

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté de génie  
Département de génie mécanique

# Développement d'un système d'actionnement utilisant la combustion d'une source d'énergie chimique pour la robotique mobile

Mémoire de Recherche  
Spécialité : Génie Mécanique

Alexandre BÉLANGER DESBIENS

Jury : Jean-Sébastien PLANTE (directeur)  
Patrice MASSON (co-directeur)  
Elijah VAN HOUTEN

Rapporteur : Alexis LUSSIER DESBIENS

Sherbrooke (Québec) Canada

Janvier 2016



# RÉSUMÉ

Les systèmes d'actionnement couramment utilisés sur les systèmes de robotiques mobiles tels que les exosquelettes ou les robots marcheurs sont majoritairement électriques. Les batteries couplées à des moteurs électriques souffrent toutefois d'une faible densité de stockage énergétique et une faible densité de puissance, ce qui limite l'autonomie de ces dispositifs pour une masse de système donnée.

Une étude comparative des systèmes d'actionnement potentiels a permis de déterminer que l'utilisation d'une source d'énergie chimique permettait d'obtenir une densité de stockage énergétique supérieure aux batteries. De plus, il a été déterminé que l'utilisation de la combustion directement dans un actionneur pneumatique souple permettrait d'obtenir une densité de puissance beaucoup plus élevée que celle des moteurs électriques.

La conception, la fabrication et la caractérisation de plusieurs types d'actionneurs pneumatiques pressurisés directement par la combustion d'une source d'énergie chimique ont permis d'évaluer la faisabilité de l'approche, dans un contexte de robotique mobile, plus précisément pour des tâches de locomotion. Les paramètres permettant d'obtenir une efficacité énergétique élevée ont été étudiés. Il a été démontré que le ratio de compression et le ratio d'expansion doivent être optimisés. De plus, comme les pertes thermiques sont le mécanisme de perte dominant, le ratio d'équivalence devrait être réduit au minimum. Parmi les carburants usuels, l'hydrogène permet d'atteindre les valeurs de ratio d'équivalence les plus faibles, ce qui en fait un choix de carburant idéal.

Les résultats expérimentaux ont été utilisés pour corréler un modèle analytique d'un actionneur pneumatique à combustion. Ce modèle analytique est par la suite utilisé pour vérifier la faisabilité théorique de l'utilisation de l'approche d'actionnement pour fournir la puissance à un dispositif d'assistance à la locomotion.

**Mots-clés** : actionneurs pneumatiques, combustion, hydrogène, efficacité énergétique, robotique mobile

# REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche Jean-Sébastien Plante et mon co-directeur Patrice Masson pour leur aide et leur motivation tout au long de mes stages et de ma maîtrise au sein du groupe CAMUS. Ils ont su me transmettre leur passion pour la recherche, cette passion qui a eu pour effet d'orienter mes objectifs de carrière. Je remercie aussi toute l'équipe du groupe CAMUS avec qui j'ai eu tant de plaisir à côtoyer à tous les jours de ma maîtrise.

# TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	i
REMERCIEMENTS .....	ii
LISTE DES FIGURES .....	v
LISTE DES TABLEAUX .....	vii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	8
1.1 Organisation du document.....	9
CHAPITRE 2 Robotique mobile.....	11
2.1 Stockage énergétique.....	11
2.2 Tâches de locomotion et de contrôle fin.....	13
2.3 Robotique mobile utilisant la combustion.....	13
2.3.1 Approche centralisée.....	14
2.3.2 Approche distribuée.....	15
2.3.3 Défis.....	16
CHAPITRE 3 ARTICLE.....	17
3.1 Avant-propos .....	17
3.2 Abstract.....	19
3.3 Introduction .....	20
3.4 Efficiency Based Design Principle.....	23
3.4.1 Ideal Cycle Analysis .....	23
3.4.2 Efficient Combustion System Design Principles.....	25
(1) Flame speed and reaction rates.....	25
(2) Quenching distance.....	26
(3) Heat transfer .....	26
(4) Residence time.....	27
(5) Sealing .....	27
(6) Emissions.....	27
3.5 Efficiency Oriented Mechanical Design.....	27
3.6 Experimental Setup .....	29
3.7 Experimental Characterization .....	32
3.8 Ragone Analysis.....	36
3.9 Discussion and Conclusion.....	38

CHAPITRE 4	MODÈLE ANALYTIQUE.....	40
4.1	Modèle du volume de contrôle.....	40
4.2	Modèle de la combustion.....	41
4.3	Modèle des pertes thermiques.....	41
4.4	Caractérisation expérimentale du modèle de combustion.....	42
CHAPITRE 5	ÉTUDE DE CAS – CHEVILLE.....	44
CHAPITRE 6	CONCLUSION.....	49
6.1	Sommaire.....	49
6.2	Recommandations.....	50
6.3	Perspectives.....	51
LISTE DES RÉFÉRENCES	.....	53

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 Analyse de ragone permettant d'évaluer le seuil d'efficacité requis .....	13
Figure 2 Direct actuation of a conceptual ankle assisting device.....	22
Figure 3 Constant volume ideal thermodynamic cycles.....	23
Figure 4 Efficiency evolution of Miller ideal cycle according to the ratio of expansion to compression ratios, for different compression ratio .....	25
Figure 5 Different types of pneumatic actuators .....	28
Figure 6 Side view of small bore and big bore actuators. ....	29
Figure 7 Experimental setup for pressure, position and force measurement.....	31
Figure 8 Pressure over volume for two different experimental combustion events.....	33
Figure 9 Overall experimental conversion efficiencies for the small bore actuator for different compression and equivalence ratios .....	34
Figure 10 Overall experimental conversion efficiencies for the big bore actuator for different compression and equivalence ratios. ....	34
Figure 11 Overall experimental conversion efficiencies of small bore and big bore at variable load .....	35
Figure 12 Peak power variation for small bore and big bore at compression ratios of 3.65 and 4.15 against different equivalence ratios .....	36
Figure 13 Ragone plot of state-of-the-art robotic power systems. ....	37
Figure 14 Comparaison entre les données expérimentales et les données de simulation de signaux de pression par rapport au temps, de volume par rapport au temps et de la pression par rapport au volume.....	43
Figure 15 Comparaison entre le signal de puissance requis à la cheville durant la marche (rouge) et le signal de puissance obtenu expérimentalement.....	44
Figure 16 Image artistique d'un dispositif d'assistance à la locomotion .....	45
Figure 17 Schéma des étapes de l'algorithme utilisé pour dimensionner la chambre de combustion requise pour l'actionnement à la cheville .....	46
Figure 18 Comparaison entre le couple provenant des données de la littérature et la simulation .....	46
Figure 19 Comparaison entre la puissance provenant des données de la littérature et la simulation .....	47
Figure 20 Mécanisme de bras de levier variable en fonction de la position de l'actionneur ....	47





## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Sources d'énergie incluant ou non la masse du réservoir.....	12
Tableau 2 Paramètre du modèle analytique.....	43
Tableau 3 Caractéristiques physiques de l'actionneur dimensionné avec le modèle et des deux actionneurs testés expérimentalement .....	48

# CHAPITRE 1 INTRODUCTION

La robotique mobile comprend tous les systèmes de robotique pour lesquels la source d'énergie où la manière d'obtenir de l'énergie fait partie de la masse du système. Parmi les exemples les plus courants de système de robotique mobile se trouvent les robots marcheurs, les drones, les dispositifs d'assistance à la marche, etc. L'échelle de grandeur de puissance d'intérêt se situe en entre 10 et 1000 W, aussi nommée l'échelle méso. L'autonomie requise se situe entre 1 et 10 heures.

Un système d'actionnement comprend la source d'énergie, les différents transformateurs d'énergie ainsi que les actionneurs. Beaucoup de dispositifs de robotique mobile utilisent un système de puissance totalement électrique. Le faible coût et l'excellente contrôlabilité expliquent la forte utilisation des systèmes électriques. Par contre, le faible stockage énergétique des batteries ainsi que la faible densité de puissance des actionneurs électriques réduisent les performances en termes d'autonomie et de masse pour les puissances et les autonomies requises.

Une des façons d'augmenter la densité de stockage énergétique consiste en l'utilisation de la combustion d'une source d'énergie chimique avec l'air ambiant. De plus, lorsque la combustion est faite directement à l'intérieur d'un actionneur pneumatique, un travail mécanique peut être directement extrait de l'actionneur et appliqué à un joint robotique. Ce système a le potentiel d'atteindre une densité de puissance élevée étant donné qu'aucune conversion intermédiaire de l'énergie n'est requise.

Le présent rapport concerne l'étude et le développement d'actionneurs pneumatiques pressurisés directement par la combustion d'une source d'énergie chimique, dans un contexte de robotique mobile.

## 1.1 Organisation du document

Ce présent rapport contient 6 chapitres :

- Chapitre 1 Le chapitre 1 est une introduction à la problématique couverte dans ce rapport.
- Chapitre 2 Le chapitre 2 fera l'état de l'art des différentes approches possibles pour l'utilisation de la combustion en robotique mobile.
- Chapitre 3 Le chapitre 3 consiste en un article de journal scientifique soumis à l'*IEEE/ASME Transaction on Mechatronics* expliquant le développement et la caractérisation expérimentale d'un actionneur pneumatique utilisant la combustion d'une source d'énergie chimique.
- Chapitre 4 Le chapitre 4 concerne le développement et la corrélation expérimentale d'un modèle analytique d'un actionneur pneumatique utilisant la combustion.
- Chapitre 5 Le chapitre 5 présente l'étude de faisabilité de l'utilisation d'un actionneur pneumatique utilisant la combustion pour une application de robotique mobile.
- Chapitre 6 Le chapitre 6 est une conclusion au rapport, faisant le compte-rendu des conclusions tirées dans les différents chapitres.



## CHAPITRE 2 Robotique mobile

Les systèmes de robotique mobile tels que les robots marcheurs ou les exosquelettes sont de plus en plus utilisés afin d'aider les humains à effectuer des tâches qui seraient autrement impossibles. Les performances de ces systèmes en termes de masse et d'autonomie dépendent du type de système d'actionnement utilisé.

La plupart des systèmes actuels sont électriques, ce qui limite leurs performances en termes de masse et d'autonomie. Par exemple, Le *Hercule*, de la compagnie française *RB3D*, utilise un système d'actionnement électrique, pèse 30 kg et a une puissance maximale de 600 W [1]. L'exosquelette pour la cheville développée par le *Biomechatronics Group* du *MIT* [2] pèse 3.9 kg et peut fournir une puissance de 23 W pendant 1.7 heures. La première raison est la faible densité de puissance causée par le couplage entre les moteurs électriques et les réducteurs mécaniques afin d'atteindre les couples et la dynamiques requis. La deuxième raison est la faible densité de stockage énergétique des batteries électriques.

### 2.1 Stockage énergétique

La densité de stockage énergétique représente la quantité d'énergie disponible par unité de masse de carburant. Un paramètre  $\beta$  est aussi utilisé afin de considérer la masse non négligeable de la technologie de stockage requise par certains carburants. Le paramètre  $\beta$  représente la masse de carburant par masse de réservoir requis. Les carburants chimiques (hydrocarbure, méthane, hydrogène, etc.) sont considérés comme étant oxydés avec l'air ambiant, autrement leur densité de stockage énergétique serait drastiquement réduite. Le tableau suivant énumère différentes sources d'énergie chimique et leur densité de stockage énergétique incluant la masse de la technologie de stockage requise.

Tableau 1 Sources d'énergie incluant ou non la masse du réservoir [3,4]

Sources d'énergie	Densité de stockage énergétique sans réservoir [MJ/kg]	Densité de stockage énergétique avec réservoir [MJ/kg]	( $\beta$ )
<b>Chimique</b>			
<i>Hydrocarbures</i>			
Hydrogène (CH <sub>2</sub> )	120	7	(0.058)
Hydrogène (LH <sub>2</sub> )	120	12	(0.1)
Méthane (CH <sub>4</sub> )	55.0	15	(0.38)
Essence (C <sub>n</sub> H <sub>1.87n</sub> )	44.0	34	(3.6)
Méthanol (CH <sub>4</sub> O)	20.0	16	(3.6)
<i>Monopropulsifs</i>			
Peroxyde d'hydrogène (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -[70%])	0.4	0.3	(3.6)
<b>Électrochimique</b>			
Lithium polymère (LiPo)	0.7	-	

L'utilisation d'une source d'énergie chimique permet d'augmenter la densité de stockage énergétique comparativement aux systèmes électriques d'un facteur allant jusqu'à 170 fois (pour l'hydrogène) sans considérer la masse du réservoir et jusqu'à près de 50 fois (pour l'essence) considérant la masse du réservoir. Par contre, une efficacité minimale doit être atteinte afin d'obtenir des performances supérieures aux systèmes électriques.

