

Analyse des performances de combustion de Gaz de Synthèse non-conventionnels dans le cycle d'une microturbine caractérisée Gaz Naturel

Jeremy BOMPAS, Ward DE PAEPE

Université de Mons (UMONS)

Service de Thermique et Combustion, Département Mécanique, Faculté Polytechnique de Mons
Place du Parc 20, 7000 Mons, Belgium

*(auteur correspondant : jeremy.bompas@umons.ac.be)

Résumé - L'objectif de ce travail est d'identifier le comportement de Gaz de Synthèse dans une chambre de combustion industrielle, spécifiquement conçue pour le Gaz Naturel. Dans ce travail, l'analyse des résultats de simulations numériques d'une chambre de combustion dont l'alimentation au Gaz Naturel est progressivement remplacée par du Gaz de Synthèse, est présentée. Les résultats montrent que l'utilisation de Gaz de Synthèse permet d'abaisser la température moyenne dans la zone de combustion et de significativement diminuer les émissions de NO_x . Il a été constaté qu'une importante fraction de vapeur d'eau dans le combustible de synthèse n'affecte pas la stabilité de la flamme.

Nomenclature

PCI Pouvoir Calorifique Inférieur

\dot{m} Débit massique, g/s

ODE Ordinary Differential Equations

RANS Reynolds Averaged Navier-Stokes

TDAC Tabulation of Dynamic Adaptive Chemistry

1. Introduction

La disponibilité limitée des combustibles fossiles conventionnels tel le Gaz Naturel a renforcé l'intérêt de la diversification des sources d'énergie afin d'assurer des ressources durables suffisantes à la demande combinée en chaleur et en électricité (cogénération). Les ressources renouvelables non-conventionnelles que sont les biogaz, les syngaz et les biocarburants sont de bons postulants à ces objectifs de diversification énergétique. Ces combustibles alternatifs se prêtent particulièrement à un contexte de production décentralisée telle que l'utilisation de micro turbines à gaz dans une application de cogénération de faible puissance. De plus, ils présentent l'avantage majeur de réduire les émissions de CO_2 afin d'atteindre les objectifs climatiques à l'horizon 2050. Cependant, dus à leurs propriétés spécifiques tels leur pouvoir calorifique inférieur, leur composition variable ainsi que leur fraction de vapeur d'eau importante quand ils ne sont pas correctement post-traités [1, 2], une meilleure caractérisation des sources d'énergies renouvelables non-conventionnelles est requise.

L'utilisation de combustibles à bas pouvoir calorifique inférieur (PCI) requiert habituellement une modification de géométrie des injecteurs ainsi que des aménagements d'air [3], afin de compenser les variations importantes de débits et de vitesses de réaction desdits combustibles. De plus, plusieurs études relevées dans la littérature présentent des simplifications de géométrie de la chambre de combustion afin de faciliter la génération du maillage ou diminuer le coût calcul [4]. Malgré la disponibilité de nombreuses recherches [5, 6], plusieurs aspects fondamentaux de la combustion de gaz de synthèse en chambre de microturbines à Gaz, tels la stabilité de la flamme, le contrôle des émissions, l'influence de la distribution de combustible entre flamme pilote et flamme principale, restent indéterminés et requièrent des investigations supplémentaires.

L'objectif de ce travail est donc d'identifier le comportement de plusieurs syngaz dans une chambre de combustion industrielle sans simplifications géométriques, originellement conçue pour le gaz naturel [7]. Dans ce travail, l'analyse des résultats de simulations numériques d'une chambre de combustion alimentée au syngaz est présentée. Les performances de la chambre de combustion est analysée pour différentes compositions de syngaz avec injection progressive de vapeur d'eau dans le but de déterminer la teneur maximale admissible en vapeur et limiter le post-traitement dans la production des gaz synthétiques. L'allumage et la stabilité de flamme ont été particulièrement étudiés avec une variété de gaz entre la flamme pilote et la flamme principale. Les résultats montrent le champ de température, les prédictions précises des espèces chimiques des réactions intermédiaires et des NO_x , CO , CO_2 et H_2O dans les fumées, qui sont de même nature que les précédentes observations. Plus spécifiquement, il a été trouvé que les NO_x sont particulièrement sensibles aux modifications de combustible à la flamme pilote et à la flamme principale. Ces résultats obtenus pourront servir de références pour la caractérisation future de Gaz de Synthèse bruts dans une large gamme de conditions d'utilisation, ce qui permettra d'exploiter entièrement leur potentiel dans des applications de cogénération de faible puissance.

