

Etude de la combustion de syngaz à haute teneur en vapeur d'eau dans une micro turbine à gaz classique : Impact de la répartition de combustibles entre flamme pilote/principale sur les émissions de NO_x

Jeremy BOMPAS^{1*}, Ward DE PAEPE¹

¹Université 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'utilisation de combustibles à faible pouvoir calorifique requiert habituellement une transformation de géométrie de chambres de combustion conçues spécifiquement pour le Gaz Naturel. Des recherches précédentes ont montré l'intérêt de l'emploi de Syngaz en chambre de combustion non-modifiée, en abaissant la température globale des fumées et en réduisant les émissions de NO_x tout en maintenant la stabilité de flamme, pour une gamme de fonctionnement nominal réduite. L'objectif de ce travail est d'identifier le comportement de Gaz de Synthèse dans une chambre de combustion industrielle, initialement 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 remplacée par du Gaz de Synthèse (Syngaz) à haute teneur en vapeur d'eau, est présentée. Les résultats montrent que l'utilisation de Syngaz à haute teneur en vapeur d'eau est particulièrement sensible à la distribution de combustible zone pilote/principale. Une richesse plus importante du Syngaz en zone pilote améliore la stabilité de la flamme, diminue les émissions de CO et engendre une production de NO_x supérieure.

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 crise énergétique actuelle met en lumière notre dépendance aux énergies fossiles. La demande énergétique en électricité et en chaleur ne cesse de croître tandis que les ressources fossiles s'épuisent par définition. Leur disponibilité limitée lors de la reprise économique, aggravée par le conflit majeur russo-ukrainien engendre de l'incertitude et des tensions sur le marché international. Parallèlement, nous avons l'ambition de respecter l'Accord de Paris et réduire drastiquement nos émissions de gaz à effet de serre afin d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. De plus, au-delà des engagements climatiques, les normes en matière d'émissions polluantes se renforcent dans les politiques sanitaires globales. Les ressources renouvelables produites à base de déchets que sont les syngaz sont de bons postulants à ces objectifs de diversification énergétique, particulièrement dans un contexte de production décentralisée telle que l'utilisation de micro turbines à gaz dans une application de cogénération de faible puissance.

Des études précédentes ont identifié le comportement à la combustion de différents gaz de synthèse caractéristiques dans une chambre de combustion industrielle classique, la Turbec T100 [1], développée originellement pour fonctionner au Gaz Naturel, dans le but d'étudier

l'impact de Syngaz sur les émissions et la stabilité de la combustion. Il a été montré que l'utilisation de gaz de synthèse abaisse la température globale dans la zone de combustion et, par conséquent, réduit les NO_x tout en augmentant modérément les émissions de CO [2].

De plus, une injection importante de vapeur dans la zone principale permet d'atteindre des températures qui favorisent l'oxydation du CO [2]. Il a également été constaté qu'une importante fraction de vapeur d'eau dans le combustible de synthèse n'affecte pas la stabilité de la flamme [3, 4]. Plus spécifiquement, il a été constaté que les émissions de NO_x sont sensibles à la distribution de combustible dans la chambre de combustion [5, 6]. Malgré la disponibilité de plusieurs recherches, des aspects fondamentaux de la combustion de gaz de synthèse à haute teneur en vapeur d'eau en chambre de microturbinés à Gaz, telle l'influence de la distribution de combustible entre flamme pilote et flamme principale sur la stabilité de la flamme et le contrôle des émissions, restent indéterminés et requièrent des investigations supplémentaires.

L'objectif de ce travail est donc d'identifier le comportement combustible de syngaz à haute teneur en vapeur d'eau dans une chambre de combustion industrielle, originellement conçue pour le gaz naturel, en variant la distribution de syngaz entre la flamme pilote et la flamme principale.

Dans les sections suivantes, la méthodologie de modélisation tridimensionnelle de la chambre de combustion sera présentée, ainsi que la description complète des conditions de fonctionnement des simulations numériques considérées. De plus, les résultats des simulations en analysant la stabilité de la combustion et les émissions de polluants pour les différentes plages de fonctionnement en contrôlant la distribution de combustibles flamme pilote/principale. Enfin, les conclusions et les perspectives de travaux futurs seront présentées.