L'analyse graphique de Ragone permet de tracer la puissance spécifique (axe y) en fonction de l'énergie spécifique (axe x) d'un système de puissance sur une vaste plage d'autonomie. Une simple analyse de Ragone comparant un système électrique typique à un système d'actionneur pneumatique utilisant la combustion permet d'évaluer ce seuil d'efficacité, voir la Figure 1. La puissance spécifique est approximée comme étant constante pour les deux systèmes. Le système à combustion utilise un stockage d'hydrogène comprimé, ce qui est le moins avantageux. Un seuil approximatif d'efficacité de 7% est requis pour qu'un système d'actionneur pneumatique utilisant la combustion surpasse les performances d'un système électrique.

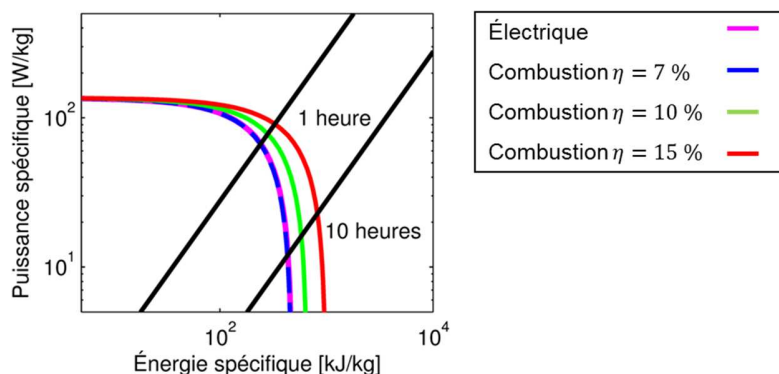


Figure 1 Analyse de ragone permettant d'évaluer le seuil d'efficacité requis

## 2.2 Tâches de locomotion et de contrôle fin

Il est possible d'associer, de manière générale, deux types de tâches à la robotique mobile. Le premier type étant les tâches de contrôle fin et l'autre étant les tâches de locomotion. Les tâches de contrôle fin, comme un robot humanoïde tenant en équilibre ou une prothèse de main empoignant un objet, sont associées à une demande en puissance relativement faible compte tenu de la dynamique lente. De plus, ces tâches nécessitent un système d'actionnement permettant un contrôle rapide et précis.

Les tâches de locomotion, comme la marche, la course ou le saut, sont quant à elles associées à une demande élevée de puissance due aux forces élevées requises couplées à une dynamique rapide.

Afin de réduire la masse et d'augmenter l'autonomie de certains dispositifs de robotique mobile, il est donc cohérent de vouloir optimiser un système d'actionnement pour les tâches de locomotion étant donné qu'elles nécessitent en général un niveau de puissance plus élevée.

## 2.3 Robotique mobile utilisant la combustion

Il y a deux approches générales afin d'utiliser la combustion d'une source d'énergie chimique dans un contexte de robotique mobile. La première étant l'approche centralisée et la deuxième l'approche distribuée.

L'approche centralisée consiste à transformer l'énergie chimique de façon continue afin d'accumuler une certaine énergie mécanique (accumulateur pneumatique ou hydraulique, roue d'inertie) ou chimique (batterie, capacitance) pour ensuite distribuer cette énergie accumulée.

L'approche distribuée, quant à elle, consiste à transformer l'énergie chimique directement en énergie mécanique utilisable au joint robotique à actionner.

### 2.3.1 Approche centralisée

Tel que mentionné, l'approche centralisée consiste à transformer l'énergie chimique dans un premier transformateur d'énergie qui est relié à un accumulateur. L'énergie accumulée dans l'accumulateur peut par la suite être redistribuée dans les actionneurs.

L'utilisation d'une pile à combustion permet de transformer l'énergie chimique d'un carburant en énergie électrique, qui peut être stockée dans une batterie. Par contre, les piles à combustible sont limitées par une densité de puissance de l'ordre de 50 à 250W/kg, sans compter la masse de l'accumulateur (batterie). Les piles à combustible disponibles sur le marché atteignent une densité de stockage 2.52 MJ/kg pour une autonomie de 8 heures [5]. La sensibilité à la température ambiante, à l'humidité et aux variations de puissance des piles à combustible peut expliquer leur faible utilisation en robotique[4,5].

Les moteurs à combustion à l'échelle méso possèdent une densité de puissance de l'ordre de 1600 W/kg. Par contre, leur efficacité de conversion de l'énergie chimique à mécanique est située entre 5 et 15% [7],[8], ce qui est plus faible que les moteurs de l'industrie automobile due au fait que les pertes par transfert thermique sont amplifiées lorsque les dimensions du moteur diminuent [9]. Les désavantages majeurs des moteurs à combustion sont leur besoin d'être opérés en continu, les émissions toxiques et les émissions sonores. Il est possible de coupler une pompe hydraulique, un compresseur pneumatique ou un alternateur électrique. Par contre ces transformateurs d'énergie doivent être opérés à un certain régime permanent afin d'atteindre une efficacité optimale. Étant donné les variations de puissances requises aux actionneurs, un accumulateur est assurément requis, ce qui augmente la masse du système. De plus le potentiel de disparité entre la puissance fournie à l'accumulateur et celle requise aux actionneurs peut résulter en des pertes énergétiques.



---

Une façon de produire de l'énergie pneumatique ou hydraulique de façon à fournir la puissance requise quasi sur demande est d'utiliser une pompe ou un compresseur à piston libre. Le concept consiste à coupler directement le piston de la chambre de combustion avec le piston d'une pompe ou d'un compresseur. Un premier avantage de cette technologie est qu'elle possède peu de pièces mobiles. De plus, comme le piston fournissant la puissance n'est pas dépendant du mouvement d'une roue d'inertie, comme dans un moteur, les produits de combustion peuvent être détendus complètement, résultant en une meilleure efficacité, une température inférieure de produit de combustion et un niveau sonore réduit. Une efficacité de conversion d'énergie chimique à hydraulique de 1.2% a été obtenue pour une pompe à piston libre utilisant du peroxyde d'hydrogène comme carburant [10]. Un compresseur à piston libre a atteint des efficacités entre 3.5 et 6.6%, ce qui est plus élevé que pour la version hydraulique, principalement dues à une meilleure correspondance des impédances des produits de combustion et du gaz à pomper [11].

Le concept de pressuriser un réservoir central directement grâce à la décomposition de peroxyde d'hydrogène en  $O_2$  et en vapeur d'eau sous haute température a démontré une efficacité de conversion d'énergie chimique en énergie pneumatique de 3.3% [12].

### 2.3.2 Approche distribuée

L'approche distribuée permet d'éviter les multiples étapes de conversion d'énergie en utilisant les produits de combustion sous haute pression pour effectuer directement un travail sur un joint mécanique, en utilisant un actionneur pneumatique comme chambre de combustion par exemple. En comparaison, l'efficacité de conversion de mécanique à énergie hydraulique dans la pompe et hydraulique à mécanique via les valves et les actionneurs est de 64% [13].

L'actionnement direct utilisant la combustion de butane et d'oxygène pure provenant de la décomposition de peroxyde d'hydrogène a été étudié afin de démontrer de nouvelles façons d'effectuer des déplacements rapides de robots via des sauts. Par contre, ces travaux ne visaient pas l'atteinte d'efficacité élevée (0.8%) [14].

L'approche distribuée, contrairement à l'approche centralisée, ne fournit pas une source d'énergie facilement contrôlable. La sortie de force s'apparente plutôt à des impulsions, ce qui correspond plutôt aux requis des tâches de locomotion.

### 2.3.3 Défis

L'utilisation d'une source d'énergie chimique est un moyen de réduire la masse et d'augmenter l'autonomie des systèmes de robotique mobile à l'échelle méso. De plus, nous croyons que ce genre de système conviendrait particulièrement pour les requis des tâches de locomotion étant donné qu'elles nécessitent le plus de puissance.

Parmi les deux approches présentées pour l'utilisation d'une source d'énergie chimique, l'approche centralisée a l'avantage d'être facilement contrôlable, au détriment de son efficacité. Le signal de puissance pouvant être produit par l'approche distribuée correspond davantage aux requis des tâches de locomotion. Cette similitude est démontrée au CHAPITRE 5.

Les phénomènes de perte de masse et de perte thermique, qui sont déjà plus prononcés lorsque l'échelle de grandeur diminue, seront davantage présents dans un contexte de robotique mobile appliqué à des tâches de locomotion dues à la dynamique relativement lente, comparée au moteur à combustion. Le chapitre suivant permet de mieux comprendre les mécanismes de perte et les paramètres à optimiser afin d'atteindre un niveau d'efficacité suffisamment élevé pour surpasser les performances des systèmes d'actionnement électrique.

## CHAPITRE 3      ARTICLE

### 3.1 Avant-propos

**Auteurs et affiliation :**

Alexandre Bélanger Desbiens : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique.

Jean-Sébastien Plante : professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique.

Patrice Masson : professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique.

**Date de soumission :** 12 janvier 2016

**Revue :** IEEE/ASME Transaction on Mechatronics

**Titre français :** Développement et Caractérisation Expérimentale d'un Actionneur Utilisant la Combustion pour la Robotique Mobile

**Contribution au document :**

Cet article étudie l'utilisation d'un actionneur pneumatique pressurisé grâce à la combustion. Les principes physiques associés à l'utilisation de la combustion dans un contexte de robotique mobile y sont exposés. L'article fait aussi état de la caractérisation expérimentale de deux actionneurs différents. Grâce aux résultats expérimentaux, le concept proposé est finalement comparé aux systèmes d'actionnement utilisés présentement en robotique mobile.

**Résumé français :**

Les dispositifs de robotique mobile à l'échelle méso (10 à 1000 W), tels que les exosquelettes ou les robots marcheurs, requièrent des systèmes d'actionnement ayant une puissance spécifique ainsi qu'une énergie spécifique élevée. L'utilisation d'un actionneur pneumatique pressurisé directement par la combustion d'une source d'énergie chimique est un concept prometteur afin de surpasser les performances des systèmes électriques, notamment pour les tâches de locomotion. Par contre, un minimum d'efficacité, autour de 7 %, est requis afin que l'approche soit pertinente.

L'article présente la conception et la caractérisation expérimentale d'un actionneur hautement efficace utilisant la combustion d'une source d'énergie chimique. Les principes physiques permettant d'atteindre une efficacité élevée sont d'abord exposés. Par la suite, l'effet du ratio de compression et du ratio d'équivalence est caractérisé expérimentalement afin de déterminer leurs impacts sur l'efficacité de conversion de l'énergie chimique à mécanique.

Il est démontré que le mécanisme de pertes thermiques est le plus dominant. Une façon de réduire l'impact des pertes thermiques est par l'utilisation de l'hydrogène comme carburant dû à ces capacités à brûler de façon pauvre, ce qui limite la température des produits de combustion. L'efficacité maximale de 28% a été obtenue à un ratio de compression de 4.15 et à un ratio d'équivalence de 0.3. Ces valeurs d'efficacité sont supérieures aux valeurs normalement atteintes par les moteurs à combustion interne de même puissance (5 à 15%). Une analyse de Rague est finalement utilisée afin de comparer l'approche présentée aux systèmes d'actionnement couramment utilisés en robotique mobile.

**Note :** Cet article est présentement en période d'évaluation

## 3.2 Abstract

Meso-scale power systems (10 W to 1000 W) with high energy densities are needed to power untethered mobile robots and human assisting devices such as exoskeletons over long missions. Combustion driven actuators are a promising solution for such applications by combining high power density of fluidic actuators and high energy density chemical fuels. However, achieving high fuel-to-mechanical energy conversion efficiency is critical for combustion systems to be relevant alternatives to lithium-based electrical systems.

This paper presents the design and experimental characterization of an air-breathing combustion-driven direct-acting actuator intended for high energy conversion efficiency. First, efficiency-oriented design principles are derived from internal combustion engine theory. An ideal-cycle thermodynamic model of a generic constant volume combustion system suggests that compression ratio and expansion/compression ratio should both be maximized. The practical effects of heat, mass and friction losses as well as fuel choice in the context of a small-scale combustion chamber are discussed. Second, an experimental characterization is made to map the impact of compression ratio and equivalence ratio on overall energy conversion efficiency. Compression ratio and equivalence ratio are varied experimentally to evaluate their effect on efficiency.

