

Rapport de travail sur le stockage de l'énergie par l'entremise de  
L'utilisation de l'air comprimé dans les moteurs à combustion  
interne

Présenté par

Simon-Nicolas Deschênes

Et réalisé pour

Adrian Ilinca

Université du Québec à Rimouski  
Mai 2004

## Table des matières

Introduction :	3
Modélisation du cycle thermodynamique de Otto	4
Description du cycle Otto	4
Le travail dans le cycle Otto	5
Le travail de la combustion	5
Le travail de la compression	6
Le travail de l'échappement et de l'admission	6
Le travail net	6
Le travail positif dans le cycle Otto	7
Le cycle Otto modifié	8
Description du cycle Otto modifié	9
Le travail d'injection dans le moteur	10
Le travail d'échappement	10
Le travail de la pompe	10
Le travail d'admission	10
Le travail de détente	11
Le travail spécifique net	11
La chaleur nécessaire au cycle pour le travail net	11
Combustion externe dans le cycle Otto modifié	12
Cycle de Rankine Cryogénique à combustion externe	14
La consommation de carburant du cycle Rankine	15
Représentation des valeurs théorique	16
Performance du cycle Otto Standard	17
Le cycle Otto modifié à combustion interne, les performances	18
Le cycle Otto modifié à combustion externe et le cycle de Rankine, les performances	20
Conclusion	22

## **Introduction :**

Ce travail permet de d'étudier les concepts de moteurs à combustion interne de type diesel et essence dans le but d'être en mesure de constater l'utilisation de l'air comprimé dans la chambre de combustion afin de réduire la consommation de carburant du moteur. Bien entendu, pour réaliser cette étude, il est impératif bien connaître le fonctionnement thermodynamique de ces moteurs.

De plus, cette étude est basée sur quelques documents techniques dont certain portent directement sur l'hybridation des moteurs à combustions internes avec un gaz cryogène.

Afin de bien amorcer l'exercice technique de ce genres de modifications, le présent travail débutera avec la description et la modélisation des cycles thermodynamiques des divers types de moteurs. Ensuite, la modélisation de ces moteurs modifier afin de constater le changement dans la consommation énergétique.

D'entrée de jeux, les précédentes études portant sur le sujet montrent qu'une automobile peut compétitionner favorablement avec les procédés électrochimiques sur les bases des coûts d'opération, autonomie, utilisation facile, disponibilité des technologies clés et, finalement, sur la plan environnemental. Un brevet, datant de années 1980, (4,226,294) à montrer qu'une grande amélioration dans l'économie d'essence et la réduction des gaz à effet de serres sont possible en utilisant un brûleur afin de chauffer l'azote liquide bien au-delà de la température ambiante. Ils proposent aussi de combiner le fuel avec de l'air pressurisé permettant ainsi une augmentation d'autonomie tout près de 90 mpg de diesel et 3 mpg d'air liquide.

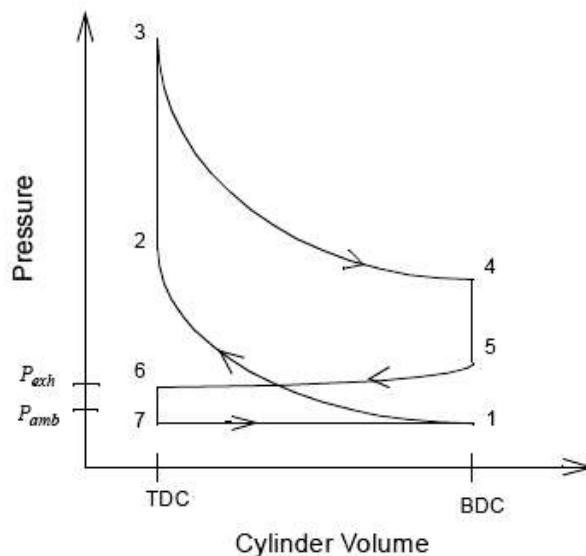
## Modélisation du cycle thermodynamique de Otto.

