

## « Récupération d'énergie sur les fumées d'échappement – Etude expérimentale paramétrique et modélisation thermique »

### 1- Encadrement de la thèse

#### *Encadrants :*

Thierry Lemenand, Maitre de Conférences HDR (Assistant Professor), LARIS EA 7315, Université d'Angers.

Mohamad Ramadan, Maitre de Conférences (Assistant Professor), Groupe « Energie et Thermofluide », Département de mécanique, Université Libanaise Internationale (Liban) ;

Mahmoud Khaled, Maitre de Conférences (Assistant Professor), Groupe « Energie et Thermofluide », Département de mécanique, Université Libanaise Internationale (Liban) ;

### 2- Contexte scientifique du projet de recherche

Ce projet est essentiellement dédié à l'étude et la compréhension de la relation existante entre les performances thermiques d'un nouveau concept de récupération d'énergie sur les fumées d'échappement de cheminées/chaudières et différents paramètres géométriques et opérationnels. Un code de calcul de récupération de chaleur ainsi que des recommandations sur l'implémentation d'un tel système produisant une grande amélioration de l'efficacité énergétique seront produits et distribués à la large communauté scientifique travaillant sur les échangeurs de chaleur et la récupération d'énergie.

Ce projet fait partie d'un projet à long terme sur lequel travaillent les chercheurs impliqués dans l'encadrement proposé, M. Mahmoud Khaled, M. Mohamad Ramadan et M. Thierry Lemenand, depuis 2013. Ces chercheurs ont publié récemment plus de 15 articles dans des journaux classés et 25 communications dans des conférences internationales, en lien avec le sujet de recherche, ces références sont détaillées à la fin du document.

### 3- Objectifs scientifiques du projet de recherche

Les objectifs scientifiques de ce projet de recherche sont :

- 1- Conception et implémentation d'un dispositif expérimental qui permet de conduire une analyse paramétrique sur les performances thermiques d'un nouveau concept de récupération d'énergie par chauffage d'eau à partir de fumées d'échappement des cheminées ;

- 2- Analyse expérimentale paramétrique de la performance du système en utilisant le dispositif expérimental développé ;
- 3- Investigations sur les équations gouvernant la performance thermique du système en relation avec les différents paramètres géométriques et opérationnels ;
- 4- Développement d'un code de calcul permettant de réaliser des calculs de performance thermique pour différentes conditions opératoires du système et tenant compte des transferts thermique transitoires ;
- 5- Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux et étude paramétrique complète du système en utilisant le code développé et validé.

#### **4- Résumé et mots-clés**

Ce travail concerne une analyse paramétrique, expérimentale et numérique, d'un nouveau concept permettant de chauffer/préchauffer l'ECS (Eau Chaude Sanitaire) en utilisant la chaleur perdue des fumées d'échappement des cheminées. Le principe de récupération d'énergie consiste essentiellement à faire circuler les fumées d'échappement dans les tubes échangeurs de chaleur insérés dans un ballon d'eau chaude, positionné sur le conduit de cheminée. L'étude paramétrique comprend les effets du nombre de tuyaux insérés dans le ballon d'eau chaude, de la distance entre le ballon et la base de la cheminée, le nombre de ballons d'eau chaude pour un volume d'eau constant, le débit massique des fumées d'échappement, la forme du ballon. Pour procéder, un dispositif expérimental ainsi qu'un code de calcul thermique transitoire seront développés. Des comparaisons entre les résultats numériques et expérimentales ainsi que des recommandations sur l'installation du système seront réalisées.

**Mots-Clés :** Chaleur évacuée, Cheminée, Convection, Rayonnement, Récupération de chaleur, Transfert thermique transitoire, Code de calcul, Dispositif expérimental, Ballon d'eau chaude, Tubes échangeurs de chaleur.

#### **5- Activités et Productions**

Les productions attendues sont :

- 1- Un code de calcul de récupération d'énergie en fonction des différents paramètres géométriques et opérationnels ;
- 2- Des configurations optimisées de l'implémentation du système de récupération d'énergie des fumées d'échappement des cheminées et son utilisation pour chauffer/préchauffer l'ECS ;
- 3- Des publications scientifiques dans des revues classées et conférences internationales sur l'analyse expérimentale paramétrique de la performance du système ;
- 4- Des publications scientifiques dans des revues classées et conférences internationales sur le modèle thermique et son code de calcul associé.