2. Chambre de Combustion Turbec T100

Dans cette section, la géométrie et le cycle de fonctionnement de la chambre de combustion (microturbine Turbec T100) seront présentés. Ensuite, les modèles numériques utilisés (chimiques et thermophysiques) seront décrits. Enfin, la stratégie d'évaluation de l'impact de l'utilisation de Gaz de Synthèse sur la stabilité de flamme et sur les émissions, sera détaillée.

2.1. Géométrie

La Turbec T100 est une unité de micro turbine à gaz classique, utilisée pour des applications de cogénération. La puissance électrique nominale est de 100 kW_e alors que sa puissance thermique nominale est de 165 kW_{th} , respectivement avec un rendement électrique de 30% et une rendement thermique de 50% [8]. La T100 fonctionne selon le cycle de Brayton à récupération et exploite un système de compresseur et turbine centrifuges à vitesse de rotation variable. L'air comprimé est préchauffé par les gaz d'échappement avant son entrée dans la chambre de combustion, ce qui améliore le rendement électrique. Dans cette chambre de combustion, du Gaz Naturel est brûlé afin d'augmenter la température des gaz à la température maximale d'entrée de la turbine de 950°C . Les gaz chauds sont ensuite détendus afin de fournir la puissance mécanique nécessaire à la turbine et produire la puissance électrique au générateur.

A l'intérieur de la chambre de combustion (voir Figure 1), le combustible est injecté par l'intermédiaire de deux circuits différents : La conduite pilote constituée de 6 injecteurs et la conduite principale composée d'une chambre toroïdale aboutissant à 15 injecteurs. L'air préchauffé dans le récupérateur entrant dans la chambre de combustion à contrecourant de la flamme est divisé en différentes sections : Les "swirlers 1" (12 trous d'injection) fournissent l'air à la flamme pilote (approximativement 2.5%) tandis que les "swirlers 2" (15 ailettes radiales) et "swirlers 2'" (30 trous d'injection) fournissent l'air à la flamme principale (respectivement 24.9% et 12.5%). Enfin, la fraction d'air restante (60.1%) pénètre les neuf trous de dilution pour y réduire la température des gaz d'échappement à la température de 950°C .

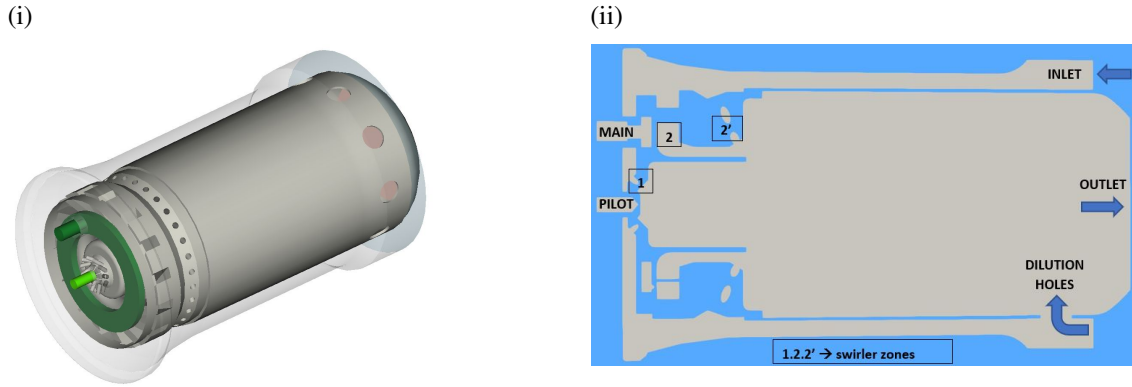


Figure 1 : Vue 3D (i) et coupe schématique de la chambre de combustion T100 (ii), mettant en évidence l'arrivée d'air à contrecourant à l'extérieur de la chambre ainsi que les injecteurs de la flamme pilote (1) et de la flamme principale (2), et les trous de dilution.