2. Chambre de Combustion Turbec T100

Dans cette section, la géométrie et le cycle de fonctionnement de la chambre de combustion (microturbiné Turbec T100) seront présentés. Ensuite, le maillage et les hypothèses de modélisation utilisées (chimiques et thermophysiques) seront décrites. En outre, la stratégie de validation des simulations numériques de référence sera détaillée. Enfin, les configurations de simulations spécifiques à la détermination de l'impact de la répartition pilote/principale du Syngaz sur les émissions polluantes seront explicitées.

2.1. Géométrie

La Turbec T100 considérée dans cette étude est un système de microturbiné à gaz classique utilisé dans des applications de cogénération de faible puissance. 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 un rendement thermique de 50% [1].

La T100 exploite le cycle de Brayton à récupération (voir Figure 1). L'air est comprimé en développant un système de compresseur radial à vitesse variable (1). L'air est ensuite préchauffé par les fumées au niveau du récupérateur (2), avant d'entrer dans la chambre de combustion (3), entraînant des performances électriques supérieures. Dans cette chambre de combustion, du Gaz Naturel est classiquement brûlé afin d'amener les fumées à une température maximale contrôlée de 950°C à l'entrée de la turbine. Les fumées chaudes seront ensuite détendues afin de fournir la puissance mécanique transmise à la turbine (4) et au générateur électrique (5). Enfin, en sortie de récupérateur, la chaleur résiduelle des fumées est convertie en puissance thermique en réchauffant de l'eau dans l'économiseur (6).

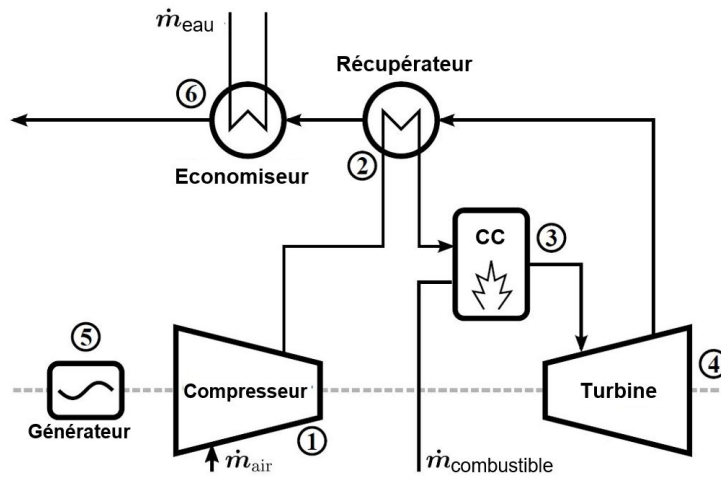


Figure 1 : Les principaux composants du système de microturbine à Gaz Turbec T100 sont : un compresseur (1) et une turbine (4) radiaux à vitesse variable, une chambre de combustion (3), un récupérateur (2), un générateur à haute vitesse (5) et un économiseur (6).

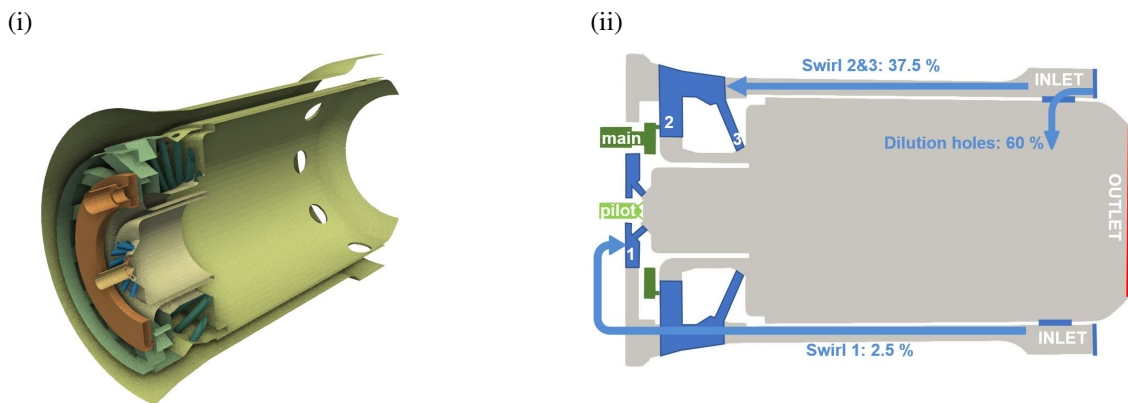


Figure 2 : Vue 3D (i) et coupe schématisée de la chambre de combustion T100 (ii), mettant en évidence l'arrivée d'air à contrecourant à l'extérieur de la chambre ainsi que les injecteurs de la flamme pilote (1) et de la flamme principale (2 et 3), et les trous de dilution.

