HAL open science

Approche numérique pour l'étude de l'influence du choix d'une équation d'état dans un écoulement autour d'une aile, à haute pression et température

Marion Brateau, Steven Kerampran, Amar Bouchama, Aubin Clough, M. Arrigoni

To cite this version:

Marion Brateau, Steven Kerampran, Amar Bouchama, Aubin Clough, M. Arrigoni. Approche numérique pour l'étude de l'influence du choix d'une équation d'état dans un écoulement autour d'une aile, à haute pression et température. 25e Congrès Français de Mécanique, Nantes, 29 août-2 septembre 2022, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280082

HAL Id: hal-04280082

https://hal.science/hal-04280082v1

Submitted on 10 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Approche numérique pour l'étude de l'influence du choix d'une équation d'état dans un écoulement autour d'une aile, à hautes pression et température

M. BRATEAU [a, b], S. KERAMPRAN [b], A. CLOUGH [a], M. ARRIGONI [b]

a. CTAI, 7 route de Guerry, 18000 Bourges, m.brateau@cta-international.com
b. IRDL ENSTA Bretagne, 2 rue François Verny, 29200 Brest, marion.brateau@ensta-bretagne.org

Résumé :

En balistique intérieure, décrire le plus fidèlement le comportement thermodynamique des gaz de combustion est primordial car ceux ci conditionnent grandement la mise en mouvement du projectile, et donc sa vitesse de sortie. Cette description est garantie par l'équation d'état des gaz, qui permet également de fermer le système d'équations de conservation de la balistique intérieure. L'équation d'état étant une équation thermodynamique, elle va naturellement influencer les grandeurs thermodynamiques du problème, comme la pression ou la masse volumique. Or, son influence sur d'autres grandeurs non purement thermodynamiques, comme le transfert thermique sur une surface, n'est pas intuitive. Ce papier présente l'étude de l'influence de l'équation d'état sur le transfert thermique sur une aile dans un écoulement, avec un fort gradient de température entre la température de l'aile et celle du fluide, au travers d'une approche numérique. Les résultats montrent que le choix de l'équation d'état impacte de façon significative le transfert thermique sur une aile, dans le cas d'un écoulement à hautes pression et température, proche de celui rencontré en balistique intérieure.

Abstract :

In interior ballistics, it is essential to describe as accurately as possible the thermodynamic behavior of the combustion gases, as these gases greatly condition the projectile's motion, and therefore its muzzle velocity. This description is guaranteed by the equation of state of the gases, which also closes the system of conservation equations of interior ballistics. The equation of state being a thermodynamic equation, it will naturally influence the thermodynamic values of the problem, such as pressure or density. However, its influence on other non purely thermodynamic quantities, such as heat transfer on a surface, is not intuitive. This paper presents the study of the influence of the equation of state on the heat transfer on a wing in a flow, where there is a strong gradient of temperatures between the wing and the gas, through a numerical approach. The results show that the choice of the equation of state has a significant impact on the heat transfer on a wing, in the case of a high pressure and temperature flow, close to the one encountered in interior ballistics.

Mots clefs : Équations d'état, Combustion, Thermodynamique, Viriel, Noble-Abel

1 Introduction

L'industrie de la Défense développe de nouvelles technologies, avec deux objectifs principaux : améliorer la compacité des systèmes d'armes et leurs performances. Cette augmentation de performances implique souvent d'augmenter la vitesse de sortie du projectile et donc augmenter la pression dans la chambre de combustion, dans les limites imposées par le matériau de celle-ci.

Les munitions télescopées de 40 mm et le système d'arme associé (40 CTAS), développés par CTA International (figure 1) font partie des dernières innovations en la matière. Ces innovations permettent une réduction du volume des munitions, particulièrement leur longueur, qui est divisée par deux à calibre équivalent, car le projectile est placé dans la cartouche, au milieu de la poudre. Cela permet également de réduire l'intrusion du canon en tourelle grâce à un système de chambre rotative, libérant plus de place pour l'équipage.