Experimental results on proof-of-concept prototypes demonstrate potential for a chemical-to-mechanical energy conversion efficiency of 28% at a compression ratio of 4.15 and equivalence ratio of 0.3. Such efficiency levels are promising since meso-scale combustion-driven power systems are generally in the 5-15% range. Design guidelines are drawn and show that the dominant physical mechanism responsible for the observed high-efficiency is lean-burn operation enabled by the wide flammability limit of hydrogen as fuel that limits the effect of heat losses through low combustion temperatures.

Finally, Ragone analysis of relevant meso-scale power systems for mobile robotic suggest that, with proper optimization and system integration, combustion driven power systems can become a viable solution for lightweight and long range meso-scale robotic applications.

### 3.3 Introduction

Meso-scale mobile robotic power systems are characterized by an output power between 10 and 1000 W and sizes of few centimeters. A typical application of such power system is for assisting exoskeleton devices that allows walking of disabled people or to enhance performance of healthy people, as well as in mobile robots.

Electric power systems are the reference in robotic mobility due to their high controllability, low cost and availability at all scales. Electric motors alone can exhibit high efficiency and power density up to 3000 W/kg. However, matching the impedance of an electric motor to a to a human like load, in terms of dynamic and kinetic, with a gearbox drastically lowers the power density of electric systems to about 220 W/kg [15]. Another critical drawback of electric systems is that battery's energy storage is around 0.7 MJ/kg [16], which is an order of magnitude lower than chemical fuels making electric systems less favorable for long range missions [4].

Fuel cells are an interesting way to overcome the limitations of electric battery storage. State-of-the-art commercially available meso-scale fuel cell systems reach energetic density of 2.52 MJ/kg [5]. However, fuel cells exhibit low power density, ranging from 50 to 250 W/kg depending on power output. Limited utilization of fuel cell in mobile robotic can also be due to short life time caused by sensitivity to ambient temperature, humidity and power demand variations [4,5].

Meso-scale spark-ignited piston engines have a high power density in the order of 1600 W/kg but their efficiency is lower than automotive engines since heat losses are accentuated by higher surface-to-volume ratio [9]. Chemical-to-mechanical conversion efficiency can range between 5 to 15% [7,8]. The major drawbacks of combustion engines are the need to run at least at idle speed, toxic emissions and noise. Combustion engine can be used to drive hydraulic pumps, air compressors or electric generators to distribute and regulate motive energy. Generally, to reach good efficiency, those last energy converters must run at a preset constant speed, which imposes important losses under variable load operation due to load dependent loss mechanism such as pumping losses. Hence the need for an accumulator (hydraulic accumulator, battery or pneumatic tank) which further adds mass and complexity.

The concept of a free piston hydraulic pump or compressor consists of pumping the working fluid with the same piston assembly as the power piston. Other than having few parts, the key

---

advantage of free-piston devices is that they allow the combustion products to be expanded more than they are compressed thus providing a quieter and more efficient operation. Efficiency in the order of 1.2% has been reached for a monopropellant powered free piston hydraulic pump [10]. For incompressible fluid pumping, the impedance mismatch between the high pressure combustion products and the hydraulic pump is the major cause of low efficiency [17].

A free liquid-piston compressor has reached chemical-to-compressed air efficiency between 3.45% and 6.63%, mainly because of a better impedance match between high pressure combustion products and compressible fluid [11].

Monopropellant decomposition of hydrogen peroxide into high temperature O<sub>2</sub> and steam has been used to pressurize a central reservoir. The pressurized gases could then be used to drive pneumatic actuator. A chemical-to-mechanical conversion efficiency of 3.3% was reached [12]. A distributed approach was also tested that consists to decompose hydrogen peroxide directly in a pneumatic actuator. This “direct-acting” approach offers the advantage of match exactly the power needed at the end effector and to eliminate losses in power transmission lines such as pumps, valves and lines. However, pneumatic actuation has a maximum intrinsic efficiency of about 50 % due to the large amount of energy lost in compressed air exhausted to the atmosphere. Moreover, hydrogen peroxide is limited at energy density of about 0.4 MJ/kg for practicable concentration (70%) [18].

Similarly to monopropellants, energy density is drastically reduced for any non-air-breathing system that must carry an oxidizer along with the fuel. For example, hydrocarbon fuels with on-board oxygen have energy density reduced down from ~40-50MJ/kg to ~10MJ/kg. Air-breathing is a central concept for optimal specific energy since high calorific value fuels such as hydrocarbons can be oxidized with available atmospheric oxygen.

Direct-acting, air-breathing, combustion-driven actuators imply that a combustible air-fuel mixture is reacted directly in an expander that is cinematically coupled to the system under control, for example, in the chambers of the pneumatic cylinder of an ankle assisting device such as shown in Figure 2 . Direct acting but non air-breathing combustion driven actuators have been explored for a soft untethered robot capable of jumping for rapid locomotion as well as crawling with pneumatic actuators. However this work aimed at demonstrating novel locomotion tasks, not achieving high conversion efficiency (0.8%) [14].

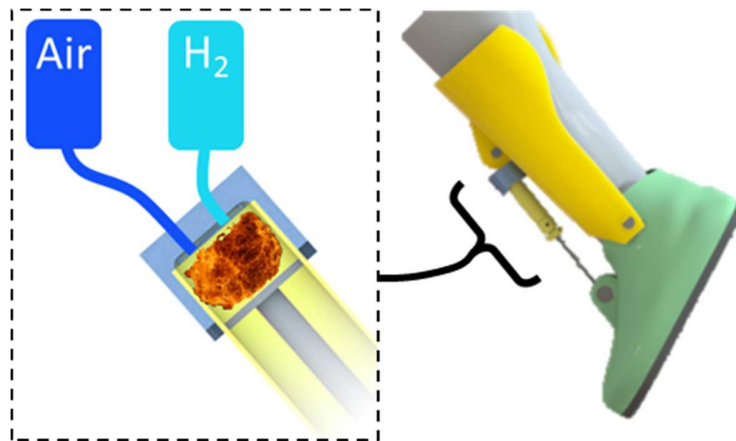


Figure 2 Direct actuation of a conceptual ankle assisting device

Achieving high energy conversion efficiencies with direct-acting combustion systems is challenging because the relatively slow dynamics of the system under control (e.g. a human) is imposed to the combustion system thereby aggravating heat and mass losses.

This paper presents the efficiency-based design of a combustion driven actuator intended to operate with the dynamics or timescales of direct-acting meso-scale applications.

Section I presents design principles derived from combustion theory including an ideal cycle thermodynamic model and a discussion on the practical effects of heat, mass and friction losses and fuel choice in small scale combustion chamber. Section II presents the experimental setup and results of the experimental characterization of two actuator prototypes. Compression ratio and equivalence ratio are varied over a wide range and mechanical energy conversion is measured using hydrogen as fuel. Finally, a Ragone analysis compares performance of the actuation concept with other state-of-the-art power systems in section 3.8.



## 3.4 Efficiency Based Design Principle

### 3.4.1 Ideal Cycle Analysis

The thermodynamic process of a combustion driven actuator is modeled here by a constant volume ideal cycle. Constant pressure cycles are not considered because of two reasons: (1) for a same peak pressure, they are less efficient due to lack of expansion after combustion, and (2) high-pressure direct-injection fuel control of constant pressure cycles is seen as less practical at meso-scale compared to simple homogeneous charge used in constant volume cycles. Figure 3 shows a pressure against volume diagram of the basic Otto cycle and its Miller and Atkinson variants.

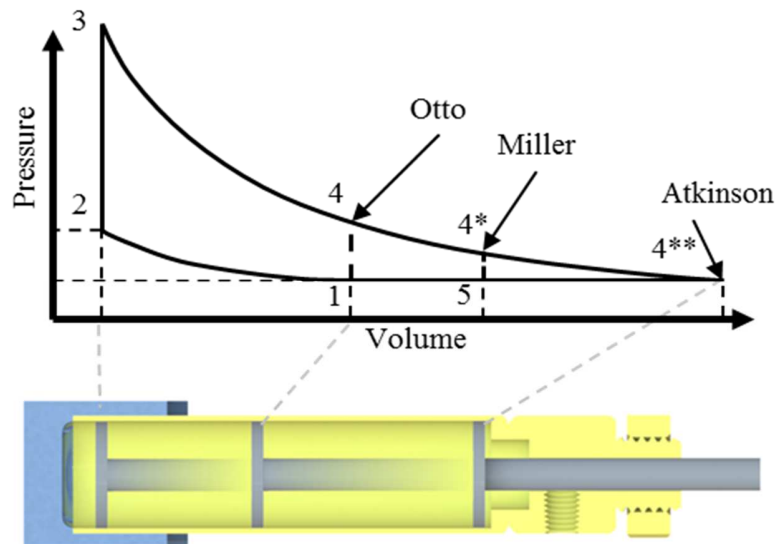


Figure 3 Constant volume ideal thermodynamic cycles

The Miller cycle is the most general constant volume cycle where the expansion ratio is higher than compression ratio allowing improved efficiency. Expansion ratio ( $r_e$ ), compression ratio ( $r_c$ ) and the ratio of both ( $r$ ) are respectively defined by [19]:

$$r_e = \frac{V_4}{V_3} \quad , \quad r_c = \frac{V_1}{V_2} \quad , \quad r = \frac{r_e}{r_c} \quad (1),(2),(3)$$

The efficiency of the Miller cycle is given by [19] :

$$\eta_i = 1 - \frac{1}{(rr_c)^{\gamma-1}} \left\{ 1 + \frac{c_v T_1}{Q^*} r_c^{\gamma-1} [1 - \gamma r^{\gamma-1} + (\gamma-1)r^\gamma] \right\} \quad (4)$$

Where the specific charge  $Q^*$  is the amount of chemical energy admitted per mass of fuel and air mixture:

$$Q^* = \left( \frac{1}{1 + AF_s/\varphi} \right) Q_{LHV} \quad (5)$$

And in turn, where the equivalence ratio ( $\varphi$ ) quantifies how much excess air is present in the combustion reaction and is defined by the ratio of the stoichiometric air to fuel ( $AF_s$ ) to the actual air to fuel ( $AF_a$ ) ratio:

$$\varphi = \frac{AF_s}{AF_a} \quad (6)$$

The Otto cycle is a special case of the Miller cycle where  $r_e = r_c$ . The Atkinson cycle is another one where combustion products are fully expanded down to atmospheric pressure, thus extracting maximal mechanical energy. For those three cycles, the main driver to reach high efficiency is a high compression ratio. Figure 4 shows the efficiency of Miller cycle according to the ratio of expansion to compression ratio, for typical compression ratios.

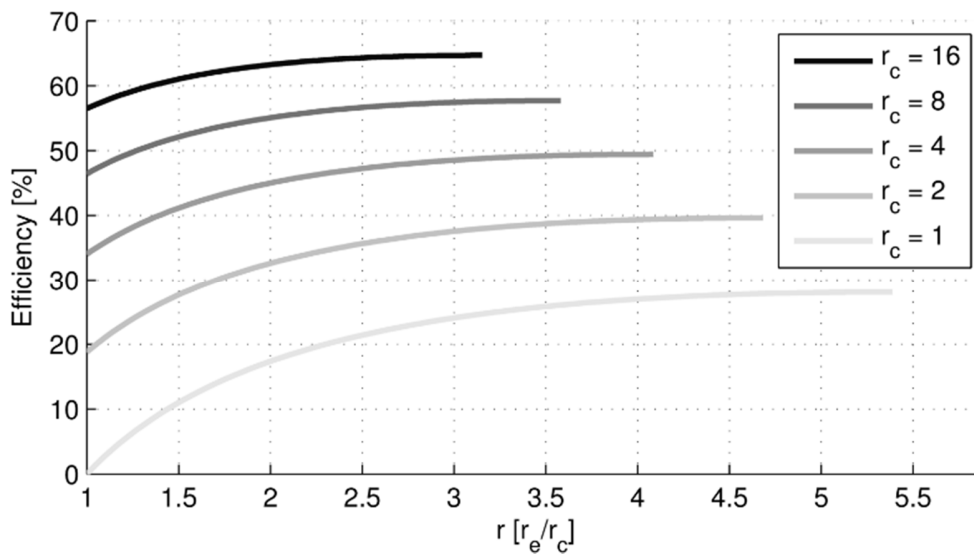


Figure 4 Efficiency evolution of Miller ideal cycle according to the ratio of expansion to compression ratios, for different compression ratio

Figure 4 shows that overexpanding combustion products ( $r > 1$ ) helps reaching higher efficiencies compared to Otto cycle. If the actuator uses no compression ( $r_c = 1$ ), then the maximum theoretical thermodynamic efficiency is 28%. The figure also shows the strong effect of compression ratio on efficiency. A compression ratio of only 2 brings efficiency to 40%. The figure shows that overexpanding has a major positive impact on efficiency at low compression ratio ( $r_c < 4$ ). Overexpanding is not only more efficient, but has lower exhaust gas temperature and pressure resulting in a quieter and safer device for near human interaction.

