

Etude de la combustion de syngaz à haute teneur en vapeur d'eau dans une micro turbine à gaz classique : Analyse des performances de combustion et impact sur les émissions polluantes

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. Dans un objectif de remplacement progressif des technologies fossiles vers des solutions durables, les solutions de micro-turbine à gaz existantes, alimentées de multiples combustibles aux caractéristiques variables, présentent un avantage indéniable dans le fonctionnement flexible des systèmes énergétiques futurs. Des recherches précédentes [1, 2] 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. L'objectif de ce travail est 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 puissance entre la flamme pilote et la flamme principale. Les résultats montrent que l'utilisation de syngaz à haute teneur en vapeur d'eau est particulièrement sensible à la distribution de combustible entre les zones pilote et principale. Une richesse plus importante du syngaz en zone pilote améliore la stabilité de la flamme en engendrant une production de NO_x supérieure.

Nomenclature

PCI Pouvoir Calorifique Inférieur

ODE Ordinary Differential Equations

TDAC Tabulation of Dynamic Adaptive Chemistry

\dot{m} Débit massique, g/s

RANS Reynolds Averaged Navier-Stokes

1. Introduction

Les crises énergétiques successives mettent en lumière notre dépendance aux ressources fossiles qui représentent 80% de l'énergie mondialement consommée [3]. Pour autant, la demande en électricité et en chaleur ne cesse de croître tandis que les ressources fossiles s'épuisent par définition. Leurs perspectives de disponibilité à long terme, aggravée par les conflits majeurs internationaux engendrent de l'incertitude et des tensions sur le seul marché énergétique. 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 liés aux gaz à effet de serre, les normes en matière d'émissions polluantes se renforcent dans les politiques sanitaires globales. Les ressources renouvelables produites à base de déchets organiques que sont les syngaz sont de bons candidats à la poursuite des objectifs de diversification et de flexibilité 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, l'AE-T100 [4], 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 ([1] et, par conséquent, réduit les NO_x tout en augmentant modérément les émissions de CO [5]. Certains aspects pénalisants tels que l'énergie nécessaire à la compression des syngaz aux caractéristiques diluées [6] ou la présence d'eau dans leur composition [7] trouvent des réponses régulières à l'échelle industrielle. Outre la robustesse matérielle des microturbines à la vapeur d'eau, nous savons qu'une injection de vapeur dans la zone principale permet d'atteindre des températures qui favorisent l'oxydation du CO [5]. Il a également été constaté qu'une fraction limitée de vapeur d'eau dans le combustible de synthèse n'affecte pas la stabilité de la flamme [8, 9].

En outre, il a été constaté que, bien que les émissions de NO_x soient globalement réduites grâce à l'utilisation du syngaz, les résultats varient sensiblement en fonction de la distribution de combustible dans la chambre de combustion [10, 11]. 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 microturbines à gaz, telle l'influence de la distribution de combustible entre flamme pilote et flamme principale et l'influence de la fraction en vapeur d'eau contenue dans le gaz de synthèse, 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 seront présentés 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 AE-T100

Dans cette section, la géométrie et le cycle de fonctionnement de la chambre de combustion (microturbine AE-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 et de la teneur en vapeur d'eau du syngaz sur les émissions polluantes seront explicitées.

2.1. Géométrie

L'AE-T100 [4] considérée dans cette étude est un système de microturbine à gaz classique développé par Ansaldo Energia et 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% (rendement global de 80% [4]).