FIGURE 1 – 40 CTAS (à gauche) et gamme de munitions téléscopées de 40 mm CTAI (à droite)

En balistique intérieure, la discipline étudiant les phénomènes mis en jeu pendant un coup de canon, une équation d'état est indispensable pour fermer le système d'équations de conservation [1] [2]. Une équation d'état permet de lier trois grandeurs thermodynamiques, comme la pression, la température et la masse volumique [3] [4]. De plus, il est utile de connaitre le comportement thermodynamique des gaz dans la chambre de combustion, car ils conditionnent la mise en mouvement du projectile dans le tube et ainsi influent directement sur les performances du système.

Afin de modéliser correctement et de prédire au mieux les performances d'un système, il convient de choisir la bonne équation d'état [5]. En effet, plusieurs équations d'état peuvent sembler convenir pour des conditions de hautes pressions et températures telles que rencontrées dans les systèmes d'armes. C'est le cas notamment des équations de Noble-Abel ou du viriel. Naturellement, le choix de l'équation d'état se répercute sur les grandeurs thermodynamiques comme la pression ou la température. En revanche, l'influence de l'équation d'état sur d'autres grandeurs non purement thermodynamiques comme le transfert thermique sur une surface n'est pas intuitive.

Ce papier présente les résultats de simulations de CFD (Computational Fluid Dynamics) effectuées sur le logiciel volumes finis STARCCM+ [6]. A titre d'illustration, la modélisation choisie est celle d'une aile, placée dans un écoulement à hautes pression et température. L'évolution du transfert thermique sur la surface de l'aile est étudiée, en fonction de l'équation d'état implémentée pour le gaz.

2 Modélisation

2.1 Géométrie

Le profil d'aile étudiée est un profil épais NACA 0020, choisi pour ses propriétés de symétrie, avec une corde de longueur arbitraire de 1m. Le domaine de calcul est rectangulaire, avec des dimensions suffisamment grandes devant celles de l'aile pour s'affranchir des effets de bords (rectangle 20m*40m). Il s'agit d'un modèle 2D plan avec une symétrie plane. La figure 2 schématise l'aile et son domaine, avec les conditions de la simulation.

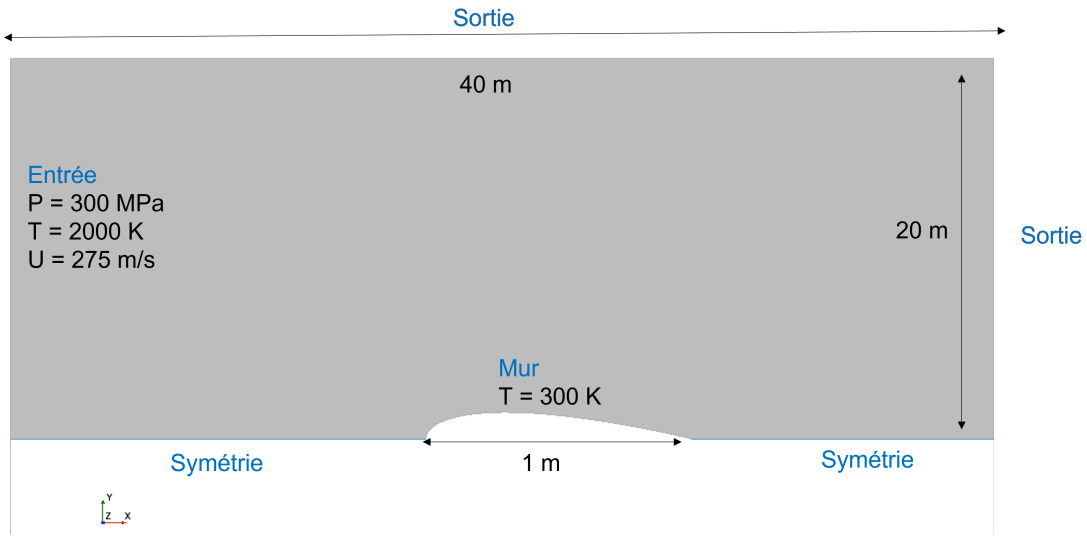

FIGURE 2 – Schéma descriptif du domaine de calcul, avec les conditions limites et initiales de l'écoulement et les longueurs utiles

Les conditions aux limites sont les suivantes : l'aile est un mur isotherme à une température de 300 K, l'écoulement se fait de la gauche vers la droite. Une condition de symétrie est imposée sur la frontière inférieure.