### 3.4.2 Efficient Combustion System Design Principles

#### (1) Flame speed and reaction rates

The flame speed of a fuel is directly correlated to its reaction rate. Both flame speed and reaction rates should be as fast as possible to be as close as possible to constant volume combustion which maximizes gas expansion work and thus efficiency. Lighter gaseous fuels generally have a higher flame speed, hydrogen having the highest, about 10X faster than methane and other hydrocarbons [20].

## (2) Quenching distance

Small-scale combustion efficiency is largely affected by the surface-to-volume ratio of the combustion chamber. Higher surface-to-volume ratio will cause more flame quenching because of the cold combustion chamber walls that act as heat sinks. The quenching distance is the minimal gap in which a flame can propagate. When quenching occurs, a portion of fuel and air mixture is left unburned which decreases combustion efficiency. Particular attention must be paid at the meso-scale because the dimensions of the combustion chamber are just a few times the average quenching distances of hydrocarbon fuels (~1-3 mm). Hydrogen has the lowest quenching distance of all fuels at 0.6 mm [21]. The quenching distance increases when equivalence ratio is decreased. Using fuels with small quenching distance and minimizing combustion chamber surface area are key drivers for high efficiency at small scale.

## (3) Heat transfer

Combustion systems have two main wall heat transfer modes, both driven by convective heat transfer. The first mode is *transient* as a burst of hot gas following combustion will reach chamber walls, inducing a rapid jump in temperature at the wall. The hot gases are then expanded rapidly which reduce their temperature. The second mode is *quasi-steady state* operation which is characterized by an increase in temperature in the walls caused by repeated actuator firing until steady state conditions are reached. The speed at which steady state conditions are reached depends on the frequency of actuation, the heat transfer magnitude and on the thermal resistance of the combustion chamber walls.

Convection heat transfer is governed by four quantities: area, convection coefficient, temperature difference between combustion products and wall, and finally the hot gases residence time. Of these, the two that can influence design are: (1) area must be reduced by using geometries that have the lowest surface-to-volume ratios such as a sphere; (2) reducing combustion products temperature can be done by introducing inert gases, exhaust products, or extra-air that does not participate to the chemical reaction and act as a thermal heat sinks. Lean homogeneous operation is a practical way of introducing extra-air, provided that the fuel lower flammability limit is sufficiently low to burn adequately. The best common hydrocarbon fuel for homogeneous lean operation is methane and has a lean flammability limit at an equivalence ratio of ~0.6 while hydrogen is at an equivalence ratio of ~0.3 [18].

#### (4) Residence time

Residence time will depend on the desired dynamics of the system on which the actuator is connected. The quicker the combustion products are expanded, the less time there is to transfer thermal energy to the colder combustion chamber. The same trend follows for pressure as less mass loss will occur if combustion products are expanded quickly.

#### (5) Sealing

As scale goes down, crevices size and sealing interfaces become more significant. The high pressure difference between combustion products and environment necessitate a good sealing in order to limit mass loss through the small orifices. Leakage also has an impact on the pressure magnitude reached prior to combustion. For a conventional piston sliding in a cylinder, there is a trade-off between having a good seal that generates more friction or a weak seal without friction. Friction effects also become more important as scale is decreased due to the increasing contact area compared to volume.

#### (6) Emissions

Toxic components can result from combustion. Reaching low combustion temperatures helps reducing the formation of toxic component such as  $\text{NO}_x$  and CO. At low temperature, so at low equivalence ratio, hydrogen combustion results only in steam and excess air.

In all, lean homogeneous-charge operation using hydrogen as fuel appears as the best combustion system approach to minimize losses at meso-scale due to fast reaction rate maximizing expansion work, high completeness of reaction due to low quenching distance, low heat transfer losses due to low charge temperature (lean operation), low leakage due to low peak pressure (lean operation), and no toxic emissions.

### 3.5 Efficiency Oriented Mechanical Design

Figure 5 shows possible mechanical constructions for combusting actuators: (A) soft air-muscles, (B) McKibben, (C) rolling diaphragms and (D) rigid cylinder.

Soft pneumatic air-muscles (A) are interesting due to their compliant structure which makes them ideal for safe human interaction tasks. However, this compliance brings an unwanted effect as it allows *radial* expansion after combustion which reduces the effective *axial* output work.

McKibben actuators (B) consist of an inflatable bladder inside a non-extensible mesh which transfers radial deformation into tensile axial work. The major drawbacks of the McKibben actuator are its large dead volume, which limits its expansion ratio and its non-linear force behavior depending on position, which adds-up to the already non-linear pressure trace of expanding gases.

A first retained configuration uses a deformable rolling diaphragm (C), which is selected for its optimal sealing and low friction motion. The major drawbacks of rolling diaphragm seals are the combustion chamber geometry which results in a high surface-to-volume ratio that is 4 times that of a cylindrical combustion chamber (e.g. air cylinder). The rolling diaphragm design also has a limited expansion ratio imposed by the rolling diaphragm geometry and is limited in maximum temperature.

A second retained configuration consists in a classic air cylinder actuator (D). The expansion ratio is not limited by the deformation of its components like air-muscles or McKibbens. The major drawback is the trade-off between a good seal which creates high friction forces, and a weak seal, which reduces friction.

Testing both rolling diaphragm and air-cylinders helps understand fundamental loss mechanisms related to slow combustion dynamics in a direct-acting combustion actuator.

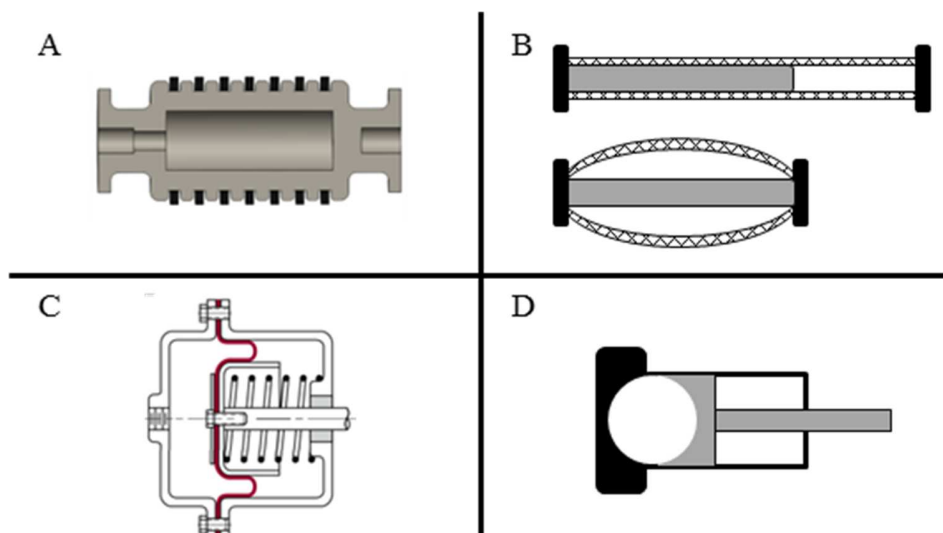


Figure 5 Different types of pneumatic actuators [18].

### 3.6 Experimental Setup

In this paper, only the cylinder actuator characterization is presented. A first actuator, referred to as *small bore*, consists in a steel combustion chamber head and a standard piston and cylinder assembly of 15.9 mm of diameter (Clippard SDR-10-2). A second actuator, referred to as *big bore*, is built in the same manner with a 31.8 mm diameter piston and cylinder assembly (Bimba 126-D). The combustion chamber exhibits a lower surface-to-volume ratio due to its almost hemispherical shape.

Because single combustion events are of interest for this work and locomotion tasks do not necessitate high frequency actuation, a relatively slow moving but good sealing valve is used for both prototypes. The valve used is a sliding valve that opens and closes inlet and exhaust ports using a pneumatic actuator as pilot. This valve has been placed as closed as possible to the combustion chamber in order to reduce the dead volume. Exhaust and intake ports are sealed using O-rings.

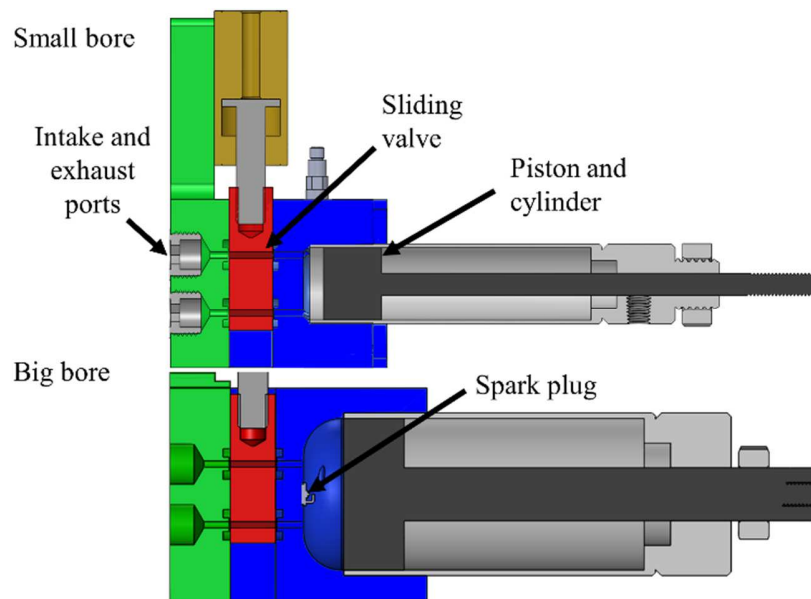


Figure 6 Side view of small bore and big bore actuators.

Table 1. Actuators properties

Parameters	Small bore	Big bore
Diameter [mm]	15.9	31.8
Stroke length [mm]	49	110
Initial volume [cm <sup>3</sup> ]	1.15	5.55
Expansion ratio	9.4	16.7
Surface-to-volume ratio [m <sup>-1</sup> ]	568	375

The experimental setup consists in the actuator mounted in line with an inertial load, as shown in Figure 7. An inertial load is used based on the understanding that, when modeled at its most basic, the load associated with locomotion tasks, like human walking, is mostly inertial [22]. The inertial load is adjusted for both actuators to obtain similar power stroke duration, as it has an impact on the level of heat loss and mass loss.

The equivalence ratio is controlled with two Alicat mass flow meters (MCR-1500SLPM-D/10M, MCR-250SLPM-D/10M). Hydrogen and air are premixed prior to intake through a tee-shaped pneumatic connector. The premixed mixture is free to flow for 5 seconds before closing the valve, which ensures the scavenging of combustion products from the prior test. Since single combustion events are conducted, there is no regulating mechanism to ensure compression and combustion products scavenging strokes. Moreover, regulating mechanisms depend on the type of application.

Once the valve is closed the actuator is maintained at its initial position in a pre-compressed state using magnets. The purpose of the magnets is that the magnetic force decreases rapidly according to position, which allows the actuator to expand freely once the pressure rise resulting from combustion exceeds the magnetic force. The magnets' size is varied to adjust the breakaway force. The energy needed to repulse the magnets accounts for around 10 to 15% of the output work.

The pre-compression pressure can be measured with a load cell (Transducer Techniques SBO-200). A miniature spark plug (Morrison and Marvin Rimfire Viper Z1) is used to initiate the



combustion. The dynamic pressure trace is measured with a high bandwidth piezo electric pressure transducer (PCB Piezotronics 105C12 SN 7956). The position is measured with a laser position sensor (Panasonic HL-G112-A-C5). Data acquisition is realized with a C-Rio 9114 from National Instruments, at a frequency of 10 kHz.

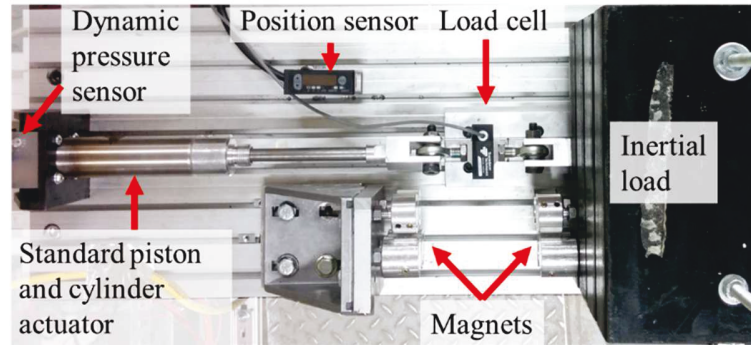


Figure 7 Experimental setup for pressure, position and force measurement

The efficiency was obtained by calculating the difference between the indicated work done by the actuator and the input work, divided by the input energy:

$$\eta_i = \frac{W_{out,i} - W_{in}}{Q_{in}} = \frac{\int_2^4 PdV - W_{in}}{Q_{in}} \quad (7)$$

The indicated work is obtained from the integral of the gauge pressure trace according to volume. The input energy is obtained knowing the equivalence ratio, the fuel lower heat value, the initial volume of the actuator and the initial pressure:

$$Q_{in} = m_f Q_{LHV} = \frac{PV}{R_{mix}T} \left( \frac{1}{(AF_s/\phi) + 1} \right) Q_{LHV} \quad (8)$$

The input compression work as well as the gases scavenging work depends on the type of system to which the actuator is connected. Here, only the compression work is considered and the scavenging work is expected to be low due to a split-cycle approach using external compression.