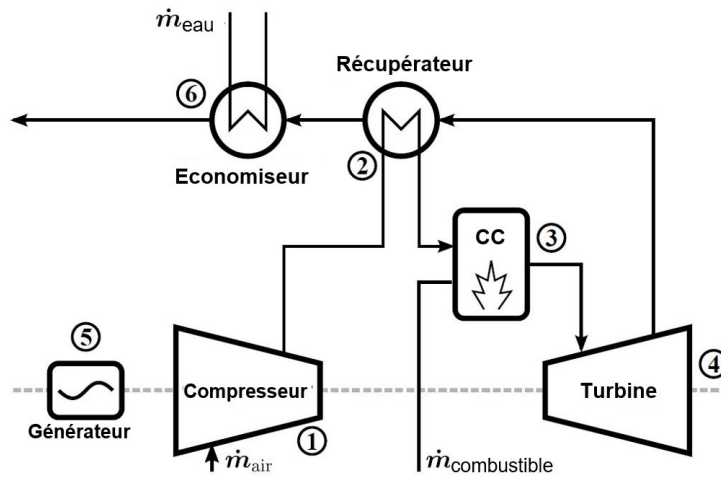


Figure 1 : Les principaux composants du système de microturbine à gaz AE-T100 sont : un compresseur (1) et une turbine (4) radiaux à vitesse variable, une chambre de combustion (3), un récupérateur (2), un générateur à haute vitesse (5) et un économiseur (6).

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).

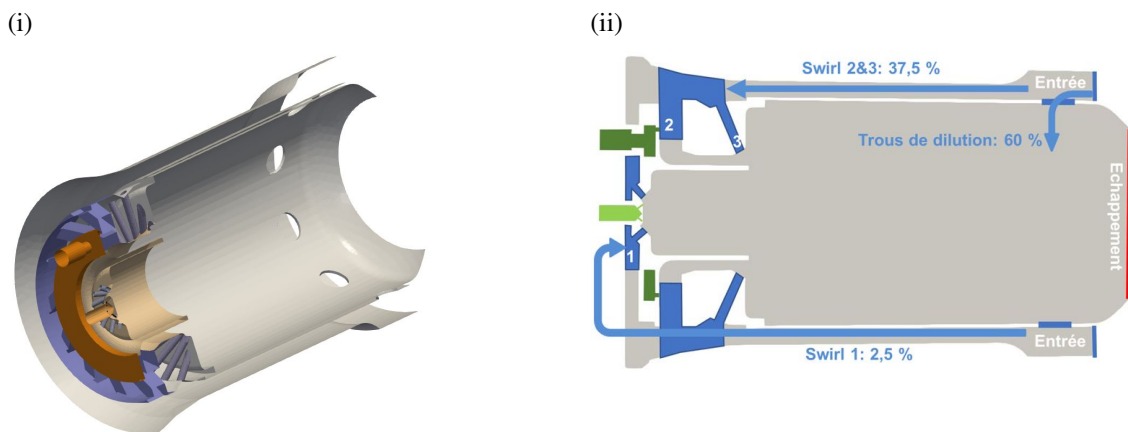


Figure 2 : Vue 3D (i) et coupe schématique de la chambre de combustion AE-T100 (ii), mettant en évidence l'arrivée d'air à contrecourant à l'extérieur de la chambre ainsi que les injecteurs de la flamme pilote (1) et de la flamme principale (2 et 3), et les trous de dilution.

L'air préchauffé (≈ 865 [K]) dans le récupérateur (Figure 1) entrant dans la chambre de combustion à contrecourant de la flamme est divisé en différentes sections : Les "swirl 1" (12 conduits) fournissent l'air à la flamme pilote (approximativement 2,5% du débit d'air) tandis

que les "swirl 2" (15 ailettes radiales) et "swirlers 3" (30 conduits) fournissent l'air à la flamme principale (respectivement 25% et 12,5% du débit d'air). Enfin, la fraction d'air restante (60,1%) pénètre les neuf trous de dilution afin de parvenir à une température de gaz d'échappement limitée à 950 [°C].

Le combustible est lui injecté à l'intérieur de la chambre de combustion (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 (Figure 2(ii)). Dû à la géométrie complexe de l'AE-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 [8]. Cette étude indique qu'un maillage raffiné constitué de 4,3 millions de cellules (de volume compris entre $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3$ et $8,3 \text{ mm}^3$) 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 [2].