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 conduits) fournissent l'air à la flamme pilote (approximativement 2.5%) tandis que les "swirlers 2" (15 ailettes radiales) et "swirlers 3" (30 conduits) fournissent l'air à la flamme principale (respectivement 25% 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.

Le combustible est lui injecté à l'intérieur de la chambre de combustion (voir Figure 2) par l'intermédiaire de deux circuits différents : La conduite pilote constituée de 6 buses d'injection (flamme de diffusion) et la conduite principale composée d'une chambre toroïdale aboutissant à 15 buses d'injection (flamme de prémélange).

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 [3].

L'étude indique qu'un maillage raffiné constitué de 4.3 millions de cellules est suffisamment raffiné pour donner des résultats précis sur les champs de vitesse et de température ainsi que sur les espèces chimiques des fumées, et un raffinement supplémentaire n'améliore plus sensiblement la précision des résultats en augmentant le coût calcul. 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. [7]

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 [8], pour lesquels les équations de transport d'espèces chimiques et les équations de conservation de Masse, de Quantité de Mouvement et d'Énergie, sont résolues [9].

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-calcul. Le modèle doit décrire le plus fidèlement possible la physique de l'écoulement tout en étant abordable numériquement. Pour cela, l'utilisation du modèle $k-\epsilon$ est considérée dans ce papier pour sa robustesse sur la physique de la combustion étudiée à un coût calcul raisonnable.

Dans cette étude, la convergence est assurée par la méthode "Preconditional bi-conjugate gradient stabilized" (PBi-CGStab) [10]. Pour toutes les simulations, le critère de convergence est fixé à 10^{-8} pour les espèces chimiques dans les équations de transport (Y_i) et à 10^{-7} pour les variable de vitesse U , enthalpy h , énergie cinétique turbulent k et la dissipation d'énergie cinétique turbulente ϵ

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 [1]. 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) apporte la plus grande fiabilité étant donné la présence des 2 régimes de combustion (diffusion et prémélange) dans la chambre de combustion du T100 [11].

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 du 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].

2.4. Validation des modèles de référence

Tableau 1 : Conditions aux limites Cas de validation des simulations numériques

	T_{entree}		Cas Gaz Naturel		Cas Syngaz	
			Simulation 1	Référence 1	Simulation 2	Référence 2
Fuel Pilote	288 (K)	\dot{m}	0.95 (g/s)		4.5 (g/s)	
Fuel principal			5.7 (g/s)		26.2 (g/s)	
Entrée d' Air	865 (K)	\dot{m}	690 (g/s)		690 (g/s)	

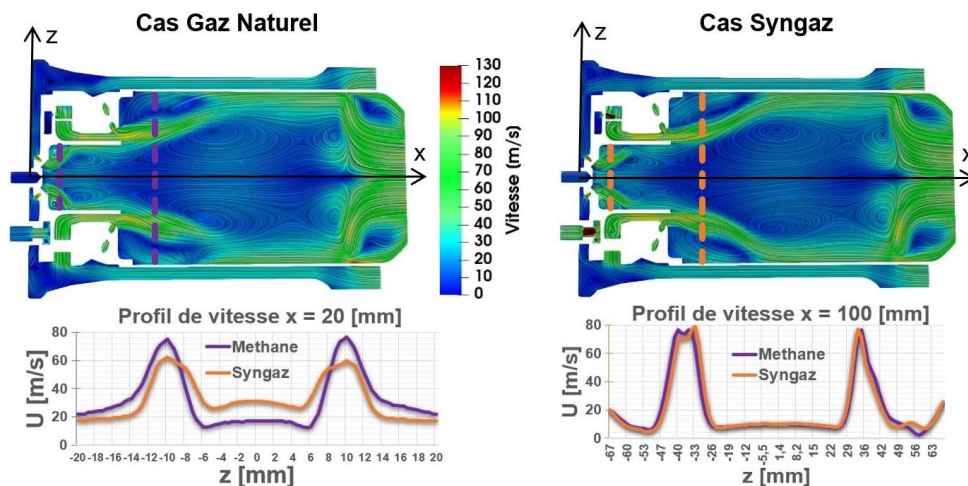


Figure 3 : Les Champs de Vitesse des cas utilisant du Gaz Naturel ou du Syngaz montrent des profils d'écoulement similaires à ceux trouvés dans la littérature. Malgré l'augmentation significative du débit de combustible, le champ de vitesse des deux cas reste similaire.

