ANALYSE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE D'UN SYSTEME DE MICRO-COGENERATION BIOMASSE A MOTEUR STIRLING

Résumé de la Thèse

La micro-cogénération est une technologie par laquelle on produit simultanément de l'électricité et de la chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire des logements, d'une manière décentralisée. La puissance électrique produite est inférieure à 50 kW_{el}.

Cette technologie récupère les pertes de "chaleur fatale" considérées comme des "déchets thermiques" produits dans les cycles thermodynamiques pour la production d'énergie mécanique.

La technologie de la micro-cogénération offre des avantages importants.

A grande échelle, les enjeux portent sur la réduction des consommations d'énergie primaire, réduction des émissions de CO2, évitement de la construction de centrales et de réseaux.

Au niveau de l'individu, les enjeux sont liés à la nouvelle stratégie de la Commission Européenne pour stimuler la rénovation intitulée "Une vague de rénovation pour l'Europe - Verdir nos bâtiments, créer des emplois, améliorer la vie". La mise en œuvre de cette stratégie est ciblée sur la décarbonation et l'intégration des énergies renouvelables qui doit faire essentiellement référence à l'énergie issue de sources renouvelables produites sur place ou à proximité. La rénovation des bâtiments doit accélérer l'intégration des énergies renouvelables, notamment locales, et favoriser une utilisation plus extensive de la chaleur résiduelle.

Dans ce contexte, l'utilisation plus élargie de la biomasse en tant que combustible, représente une réponse à cette nouvelle orientation et offre plusieurs avantages : on utilise de l'énergie renouvelable, la neutralité carbone, la disponibilité et le bas-prix.

Dans ce contexte, l'utilisation plus élargie de la biomasse en tant que combustible, représente une réponse à cette nouvelle orientation et offre plusieurs avantages : on utilise de l'énergie renouvelable, la neutralité carbone, la disponibilité et le bas-prix.

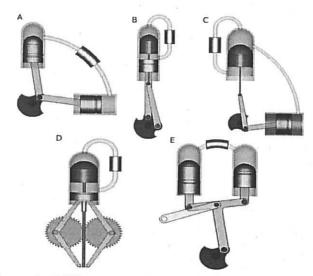


Figure 1 - Différentes configurations des moteurs Stirling
Le travail de cette thèse a pour objectif de réaliser une analyse théorique et expérimentale d'un système de micro-cogénération biomasse à moteur Stirling (Figure 1).

Le premier chapitre de la thèse présente une étude bibliographique qui apporte des réponses sur le choix du sujet de thèse. Dans cette partie est presenté le contexte énergétique européen. La réduction des émissions de 55% d'ici 2030, considérée comme une première étape nécessaire vers la neutralité carbone de l'UE fixée pour 2050, demande la promotion de la décarbonisation du chauffage et du refroidissement, qui sont responsables de 80% de l'énergie consommée dans les bâtiments résidentiels. Deux tiers de cette énergie proviennent de combustibles fossiles, respectivement 76,5%.

Étant donné que les systèmes autonomes représentent 88 % du marché global de l'approvisionnement en chaleur de l'Union européenne, l'une des priorités est de s'attaquer à la décarbonisation du chauffage par la promotion de systèmes autonomes modernes et efficaces utilisant des sources d'énergie renouvelables. Par conséquent, la production de chaleur à partir de biomasse solide et, en outre, la production simultanée d'électricité dans le même système autonome sont prises en considération.

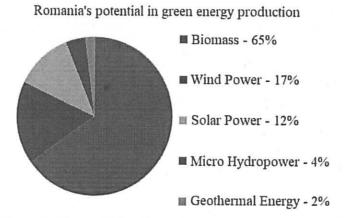


Figure 2 - Potentiel des énergies renouvelables en Roumanie

(source: https://www.interregeurope.eu/)

Les systèmes de micro-cogénération à base de biomasse sont de plus en plus populaires car ils peuvent aider les clients à passer du statut de consommateurs à celui de prosommateurs, en produisant de l'électricité pour l'autoconsommation ou même en la revendant au réseau. En conséquence, un système de micro-cogénération à combustion de biomasse solide équipé d'un moteur Stirling est étudié expérimentalement et théoriquement.