Dans cette section, nous mettons au point un modèle simple d'un moteur à combustion interne basé sur le cycle de Otto qui incorpore quelques inefficacités. Il est aussi important de mentionner qu'en ce qui concerne le moteur diesel, les calculs sont basés sur le cycle de Otto mais, avec quelques modifications qui permettent de prendre en compte les différentes caractéristiques qui caractérisent le moteur diesel. Ce modèle est appliqué à un concept « dual-fuel » qui à un volume constant et un procédé d'addition de chaleur à pression constante afin de surchauffer un gaz cryogène qui est utilisé comme fluide de travail.

Les rendements de compression et de détente sont les mêmes peu importe les cycles.

### Description du cycle Otto

Les cycles Otto et diesel sont généralement utilisés sous forme de moteur à quatre temps. On retrouve l'admission, la compression, la combustion et l'échappement qui sont les temps présents dans le fonctionnement du moteur.



Graphique pression-volume

- Du point 1 au point 2 se trouve l'étape de compression du mélange. Cette étape cause une réduction du travail net.

- Du point 3 au point 4 se trouve l'étape de la combustion du mélange. C'est le temps moteur, c'est-à-dire, la seule étape produisant un travail net.
- Du point 5 au point 6 se trouve l'étape de l'échappement des gaz. Cette étape cause une réduction du travail net.
- Et finalement, du point 7 au point 1, se trouve l'étape de l'admission du mélange. On considère cette étape comme neutre, c'est-à-dire, qu'elle ne consomme pas ni ne fournit d'énergie au moteur.

On peut observer que le moteur opère avec un ratio de compression ( $V_1/V_2$ ) fixe, alors, le fluide de travail ne peut pas se détendre à sa pleine capacité engendrant ainsi un manque dans le travail utile.

De plus, les pertes de chaleurs substantielles à l'intérieur de la chambre à combustion occasionnent, par le fait même une perte de travail utile.

## ***Le travail dans le cycle Otto***

Dans tout cycle moteur thermodynamique, le travail net est déterminé par la somme de tous les travaux réalisés à chaque étape du cycle en question. Dans notre cas, il s'agit de la somme des travaux engendrés par le piston aux quatre temps moteur.

$W_e$  = travail idéal d'une détente isotropique à travers ce même changement de pression ( $W_{34}$ )

Afin d'être en mesure de faire la somme de tous ces travaux, il est impératif de connaître comment obtenir la valeur de chaque travail individuellement avec une valeur.

## **Le travail de la combustion**

$$W_{\text{exp}} = \eta_e W_{34} = \eta_e C_v T_3 (1 - (P_4/P_3)^{(\gamma-1)/\gamma})$$

$C_v$  = capacité spécifique de l'élément en question à volume constant

$T_3$  = température au point 3, la plus élevée du cycle

$P_3$  = pression au point 3, la plus élevée du cycle

$\gamma$  = Ratio de chaleur spécifique

Le rendement mécanique de la détente  $\eta_e$ , est défini comme le ratio du travail actuel pour un changement de pression donné.

## Le travail de la compression

$$W_{\text{comp}} = W_{12}/\eta_c = C_v T_1 / \eta_c \left( (P_2/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right)$$

Le rendement mécanique de la compression  $\eta_c$ , est défini comme le ratio d'un travail fourni pour une compression isentropique en fonction d'un changement de pression donné  $W_{12}$ .

Rendu à cette étape partie de l'analyse, le travail réalisé par le piston durant la compression et la détente est nul.