Afin de caractériser l'écoulement dans la chambre de combustion et valider les modèles numériques précédemment exposés, 2 simulations préalables ont été réalisées [3]. La première simulation sur la géométrie du T100 (voir Tableau 1) a été réalisée en injectant le méthane pur pour une puissance thermique totale de 330 kW, ce qui correspond aux conditions nominales de fonctionnement, reprises par De Santis et al. [14]. Une seconde évaluation a été réalisée avec un Syngaz sec, obtenu par un procédé industriel de gazéification de biomasse, sans modifier la géométrie de la chambre de combustion. Les mêmes conditions initiales ont été paramétrées, à l'exception du débit massique total de combustible, qui doit être augmenté (de 6.65 à 30.7 g/s) afin de garantir un apport thermique constant, en considérant que le Syngaz a un Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) de seulement 10.8 MJ/kg comparé aux 50 MJ/kg du méthane pur.

Tableau 2 : Composition des fumées (Fraction massique), Température moyenne d'échappement et Température maximum des fumées (*Calculs OD Stœchiométriques - **De Santis et al. [14] - ***Données Fabricant [1])

	Cas Gaz Naturel		Cas Syngaz	
	Simulation 1	Référence 1	Simulation 2	Référence 2
Y_{CO_2}	3.1 %	3 %*	5 %	4.8 %*
Y_{H_2O}	2.6 %	2.5 %*	1.8 %	1.9 %*
CO	3 ppmv	3 ppmv** < 6 ppmv***	4.3 ppmv	< 6 ppmv***
NO _x	11 ppmv	9 ppmv** < 15 ppmv***	3.5 ppmv	< 15 ppmv***
T_{sortie}	1311 (K)	1304 (K)*	1193 (K)	1189 (K)*

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

	Y_{CO}	Y_{CO_2}	Y_{H_2O}	Y_{H_2}	Y_{CH_4}
Syngaz	55.1	31.8	7.8	3.8	1.4
Syngaz +20% H ₂ O	38	42.9	12.6	3.9	2.5

La composition des gaz d'échappement des Cas Gaz Naturel et Syngaz présentés en Tableau 2, correspond aux réactions chimiques à l'équilibre des espèces CO₂ and H₂O. Les émissions de CO et de NO_x dépendent fortement de la dilution des gaz d'échappement et des températures de flamme [15], mais restent dans l'intervalle prévu par le constructeur [1] pour les deux cas de référence. L'utilisation du Syngaz engendre un niveau de température plus bas, divisant par trois les émissions de NO_x et augmentant substantiellement les émissions de CO, mais n'affectant toutefois pas significativement l'efficacité de la combustion. Le Cas Syngaz, en alimentant en gaz de synthèse 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 pour contrebalancer le PCI plus faible du Syngaz, modifie légèrement la forme de la flamme pilote (voir Figure 3), qui s'évase moins rapidement en ayant une zone de recirculation plus allongée. Malgré l'augmentation de débit du combustible, la morphologie globale de l'écoulement reste similaire à celle trouvée dans la littérature [14, 16].

2.5. Configuration des simulations

La simulation numérique de référence aux conditions nominales d'utilisation considère une répartition de 15% pour l'alimentation au pilote et 85% au principal.

Afin d'évaluer l'incidence de distributions différentes de Syngaz à haute teneur en vapeur d'eau (voir Syngaz +20% H₂O, Tableau 3) entre pilote et principal, 4 simulations supplémentaires ont été réalisées sur la base des modèles numériques décrits précédemment, sous les mêmes conditions nominales d'entrée, à savoir puissance thermique totale (330 kW), température de combustibles (288 K), débit (690 g/s) et température (865 K) d'air préchauffé : Le cas A représente la limite inférieure d'alimentation au pilote de 6% pour 94% au principal. Les Cas B au Cas E représentent une augmentation progressive du pourcentage d'alimentation en Syngaz au pilote jusqu'à 25% (voir Tableau 4).