Les activités nécessaires pour atteindre les productions mentionnées ci-dessus sont :

- 1- Investigations sur les équations gouvernant la performance thermique du système en relation avec différents paramètres géométriques et opérationnels ;
- 2- Développement d'un code de calcul permettant de réaliser des calculs de performance thermique pour différentes conditions opératoires du système et tenant compte des transferts thermique transitoires ;
- 3- Conception et implémentation d'un dispositif expérimental permettant de conduire une analyse paramétrique sur les performances thermiques d'un nouveau concept de chauffage d'eau par les fumées d'échappement des cheminées ;
- 4- Analyse expérimentale paramétrique de la performance du système en utilisant le dispositif expérimental développé ;
- 5- Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux et étude paramétrique complète du système en utilisant le code développé et validé ;
- 6- Rédaction de manuscrits (à publier dans ACL, ACTI, ...) sur l'analyse expérimentale paramétrique de la performance du système ;
- 7- Rédaction de manuscrits (à publier dans ACL, ACTI, ...) sur le modèle thermique et son code associé.

## 6- Détails scientifiques

La tendance actuelle dans le secteur de l'énergie est fortement orientée vers la réduction de la consommation des énergies fossiles et des émissions de dioxyde de carbone. Cet objectif peut être réalisé grâce d'une part à l'utilisation d'énergies renouvelables et d'autre part une meilleure gestion de la consommation d'énergie. La récupération d'énergie est un axe singulier de la gestion d'énergie pour lequel les scientifiques vont mettre en œuvre des techniques pour utiliser et/ou récupérer les énergies perdues dans les systèmes mécaniques. La majorité (voire la totalité) des applications d'ingénierie dans le domaine de l'énergie nécessitent des systèmes de génération de puissance mécanique à partir d'une énergie primaire. Ces systèmes produisent des quantités considérables d'énergie perdue, contraints par la deuxième loi de Thermodynamique.

Le Liban, ainsi que plusieurs autres pays comparables, constituent d'excellents exemples pour les applications des concepts d'énergie renouvelable et de la gestion d'énergie à cause de leur dépendance en fioul importé, d'une production insuffisante d'électricité, et d'une faiblesse dans la gestion d'énergie dans plusieurs de leurs domaines de production de puissance. Dans ce contexte, les auteurs de cette proposition ont développé et présenté un nouveau concept de récupération de la chaleur des fumées d'échappement des cheminées, dans lequel un prototype a été implémenté et testé et des mesures expérimentales réalisées [1-2]. En effet, les cheminées sont largement utilisées au Liban (mais ce n'est pas une particularité locale car ce système existe dans tous les pays du monde), pour procurer la puissance nécessaire pour chauffer les habitations en hiver. Les cheminées sont des systèmes thermiques qui brûlent du fioul ou du bois pour produire de la chaleur qui se transfère en grande partie vers l'espace à conditionner. Pendant ce cycle, des ordres de grandeur considérables d'énergie sont perdues par les fumées

d'échappement qui s'échauffent jusqu'à des températures dépassant les 300°C suivant l'application. L'idée principale du travail consiste à utiliser/récupérer l'énergie des fumées d'échappement pour chauffer de l'eau en faisant circuler les fumées d'échappement dans des tuyaux insérés dans un ballon d'eau chaude placé au-dessus de la cheminée (Figure 1).