2.2 Propriétés de l'écoulement

Le gaz étudié est de l'air, composé de 21% de dioxygène et 79% de diazote. La température et la pression d'entrée du domaine de calcul valent respectivement 2000 K et 300 MPa. La vitesse de l'écoulement (275 m/s) est choisie de telle sorte que l'écoulement reste subsonique (M $\simeq$ 0,3) afin d'éviter les phénomènes d'ondes de choc, qui perturberaient l'écoulement (discontinuités de la pression, température, masse volumique...) . Deux types de simulations sont effectuées : une avec une viscosité dynamique évaluée à 298K (celle par défaut dans STARCCM+) et une autre avec une viscosité dynamique corrigée pour de l'air sec à 2000K issue de [3] (modèles théoriques de l'évolution de la viscosité dynamique en fonction de la température). Les viscosités sont données dans la table 1.

Viscosité	Valeurs	Unités
Viscosité à 298 K	1,85 10^{-5}	Pa.s
Viscosité corrigée à 2000 K [3]	6,68 10^{-5}	Pa.s

TABLE 1 – Viscosité dynamique de l'air à 298 K et 2000 K

Trois équations d'état sont comparées : les gaz parfait, Noble-Abel et le viriel. Dans la suite, P désignera la pression, ρ la masse volumique, T la température, r la constante spécifique des gaz parfaits. L'équation d'état des gaz parfaits est la plus simple (1), puisqu'elle nécessite seulement la connaissance de la masse molaire du gaz, qui vaut 28,8 g/mol dans le cadre de cette étude (air). Ses hypothèses sont très restrictives (les molécules n'ont pas de volume et n'interagissent pas entre elles). Cette équation d'état n'est pas adaptée aux conditions de pression de l'écoulement [7], cependant sa simplicité fait qu'elle a sa place dans l'étude.

$$P = \rho \cdot r \cdot T \tag{1}$$

L'équation de Noble-Abel (2) est une correction des gaz parfaits, où le volume des molécules est considéré avec le paramètre η (covolume). Cette équation est largement utilisée en balistique intérieure [1][2][8].

$$P\left(\frac{1}{\rho} + \eta\right) = r \cdot T \tag{2}$$

L'équation du viriel (3) est également parfois utilisée en balistique intérieure [7][9], bien que ses coefficients soient difficiles à calculer (en particulier pour des mélanges gazeux, méthode décrite dans [3]) et induisent des incertitudes importantes. Contrairement aux autres équations présentées, les coefficients du viriel dépendent de la température [3] [4].

$$\frac{P}{\rho r T} = 1 + B\rho + C\rho^2 \tag{3}$$

Les coefficients des équations d'état pour l'air sont récapitulés dans la table 2.

Coefficients	**Valeurs**	**Unités**
Covolume η	1 10^{-3}	kg.m^{-3}
B à 2000 K	1,14 10^{-3}	kg.m^{-3}
C à 2000 K	1,15 10^{-6}	(kg.m^{-3})^2

TABLE 2 – Paramètres des équations d'état de Noble-Abel (covolume) et du viriel (B et C, à 2000 K)

2.3 Maillage

La couche limite de l'écoulement dont l'épaisseur est de l'ordre de $\delta = 5 \cdot 10^{-4}$ m sur l'aile est représentée grâce à un maillage structuré comptant 30 mailles dans l'épaisseur. Le reste du domaine est maillé de manière non-structuré avec des mailles polygonales de 1 cm.