Tableau 4 : Conditions aux limites et conditions initiales des cas simulés — $P_{th} = 330$ (kW)

Entrée d'Air : $\dot{m} = 690$ (g/s) — $T = 865$ (K)

Combustible (Syngaz + 20% H_2O) : $\dot{m}_{total} = 34.1$ (g/s) — $T = 288$ (K)

		Cas A	Cas B	Cas C	Cas D	Cas E
Flamme Pilote	\dot{m}	2.1 (g/s)	3.4 (g/s)	5.1 (g/s)	6.8 (g/s)	8.5 (g/s)
	$\%P_{th,total}$	6%	10%	15%	20%	25%
Flamme Principale	\dot{m}	32 (g/s)	30.7 (g/s)	29 (g/s)	27.3 (g/s)	25.6 (g/s)
	$\%P_{th,total}$	94%	90%	85%	80%	75%

3. Résultats

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aux champs de vitesse, aux champs de températures et à la composition des gaz d'échappement, plus particulièrement au CO et au NO_x , dans le but d'étudier l'impact sur les émissions d'une large répartition de Syngaz à haute teneur en vapeur d'eau entre la zone pilote et la zone principale.

Nous avons pu constater précédemment (voir Figure 3) que les champs de vitesse et la configuration de l'écoulement sont peu impactés par l'utilisation de Syngaz, la morphologie globale de l'écoulement étant dirigée principalement par le débit d'air préchauffé.

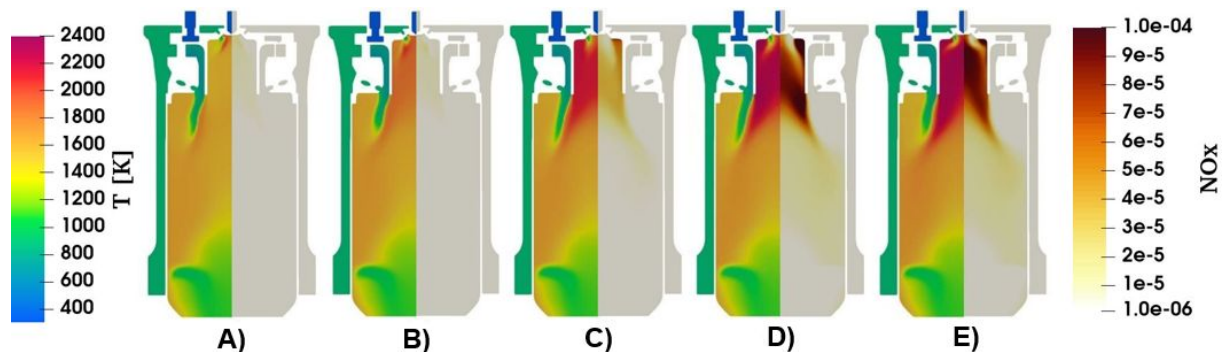


Figure 4 : Evolution du champ de température et du champ de production de NO_x

Le cas A (6% pilote - 94% principal, Tableau 5) correspond à la limite basse de stabilité de flamme de la zone pilote. En effet, pour cette répartition pilote/principal de Syngaz, la richesse locale correspondante pour la flamme pilote est très faible ($\Phi_{l,pilote} = 0.2$). Nulle ignition de flamme n'a été constatée en zone pilote en dessous de cette valeur. En augmentant progressivement le pourcentage de Syngaz en zone pilote, nous constatons qu'au contraire du champ de vitesse, le champ de température est lui clairement influencé par la distribution du combustible au niveau du front de flamme (voir Figure 4). Les températures maximales augmentent fortement dans la zone pilote, particulièrement à partir du niveau de richesse locale ($\Phi_{l,pilote}$) correspondant à la répartition nominale de combustible (Cas C, voir Tableau 5) où l'on constate des températures maximales de respectivement 2360 (K) (cas D, 20% pilote - 80% principal) et 2350 (K) (cas E, 25% pilote - 75% principal) alors que la température moyenne des gaz en sortie est conservée pour une puissance thermique totale identique. Les températures plus élevées en zone pilote engendrent une production croissante de NO_x (Cas A à D, Tableau 5) qui entraînent des émissions globales plus importantes dans les gaz d'échappement, tout en restant en dessous

des valeurs normées (< 15 ppmv).