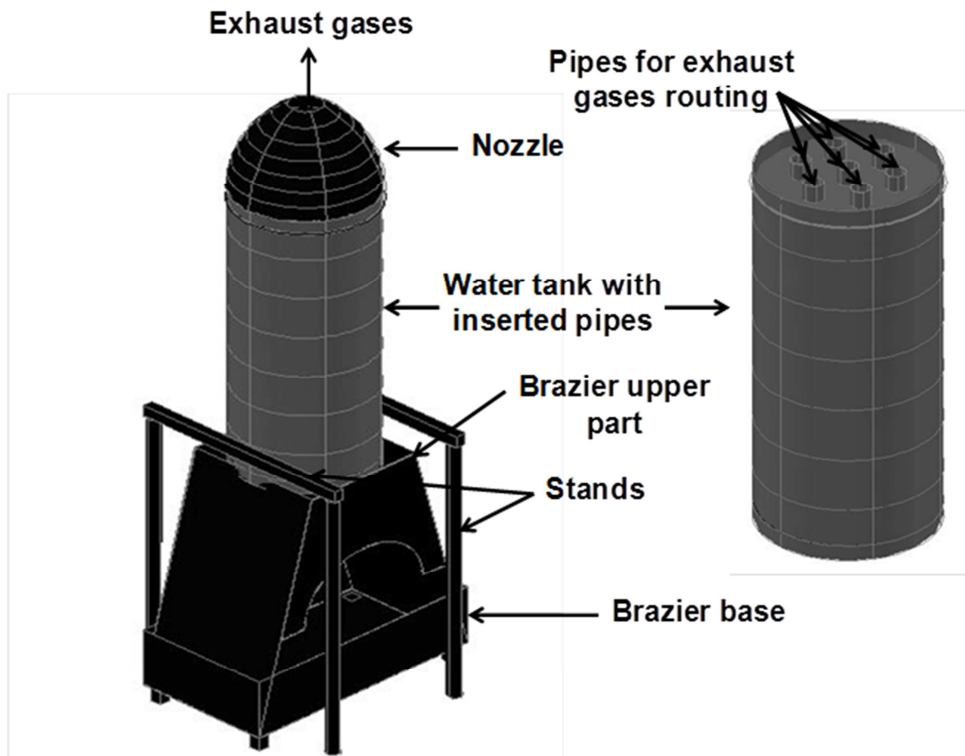


Figure 1 : Schéma du mode opérationnel du nouveau concept de chauffage d'eau.

Dans ce travail, différents scénarii de récupération de la chaleur ont été testés en faisant varier la quantité de bois brûlé (apport de chaleur). Les mesures de température ont été effectuées dans différents endroits du système. Le débit des fumées d'échappement a également été mesuré. Les expériences ont montré qu'un réservoir de 95 L d'eau peut être chauffé jusqu'à 78°C en une heure. D'autre part, les résultats obtenus ont montré que les échanges thermiques par convection et rayonnement à la surface inférieure du réservoir ont un impact considérable sur le taux global de transfert de chaleur (jusqu'à 70%).

L'analyse des résultats expérimentaux obtenus révèle que le système est fortement dépendant de certains paramètres tels que le nombre de tubes insérés dans le réservoir, la distance entre le réservoir et la cheminée, le débit des fumées d'échappement, la forme du réservoir. Dans ce contexte, le projet de recherche proposé consiste à :

- 1- Concevoir et mettre en œuvre un dispositif expérimental qui permet d'effectuer une analyse paramétrique de la performance du système ;
- 2- Développer une modélisation thermique du système en tenant compte du transfert de chaleur transitoire ;

- 3- Comparer les résultats numériques et expérimentaux et proposer des recommandations sur la mise en œuvre du système ;
- 4- Effectuer une analyse paramétrique sur le fonctionnement du système afin d'établir une relation explicite entre la performance du système et les paramètres détaillés ci-dessus.

## 7- Références bibliographiques

[1] M. Khaled, M. Ramadan, M. Gad El Rab, K. Chahine, and A. Assi, Heating water using the recovered chimney waste heat – Prototype and experimental analysis, International Conference on Microelectronics ICM 2013, Special Session on Renewable Energy, Beirut, Lebanon, 2013.

[2] M. Khaled, M. Ramadan, K. Chahine, and A. Assi, Prototype implementation and experimental analysis of water heating using recovered waste heat of chimneys, Case Studies in Thermal Engineering, In press.