The compression work is estimated from an analytical calculation knowing the ambient pressure, the initial pressure and volume prior to combustion and the compression efficiency of a typical air-compressor:

$$W_{in} = \frac{1}{\eta_{comp}} \int_1^2 P dV \quad (9)$$

Unless noted, a compression efficiency of 65% as measured on small centrifugal air compressors is considered in this paper [23]. The impact of valving power consumption on efficiency is assumed to be negligible based on the fact that the low duty cycle associated with mobile robotic tasks doesn't necessitate large flow valves, unlike high speed rotating engine. Micro-valve power consumption is typically on the order of a few watts [24], which is small compared to the hundreds of watts generated by meso-scale actuators.

### 3.7 Experimental Characterization

Potential loss mechanisms are mass loss and heat loss. Mass loss has been evaluated prior to experiment by pressurizing the combustion chamber and measuring the pressure decay over time. The small bore device was pressurized at 1.6 MPa. A pressure decay of 0.3 kPa over 300 seconds results in a leakage flow of  $10e-10$  kg/s. The big bore device was pressurized at 0.8 MPa. A pressure decay of 6 kPa over 300 seconds results in a leakage flow of  $2e-7$  kg/s. Dynamic simulations including a choked flow model to account for previous amounts of mass loss showed such low leakage rates to have insignificant impact on efficiency. Friction from the seal of the actuator and from the linear bearing on which the inertial load is attached has been measured and shown to be insignificant.

Heat loss impact on efficiency is addressed by varying the equivalence ratio and by testing two actuators with different surface-to-volume ratio. Figure 8 shows pressure trace over volume of two combustion events at the same compression ratio of 2.5 but with different equivalence ratios. It is noticeable that a low equivalence ratio result in less heat loss as the experimental pressure trace approaches the isentropic expansion case (lossless).

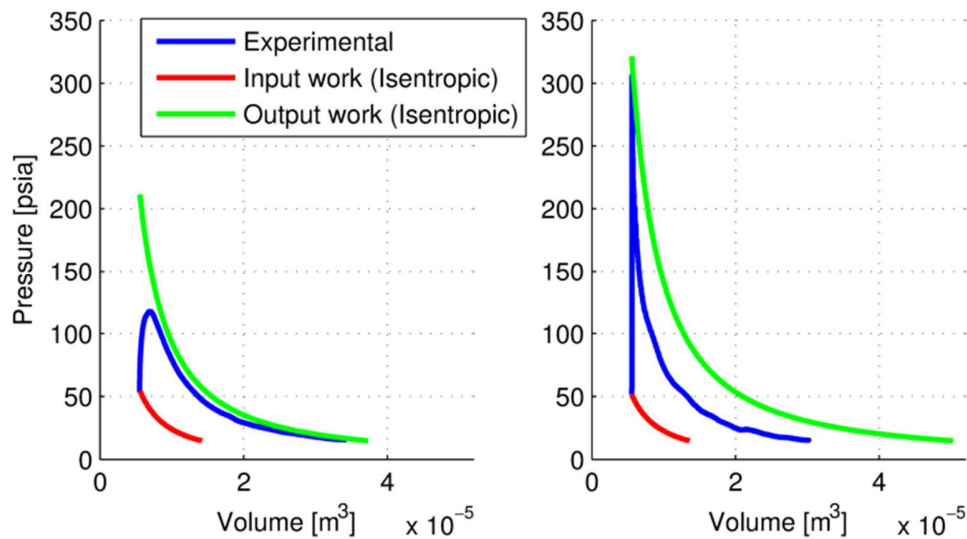


Figure 8 Pressure over volume for two different experimental combustion events

In Figure 8, the two graphs show pressure over volume for two combustion events with the same load and compression ratio of 2.5 and but with different equivalence ratios. Left graph is at an equivalence ratio of 0.3. Right graph is at an equivalence ratio of 0.6. Red curves represent the isentropic input work from compression. Green curves represent an isentropic pressure curve corresponding to an efficiency of 37% for a compression ratio of 2.5. Blue curves are experimental pressure traces.

Figure 9 and Figure 10 illustrate overall conversion efficiency over equivalence ratio for different compression ratios for the small bore and big bore actuators respectively. A mechanical efficiency of 85% is further accounted for to take into account potential friction in the mechanism linking the piston to the actuator output (e.g. pivots or ball joints). Figure 9 and Figure 10 show that efficiency decreases quite rapidly when equivalence ratio increases as combustion products temperature gets higher causing higher heat losses. For the same equivalence ratio, compression ratio and power stroke duration, the big bore reaches higher level of efficiency again due to reduced heat loss from the smaller surface-to-volume ratio. As expected, increasing compression ratio increases efficiency as seen on both Figure 9 and Figure 10.

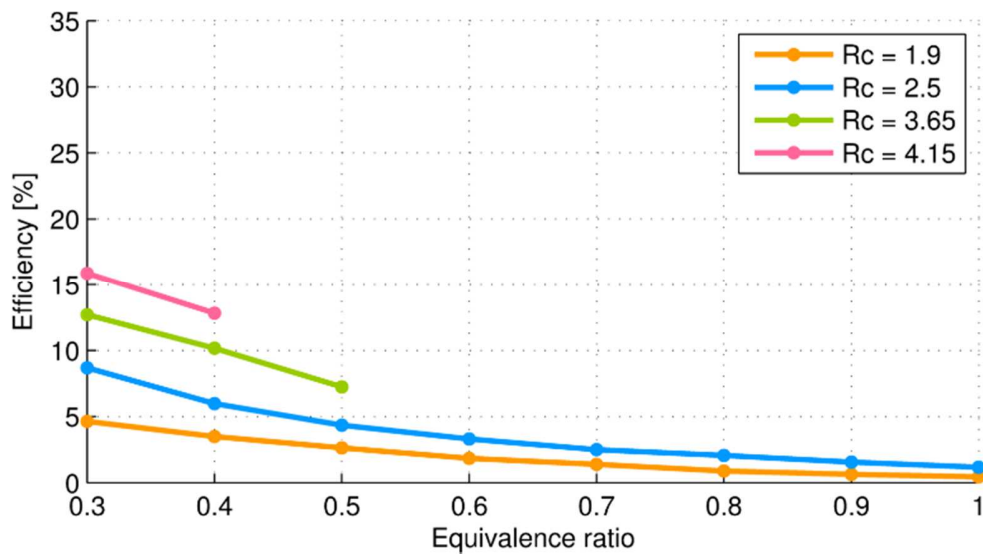


Figure 9 Overall experimental conversion efficiencies for the small bore actuator for different compression and equivalence ratios

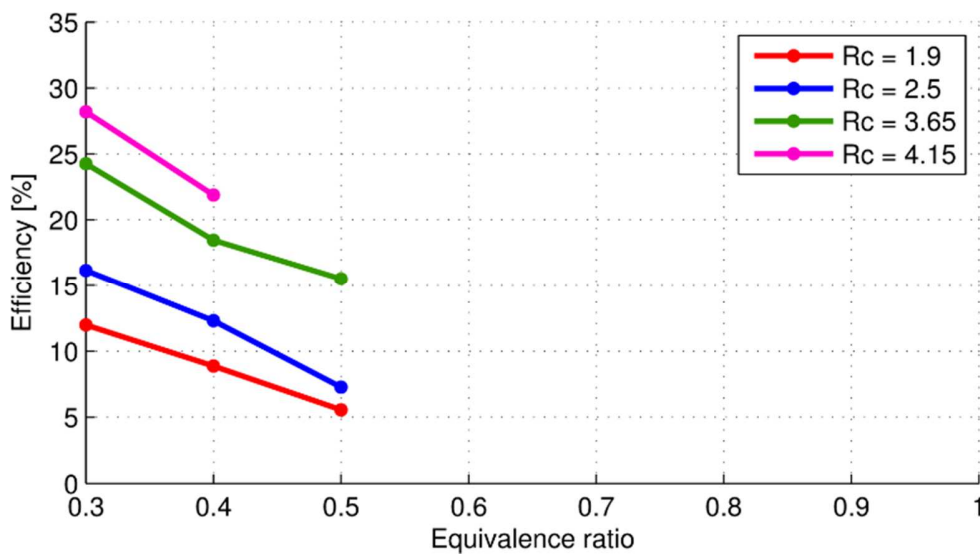


Figure 10 Overall experimental conversion efficiencies for the big bore actuator for different compression and equivalence ratios.

Variation of inertial load is used to vary the power stroke durations. Figure 11 shows the impact of increased power stroke duration on efficiency for big bore and small bore at a compression ratio of 4.15 and an equivalence ratio of 0.3. Power stroke duration has a reduced effect on overall conversion efficiency for big bore. This reduce sensitivity is explained by the smaller surface-to-volume ratio.

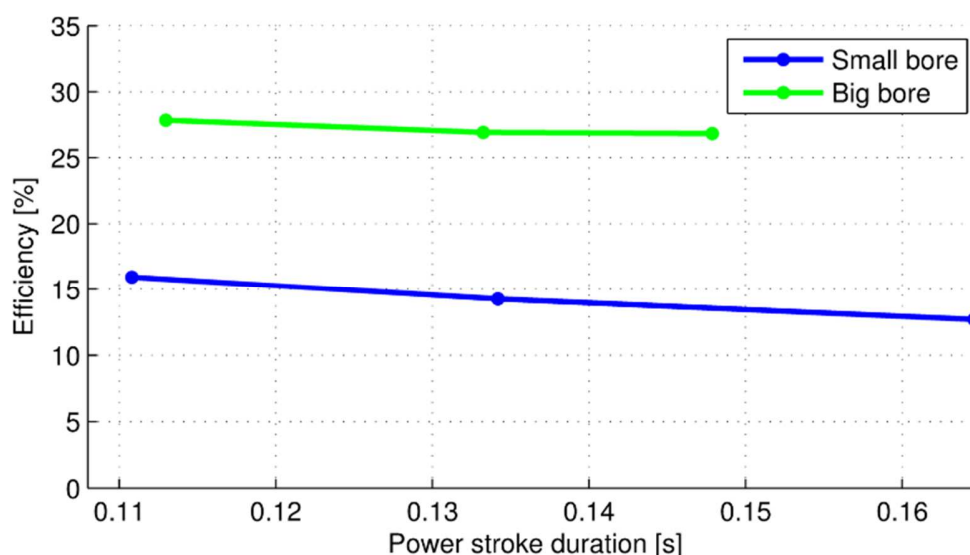


Figure 11 Overall experimental conversion efficiencies of small bore and big bore at variable load

In Figure 11, compression ratio is 4.15 and equivalence is 0.3. Inertial loads are 8, 16 and 28 kg for small bore. Inertial load are 24, 36 and 48 kg for big bore.

The peak efficiency of 28% is reached at the lowest equivalence ratio of 0.3 and at the highest compression ratio of 4.15. The corresponding power stroke duration is 0.113 ms and the measured peak power is 635 W.

Lowering combustion temperature through low equivalence ratio is critical for homogenous premix combustion systems to have meaningful efficiencies. Hydrogen is the only practical fuel than can burn in the range of equivalence ratios around 0.3 and is thus an enabler for such low temperature meso-scale fuel power systems. Methane and other hydrocarbon fuels are not effective as they won't even ignite below an equivalence ratio of 0.6. In fact, the practical lean

limit of hydrocarbon fuels at small-scale is likely to be above 0.6 because of combustion stability issues in cold air and low turbulence conditions.

A significant observation is that, everything else being equal, the results presented here show that efficiency roughly doubles when equivalence ratio reduces from 0.6 to 0.3.