3 Résultats

3.1 Viscosité à 298 K

La figure 3 présente la pression de l'écoulement autour de l'aile pour l'équation d'état des gaz parfaits à titre illustratif (les allures sont similaires pour toutes les simulations). Le bord d'attaque de l'aile constitue un point d'arrêt de l'écoulement, donc avec une pression plus élevée. Cette valeur de pression d'arrêt peut être calculée grâce à l'équation 4 (dans le cas gaz parfaits) et vaut 319,3 MPa, ce qui est bien la valeur donnée par la simulation au point d'arrêt.

$$P_0 = P * (1 + \frac{\gamma - 1}{2} * M^2)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \tag{4}$$

Quelques perturbations sont également visibles sur le bord de fuite (dues aux instationnarités numériques locales).

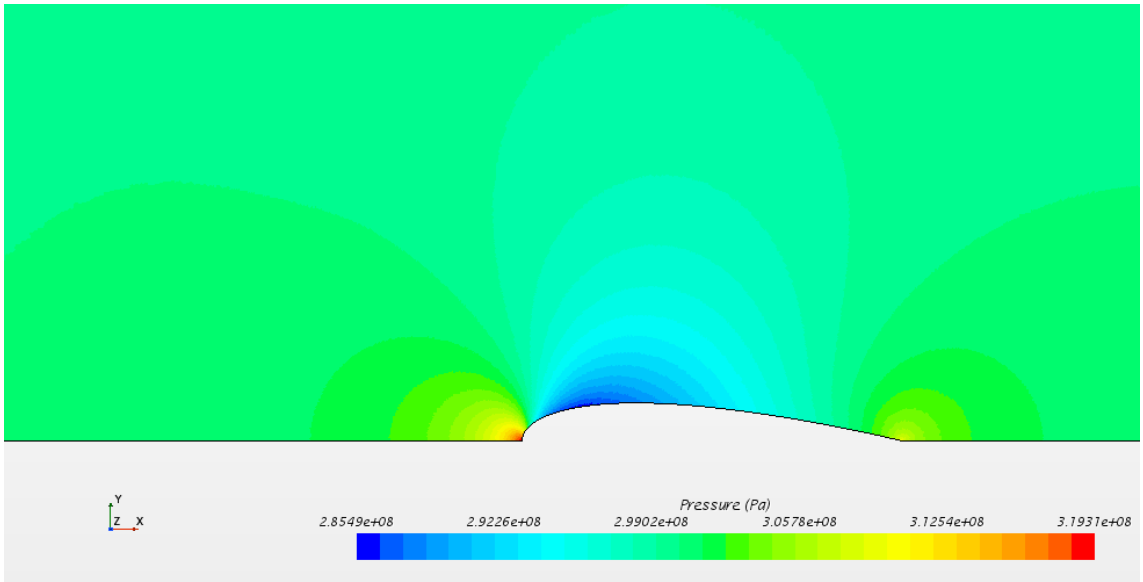

FIGURE 3 – Evolution de la pression de l'écoulement (conditions initiales P=300 MPa, U=275 m/s, T=2000K) autour de l'aile, avec l'équation d'état des gaz parfaits

La masse volumique de l'écoulement le long de l'aile dépend fortement de l'équation d'état choisie (figure 4). En effet, il y a plus d'un facteur trois entre la masse volumique prédite par les gaz parfaits et les deux autres équations d'état (viriel et Noble-Abel). L'écart entre Noble-Abel et le viriel est significatif également (autour de 30%). Le choix de l'équation d'état est donc crucial pour la prédiction de la masse volumique de l'écoulement. Pour une application à la balistique intérieure, il est primordial de décrire le plus fidèlement possible l'évolution de cette grandeur car elle pilote, entre autre, le mouvement du projectile, qui est poussé dans le tube par les gaz de combustion. Les valeurs de la masse volumique sont très élevées, ce qui s'explique par le fait que la pression autour de l'aile varie peu (voir figure 3) et que la température de l'aile est imposée à 300K alors que l'écoulement est à 2000K. La masse volumique n'a donc pas d'autre choix que de compenser ce grand écart sur la température.