## 8- Publications des encadrants du projet de recherche en énergie renouvelable et gestion d'énergie (au cours des 4 dernières années)

1. **M. Khaled, M. Ramadan, K. Chahine, and A. Assi**  
Prototype implementation and experimental analysis of water heating using recovered waste heat of chimneys  
*Case Studies in Thermal Engineering, In press.*
2. Habchi C., **Lemenand T.**, Della Valle D., Al Shaer A., Peerhossaini H.  
Experimental study of the turbulent field behind a perforated vortex generator.  
*Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. In press.*
3. **M. Ramadan, M. Khaled,** and H. El Hage  
Parametric analysis of concentric tube heat exchanger thermal performance using iterative code - Effect of mass flow rates  
*Revised Version Submitted to Journal of Heat and Mass Transfer.*
4. Ali S., Habchi C., Menanteau S., **Lemenand T.**, Harion J.L.  
Heat transfer and mixing enhancement by free elastic flaps oscillation.  
*International Journal of Heat and Mass Transfer.* 85, 250-264, 2015.
5. Habchi C., **Khaled M., Lemenand T.**, Della Valle D., El Marakbi A., Peerhossaini H.  
A semi-analytical approach for temperature distribution in dean flow.  
*Heat and Mass Transfer. doi.org/10.1007/s00231-013-1222-z, 50, 23-30, 2014.*
6. **M. Ramadan, M. Khaled,** M. El Kady, and H. El Hage  
Generating power from Speed-Bump - Prototype development and experimental study  
*17th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Beirut, Lebanon, 2014.*

- 7. Lemenand T.,** Habchi C., Della Valle D., Bellettre J., Peerhossaini H.  
Mass transfer and emulsification by chaotic advection.  
*International Journal of Heat and Mass Transfer.* 71, 228-235, 2014.
- 8. M. Ramadan, M. Khaled,** B. Abdulhay, M. Hammoud, and A. Shaito  
Using parabolic trough concentrators with tracking system for heating residential water  
*ASME 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis ESDA 2014, Copenhagen, Denmark, 2014.*
- 9. M. Ramadan, M. Khaled,** A. Al Shaer, M. Hammoud, and H. El Hage  
Using iterative code for thermal performance prediction of concentric tube heat exchanger – Parametric analysis  
*ASME 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis ESDA 2014, Copenhagen, Denmark, 2014.*
- 10.** Ghanem A., Charbel Habchi, **Lemenand T.,** Della Valle D., Peerhossaini H.  
Mixing performances in swirl flow and corrugated channel reactors.  
*Chemical Engineering Research and Design.* doi.org/10.1016/j.cherd.2014.01.014, 92 (11), 2213-2222, 2014.
- 11. M. Khaled, M. Ramadan,** A. Al Shaer, F. Hajj, F. Harambat  
Etude de l'effet de la distribution de température d'air en amont d'un échangeur de chaleur sur sa performance thermique  
*Congrès Français de Thermique 2014, Approche multi-échelles pour la thermique, l'énergétique et le génie des procédés, Lyon, France, Poster presentation.*
- 12.** Ghanem A., **Lemenand T.,** Della Valle D., Peerhossaini H.  
Static mixers: mechanisms, applications, and characterization methods - a review.  
*Chemical Engineering Research and Design.* doi.org/10.1016/j.cherd.2013.07.013, 92, 205-228, 2014.
- 13. M. Ramadan, M. Khaled,** M. Gad El Rab, M. Hammoud, F. Hajj and A. Shaito  
Réduction de la consommation d'énergie par un système efficace de récupération de la chaleur de l'eau de douche – Analyse expérimentale  
*Congrès Français de Thermique 2014, Approche multi-échelles pour la thermique, l'énergétique et le génie des procédés, Lyon, France, Poster presentation.*
- 14. M. Ramadan, M. Khaled,** A. Al Shaer, H. El Hage, and F. Hachem  
Etude d'une nouvelle conception permettant de chauffer l'eau domestique par la chaleur libérée par les systèmes CVC  
*Congrès Français de Thermique 2014, Approche multi-échelles pour la thermique, l'énergétique et le génie des procédés, Lyon, France, Poster presentation.*