Pour encadrer ce travail, le premier chapitre présente les notions sur la biomasse (Figure 2 et Figure 3), les systèmes de microcogénération biomasse, le transfert de chaleur, le cycle de Carnot et de Stirling, les types de moteurs Stirling les paramètres spécifiques, les aspects théoriques, les calculs simplifiés, tous liés au moteur Stirling.

Le chapitre 2 fait référence aux caractéristiques de la biomasse solide et à son impact favorable sur les émissions de gaz à effet de serre. Le pouvoir calorifique supérieur et le pouvoir calorifique inférieur ainsi que les relations qui les relient ont été déterminés pour plusieurs types de biomasse : déchets forestiers, granulés de sapin, briquettes de chêne, sciure de hêtre, granulés de hêtre, briquettes de hêtre.

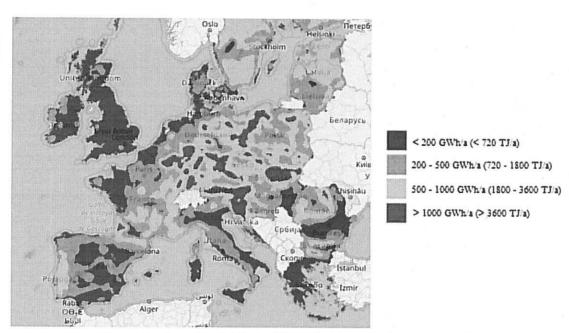


Figure 3 - Le potentiel énergétique de biomasse type bois en Europe (source : https://heatroadmap.eu/)

Les considérations sur la teneur en eau de la biomasse se sont concentrées sur l'importance de son évaluation initiale et de son contrôle ultérieur, conformément à la méthode d'essai et aux procédures connexes recommandées par les normes spécifiques.

Sur la base de divers échantillons de biomasse, les niveaux d'humidité humide et sèche ont été déterminés. Le séchage a eu lieu dans une atmosphère d'azote pour éviter l'oxydation.

Le pouvoir calorifique supérieur a été déterminé à l'aide d'un calorimètre (Figure 4). Des détails sur ce processus de mesure sont fournis dans le chapitre deux.

Sur la base des relations trouvées dans la littérature scientifique, le pouvoir calorifique inférieur de tous les échantillons de biomasse a été calculé et le prix de l'énergie équivalente reposant exclusivement sur le coût du carburant a été obtenu. Les relations (1) - (4) provenant de la littérature scientifique ont été utilisées pour calculer la puissance calorifique inferieure des combustibles biomasse analysée.

Tableau 1 - Formules utilisées pour le calcul de la puissance calorifique inférieure des combustibles analysés

Conformément à l'importance accordée aux questions de cendres dans le cadre de l'extension requise de l'utilisation de la biomasse, la teneur en cendres de la biomasse solide a été mesurée en utilisant un four à moufle (Figure 5). Des détails sur les procédures de mesure utilisées pour cette détermination sont fournis dans le chapitre 2.