Concernant l'évolution du transfert thermique, grandeur non directement influencée par l'équation d'état a priori, les valeurs convergées moyennes sur l'extrados de l'aile sont données dans la table 3 en fonction de l'équation d'état. Ces valeurs sont données pour une viscosité à 298K de l'air, donnée dans la table 1.

Equations d'états	**Transfert thermique**	**Unités**
Gaz parfaits	2,3 10^6	W
Noble-Abel	1,6 10^6	W
Viriel	1,4 10^6	W

TABLE 3 – Flux thermique intégré sur la surface de l'aile en fonction de l'équation d'état du gaz, pour une viscosité à 298 K

L'écart entre les équations de Noble-Abel et du viriel est relativement faible (moins de 15 %). En re-

vanche, les écarts entre les gaz parfaits et les deux autres équations d'états sont plus importants (autour de 50%). L'équation des gaz parfaits induit donc des écarts sur le transfert thermique par rapport aux autres équations d'état (Noble-Abel et le viriel).

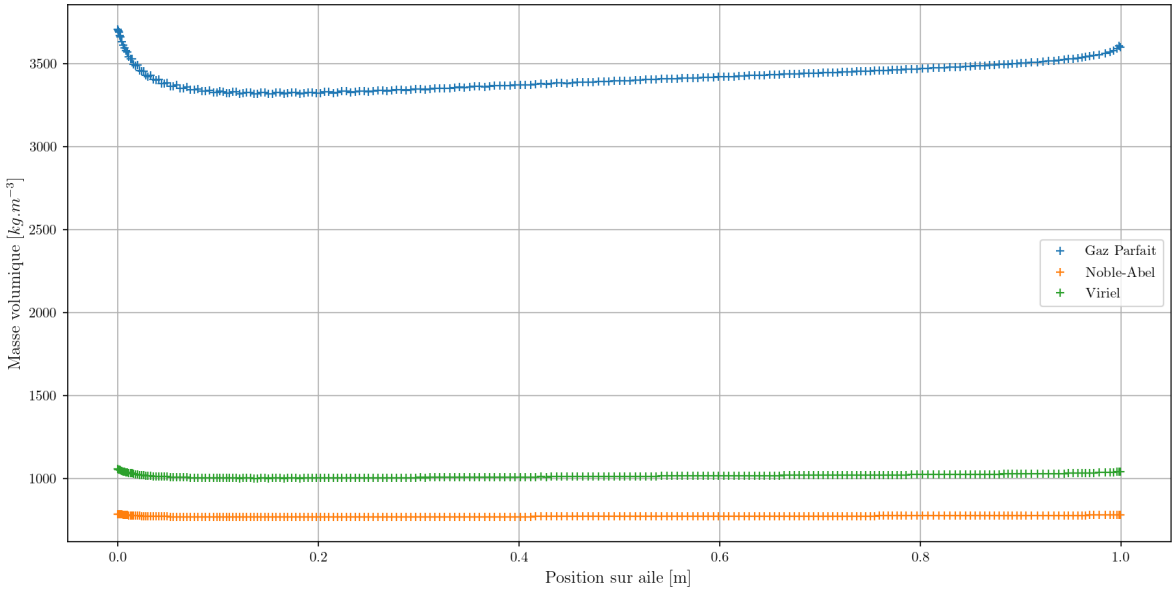

FIGURE 4 – Evolution de la masse volumique de l'écoulement (conditions initiales P=300 MPa, U=275 m/s, T=2000K) le long de d'aile pour différentes équations d'état (gaz parfaits GP, Noble-Abel NA et viriel V)

Pour un gaz dans de telles conditions de pression et température, il n'est pas recommandé d'utiliser l'équation d'état des gaz parfaits pour décrire le comportement thermodynamique des gaz, car les hypothèses liées à celle-ci ne sont plus respectées (absence d'interactions entre les molécules) et induisent des erreurs non seulement sur les grandeurs liées directement à l'équation d'état, comme la masse volumique ou la pression [5] [7], mais aussi sur le transfert thermique.