- 15. M. Khaled, M. Ramadan, B. Abdulhay, F. Hajj, F. Harambat**  
Formulation empirique des performances thermiques d'échangeurs de chaleur – Effet de l'hétérogénéité de distribution de vitesse  
*Congrès Français de Thermique 2014, Approche multi-échelles pour la thermique, l'énergétique et le génie des procédés, Lyon, France, Poster presentation.*
- 16. M. Khaled, M. Ramadan, and M. Gad El Rab**  
Application of waste heat recovery concepts to generators – Thermal modeling and parametric analysis  
*The Second International Conference on Renewable Energy for Developing Countries REDEC 2014, Beirut, Lebanon, 2014*
- 17. Ghanem A., Lemennand T., Della Valle D., Peerhossaini H.**  
Kinematic mixing and heat transfer enhancement in chaotic split-and-recombine heat exchangers/reactors.  
*5<sup>th</sup> Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale HTFFM-V. Marseille, France, April 22-26, 2014.*
- 18. M. Gad El Rab, M. Ramadan, and M. Khaled**  
Power Generation from Solar Chimney in Lebanon - Thermodynamic Analysis  
*The Second International Conference on Renewable Energy for Developing Countries REDEC 2014, Beirut, Lebanon, 2014.*
- 19. M. Ramadan and M. Khaled**  
Recovering Heat from Shower Water - Design calculation and prototype  
*The Second International Conference on Renewable Energy for Developing Countries REDEC 2014, Beirut, Lebanon, 2014.*
- 20. Ghanem A., Lemennand T., Della Valle D., Peerhossaini H.**  
Performances thermiques d'un échangeur « High-Efficiency Vortex » (HEV) : mesures, corrélations et comparaisons.  
*Congrès français de Thermique, SFT, Lyon, June 3-6, 2014.*
- 21. M. Khaled, M. Ramadan, C. Habchi, Mehdi Chouman, and F. Hachem**  
Heating water using the recovered waste heat from boilers in HVAC applications – Thermal modeling and parametric analysis  
*International Conference on Efficient Building Design: Materials and HVAC Equipment Technologies, Beirut, Lebanon, 2014.*
- 22. M. Ramadan, M. Khaled, M. Gad El Rab, and F. Hachem**  
A review on HVAC Heat Recovery Systems  
*International Conference on Efficient Building Design: Materials and HVAC Equipment Technologies, Beirut, Lebanon, 2014.*

- 23.** Habchi C., Russeil S., Bougeard D., Harion J.-L., **Lemenand T.**, Ghanem A., Della Valle D., Peerhossaini H.  
Partitioned solver for strongly coupled fluid-structure interaction.  
*Computers & Fluids*, 71, 306-319, 2013.
- 24.** Ghanem A., Habchi C., **Lemenand T.**, Della Valle D., Peerhossaini H.  
Energy efficiency in process industry – High-Efficiency Vortex (HEV) multifunctional heat exchanger.  
*Renewable Energy*, 56, 96-104, 2013.
- 25.** **M. Khaled, M. Ramadan**, M. Gad El Rab, K. Chahine, and A. Assi  
Heating water using the recovered chimney waste heat – Prototype and experimental analysis  
*International Conference on Microelectronics ICM 2013 Special Session on Renewable Energy, Beirut, Lebanon, 2013.*
- 26.** **M. Ramadan, M. Khaled**, F. Hachem, A. Al Shaer, K. Chahine, and A. Assi,  
Design and analysis of an HVAC-Based heat recovery system  
*International Conference on Microelectronics ICM 2013 Special Session on Renewable Energy, Beirut, Lebanon, 2013.*
- 27.** **M. Ramadan, M. Khaled**, M. Gad El Rab, F. Hachem, and H. Harambat  
Development of two-dimensional code for heat exchanger thermal performance prediction – Effects of airflow velocity distribution  
*International Conference on Microelectronics ICM 2013, Beirut, Lebanon, 2013.*
- 28.** Ghanem A., **Lemenand T.**, Della Valle D., Peerhossaini H.  
Optimised chaotic mixer configurations for process industries: a numerical study.  
*ASME- FEDSM 2013. Nevada USA, July 07-11, 2013.*
- 29.** Ghanem A., **Lemenand T.**, Della Valle D., Peerhossaini H.  
Transport phenomena in passively manipulated chaotic flows: split-and-recombine reactors.  
*ASME- FEDSM 2013: 6th Symposium on Transport Phenomena in Mixing. Nevada USA, July 07-11, 2013.*
- 30.** Habchi C., Khalil F., **Lemenand T.**, Della Valle D., Peerhossaini H.  
Flow past a row of trapezoidal tabs: experimental and numerical study.  
*11<sup>th</sup> International Conference of Fluid Dynamics, ICFD 11. Alexandria, Egypt, December 19-21, 2013.*
- 31.** Ghanem A., **Lemenand T.**, Della Valle D., Peerhossaini H.  
Thermal performance of High-Efficiency Vortex (HEV) variants: reversed arrays configuration.  
*11<sup>th</sup> ISHMT-ASME 2013. Kharagpur, India, December 28-31, 2013.*
- 32.** Ghanem A., Habchi C., **Lemenand T.**, Della Valle D., Peerhossaini H.  
Heat-transfer enhancement by artificially generated streamwise vorticity.  
*Journal of Physics: Conf. Ser.*, 395, 012051, 2012.