Tableau 1 : Dimensions et répartition des débits d'air dans la chambre de combustion Turbec T100.

	#	Dimension	Distribution
Trous de dilution	9	$D = 20(mm)$	60.1%
Swirler 1	12	$D = 3.5(mm)$	2.5%
Swirler 2	1	$D_e = 34(mm)$ $D_i = 28(mm)$	24.9%
Swirler 2'	30	$D = 5(mm)$	12.5%

2.2. Maillage

Le maillage est généré sur l'entiereté du domaine fluide de la chambre de combustion, sans simplifications géométriques et en intégrant le conduit d'air à contrecourant. Dû à la géométrie complexe du T100, un maillage 3D complet à mailles hexaédriques a été adopté. Un raffinement spécifique a été réalisé sur les formes complexes des "swirlers" et la zone de combustion pilote. Une discrétisation plus fine a également été effectuée sur les petits éléments des injecteurs pilotes et principaux. Une étude de sensibilité de maillage préliminaire a été conduite afin de déterminer la taille de maillage optimum. L'étude indique qu'un maillage constitué de 4.3 millions de cellules est suffisamment raffiné pour donner des résultats précis [9]. De plus, des maillages de taille similaire ont été utilisés par d'autres chercheurs, dans le cadre de simulations de type RANS sur cette même chambre de combustion.

2.3. Configuration des modèles numériques

Dans ce travail, une simulation tridimensionnelle instationnaire a été réalisée, combinant une méthode des volumes finis et un algorithme "PIMPLE" (Pressure Implicit Splitting Operators + Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations). Les écoulements fluides avec réactions chimiques ont été simulés sur le solveur reactingFoam de *OpenFOAM*[10].

Le modèle de turbulence est basé sur l'approche de Moyenne de Reynolds des équations de Navier-Stokes (RANS). Un facteur primordial affectant le choix du modèle de turbulence d'écoulements complexes est le coût de calcul. Le modèle doit modéliser le plus fidèlement possible la physique de l'écoulement tout en étant abordable numériquement. Pour cela, l'utili-

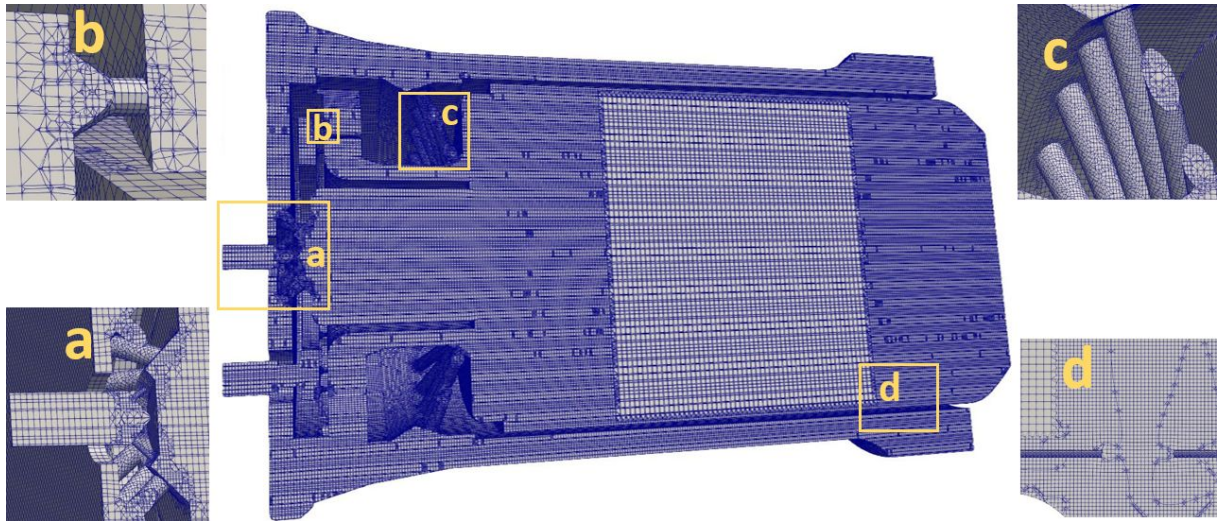


Figure 2 : Coupe de la chambre de combustion T100, présentant le maillage 3D de 4.3 millions de cellules, incluant les raffinements au pilote (a) et dans la première zone de flamme principale, ainsi que les injecteurs principaux (b), les "swirls" d'air (c) et les trous de dilution (d).

sation du modèle $k-\epsilon$ est considérée dans ce papier pour sa robustesse à un coût calcul raisonnable.