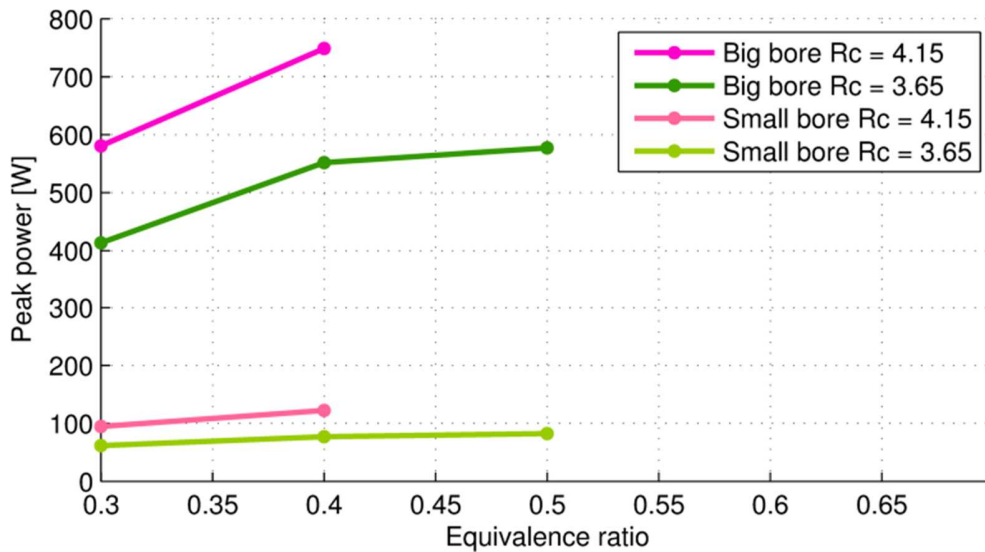


Figure 12 Peak power variation for small bore and big bore at compression ratios of 3.65 and 4.15 against different equivalence ratios

Figure 12 illustrates how peak power is affected by equivalence ratio and compression ratio for both tested actuators. Compression ratio and equivalence ratio can be used as control variables to adjust the output power.

### 3.8 Ragone Analysis

Graphical Ragone analysis is a useful tool to compare performances of various actuation systems by plotting the specific power vs the specific energy, for a wide range of autonomy. A diagonal line represents a mission time. The farthest system on the upper right of a diagonal is the most lightweight system. More details about assumptions made to realize the Ragone analysis are given in a prior paper [25].

Figure 13 shows a Ragone plot comparing expected performances of hydrogen powered direct acting actuator (System 4) with state of the art robotic power systems. System 1 is a complete electric system. System 2 is a gasoline powered combustion engine combined with a hydraulic actuation system. System 3 is a gasoline powered generator which drives an electric actuation system.

Hydrogen compressed storage ( $\text{CH}_2$ ) and liquid storage ( $\text{LH}_2$ ) are chosen to compare system 4 to other systems. Including reservoir, compressed hydrogen energetic density is around 7 MJ/kg [26] and liquid hydrogen storage is around 12 MJ/kg [27].

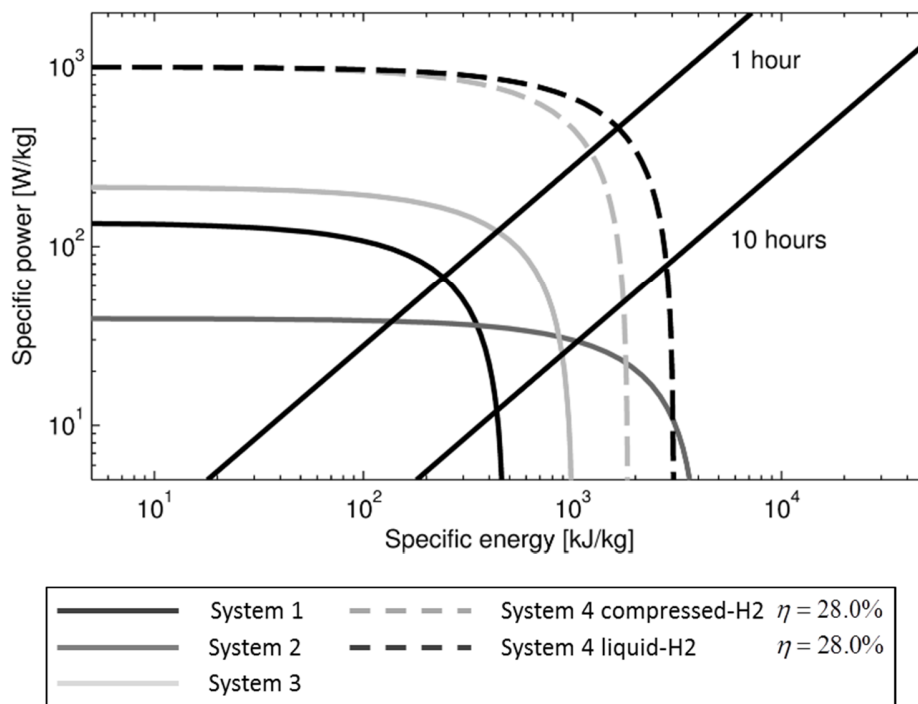


Figure 13 Ragone plot of state-of-the-art robotic power systems.

For autonomy of 1 hour, system 4 with  $\text{CH}_2$  and  $\text{LH}_2$  represent reduction in system weight of 64% and 74% respectively, compared to system 3. For 10 hours autonomy, reduction in system weight represents 40% and 63%, compared to system 1. When compared to an electric power system, system weight reduction would be 80%, 85% and 75%, 85% for  $\text{CH}_2$  and  $\text{LH}_2$  for 1 and 10 hours respectively.

### 3.9 Discussion and Conclusion

In this paper, efficiency oriented design principles regarding enhanced heat, mass and friction losses due to high surface-to-volume ratio and slow dynamics of meso-scale combustion driven actuators are presented.

Two prototypes are built based on those design principles. Both prototypes use a standard piston and cylinder assembly, with the same combustion chamber material. The prototypes are tested with hydrogen as fuel and the effects of compression ratio and equivalence ratio on chemical to mechanical conversion efficiency are studied experimentally.

Experiments show potential for energy conversion efficiencies of 28% with a compression of 4.15, an equivalence ratio of 0.3 and assuming compression efficiency of 65% and mechanical efficiency of 85%. Given the measured peak power of 635W of the prototypes developed in this work, efficiencies compare favorably to previously reported meso-scale devices with efficiencies in the 5-15% range depending on size.

The actuator presented in this work could not only operate either as a direct-acting actuator, for example in an exoskeleton limb, but also as a centralized energy system that would store energy in an accumulator to later redistribute it, for example in a hydraulic, electric, or pneumatic system. The work provides the following design guidelines for small-scale premix homogeneous charge combustion actuators:

- 1- Heat loss is the dominant loss mechanism compared to friction and mass loss. Thus, combustion chamber design must minimize surface-to-volume ratio and combustion product should be kept as cold as possible by reducing equivalence ratio.
- 2- Hydrogen is an optimal fuel with its unique lean burn ability in premix homogenous charge conditions that reduces peak temperature.
- 3- A classic cylinder-piston configuration presents the best geometric configuration over compliant systems such as rolling-diaphragm, air-muscles and McKibben when considering expansion ratios, heat loss due to surface-to-volume ratio, and leakage losses.
- 4- Compression ratio should be as high as possible to maximize efficiency.



- 5- The ratio of expansion to compression ratio should be as high as possible to maximize efficiency.

Future work will consist in exploring practical applications and developing prototypes including the balance of plant of air compression and valve control.

## CHAPITRE 4 MODÈLE ANALYTIQUE

Cette section présente le développement d'un modèle analytique d'un actionneur pneumatique pressurisé par la combustion d'une source d'énergie chimique. L'entrée du modèle est la libération de l'énergie chimique contenue dans le carburant injecté juste avant la combustion. Une partie de cette énergie sera libérée durant l'évènement de combustion entre le carburant et l'air. La sortie du modèle est la dynamique de la pression. Les mécanismes de perte qui sont pris en compte sont les pertes thermiques et l'efficacité de combustion. Les pertes de masse sont négligées, car elle fût démontrée comme étant non significatives. Le modèle présenté est basé sur les travaux de J.Barth [28].

### 4.1 Modèle du volume de contrôle

L'équation (10) est la dérivée de la conservation de l'énergie.

$$\dot{U} = \dot{H} + \dot{Q}_{heat} - \dot{W} \quad (10)$$

Où  $\dot{U}$  est le taux de variation de l'énergie interne,  $\dot{H}$  est le taux de variation de l'enthalpie,  $\dot{Q}_{heat}$  est la combinaison du taux de pertes thermiques et du taux d'énergie libérée lors de la combustion et  $\dot{W}$  est la puissance mécanique libérée ou absorbée par le volume de contrôle. Les équations (11), (12) et (13) expriment chacun de ces termes par leurs variables d'états.

$$\dot{H} = \sum \dot{m}_{in/out} c_{p, in/out} T_{in/out} \quad (11)$$

$$\dot{W} = P\dot{V} \quad (12)$$

$$\dot{U} = \dot{m}c_v T + m c_v \dot{T} = \frac{1}{\gamma-1} (\dot{P}V + P\dot{V}) \quad (13)$$

En remplaçant (11), (12) et (13) dans (10) et en exprimant la dynamique de la pression  $\dot{P}$  explicitement donne l'équation suivante (14):

$$\begin{aligned} \dot{P} = & \left( \frac{1}{V_{comb}} \right) \left[ (\gamma-1) \left[ \dot{m}_{mix} c_{p,mix} T_{mix} - \dot{m}_{exh} c_{p,exh} T_{exh} \right] + \right. \\ & \left. \dots + (\gamma-1) \dot{Q}_{heat} - \gamma P_{comb} \dot{V}_{comb} \right] \end{aligned} \quad (14)$$

## 4.2 Modèle de la combustion

L'énergie libérée lors de la combustion est modélisée par la loi d'Arrhenius, qui consiste à exprimer le taux de production d'une réaction chimique comme étant dépendant de la température. L'équation (15) exprime l'enthalpie de réaction d'un mélange stœchiométrique d'air et d'hydrogène.

$$\begin{aligned}\Delta H_r &= \frac{120,000,000\text{J}}{\text{kg fuel}} \times \frac{1\text{kg fuel}}{35.3\text{ kg air/fuel mixture}} \quad (15) \\ &= 3.4\text{ MJ/kg mix}\end{aligned}$$

Le taux d'énergie libérée est exprimé comme étant l'enthalpie de réaction multipliée par le taux de formation des produits de combustion  $\dot{m}_{cc}$ .

$$\dot{Q}_{comb} = \Delta H_r \dot{m}_{cc} \quad (16)$$

Le taux de formation des produits de combustion  $\dot{m}_{cc}$ , qui suit la loi d'Arrhénius, est exprimé par l'équation (17).  $A$  et  $K$  sont des constantes qui doivent être caractérisés expérimentalement.

$$\dot{m}_{cc} = K e^{-A/T} m_{uc} \quad \text{where } A = E_a/R \quad (17)$$

Concrètement,  $A$  agit comme un délai temporel tandis que  $K$  a un effet sur la pente. La masse des produits non brûlés  $m_{uc}$  est exprimée par (18).

$$m_{uc} = m_c - \int_{t_{spark}}^t \dot{m}_{cc} dt \quad (18)$$

## 4.3 Modèle des pertes thermiques

Les pertes thermiques sont caractérisées par deux mécanismes. Le premier mécanisme, étant la radiation, est négligé due à la température faible des produits de combustion. Le second mécanisme est la convection entre les produits de combustion chaude et les parois froides de la chambre de combustion.

Il a été démontré que la température de la paroi d'une chambre de combustion d'un moteur automobile varie d'environ 10°C lors de la présence de produits de combustion chauds [19]. De plus, le flux de chaleur est plus élevé pour un moteur à combustion automobile à cause de la

vitesse élevée des gaz de combustion à la paroi. Il est donc raisonnable d'émettre l'hypothèse que, pour les fréquences d'intérêt (entre 1 et 2 Hz), la dynamique de la température des parois de la chambre de combustion ne varie pas suffisamment pour être prise en compte. La température des parois est donc considérée comme étant constante et les pertes thermiques sont exprimées par l'équation (19).

$$\dot{Q}_{heat} = h(T_g - T_w) \quad (19)$$

Parce que les moteurs à combustion ont des dimensions beaucoup plus larges et opèrent à des vitesses plus élevées qu'un actionneur utilisant la combustion, les modèles permettant d'évaluer le coefficient de convection comme Woshini ne corrèle pas avec les résultats expérimentaux. Le coefficient de convection  $h$  doit donc être caractérisé expérimentalement.