- 33.** Habchi C., Russeil S., Bougeard D., Harion J.-L., **Lemenand T.**, Della Valle D., Peerhossaini H.  
Enhancing heat transfer in vortex generator-type multifunctional heat exchangers.  
*Applied Thermal Engineering*, 38, 12-25, 2012.
- 34.** Ghanem A., Habchi C., **Lemenand T.**, Della Valle D., Peerhossaini H.  
Energy efficiency in process industry - high efficiency vortex (HEV) multifunctional heat exchanger.  
*ICREGA 2012, International Conference on Renewable Energy: Generation and Applications, Al-Ain, UAE, March 4-7, 2012.*
- 35.** Ghanem A., **Lemenand T.**, Della Valle D., Habchi C., Peerhossaini H.  
Vortically enhanced heat transfer and mixing: state-of-the-art and recent results.  
*ASME-HT 2012: Summer Heat Transfer Conference, Symposium on Heat Transfer Enhancement for Practical Applications, Puerto Rico, USA, July 8-12, 2012.*
- 36.** Ghanem A., Habchi C., **Lemenand T.**, Della Valle D., Peerhossaini H.  
Heat transfer enhancement by artificially generated streamwise vorticity.  
*Eurotherm 2012, 6<sup>th</sup> European Thermal Sciences Conference, Poitiers, France, September 4-7, 2012.*
- 37.** Habchi C., Russeil S., Bougeard D., Harion J.-L., **Lemenand T.**, Della Valle D., Peerhossaini H.  
Heat and mass transfer enhancement by two elastic flaps oscillating in a laminar flow.  
*ASME-HT 2012: Application of Computational Heat Transfer, Puerto Rico, USA, July 8-12, 2012.*
- 38. M. Khaled**, F. Mangi, H. El Hage, F. Harambat, and H. Peerhossaini  
Fan air flow analysis and Heat Transfer Enhancement of Vehicle Underhood Cooling System – Towards a New Control Approach for Fuel Consumption Reduction  
*Journal of Applied Energy*, 91 (2012) 439-450.
- 39.** Habchi C., **Lemenand T.**, Della Valle D., Pacheco L., Le Corre O., Peerhossaini H.  
Entropy production and field synergy principle in turbulent vortical flows.  
*International Journal of Thermal Science*, 50, 2365-2376, 2011.
- 40. M. Khaled**, F. Harambat, and H. Peerhossaini  
Analytical and empirical determination of thermal performance of louvered heat exchanger – effects of air flow statistics  
*International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54 (2011) 356-365.
- 41.** Ghanem A., Habchi C., **Lemenand T.**, Della Valle D., Peerhossaini H.  
Intensification des transferts convectifs par vorticit  longitudinale.  
*Congrès français de Thermique, SFT, Perpignan, 24-27/05, 2011.*

**42. M. Khaled**, F. Harambat, H. El Hage, and H. Peerhossaini  
Spatial optimization of underhood cooling module – towards an innovative control approach  
*Journal of Applied Energy*, 88 (2011) 3841-3849.

**43. Anxionnaz Z.**, Theron F., Tochon P., Couturier R., Bucci P., Gourdon C., Cabassud M., Lomel S., Bergin G., Peerhossaini H., **Lemenand T.**, Habchi C.  
RAPIC project: toward competitive heat-exchanger/reactors.  
*EPIC, 3<sup>rd</sup> European Process Intensification Conference, Manchester, UK, June 20-23, 2011.*