2.3. Configuration des modèles numériques

Dans ce travail, des simulations tridimensionnelles instationnaires ont été réalisées, combinant une méthode des volumes finis et un algorithme "PIMPLE" (Pressure Implicit Splitting Operators + Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations [12]). Les écoulements fluides avec réactions chimiques ont été simulés sur le solveur reactingFoam de OpenFOAM [13], 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 [14].

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) [15]. 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 variables 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 [4]. Comme le point de fonctionnement est proche de la limite d'inflam-

Tableau 1 : 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}	PCI [kJ/g]
Syngaz W0 (biomasse sèche)	55,1	31,8	7,8	3,8	1,4	10,8
Sxxyy W20 [0,2kg H ₂ O/ kg biomasse]	38	42,9	12,6	3,9	2,5	9,8
Sxxyy W50 [0,5kg H ₂ O/ kg biomasse]	19,8	51,7	20,3	3,7	4,5	8,6

mabilité, 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 de l’AE-T100 [16].

Dans le présent travail, toutes les simulations ont été effectuées en utilisant le mécanisme chimique GRI3.0 MECH [17] 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 [18].

2.4. Configuration des simulations

Dans les conditions nominales d’opération de la micro-turbine employant du gaz naturel, la répartition de combustible pilote/principal est classiquement de 15% - 85%. Nous utiliserons cette première configuration “référence” pour la simulation nominale de syngaz (Voir cas B, Tableau 2).

Afin d’évaluer l’incidence de distributions différentes de syngaz à haute teneur en vapeur d’eau (voir syngaz 0,2kg H₂O, Tableau 1) 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 une limite basse d’alimentation au pilote de 10% pour 90% au principal. Les cas B au cas E (voir Tableau 2) représentent une augmentation progressive du pourcentage d’alimentation en syngaz au pilote jusqu’à 40% traitant les conditions nominales d’utilisation de l’AE-T100 (Cas B, 15% - 85%) jusqu’à des conditions de mélanges très riches dans la zone pilote afin de traiter une gamme étendue de fonctionnement de la chambre de combustion en y vérifiant les impacts sur la stabilité de flamme ainsi que les émissions polluantes.

Tableau 2 : Conditions aux limites et conditions initiales des cas simulés (Syngaz à 0,2kg H₂O/kg biomasse) à charge nominale $P_{th} = 330$ [kW]; Entrée d'Air : $\dot{m} = 690$ [g/s] — T = 865 [K]; Combustible (Sxxyy W20) : $\dot{m}_{total} = 34,1$ [g/s] — T = 288 [K]

		Cas A S1090	Cas B S1585	Cas C S2080	Cas D S3070	Cas E S4060
Flamme Pilote	\dot{m}	3,4 [g/s]	5,1 [g/s]	6,8 [g/s]	10,4 [g/s]	13,7 [g/s]
	$\%P_{th,total}$	10%	15%	20%	30%	40%
	Φ_{local}	0,33	0,5	0,66	1	1,33
Flamme Principale	\dot{m}	30,7 [g/s]	29 [g/s]	27,3 [g/s]	23,7 [g/s]	20,4 [g/s]
	$\%P_{th,total}$	90%	85%	80%	70%	60%

Tableau 3 : Composition des gaz d'échappement et Températures pour les cas considérés

	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D	Cas E
Répartition % Pilote / Principal	10 - 90	15 - 85	20 - 80	30 - 70	40 - 60
T_{max}	2190 [K]	2205 [K]	2360 [K]	2350 [K]	2327 [K]
T_{sortie}	1230 [K]	1234 [K]	1235 [K]	1234 [K]	1226 [K]
$\Phi_{l,pilote}$	0,33	0,5	0,66	1	1,3
NO _x [ppmv@15%O ₂]	2	4,4	8,5	7	6,5
CO [ppmv@15%O ₂]	2,9	2,7	3	3	3,6

3. Résultats

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés 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 et sur la stabilité de flamme d'une large répartition de syngaz à haute teneur en vapeur d'eau entre la zone pilote et la zone principale.