Le T100 exploite une technologie à prémélange pauvre pour contrôler la température de flamme et assurer la réduction des émissions de NO_x dans la gamme de 6 à 15 ppmv rapportée par le constructeur [8]. Comme le point de fonctionnement est proche de la limite d'inflammabilité, une flamme de diffusion pilote assure la stabilité de la combustion et prévient du phénomène de soufflage. Le régime de combustion présente à la fois des caractéristiques de flammes de diffusion (pilote) et de prémélange (principale). Par conséquent, le modèle "Eddy Dissipation Concept" (EDC) semble le plus fiable étant donné la présence des 2 régimes de combustion (diffusion et prémélange) dans la chambre de combustion du T100 [11].

La réactivité du CO et de OH a un impact dominant sur la chimie de la combustion au niveau de la génération et de la consommation de radicaux. Un mécanisme chimique détaillé doit être implémenté pour en tenir compte. Dans le présent travail, toutes les simulations ont été effectuées en utilisant le mécanisme chimique GRI3.0 MECH [12] qui modélise la cinétique de combustion d'hydrocarbures en examinant la sensibilité de 325 réactions chimiques afin de mieux prédire l'occurrence de 53 espèces chimiques. Ce mécanisme détaillé est particulièrement intéressant dans la détection des NO_x et des CO, permettant une analyse avancée sur le processus de combustion. Cependant, la résolution de systèmes d'équations différentielles ordinaires (ODE) pour les équations de cinétique chimique dépassent habituellement les ressources informatiques. Des techniques de réduction doivent être employées afin d'éviter ce coût calcul. Le nombre d'espèces chimiques peut être dynamiquement réduit en sélectionnant les espèces actives dominantes. Parallèlement, le résultat de solutions précédentes sont tabulées et interpolées pour les cellules présentant des conditions similaires. L'algorithme de tabulation adaptative de la dynamique chimique (TDAC) utilisé dans notre travail, combine ces deux techniques de réduction [13].

Tableau 2 : Conditions aux limites et conditions initiales des cas simulés — $P_{th} = 330$ (kW)
 Entrée d’Air : $\dot{m} = 690$ (g/s) — $T = 865$ (K)

		Case a	Case b	Case c	Case d
Flamme Pilote	Combustible	CH_4		Syngas	
	\dot{m}	0.8 (g/s)		2.8 (g/s)	
	T	288 (K)			
Flamme Principale	Combustible	CH_4	Syngas	Syngas	Syngas +20% H_2O
	\dot{m}	5.7 (g/s)	28 (g/s)	28 (g/s)	31 (g/s)
	T	288 (K)			

2.4. Configuration des simulations

Afin de caractériser l’écoulement dans la chambre de combustion, une première simulation numérique a été réalisée sur la géométrie du T100 (voir Table 2, Cas a), en injectant le méthane pur pour une puissance thermique totale de 330 kW. La distribution d’air assure un excès d’air suffisant à la combustion complète. Le débit d’air total entrant dans la chambre de combustion a été déterminé sur la base de l’analyse de cycles thermodynamiques précédemment validés, tandis que l’injection de combustible pilote et principal a été fixé similaire à la configuration utilisée par De Santis et al. [14] Ce cas correspond aux conditions réelles nominales d’utilisation de la microturbine à gaz Turbec T100 et est donc considéré comme le cas de référence utilisé pour valider les hypothèses et les modèles numériques, en considérant les nombreuses données numériques et expérimentales disponibles sur ce brûleur.

Pour le second cas (voir Table 2, Cas b), la flamme principale est alimentée par un combustible issu d’un procédé de gazéification synthétique (Syngas), sans apporter de modification à la géométrie des injecteurs ni à la chambre de combustion, conçue originellement pour le Gaz Naturel. La composition spécifique du Syngas est présentée en Table 3. Afin d’initier la combustion et assurer la stabilité de la flamme de diffusion dans la chambre pilote, du méthane pur est utilisé dans les mêmes conditions que pour le cas de référence. De plus, les mêmes conditions aux limites ont été paramétrées, à l’exception du débit massique de combustible principal, qui doit être augmenté (de 5.7 à 28 g/s) afin de garantir un apport thermique constant, en considérant que le Syngas a un Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) de seulement 10.8 MJ/kg comparé aux 50 MJ/kg du méthane pur.