#### 4.4 Caractérisation expérimentale du modèle de combustion

Les coefficients  $A$ ,  $K$  et  $h$  sont caractérisés en comparant des données de simulation avec des données expérimentales ayant les mêmes conditions initiales.  $A$  et  $K$  peuvent avoir une large plage de valeur dépendamment du type de carburant et du ratio d'équivalence utilisé. Un autre paramètre est introduit  $\eta_{scaling}$  pour prendre en compte un mélange incomplet du carburant avec l'air et une combustion incomplète.

Les coefficients sont corrélés pour un événement de combustion à un ratio de compression de 4.15 et un ratio d'équivalence de 0.3, représentant le cas le plus efficace obtenu expérimentalement. L'actionneur applique une force sur une charge dépendante de la position correspondant à la force appliquée par les aimants ainsi qu'une masse constante, comme illustré à la Figure 7. La portion de la charge liée à la répulsion des aimants varie entre 10 et 15% dépendamment du cas étudié. Plusieurs cas de chargement utilisant différentes masses ont permis de corréliser les coefficients. La variation de la masse permet d'atteindre des dynamiques plus vites ou plus lentes, ce qui fait varier l'impact des pertes thermiques sur l'efficacité.

Tableau 2 Paramètre du modèle analytique

Paramètres	Valeur
$A$ [K]	1300
$K$	600
$\eta_{scaling}$	0.59
$h$ [W/m <sup>2</sup> .K]	50

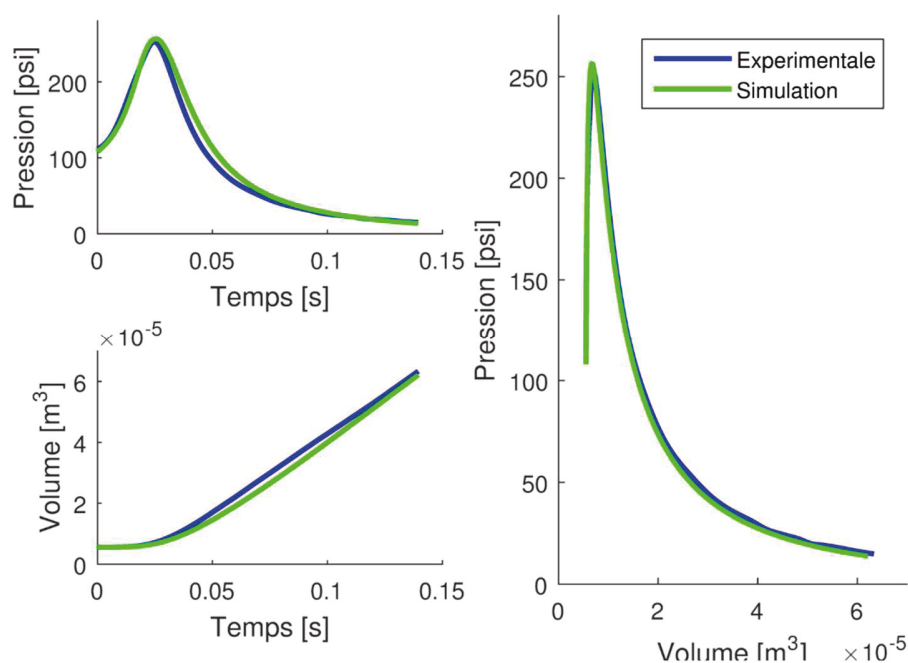


Figure 14 Comparaison entre les données expérimentales et les données de simulation de signaux de pression par rapport au temps, de volume par rapport au temps et de la pression par rapport au volume.

Les signaux de pression et de volume en fonction du temps ainsi que le signal de pression en fonction du volume sont comparés entre les simulations et les résultats expérimentaux, tel que montré à la Figure 14. Tableau 2 énumère les coefficients corrélés. Le modèle analytique corrèle bien avec les résultats expérimentaux.

Le modèle présenté dans cette section prend en compte l'apport d'énergie lors de la combustion et les pertes thermiques et est donc un modèle très utile pour l'étude de système utilisant la combustion.

## CHAPITRE 5 ÉTUDE DE CAS – CHEVILLE

Les dispositifs d'assistance à la locomotion pour l'humain requièrent un système d'actionnement développant de hauts niveaux de puissance. La Figure 15 compare la puissance requise à la cheville durant la marche provenant des travaux de D.A. Winter à la puissance obtenue expérimentalement [29]. L'atteinte de niveaux de puissance suffisants d'une durée allant jusqu'à 0.2 seconde confirme que l'utilisation d'un actionneur pneumatique pressurisé directement par la combustion d'une source d'énergie chimique semble être idéale pour ce genre de requis.

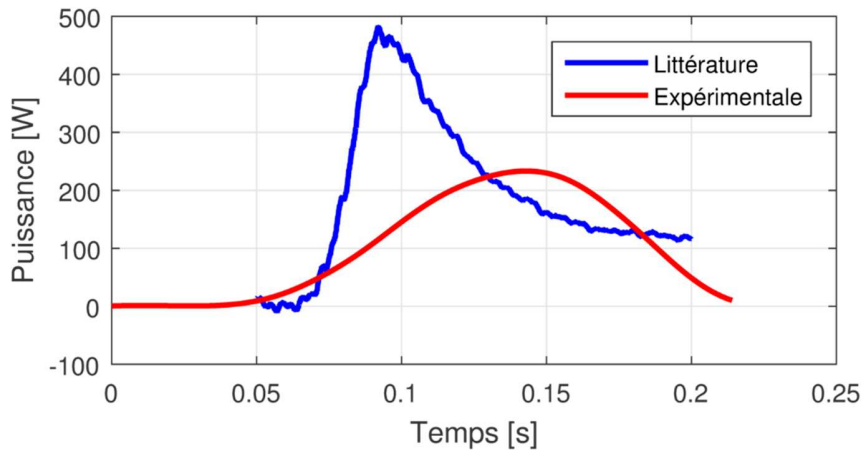


Figure 15 Comparaison entre le signal de puissance requis à la cheville durant la marche (rouge) et le signal de puissance obtenu expérimentalement.

La section qui suit présente le dimensionnement d'un actionneur pour une orthèse d'assistance à la cheville. L'actionnement à la cheville est choisi, car elle représente la plus importante dépense énergétique requise durant la marche.

Le dimensionnement a pour objectif de déterminer les dimensions caractéristiques de la chambre de combustion requise ainsi que la dimension caractéristique du mécanisme de bras de levier requis entre l'actionneur et le dispositif d'assistance, tel qu'illustré à la Figure 16 . Le mécanisme de bras de levier permet de faire correspondre le couple du dispositif d'assistance au couple requis à la cheville durant la marche.

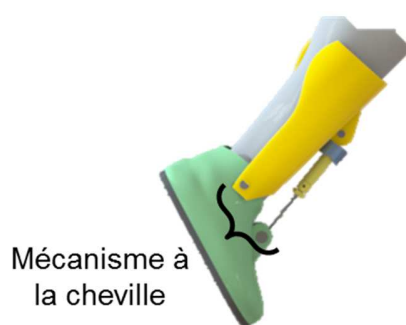


Figure 16 Image artistique d'un dispositif d'assistance à la locomotion

Les signaux de la cinématique et de la cinétique requis à la cheville sont tirés de l'œuvre de David A. Winter [29]. Il a été démontré que l'application d'une certaine portion de ces signaux à l'aide d'un dispositif d'assistance à la marche permet de réduire le coût métabolique du porteur [2].

Le dimensionnement présenté est basé sur le modèle développé au Chapitre 4. Tel que mentionné dans cette section, la sortie du modèle est la dynamique de la pression, qui possède une partie dépendante du temps et une partie dépendante de la position. La partie dépendante de la position considère la compression ou la détente de la chambre de combustion tandis que la partie dépendante du temps considère l'entrée d'énergie durant la combustion et les pertes thermiques qui sont intégrées dans le temps durant la simulation.

La méthodologie consiste à imposer la cinématique du corps humain (position, vitesse et accélération en fonction du temps) au mécanisme du dispositif d'assistance. Le volume de l'actionneur est connu en fonction du temps en imposant une première valeur de la longueur du bras de levier. Par la suite, le modèle de la dynamique de la pression est résolu dans le temps de façon discrète.

Le couple appliqué au joint est une fonction de la pression appliquée sur le piston de l'actionneur, de l'aire du piston et de la longueur du bras de levier. L'erreur obtenue entre le couple obtenu en simulation et le couple requis à la cheville permet de réitérer sur la longueur du bras de levier. L'algorithme est répété jusqu'à l'obtention du bon couple à chacun des pas de temps.

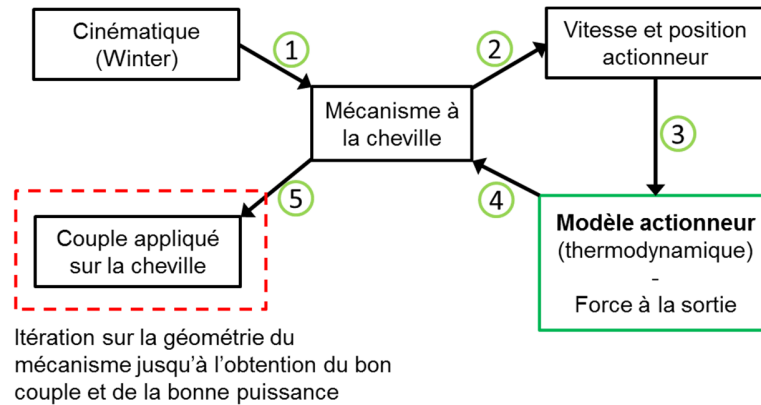


Figure 17 Schéma des étapes de l'algorithme utilisé pour dimensionner la chambre de combustion requise pour l'actionnement à la cheville

Les résultats de simulation démontrent qu'il est théoriquement possible d'atteindre les requis de couple et de puissance à la cheville durant la marche, comme le montrent les Figure 18 et Figure 19. De ce cas de simulation particulier, le mécanisme de bras de levier requis en fonction de la course du piston est illustré à la Figure 20.

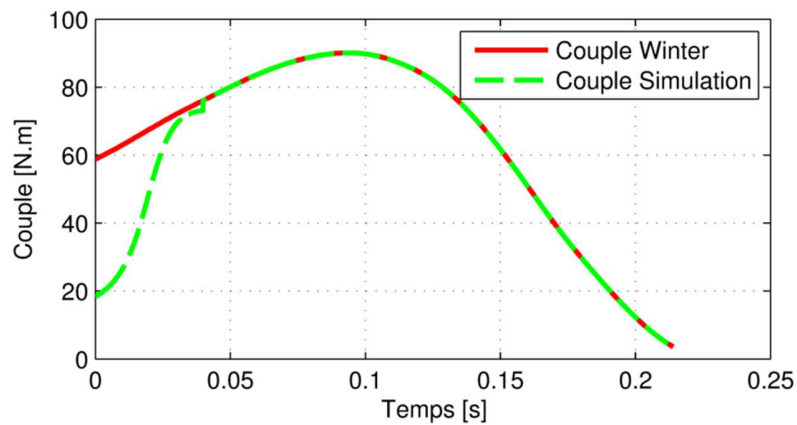


Figure 18 Comparaison entre le couple provenant des données de la littérature et la simulation



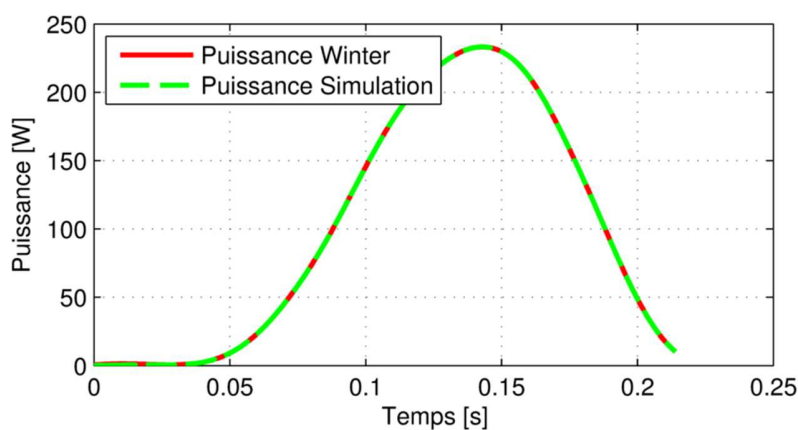


Figure 19 Comparaison entre la puissance provenant des données de la littérature et la simulation

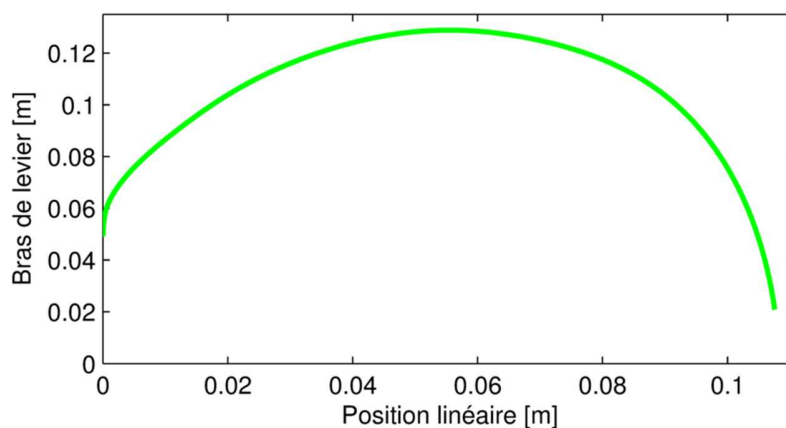


Figure 20 Mécanisme de bras de levier variable en fonction de la position de l'actionneur

Il y a une infinité de dimensions d'actionneur et de géométries de bras de levier possibles qui résulteraient en un résultat équivalent. L'intention n'est pas de trouver le système optimal, mais plutôt de vérifier la faisabilité en termes de dimensions et de géométrie. Le mécanisme de bras de levier requis pour ce cas pourrait être réalisé à l'aide de came et de tendon par exemple. À l'inverse, le mécanisme pourrait aussi être simplifié, au détriment de l'exactitude du signal de puissance et de couple par rapport aux données de la littérature. Tel que démontré dans les travaux de Herr [2], le signal de couple ou de puissance ne doit pas nécessairement être exactement comme les requis de la littérature, mais doit par contre être bien synchronisé.