Le cas A (10% pilote - 90% principal, Tableau 3) 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 faible ($\Phi_{l,pilote} = 0,33$ pour le syngaz Versus 0,7 pour la même répartition pilote/principal en gaz naturel). En augmentant progressivement le pourcentage de syngaz en zone pilote, nous constatons que le champ de température est lui clairement influencé par la distribution du combustible au niveau du front de flamme (voir Figure 3). 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 B, voir Tableau 3) où l'on constate des températures maximales absolues de respectivement 2360 [K] (cas C, 20% pilote - 80% principal) et 2350 [K] (cas D, 30% pilote - 70% 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 C, Tableau 3) qui entraînent des émissions globales plus importantes dans les gaz d'échappement, tout en restant en dessous des valeurs normées (< 15 ppmv@15%O₂).

La progression à la hausse des températures maximales et des NO_x se stabilise autour d'une

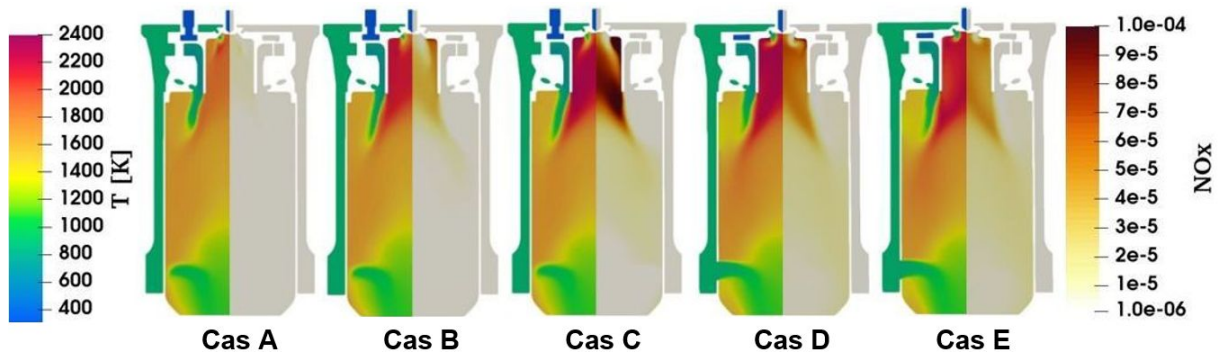


Figure 3 : Evolution du champ de température et du champ de production de NO_x où l'on voit une augmentation du niveau de températures et de NO_x jusqu'à un $\Phi_{l,pilote}$ de 0,66 (Cas C), pour ensuite décroître légèrement.

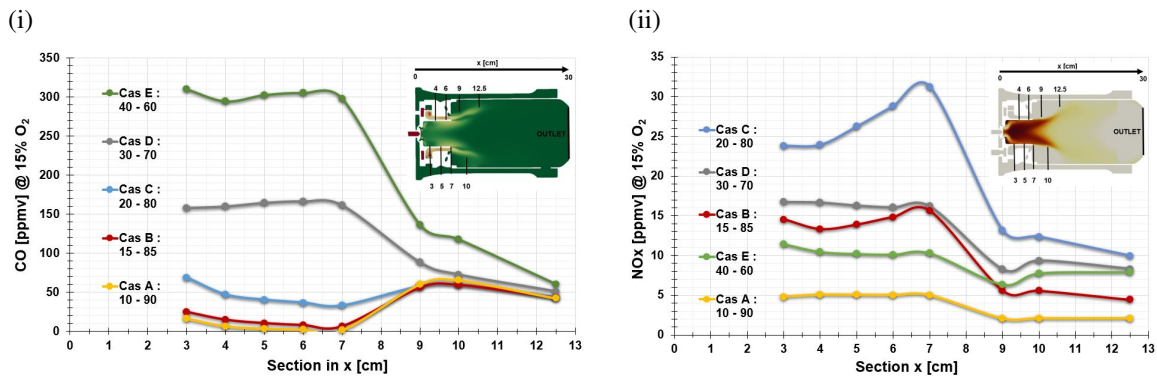


Figure 4 : Concentration croissante en CO (i) dans la chambre de combustion pilote en fonction de la distribution pilote/principal et évolution à la hausse d'émission de NO_x (ii) jusqu'à saturation (Cas C) sous l'effet d'un mélange plus riche au pilote.