3.2 Viscosité à 2000 K

La viscosité est un paramètre dépendant notamment de la température, la valeur usuellement prise est calculée à 298 K. Or, les simulations sont faites à une température presque 10 fois plus élevée (2000 K). Des simulations complémentaires avec une viscosité à 2000 K ont donc été faites. La valeur de la viscosité à 2000K est issue de la littérature [3] (air sec).

Les masses volumiques des différentes équations d'état sont comparées entre les simulations avec une viscosité à 298K et celle à 2000K (figure 5). Les résultats montrent aucunes différences sur la masse volumique si la viscosité est changée, ce qui n'est pas surprenant car celle-ci est surtout pilotée par l'équation d'état. En revanche, la valeur de la viscosité cinématique va augmenter, car celle ci est égale au rapport viscosité dynamique sur masse volumique. Donc, une augmentation de la viscosité dynamique, tout en laissant la masse volumique constante, induit une augmentation de la viscosité cinématique. Or, celle-ci est responsable en partie du transfert thermique, ce qui implique une augmentation du transfert thermique.

Les transferts thermiques moyens sur l'aile ont été relevés en fonction de l'équation d'état implémentée,

table 4.

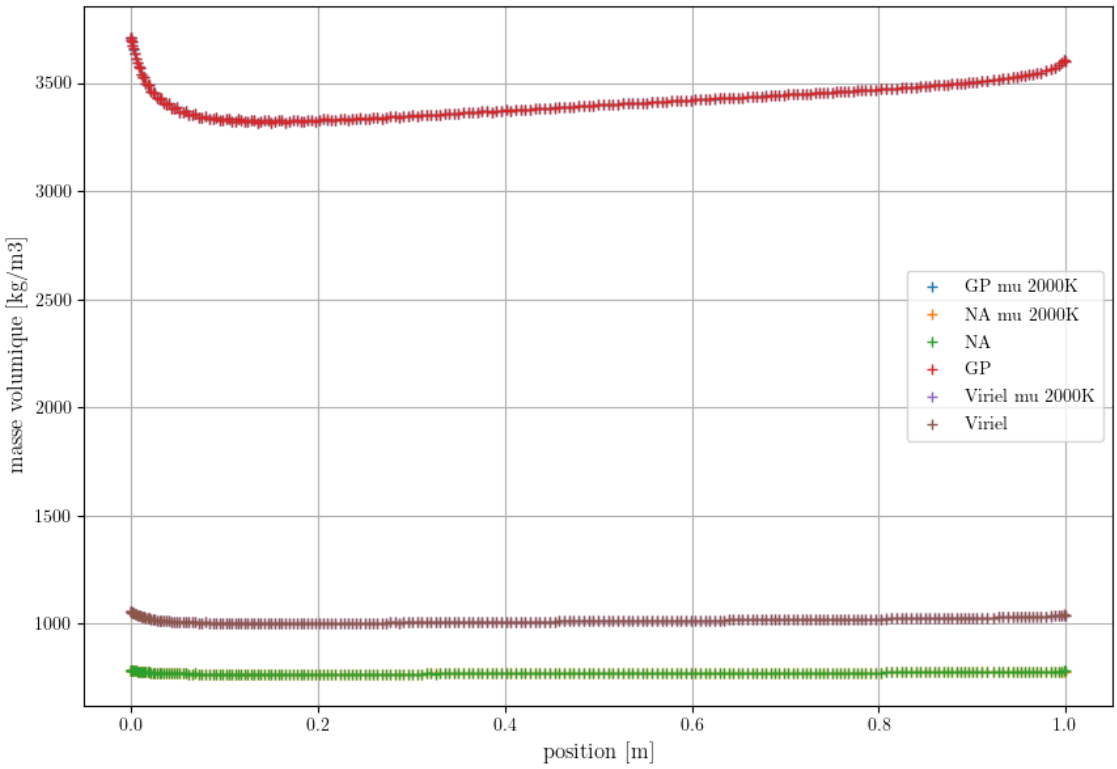

FIGURE 5 – Evolution de la masse volumique du fluide le long de d'aile pour différentes équations d'état (gaz parfaits GP, Noble-Abel NA et viriel) et pour différentes valeurs de la viscosité (298 K et 2000 K)