Tableau 3 : Composition des Syngas étudiés. Les fractions Y_i (%) sont exprimées en base massique.

	Y_{CO}	Y_{CO_2}	Y_{H_2O}	Y_{H_2}	Y_{CH_4}
Syngas	55.1	31.8	7.8	3.8	1.4
Syngas +20% H_2O	38	42.9	12.6	3.9	2.5

En complément de ces deux cas utilisant du méthane à la flamme pilote, deux autres cas ont été simulés en n’utilisant que du Syngas. Pour le troisième cas (Figure 4, Cas c), la flamme pilote et la flamme principale sont alimentées en Syngas pur (sans vapeur d’eau). Afin de maintenir la puissance thermique constante (330 kW), la même adaptation de débit massique aux plus faibles PCI des Gaz de Synthèse a été appliquée, toutes les autres conditions restant identiques au cas de référence. Ce cas particulier permet de valider la stabilité et les émissions de combustibles à

faible PCI tel le Gaz de Synthèse considéré dans ce papier. Pour le dernier Cas d) (voir Table 2), la flamme principale est alimentée par un Gaz de Synthèse non-prétraité (avec une fraction massique de vapeur d'eau de 20 %). L'impact de l'introduction de quantités importantes de vapeur d'eau dans le cycle de la microturbine (mHAT), afin d'augmenter l'efficacité thermique du système cogénération, a été étudié en détails dans le passé [15].

3. Résultats

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aux champs de vitesse, champs de températures et compositions des gaz d'échappement, dans le but de valider le cas de référence (Cas a) et d'étudier l'impact d'une altération progressive du combustible injecté. La combustion du méthane (Cas a) dans les conditions de fonctionnement nominales, délivre des champs de vitesse et de température caractéristiques, similaires à ceux trouvés dans la littérature tel que De Santis et al. [14]. Nous pouvons constater dans le champ de vitesse (Figure 3) que les différentes zones de recirculation générées par les "swirlers" sont bien capturées. De plus, la température maximale calculée atteint 2507 K ce qui est comparable à la valeur de température de flamme adiabatique trouvée par De Santis et al. [14], 2501 K.

Passer du méthane au Gaz de Synthèse pour la flamme principale augmente le débit massique de combustible et ainsi la vitesse dans les "swirlers 2" de prémélange (Figure 3(i)). Cependant, malgré l'augmentation de débit de combustible, les zones de recirculation intérieures et extérieures ne sont pas significativement modifiées. A contrario, le champ de température est clairement influencé par la distribution du combustible au niveau du front de flamme. Les températures maximale et moyenne de la chambre de combustion plus basses et la température des gaz d'échappement plus basse (voir Table 4), du cas Syngas (Cas b) par rapport au cas référence (Cas a), sont dues à la dilution du combustible de synthèse pour une puissance thermique équivalente [16].

La composition des gaz d'échappement des Cas a) et b) présenté en Table 3, correspond aux réactions chimiques à l'équilibre des principales espèces réactives telles que O_2 , N_2 , CO_2 and H_2O . Les émissions de CO et de NO_x dépendent fortement de la dilution des gaz d'échappement et des températures de flamme [17], mais restent dans l'intervalle prévu par le constructeur [8] pour le cas de référence (Cas a). L'utilisation du Syngas engendre un niveau de température plus bas en divisant par trois les émissions de NO_x . Le cas c), en alimentant en Syngas la flamme pilote et la flamme principale, permet de valider le remplacement complet du Gaz Naturel par du Gaz de Synthèse dans la chambre de combustion. Le plus grand débit de combustible aux injecteurs pilotes pour contrebalancer le PCI plus faible du Syngas, modifie légèrement la forme de flamme (voir Figure 4(i)), qui s'évase plus en ayant une zone de recirculation réduite. L'utilisation du Gaz de synthèse abaissent massivement les températures dans la chambre primaire (voir Figure 4(ii)), avec un effet dilutif supplémentaire, une température de sortie plus basse et une réduction substantielle des émissions de NO_x .