## Le travail de l'échappement et de l'admission

Pour les besoins de cette étude, les rendements pour les temps d'admission et d'échappement sont les mêmes.

$$W_{\text{int}} = \eta_c (P_{\text{int}} - P_{\text{amb}})(V_1 - V_2)$$

$$W_{\text{exh}} = (1/\eta_c)(P_{\text{exh}} - P_{\text{amb}})(V_1 - V_2)$$

$P_{\text{int}}$  = Pression à la tubulure d'admission

$P_{\text{amb}}$  = Pression dans le carter (atmosphérique)

$P_{\text{exh}} = P_5$

La pression à l'intérieur de la chambre de combustion durant l'étape d'échappement est égale à  $P_5$ .

## Le travail net

Comme mentionné précédemment, le travail net est la somme de tous les travaux exécuter par le piston à chaque étape du cycle.

$$W_{\text{net}} = W_{\text{exp}} - W_{\text{comp}} + W_{\text{int}} - W_{\text{exh}}$$

## Le travail positif dans le cycle Otto

Comme le seul temps moteur où le travail est positif ou non-nul est le temps de combustion, il est nécessaire que l'ajout de chaleur provienne d'un élément externe comme l'essence. Il devient donc indispensable de d'être en mesure de déterminer la quantité de chaleur à fournir en fonction du travail net voulue.

On détermine donc la quantité de chaleur durant le précédé de combustion par :

$$q_{23} = C_v (T_3 - T_2)$$

$$T_2 = T_1 (1 + 1/\eta_c ((P_2/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1))$$

Donc, la quantité massique d'essence indispensable afin de fournir une quantité de chaleur donné nécessaire est déterminé à partir de la « Lower Heating Value » du carburant ( $H_{lhv}$ ) et du rendement de combustion  $\eta_b$  qui tien en compte toute les pertes durant la combustion et la chaleur perdu dans le système de refroidissement.

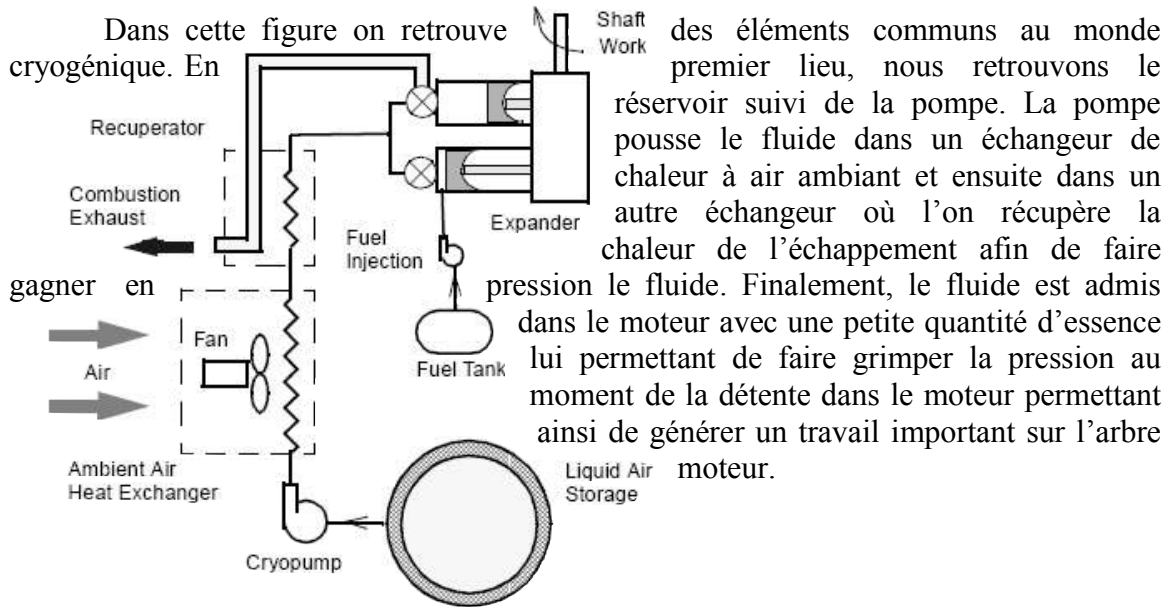
Le débit massique du carburant  $m_f$ , afin de mieux fournir de la chaleur par unité de masse est :