Le Tableau 3 présente les différentes caractéristiques de l'actionneur dimensionné à l'aide du modèle comparées aux actionneurs testés expérimentalement. Les dimensions de l'actionneur

requis pour l'actionnement à la cheville sont très près des dimensions des actionneurs testés expérimentalement.

Tableau 3 Caractéristiques physiques de l'actionneur dimensionné avec le modèle et des deux actionneurs testés expérimentalement

Paramètres	Petit diamètre	Gros diamètre	Actionneur pour cheville
Diamètre du piston [mm]	15.9	31.8	27.0
Volume initial [mL]	1.15	5.55	8.63
Course maximale [mm]	49	110	111.5
Ratio d'expansion	9.4	16.7	8.4

Le modèle présenté dans la section précédente ainsi que la méthodologie utilisée dans la présente section sont des outils de conception permettant de dimensionner une panoplie de système de robotique mobile utilisant des actionneurs pneumatiques à combustion.

# CHAPITRE 6 CONCLUSION

## 6.1 Sommaire

Le développement d'un système d'actionnement pour la robotique mobile à l'échelle méso a pour but d'augmenter les performances en termes de masse et d'autonomie des dispositifs tels que les exosquelettes et les robots marcheurs. L'utilisation d'actionneurs pneumatiques pressurisés directement à l'aide de la combustion d'une source d'énergie chimique a le potentiel de surpasser les performances des systèmes électriques si un seuil d'efficacité de 7% est minimalement atteint.

L'atteinte d'efficacité élevée pour cette approche, dans un contexte de robotique mobile appliqué aux tâches de locomotions pose certains défis. D'abord, les dimensions des chambres de combustion à cette échelle ont intrinsèquement un ratio de surface sur volume plus élevé plus les dimensions diminuent. Cela a pour effet d'augmenter la sensibilité aux pertes thermiques, ainsi qu'aux pertes de masse. De plus, la dynamique lente reliée aux tâches de locomotions, comparée à la dynamique des moteurs à combustion de même puissance, fait en sorte que les mécanismes de pertes sont amplifiés par la longue présence des produits de combustion chauds et sous haute pression.

Les contributions scientifiques du projet sont d'abord les principes de conception d'un actionneur pneumatique à combustion.

1. Par l'analyse du cycle thermodynamique décrivant l'actionneur pneumatique à combustion ainsi qu'expérimentalement, il a été démontré que le ratio de compression et d'expansion doivent être le plus élevé possible afin d'obtenir une efficacité maximale.
2. Le mécanisme de perte dominant est la perte par transfert thermique causé par un ratio de la surface sur le volume élevé de la chambre de combustion ainsi que la dynamique lente des tâches de locomotion.
3. L'utilisation de l'hydrogène comme carburant permet de brûler à un mélange air-carburant pauvre, ce qui diminue la température des produits de combustion, donc les pertes thermiques. De plus, l'hydrogène a une distance d'étouffement de la flamme faible ce qui est idéal pour la combustion à petite échelle.

4. L'utilisation d'un actionneur pneumatique à piston et cylindre permet d'optimiser le ratio d'expansion et le ratio surface sur volume comparativement à d'autres actionneurs pneumatiques tels que les McKibbens, les actionneurs à membrane déroulante et les muscles pneumatiques souples.

Une autre contribution est le développement et la caractérisation expérimentale d'un modèle analytique permettant la simulation d'une panoplie de système robotique utilisant un actionneur pneumatique à combustion.

Une dernière contribution consiste au dimensionnement d'un actionneur pour l'actionnement à la cheville durant la marche démontrant la faisabilité théorique de l'utilisation de cette approche pour fournir un signal de couple adéquat à la cheville.

## 6.2 Recommandations

Plusieurs étapes de développement sont encore requises afin d'implanter l'approche développée dans un système robotique complet. Parmi les développements futurs, il y a :

1. L'étude du mécanisme de régulation permettant à l'actionneur de revenir à sa position initiale. Dans le cas d'un exosquelette, l'inertie du porteur peut fournir l'énergie nécessaire au retour à la position initiale de l'actionneur et ainsi permettre l'échappement des produits de combustion.
2. L'étude de la compression du mélange air-carburant permettra de déterminer les paramètres du compresseur requis.
3. L'étude de l'injection du mélange air-carburant afin de dimensionner les valves ou les injecteurs requis.

### 6.3 Perspectives

L'utilisation d'actionneurs pneumatiques à combustion permet d'optimiser le rapport masse-autonomie de systèmes de robotique mobile. Cette approche est idéale pour les tâches de locomotion, car elle fournit la puissance sur demande, sous forme d'impulsion. Par contre, il est très difficile de contrôler la puissance à la sortie. Dans le cas d'un développement complet d'exosquelette ou de robot marcheur, il serait avantageux d'utiliser un système hydraulique en parallèle aux actionneurs pneumatiques à combustion. Le système hydraulique effectuerait les tâches de contrôle fin tel que le balancement en équilibre ou la manipulation d'objet, tandis que les actionneurs pneumatiques à combustion seraient uniquement dédiés aux tâches de locomotion.

L'actionneur développé dans ce projet pourrait aussi être utilisé en série avec un système hydraulique afin de fournir de l'énergie hydraulique sur demande et de façon efficace. Les critères de conception et le modèle développé dans ce projet sont des outils qui ont d'ailleurs permis de développer une preuve de conception de pompe hydraulique utilisant la combustion. Il serait donc possible d'avoir un système d'actionnement utilisant une seule source d'énergie chimique et pouvant fournir de la puissance hydraulique ainsi que des impulsions de puissance mécanique.



## LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] RB3D (2014), *RB3D - we multiply your capacity*. <http://www.rb3d.com/produits/exosquelettes>. (page consultée le 13 janvier 2016).
- [2] Mooney, L. M., Rouse, E. J. et Herr, H. M. (2014). Autonomous exoskeleton reduces metabolic cost of walking. Dans *2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, IEEE EMB, Chicago, États-Unis, p. 3065-3068.
- [3] Ferguson, C. R. (2000). *Internal combustion engines: applied thermosciences*, 2<sup>e</sup> édition. John Wiley & Sons, New York, États-Unis, 369 p.
- [4] Tarascon, J.-M. et Armand M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, volume 414, numéro 6861, p. 359-367.
- [5] Horizon Fuel Cell Technologies (2013). *Horizon Fuel Cell Technologies*. <http://www.horizonfuelcell.com> (page consultée le 7 décembre 2015).
- [6] Barbir, F. (2005). *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*. 2<sup>e</sup> édition. Academic Press, Boston, États-Unis, 433 p.
- [7] Dunn-Rankin, D., Leal, E. M., et Walther D. C. (2005). Personal power systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, volume 31, numéro 5-6, p. 422-465.
- [8] Menon, S. et Cadou, C. P. (2013). Scaling of Miniature Piston-Engine Performance, Part 1: Overall Engine Performance. *J. Propuls. Power*, volume 29, numéro 4, p. 774-787.
- [9] Maruta, K., (2011). Micro and mesoscale combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*. volume 33, numéro 1, p. 125-150.
- [10] Raade, J. W., McGee, T. G., et Kazerooni, H. (2003). Design, Construction, and Experimental Evaluation of a Monopropellant Powered Free Piston Hydraulic Pump, *IMECE 2003 - Dyn. Syst. Control*, volume 1, p. 651-658.
- [11] Willhite, J. A., Yong, C. et Barth, E. J. (2013). The High Inertance Free Piston Engine Compressor—Part II: Design and Experimental Evaluation, *Journal of Dynamix Systems Measurement and Control*, volume 135, numéro 4, p. 41002-1-041002-9.

- [12] Gogola, M., Barth, E. J. et Goldfarb, M. (2002). Monopropellant powered actuators for use in autonomous human-scaled robotics. Dans *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Proceedings ICRA*. IEEE, volume 3, p. 2357-2362.
- [13] Amundson, K., Raade J., Harding, N. et Kazerooni, H. (2006). Development of hybrid hydraulic–electric power units for field and service robots, *Advanced Robotic*, volume 20, numéro 9, p. 1015-1034.
- [14] Tolley, M. T., Shepherd, R. F., Karpelson, M., Bartlett, N. W., Galloway, K. C., Wehner, M., Nunes, R., Whitesides, G. M. et Wood, R. J. (2014). An untethered jumping soft robot, Dans *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, p. 561-566.
- [15] Maxon Motor (2016). *DC motors, gearheads, electronics by maxon motor*. <http://www.maxonmotor.com/maxon/view/content/products> (page consultée le 19 janvier 2016).
- [16] Panasonic (2007). *Overview Information on Li-ion Batteries | Panasonic Industrial Devices*. <http://na.industrial.panasonic.com> (page consultée le 22 janvier 2015).
- [17] Riofrio, J. A. et Barth, E. J. (2005). Design of a Free Piston Pneumatic Compressor as a Mobile Robot Power Supply. Dans *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, p. 235-240.
- [18] Shields, B. L., Fite, K. B. et Goldfarb, M. (2006). Design, control, and energetic characterization of a solenoid-injected monopropellant-powered actuator, *IEEE ASME Transaction on Mechatronic*, volume 11, numéro 4, p. 477-487.
- [19] Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Education, New York, États-Unis, 930 p.
- [20] Strahle, W. C. (1993). *An Introduction to Combustion, volume 1*. CRC Press, Boca Raton, États-Unis, 192 p.
- [21] McAllister, S., Chen, J.-Y. et Fernandez-Pello, A. C. (2011). *Fundamentals of Combustion Processes*. Springer Science & Business Media, New York, États-Unis, 290 p.
- [22] Kuo, A. D. (2001). Energetics of Actively Powered Locomotion Using the Simplest Walking Model, *Journal of Biomechanical Engineering*, volume 124, numéro 1, p. 113-120.



- [23] Casey, M. V. (2013). The Design of Ultra-High-Speed Miniature Centrifugal Compressors, Dans *European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics ETC 10*, Zurich, Switzerland.
- [24] Parker (2015). *Miniature Solenoid Valve* | *ParkerExportStore*. <http://ph.parker.com/us> (page consultée le 22 décembre 2015).
- [25] Bélanger Desbiens, A., Plante, J.-S. et Masson. P. (2015). Experimental Characterization of a Meso-Scale Combustion Driven Actuator Designed for High Efficiency, *ASME 2015 IDETC-CIEC*, Boston, États-Unis.
- [26] Hwang, H. T. et Varma, A. (2014). Hydrogen storage for fuel cell vehicles, *Current Opinion in Chemical Engineering*, volume 5, p. 42-48.
- [27] Léon, A., (2008). *Hydrogen Technology - Mobile and Portable Applications*. Heidelberg, Allemagne, 686 p.
- [28] Willhite, J., Yong, A. C. et Barth, E. J. (2013). The High Inertance Free Piston Engine Compressor—Part I: Dynamic Modeling, *Journal of Dynamic System Measurement and Control*, volume 135, numéro 4, p. 041003-1-041003-12, avr. 2013.
- [29] Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, 4 edition. John Wiley & Sons, Hoboken, États-Unis, 370 p.