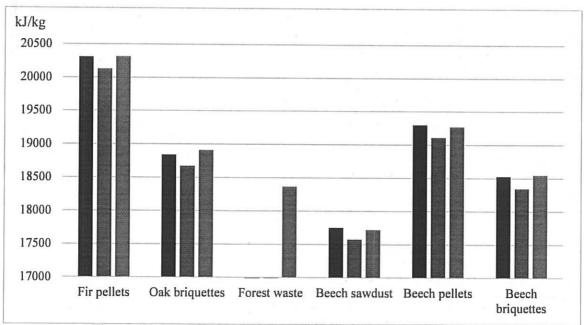


Figure 4 - Puissance calorifique supérieure des combustibles analysés

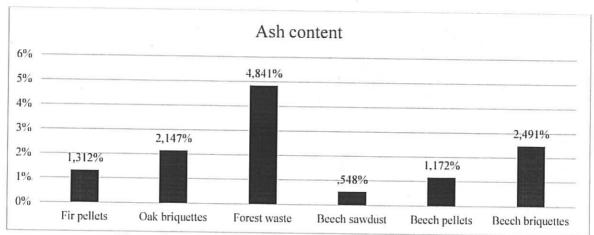


Figure 5 - Analyse des cendres des combustibles considerés.

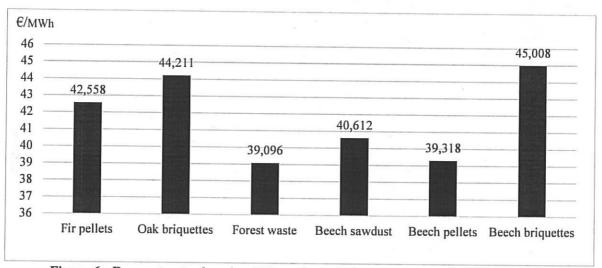


Figure 6 - Rapport entre le prix et l'énergie produite par les combustibles analysés

Enfin, des calculs économiques décrivant la rentabilité d'un investissement dans une nouvelle centrale de chauffage utilisant les échantillons de biomasse solide ont été développés (Figure 6). La durée de vie de la centrale thermique a été fixée à 20 ans. Dans ces conditions, compte tenu du fait que les investissements dans la production de chaleur doivent se refléter dans le prix de vente (€/MWthh), une augmentation par rapport au prix du combustible de 35% a été adoptée.

Pour chaque essence de bois, la projection du cash-flow a été réalisée (Figure 7). Pour les données d'entrée considérées, les délais de récupération varient du plus petit, à savoir les briquettes de hêtre, au plus grand, les déchets de fôret. `

Pour une durée de vie de 20 ans, le retour sur investissement est raisonnablement court, sachant que la fourniture de chaleur au sein des systèmes de chauffage urbain locaux a un fort impact social et que les prix de vente (variant de 53 à 61 €/MW_{th} dans cet exemple) devraient être abordables.

Dans des pays comme la France où la parité d'achat du pouvoir d'achat est adéquate, dans d'autres pays comme la Roumanie, la nécessité de subventionner localement la fourniture de chaleur est toujours présente.

Des performances financières attrayantes soutiennent l'idée que tous les investissements sont économiquement valables.

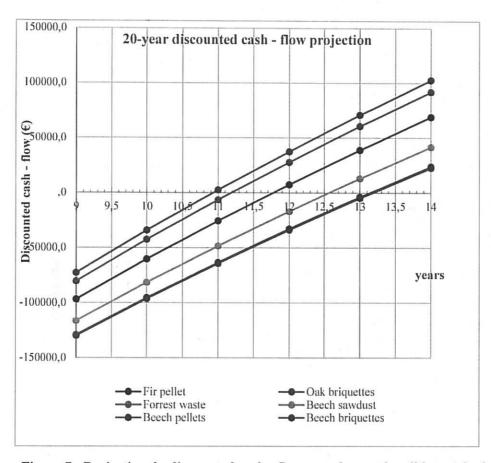


Figure 7 - Projection du discounted cash - flow pour les combustibles analysés

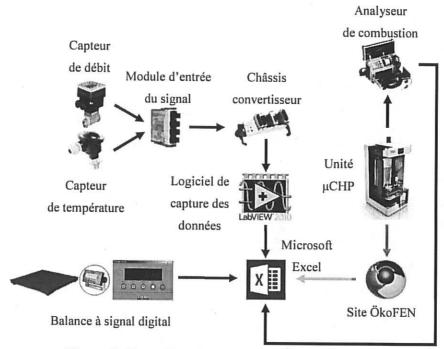
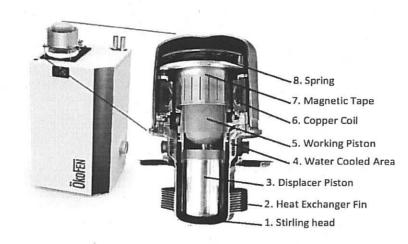