L'ajout d'une fraction de vapeur d'eau au Gaz de Synthèse alimentant la flamme principale (Cas d) augmente le débit massique de combustible de 11 %, sans modifier profondément la dynamique de la chambre de combustion. La morphologie des zones de recirculation ne subit qu'un léger affaiblissement (voir Figure 4(i)). La distribution de températures n'est pas significativement affectée par la dilution en vapeur d'eau du Syngaz (voir Table 4). La température globale de la chambre de combustion, la température des gaz d'échappement et les émissions de NO_x sont significativement réduites par rapport au cas de référence (Cas a) grâce à la dilution de 500% du débit de combustible pour une puissance thermique équivalente. Les niveaux de

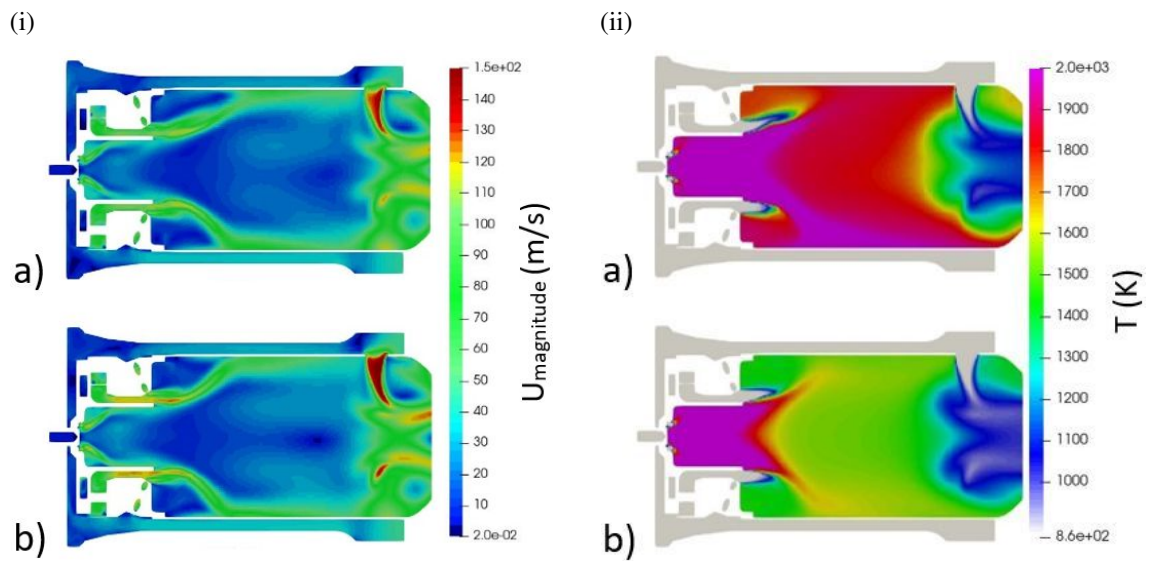


Figure 3 : Les Champs de Vitesse (i) et de Température (ii) des cas utilisant du méthane pur à la flamme pilote et du méthane (Cas a) ou du Syngas (Cas b) montrent des profils d'écoulement similaires à ceux trouvés dans la littérature. Malgré l'augmentation significative du débit de combustible principal, le champ de vitesse des deux cas reste similaire. Cependant, le passage au syngas conduit clairement à une réduction significative de température dans la chambre.