répartition 20% pilote - 80% principal (Cas C) pour ensuite décroître (Cas D et E); 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 ($\Phi_{l,pilote} > 1$).

Plus particulièrement, l'analyse de l'évolution des espèces chimiques dans la chambre pilote (voir Figure 4(ii)) montre que les NO_x sont produits essentiellement dans cette zone de haute température et ces émissions entraînent de facto les tendances des fumées à l'échappement. Les NO_x thermiques augmentent avec la richesse du mélange local en zone pilote jusqu'à une répartition pilote/principal de 20% - 80% (Cas C) pour ensuite diminuer, le défaut en oxygène local bloquant l'oxydation de l'azote.

En augmentant progressivement la richesse locale au pilote (Du cas A vers le cas E), ce même défaut en oxygène entraîne des concentrations en CO croissant fortement en zone pilote (voir Figure 4(i)). La concentration de CO dans les gaz d'échappement (voir Tableau 3) tend, quant à elle, à n'augmenter que sensiblement à mesure que la richesse locale de la zone pilote est augmentée, l'apport massif d'air secondaire et les températures plus importantes favorisant l'oxydation du CO en CO_2 et ainsi la stabilisation des émissions de CO à l'échappement (< 6 [ppmv@15% O_2]).

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.

Les résultats principaux sont qu'une augmentation de la richesse en syngaz dans la zone pilote, pour une même puissance thermique totale, favorise la stabilité de la flamme. Une richesse plus importante du syngaz en zone pilote augmente significativement la température de flamme et provoque une production de NO_x croissante jusqu'à une saturation due à un défaut d'oxygène à la flamme pilote. Les valeurs d'émissions polluantes telles que les NO_x et le CO sont maintenues toutefois dans les valeurs d'émissions limites normées pour une large plage d'utilisation du syngaz. En outre, il a été montré que la présence de vapeur d'eau dans la composition du syngaz possède un effet favorable quant à la limitation des températures globales et aux émissions de NO_x au sein de la chambre de combustion.

References

- [1] 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).
- [2] 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.
- [3] International Energy Agency Bioenergy, Contributions of sustainable biomass and bioenergy in industry transitions towards a circular economy, www.ieabioenergy.com (2020).
- [4] Ansaldo Energia SpA, Ae-t100 microturbine system natural gas : Technical description, <https://www.ansaldoenergia.com/offering/equipment/turbomachinery/microturbines/ae-t-100>.
- [5] 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.
- [6] K. Al-attab, Z. Zainal, Micro gas turbine running on naturally aspirated syngas : An experimental investigation, Renewable Energy 119 (2018) 210–216.
- [7] 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).
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] L. Casarsa, D. Micheli, V. Pediroda, R. Radu, Investigations of pyrolysis syngas swirl flames in a combustor model, ASME Paper GT2009-59610 (2009).
- [11] 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).
- [12] O. Ltd, Cfd direct ltd, <https://doc.cfd.direct/notes/cfd-general-principles/the-pimple-algorithm>.

- [13] ESI group, Open CFD Ltd, <https://www.openfoam.com/>.
- [14] Q. Yang, P. Zhao, H. Ge, reactingfoam-sci : An open source CFD platform for reacting flow simulation, *Computers and Fluids* 190 (2019) 114–127.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.

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. Ces calculs représentent en moyenne pour une simulation complète : 10 jours de simulation parallèle sur 169 CPUs.