Figure 8 - Banc d'essai du système de micro-cogénération

La troisième partie de la thèse est consacrée au dispositif expérimental mis en place au cours de la thèse (Figure 8). Une description détaillée du banc d'essai du système de micro-cogénération est présentée.



- Légende :
- Carcasse du Stirling
- 2. Echangeur de chaleur (source chaude)
- 3. Piston déplaceur
- 4. Zone refroidie par de l'eau (source froide)
- 5. Piston moteur
- 6. Bobine de cuivre
- Bande magnétique
- 8. Ressort

Figure 9 - Le système de micro-cogénération biomasse à moteur Stirling

Il s'agit d'une installation de micro-cogénération biomasse à moteur Stirling (Figure 9). Le moteur Stirling est un moteur à piston libre de type dynamique. En plus du moteur Stirling, l'unité comprend une chambre combustion et des échangeurs de chaleur pour récupérer la chaleur des fumées. Le système utilise la technologie de condensation (changement d'état des vapeurs d'eau des fumées) pour augmenter son efficacité.

La puissance électrique nominale de l'installation de micro-cogénération biomasse est de 1 kWe. La puissance thermique du système de micro-cogénération varie entre 10 et 14 kWth.

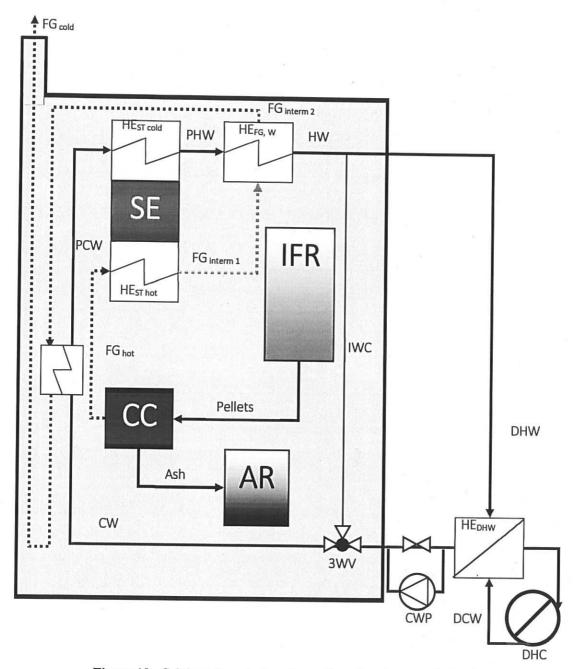


Figure 10 - Schéma de principe du système de micro-cogénération

Les essais ont été effectués pour neuf configurations différentes correspondant à trois débits de l'agent thermique différents et à trois puissances de sortie thermique différentes : $10 \, kW_{th}$, $12 \, kW_{th}$ et $14 \, kW_{th}$.

L'objectif de l'étude expérimentale a été d'observer l'influence du débit de l'agent thermique et de la puissance de sortie thermique sur le comportement de l'installation de micro-cogénération. Dans la deuxième partie de ce chapitre les résultats expérimentaux sont présentés.

Tableau 2 : Les configurations testées

	- Sommigarat	os comigurations testees		
Configurations	10kW _{th}	12kW _{th}	14kW _{th}	
Debit F1	10F1	12F1	14F1	
Debit F2	10F2	12F2	14F2	
Debit F3	10F3	12F3	14F3	

Les températures et les débits ont été mesurés à l'aide des capteurs de température et de débitmètres. Le rendement global et les rendements thermique et électrique ont été déterminés pour chaque configuration.