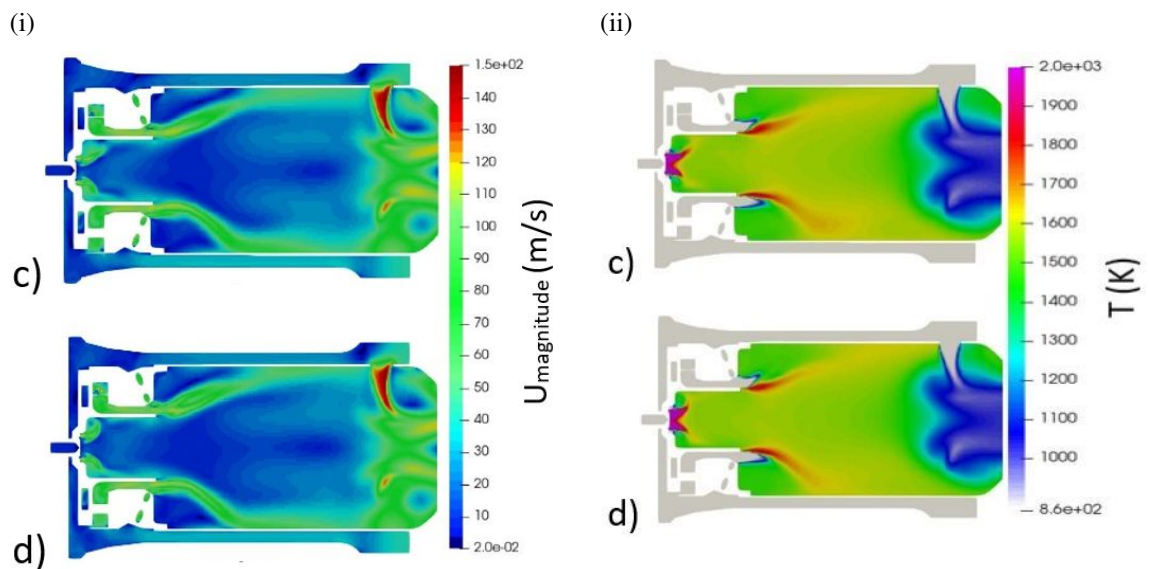


Figure 4 : Les Champs de Vitesse (i) et de Température (ii) des cas utilisant du Syngas à la flamme pilote et du Syngas (Cas c) ou du Syngas partiellement dilué en vapeur d'eau (20 %, Cas d) montrent des profils d'écoulement et de températures similaires, soulignant que l'ajout d'une part significative de vapeur d'eau n'affecte pas la stabilité et l'efficacité de la combustion.

Tableau 4 : *Composition des gaz d'échappement et Températures pour les cas considérés*

Case	a	b	c	d
Pilot Fuel	CH_4		Syngas	
Main Fuel	CH_4	Syngas	Syngas	Syngas +20% H_2O
Y_{O_2}	18.2 %	19.7 %	19.6 %	19.5 %
Y_{N_2}	75.7 %	74.5 %	73.7	73.5 %
Y_{CO_2}	3.3 %	4.2 %	4.8 %	4.8 %
Y_{H_2O}	2.6 %	1.7 %	1.8 %	2.3 %
CO	2 ppmv	3 ppmv	0.4 ppmv	0.3 ppmv
NO_x	11 ppmv	6 ppmv	3.45 ppmv	3.1 ppmv
T_{sortie}	1333 (K)	1213 (K)	1193 (K)	1184 (K)
T_{max}	2503 (K)	2489 (K)	2448 (K)	2444 (K)

monoxyde de carbone similaires pour les cas "Gaz Naturel" et "Gaz de Synthèse" indiquent que l'efficacité de la combustion n'est pas significativement affectée par l'utilisation de Gaz de Synthèse, brut ou prétraité (Table 3).

4. Conclusion

L'objectif de notre travail était d'identifier le comportement à la combustion de plusieurs Gaz de Synthèse caractéristiques dans une chambre de combustion industrielle, afin de vérifier la flexibilité à utiliser une large gamme de combustibles et la polyvalence de microturbines à gaz à pleine charge dans un cycle de cogénération complet. Le papier a décrit les simulations numériques effectuées sur la géométrie de la chambre de combustion Turbec T100, originellement alimentée en Gaz Naturel, combustible remplacé progressivement par un Gaz de Synthèse, afin d'en étudier l'impact sur les émissions et sur la stabilité de la combustion. En plus de l'intérêt environnemental de la diversification des sources d'Energie durable, l'utilisation de Gaz de Synthèse est prometteuse dans le processus de combustion car elle permet de baisser la température moyenne dans la zone de combustion et de significativement diminuer les émissions de NO_x en maintenant le taux de CO à un niveau raisonnable. Il a été constaté qu'une importante fraction de vapeur d'eau dans le combustible de synthèse n'affecte pas la stabilité de la flamme. Cependant, d'autres simulations numériques devront être effectuées afin d'évaluer les performances de la chambre de combustion en injectant également un Gaz de Synthèse non-prétraité à la flamme pilote, altéré par une importante fraction de vapeur d'eau. De plus, l'impact sur la stabilité et sur les émissions, d'une répartition de combustible différente entre flamme pilote et principale, sera étudiée.