Les écarts entre l'équation des gaz parfaits et les deux autres sont d'environ 100%. Cet écart plus important que pour la viscosité à 298K souligne l'importance du choix de l'équation d'état, non seulement pour modéliser les grandeurs thermodynamiques mais également pour le transfert thermique. Il conviendra de noter cependant, que les valeurs constatées ne sont utilisées qu'à titre comparatif entre elles. De telles simulations ne peuvent pas se passer de validation expérimentale pour s'assurer que les valeurs de transferts thermiques données par le logiciel sont effectivement les bonnes.

Equations d'états	**Transfert thermique**	**Unités**
Gaz parfaits	1,0 10^7	W
Noble-Abel	5,7 10^6	W
Viriel	4,7 10^6	W

TABLE 4 – Flux thermique intégré sur la surface de l'aile en fonction de l'équation d'état du gaz et avec une viscosité à 2000 K

4 Conclusion

Le choix de l'équation d'état pour un problème de balistique intérieure conditionne la prédiction de l'évolution des grandeurs thermodynamiques (pression, température, masse volumique) et par extension le mouvement du projectile dans le tube (poussé par les gaz de combustion à haute pression et leur détente). Des simulations numériques ont été faites grâce au logiciel de volumes finis STARCCM+, avec

un écoulement proche de ceux rencontrés en balistique intérieure (haute pression, haute température) autour d'un profil épais symétrique. Le transfert thermique a été étudié pour différentes équations d'état (gaz parfaits, Noble-Abel et le viriel).

Ces travaux ont montré que l'équation d'état a aussi une influence sur le transfert thermique intégré sur l'aile, qui est un phénomène en partie piloté par les grandeurs thermodynamiques, mais pas uniquement. L'équation d'état influencerait donc également d'autres phénomènes non purement thermodynamiques.

Ce résultat souligne d'autant plus la nécessité de choisir l'équation d'état la plus adaptée, afin d'une part décrire le plus fidèlement possible le comportement thermodynamique des gaz et d'autre part modéliser correctement les transferts thermiques ayant lieu dans la chambre de combustion et dans le tube de l'arme.

5 Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Innovation Défense (AID) pour le financement des travaux (thèse CIFRE-Défense – AID/ANRT n° 2020862).

Références

[1] D. CARLUCCI & S. JACOBSON, Theory and Design of Guns and Ammunition, CRC Press, 2008.

[2] R. GERMERSHAUSEN et al, Handbook on Weaponry, Rheinmetall GmbH, 1982.

[3] J. HIRSCHFELDER et al, Molecular theory of liquids and gases, Wiley & Sons, 1964.

[4] A. GOODWIN et al, Applied Thermodynamics of fluids, Royal Society of Chemistry, 2010.

[5] M. BRATEAU et al, Evaluation of existing equations of state for the modelling of propellant combustion in interior ballistics. Proceedings of the 32nd International Symposium on Ballistics (Reno, USA, 2022), 2022.

[6] Siemens Industries Digital Software, Simcenter STAR-CCM+, User manual version 2021, Siemens 2021.

[7] S.Y WANG et al, Non ideal Equation of state for combusting and detonating explosives, Prog. Energ Combu Sc, Vol. 1 I., 1985, 311–331

[8] NATO Organization, STANAG 4367 : Definition and determination of ballistic properties of gun propellant, 1995.

[9] F. VOLK and H. BATHELT, Application of the virial Equation of state in calculating interior ballistics quantities, Propellants and Explosives 1 1976, 7–14.