furnaces, Under stoker Furnaces and Dust Combustors », présenté à Biomass Summer School, Schloss Stein, Styria (Austria), 1996.
- [22] « Oxyde de chrome en milieu acide et basique ». [En ligne]. Disponible sur: <http://forums.futura-sciences.com/chimie/448078-oxyde-de-chrome-milieu-acide-basique.html>. [Consulté le: 19-avr-2018].
- [23] Windhager Zentralheizung, *Windhager PuroWIN - La révolution du chauffage à plaquettes de bois*.
- [24] Unknown, « Bright Yellow Carcinogenic Chromate Produced by Garden Wood Burner ».
- [25] « Production et valeur de la chromite », *news.ontario.ca*. [En ligne]. Disponible sur: <https://news.ontario.ca/mndmf/fr/2012/05/production-et-valeur-de-la-chromite.html>. [Consulté le: 19-avr-2018].
- [26] « Métallurgie extractive du chrome - Traitements minéralurgiques des minerais de chromite ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/metallurgie-extractive-42369210/metallurgie-extractive-du-chrome-m2245/traitements-mineralurgiques-des-minerais-de-chromite-m2245v2niv10005.html>. [Consulté le: 19-avr-2018].
- [27] « Le Chrome », *Superprof Ressources*, 28-févr-2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.superprof.fr/ressources/physique-chimie/tout-niveau/tableau-periodique/metal-de-transition.html>. [Consulté le: 19-avr-2018].
- [28] « Extraction of Chromium from Chromite Ore », *Metallurgist & Mineral Processing Engineer*, 20-juill-2017.
- [29] BeCloud.com, « Corrosion de l’acier inoxydable en traitement de l’eau ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.suezwaterhandbook.fr/eau-et-generalites/corrosion-des-metaux-et-betons/corrosion-des-materiaux-metalliques/acier-inoxydable>. [Consulté le: 19-avr-2018].
- [30] ArcelorMittal, « L’acier inoxydable et la corrosion ».
- [31] Sjaak van Loo et Jaap Koppejan, *Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*, Earthscan. 2008.
- [32] Müller, D., Plankenbühler, T., et Karl, J., « Small-scale CHP with Stirling engines based on fluidized-bed combustion of biomass », *Co-generation & Stirling Energy Systems*, 2016.
- [33] Borgeaud, Y., « MicroXyloCogen - Analyse économique intermédiaire », HEIG-VD, juin 2014.
- [34] Girardin, A. et Röthlisberger, R., « MICROXYLOCOGEN - Phase I : rapport final », HEIG-VD, sept. 2014.
- [35] « Stirling et chaudière bois », *cogeneration.discutforum.com*. [En ligne]. Disponible sur: <http://cogeneration.discutforum.com/t45-stirling-et-chaudiere-bois>. [Consulté le: 30-avr-2018].



Projet Stirling Rudolf Schmid

André Van der Veken, le 22 avril 2018

Le procédé Carboforce a pour particularité de décomposer la combustion en une dizaine de phases. Cette segmentation des étapes de la combustion permet d'adapter la technologie au besoin du client avec un maximum d'efficacité.

Grâce à notre technologie, nous pouvons aisément obtenir différents niveaux de hautes températures uniformes et stables avec des émissions de polluants très faibles. Notamment, notre procédé permet d'effectuer une combustion complète du bois avec des fumées contenant très peu d'oxydes d'azote, d'imbrûlés, ou de poussières fines, et le tout avec un excès d'oxygène de moins de 1 %. Ces caractéristiques rendent notre procédé particulièrement bien adapté pour développer une machine de cogénération Stirling au bois. Nous estimons qu'il est possible de rendre le système de Rudolf Schmid aussi performant avec une combustion de bois qu'avec la combustion de propane actuelle.

Lors de ce projet, d'autres paramètres devront être considérés au même titre que les aspects de combustion, tels que la configuration des flux d'énergie dans le brûleur, les admissions, et les départs des gaz et fumées, les dimensions de l'installation, ou les intervalles de service.

Pour appuyer les affirmations ci-dessus, j'autorise l'Institut de Génie Thermique de la HEIG-VD à joindre en annexe à leur rapport les relevés des mesures d'émissions effectués sur l'un de mes prototypes en 2017, au sein du laboratoire de l'institut en question.