Les résultats obtenus ont montré que, si le débit n'est pas suffisant pour évacuer la puissance thermique produite par l'unité de micro-cogénération, la température de l'agent thermique va augmenter, réduisant ainsi les performances thermiques du système.

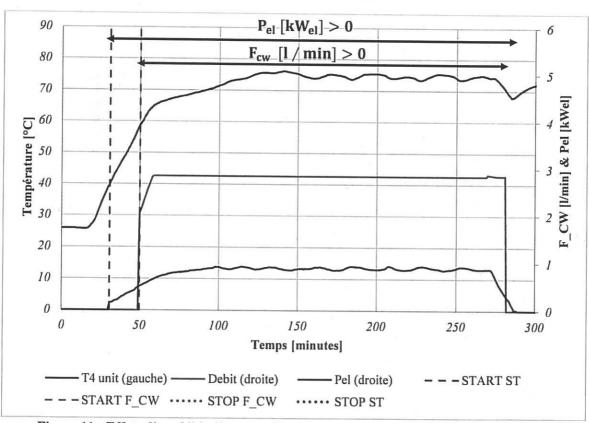


Figure 11 - Effets d'un débit d'agent caloporteur faible sur les performances du système

Dans le chapitre quatre un modèle mathématique décrivant le système de micro-cogénération biomasse a été développé (Figure 13). Le modèle mathématique est basé sur le processus de combustion de 4 différentes combustibles. Les 3 premières sont le chêne, le hêtre et le sapin de Douglas. Les teneurs en carbone, hydrogène, azote, soufre et oxygène présentes dans les sources

de combustible ainsi que le pouvoir calorifique inférieur sont tirés de la base de données Phyllis (base de données TNO).

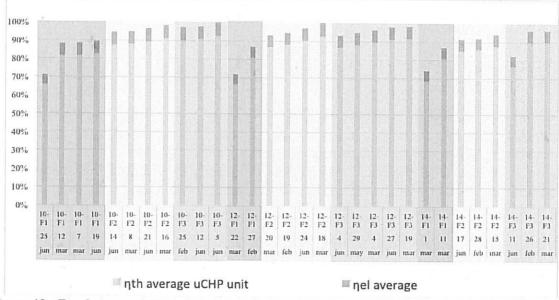


Figure 12 - Rendements thermiques et électriques obtenus pour les différentes configurations testées

Les combustibles sont secs et la teneur en humidité est donc nulle. La base de données Phyllis ne contient pas la densité de masse du combustible ; ce paramètre est donc tiré d'une autre base de données (Köppen). Comme la densité massique est donnée sous forme de fourchette, elle a été considérée comme la moyenne des deux intervalles donnés. La 4ème espèce de combustible est celle utilisée pour les expériences à l'INSA Strasbourg, France.

Le volume de la chambre de combustion est imposé, dans un ordre de grandeur comparable à celui du modèle d'unité de cogénération ÖkoFEN Pellematic Condens_e, présent à l'INSA Strasbourg.

Le modèle permet d'obtenir la température adiabatique de combustion, les puissances thermique et électrique, le rendement thermique de l'installation et le rendement électrique de l'installation.

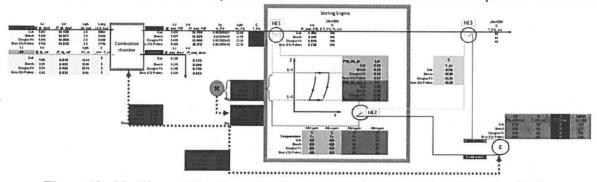


Figure 13 - Modèle mathématique décrivant le système de micro-cogénération biomasse

L'impact des différents combustibles a différentes humidités et des différents excès d'air sur la production de puissance thermique et de puissance électrique a été ainsi mis en évidence (Figure 14 et Figure 15).