Tableau 5 : *Composition des gaz d'échappement et Températures pour les cas considérés*

Répartition % Pilote / Principal	Cas A 6 - 94	Cas B 10 - 90	Cas C 15 - 85	Cas D 20 - 80	Cas E 25 - 75
T_{max}	2183 (K)	2190 (K)	2205 (K)	2360 (K)	2350 (K)
T_{sortie}	1227 (K)	1230 (K)	1234 (K)	1235 (K)	1236 (K)
$\Phi_{l,pilote}$	0.2	0.33	0.5	0.66	0.8
NO_x	1.3 ppmv	1.5 ppmv	2.8 ppmv	5.5 ppmv	5.4 ppmv
CO	5.1 ppmv	4.8 ppmv	3.7 ppmv	3.5 ppmv	3.8 ppmv

A l'inverse des émissions de NO_x , la production de CO dans les gaz d'échappement tend à diminuer à mesure que la richesse locale de la zone pilote est augmentée, l'oxydation du CO en CO_2 dans ces conditions étant favorisée par des plus hautes températures. Enfin, il est à constater pour le cas E (Tableau 5) que la progression à la hausse des températures maximales et des NO_x tend à se stabiliser voire légèrement décroître, alors que les émissions globales de CO ont une tendance inverse, le taux de réaction chimique de la combustion du Syngaz dans la zone pilote diminuant sous l'effet conjugué de la dilution importante du Syngaz en espèces réactives et d'un excès d'air localement très faible ($\Phi_{l,pilote} = 0.8$).

4. Conclusion

L'objectif de notre travail était d'identifier le comportement à la combustion d'un Gaz de Synthèse à haute teneur en vapeur d'eau dans une chambre de combustion industrielle, afin d'en vérifier la flexibilité pour une gamme de répartition très large de Syngaz entre la flamme pilote et la flamme principale 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 par un Gaz de Synthèse à haute teneur en vapeur d'eau, afin d'en étudier l'impact sur la stabilité de la combustion et sur les émissions, spécifiquement les NO_x et le CO. Il a été montré qu'une augmentation de la richesse en Syngaz dans la zone pilote, pour une même puissance thermique totale, favorise la stabilité de la flamme et diminue les émissions de CO. Cependant, la richesse plus importante du Syngaz en zone pilote augmente significativement la température de flamme et provoque une production de NO_x supérieure, qui se maintient toutefois dans les valeurs d'émissions limites imposées.

Outre l'intérêt environnemental de la diversification des sources d'Énergie renouvelables, l'utilisation de Gaz de Synthèse est prometteuse dans le processus de combustion car en plus d'abaisser la température moyenne dans la chambre de combustion, elle permet de conserver la flexibilité sur une gamme élargie de répartition de puissance entre la flamme de diffusion pilote et la flamme de prémélange principale sans affecter significativement les émissions de NO_x et en maintenant le taux de CO à un niveau raisonnable.

Néanmoins, d'autres simulations numériques devront être effectuées afin d'évaluer les performances de la chambre de combustion à charge partielle (phase transitoire) et de définir les limites de fonctionnement hautes en matière de teneur en vapeur des Syngaz, avec pour objectif final d'évaluer les points de fonctionnement optimaux pour le cycle complet de systèmes de cogénération.

References

- [1] Turbec T100, Turbec t100 microturbine system natural gas : Technical description, www.turbec.com (2009).
- [2] 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.
- [3] J. Bompas, A. Pappa, W. De Paepe, Analysis of combustion performance of non-conventional syngas in mgt combustor : Assessment of the impact of the quality of synthesis gas towards flame stability and emissions, *Proceedings of the ASME Turbo Expo* (2022) Paper GT2022–82888.
- [4] 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.
- [5] L. Casarsa, D. Micheli, V. Pediroda, R. Radu, Investigations of pyrolysis syngas swirl flames in a combustor model, *ASME Paper GT2009-59610* (2009).
- [6] 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).
- [7] 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.
- [8] ESI group, Open CFD Ltd, <https://www.openfoam.com/>.
- [9] Q. Yang, P. Zhao, H. Ge, reactingfoam-sci : An open source CFD platform for reacting flow simulation, *Computers and Fluids* 190 (2019) 114–127.
- [10] H. A. Van der Vorst, Bi-cgstab : A fast and smoothly converging variant of bi-cg for the solution of nonsymmetric linear systems, *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing* 13 (1992) 631–44.
- [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] M. Frenklach, H. Wang, M. Goldenberg, G. P. Smith, D. M. Golden, Gri-mech : An optimized detailed chemical reaction mechanism for methane combustion., *Topical Report* (1995) 156.
- [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, 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).
- [16] M. Cadorin, *et al.*, Analysis of a micro gas turbine fed by natural gas and synthesis gas : Test bench and combustor CFD analysis, *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2011* (2011).

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