References

- [1] L. Casarsa, D. Micheli, V. Pediroda, R. Radu, Investigations of pyrolysis syngas swirl flames in a combustor model, ASME Paper GT2009-59610 (2009).
- [2] S. Colantoni, S. Della Gatta, R. De Prosperis, A. Russo, F. Fantozzi, U. Desideri, Gas turbines fired with biomass pyrolysis syngas : Analysis of the overheating of hot gas path components, ASME J. of Eng. for Gas Turbines and Power (2010).
- [3] A. Cappelletti, F. Martelli, E. Bianchi, E. Trifoni, Numerical redesign of 100kw mgt combustor for 100% h_2 fueling, Energy Procedia 45 (2014) 1412–21.

- [4] R. Calabria, F. Chiariello, P. Massoli, F. Reale, Part load behavior of a micro gas turbine fed with different fuels, Proceedings of ASME Turbo Expo (2014).
- [5] B. Ge, Y. Tian, S. Zang, The effects of humidity on combustion characteristics of a non-premixed syngas flame, International Journal of Hydrogen Energy 41 (2016) 9219–26.
- [6] M. Renzi, C. Riolfi, M. Baratieri, Influence of the syngas feed on the combustion process and performance of a micro gas turbine with steam injection., Energy Procedia 105 (2017) 1665–70.
- [7] C.-R. Liu, H.-Y. Shih, A computational investigation of syngas substitution effects on the combustion characteristics for a micro gas turbine, Proceedings of the ASME 5 (2012) 693–702.
- [8] Turbec T100, Turbec t100 microturbine system natural gas : Technical description, www.turbec.com (2009).
- [9] R. Calabria, *et al.*, Numerical of a micro gas turbine fed by liquid fuels : potentialities and critical issues., Energy Procedia [Internet] 81 (2015) 1131–42.
- [10] ESI group, Openfoam ltd, <https://www.openfoam.com/>.
- [11] E. Ghasemi, *et al.*, Rans simulation of methane-air burner using local extinction approach within eddy dissipation concept by openfoam., International Communications in Heat and Mass Transfer 54 (2014) 96–102.
- [12] D. Smith, G. Golden, M. Frenklach, N. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldenberg, T. Bowman, R. Hanson, S. Song, W. Gardiner, V. Lissianski, Z. Qin, Gri-mech 3.0, <http://www.me.berkeley.edu/gri-mech/>.
- [13] F. Contino, H. Jeanmart, B. Lucchini, G. D’Errico, Coupling of in situ adaptive tabulation and dynamic adaptive chemistry : An effective method for solving combustion in engine simulations, Proceedings of the Combustion Institute 33 (2011) 3057–3064.
- [14] A. De Santis, *et al.*, Cfd analysis of exhaust gas recirculation in a micro gas turbine combustor for co2 capture., Fuel. 173 (2016) 146–154.
- [15] W. De Paepe, P. Sayad, S. Bram, S. Klingmann, F. Contino, Experimental investigation of the effect of steam dilution on the combustion of methane for humidified micro gas turbine applications, Combustion Science and Technology 188 (2016) 1199–1219.
- [16] M. Cadorin, *et al.*, Numerical of a micro gas turbine fed by liquid fuels : potentialities and critical issues., Proceedings of the ASME Turbo Expo 2011 (2011).
- [17] W. De Paepe, M. Montero Carrero, S. Giorgetti, A. Parente, S. Bram, F. Contino, Exhaust gas recirculation on humidified flexible micro gas turbines for carbon capture applications., ASME Conference Proceedings : ASME Turbo Expo 2016. (2016).

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l’aide financière reçue du Fond Européen de Développement Régional (Projet FEDER).

Les moyens de calcul ont été fournis par le Consortium des Équipements de Calcul Intensif (CÉCI), financé par le Fonds de la Recherche Scientifique de Belgique (F.R.S.-FNRS) sous la convention n° 2.5020.11 et par la Région Wallonne