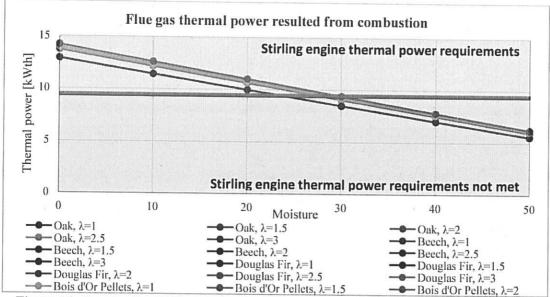


Figure 14 - Impact des différents combustibles a différentes humidités et des différents excès d'air sur la production de puissance thermique du moteur Stirling

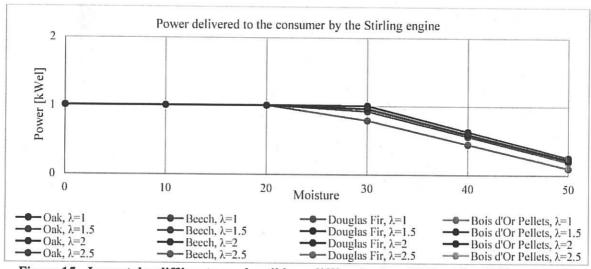


Figure 15 - Impact des différents combustibles a différentes humidités et des différents excès d'air sur la production de puissance électrique du moteur Stirling

Les rendements décrivant les performances globales de l'unité de micro-cogénération à biomasse solide avec moteur Stirling visent à montrer que l'utilisation d'un combustible sec est recommandée pour obtenir les meilleures puissances utiles. Si la puissance thermique n'est pas entièrement nécessaire, le combustible peut avoir une humidité allant jusqu'à 20% pour que le moteur Stirling fonctionne à la charge nominale.

Le cas mentionné ci-dessus est intuitivement celui de la saison d'été, où le besoin en énergie thermique est plus faible que celui de la saison d'hiver. Il est donc crucial d'utiliser du combustible sec pendant les saisons froides, pour obtenir la puissance thermique maximale disponible, à condition que le système n'ait pas été surdimensionné pour la maison du consommateur. Si c'est le cas, des combustibles de moindre qualité en termes d'humidité peuvent être utilisés, car leur rendement thermique ne créera pas de surplus de puissance thermique.

Le présent chapitre conclut qu'une étude des besoins du consommateur est nécessaire, afin de mieux déterminer l'adéquation de la qualité du combustible au système de cogénération en fonction des besoins du consommateur, travail qui sera effectué dans le chapitre suivant.

Et sur un marché avec une taille assez significante, une optimisation du type logiciel du fonctionnement des systèmes autonomes à micro-cogénération, à partir de la décomposition de la consommation de combustible proposée dans cette thèse, puisse aider à obtenir une meilleure corrélation entre les coûts de la production séparée ou simultanée avec le prix de combustibles et le prix de l'énergie électrique dans le réseau local de la distribution d'électricité.

Conclusions

Le travail de cette thèse a permis de réaliser une analyse théorique et expérimentale d'un système de micro-cogénération biomasse à moteur Stirling.

Le premier chapitre a présenté le contexte énergétique et une étude bibliographique sur la biomasse, les systèmes de micro cogénération biomasse et les moteurs thermiques. La dernière partie de ce chapitre a présenté une synthèse sur le moteur Stirling.

Le deuxième chapitre a présenté une analyse sur plusieurs types de biomasse : déchets forestiers, granulés de sapin, briquettes de chêne, sciure de hêtre, granulés de hêtre, briquettes de hêtre. Ces combustibles ont été d'abord analysés en termes de pouvoir calorifique supérieur. Plusieurs caractéristiques ont étudiés ensuite : l'influence de l'humidité, le coût, la complexité de l'équipement nécessaire pour transporter et brûler le combustible, la disponibilité du combustible, le stockage du combustible, les émissions causées par la combustion, les technologie des chaudières utilisant la biomasse. Une analyse économique d'une chaudière à condensation biomasse d'une centrale thermique de chauffage urbain a été également menée. Les résultats obtenus ont montré une profitabilité modérée pour l'ensemble des combustibles analysés. L'intérêt de la micro cogénération biomasse (production d'énergie renouvelable décentralisée) a été finalement mis en évidence dans le contexte énergétique et environnemental actuel.

Le troisième chapitre a porté sur la présentation du banc d'essai de l'unité de micro-cogénération biomasse à moteur Stirling mis en place au cours de la thèse et la présentation des résultats expérimentaux. L'objectif de cette étude expérimentale a été d'observer l'influence du débit de l'agent thermique et de la puissance de sortie thermique sur le comportement de l'installation de micro-cogénération. Les essais ont été effectués pour neuf configurations différentes (correspondant à trois débits de l'agent thermique différents et à trois puissances de sortie thermique différentes : 10 kW, 12 kW et 14 kW). Les températures et les débits ont été obtenus à l'aide des capteurs de température et de débitmètres. Les rendements thermique et électrique et le rendement global ont été déterminés pour chaque configuration. Les résultats expérimentaux ont

montré que, si le débit n'est pas suffisant pour évacuer la puissance thermique produite par l'unité de micro-cogénération, la température de l'agent thermique va augmenter, réduisant ainsi les performances thermiques du système.

Le quatrième chapitre a porté sur le développement d'un modèle mathématique décrivant le système de micro-cogénération biomasse. La température adiabatique de combustion, les puissances thermique et électrique, le rendement thermique de l'installation et le rendement électrique de l'installation ont été obtenues. Une analyse paramétrique a permis de mettre en évidence l'impact des différents combustibles à différentes humidités et différents excès d'air sur la puissance thermique et de puissance électrique du système de micro-cogénération biomasse.

Le cinquième chapitre porte sur la simulation en regime trainsitoire des debits de combustible utilisees pour obtenir les puissances de nature thermique et electrique. La besoin de cette simulation a la base une incertitude importante dans la mesure du debit combustible. En utilisant un algorithme de probleme inverse, on part des puissances utiles obtenues et on calcule le debit massique du combustible utilisee

Les rendements décrivant les performances globales de l'unité de micro-cogénération à biomasse solide avec moteur Stirling visent à montrer que l'utilisation d'un combustible sec est recommandée pour obtenir les meilleures puissances utiles. Si la puissance thermique n'est pas entièrement nécessaire, le combustible peut avoir une humidité allant jusqu'à 20% pour que le moteur Stirling fonctionne à la charge nominale.

Le cas mentionné ci-dessus est intuitivement celui de la saison d'été, où le besoin en énergie thermique est plus faible que celui de la saison d'hiver. Il est donc crucial d'utiliser du combustible sec pendant les saisons froides, pour obtenir la puissance thermique maximale disponible, à condition que le système n'ait pas été surdimensionné pour la maison du consommateur. Si c'est le cas, des combustibles de moindre qualité en termes d'humidité peuvent être utilisés, car leur rendement thermique ne créera pas de surplus de puissance thermique.

Le cinquième chapitre porte sur la simulation en régime transitoire des débits de combustible utilisés pour obtenir les puissances de nature thermique et électrique. Le besoin de cette simulation a la base une incertitude importante dans la mesure du débit combustible. En utilisant un algorithme de problème inverse, on part des puissances utiles obtenues et on calcule le débit massique du combustible utilisé, pour chaque des 32 expériences effectuées au sein du laboratoire iCube.

Les perspectives du cet étude comprennent plusieurs directions de recherche, parmi lesquelles se trouvent :

- le couplage de l'unité de micro-cogénération avec des technologies du stockage thermique et électrique;
- la réalisation d'un système hybride composé 100% des technologies renouvelables : microcogénération biomasse et panneaux photovoltaïques
- une analyse exégétique du système.

Mots-clés: micro-cogénération, biomasse, moteur Stirling, bâtiment, production d'énergie