$$m_f = q_{23} / (\eta_b * H_{lhv})$$

Il est important de noter que pour des raisons d'ordre technique, la proportion massique d'essence admise dans la chambre de combustion est fonction de la masse de l'air entrant simultanément avec l'essence. Cette proportion massique est de 14.7 partie d'air pour une partie d'essence. Le mélange stochiométrique idéal pour l'essence est de 16 parties d'air pour une d'essence. Donc, la raison pour laquelle il est nécessaire d'avoir moins d'air pour une même partie d'essence est que le moteur à piston ne peut supporter la haute température de combustion d'un mélange parfait de 16 :1. De plus, l'essence qui demeure imbrûlé joue un rôle caloporteur afin de refroidir la chambre de combustion. Par contre, cette essence imbrûlée s'évapore plus loin dans la tuyauterie d'échappement et génère ainsi des hydrocarbures émis dans l'atmosphère.

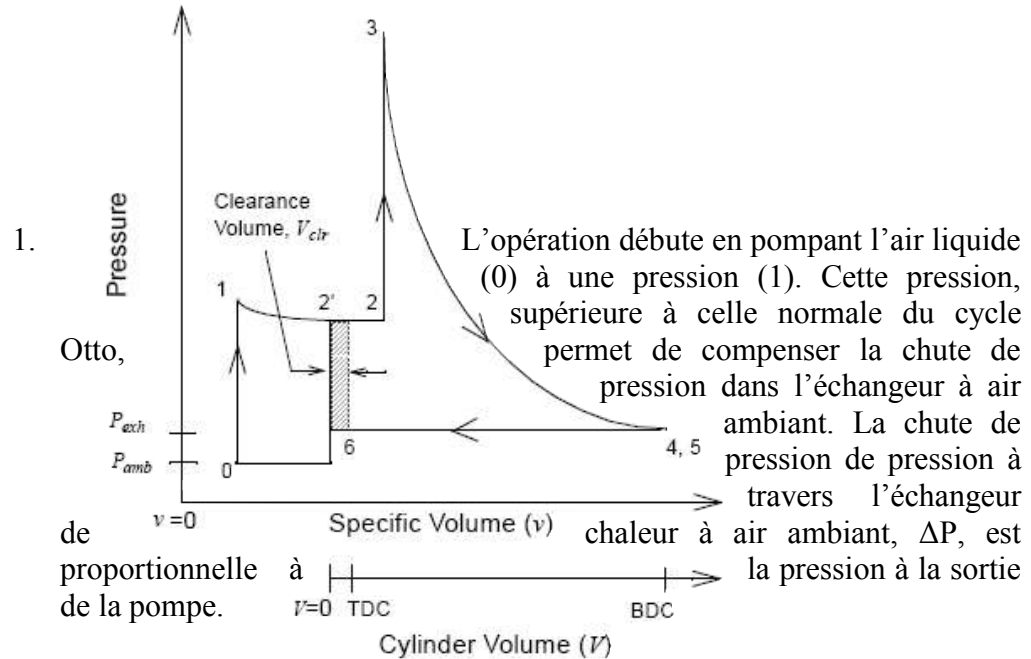
## Le cycle Otto modifié

Le montage de base du Otto modifié ressemble fortement au cycle au cycle de Rankine comme nous le verrons plus tard. Présentement, le cycle étudié utilise de l'air liquide donc, une partie du travail nécessaire dans les graphique pourra être négligé si l'utilisation de l'air comprimé requise dans le prochain exercice théorique.





## Description du cycle Otto modifié



$$\eta_p = \Delta P/P_1$$

$\eta_p$  est le coefficient de chute de pression.

- Par la suite, l'échangeur de chaleur à air ambiant vaporise et surchauffe l'air liquide près de la température ambiante. La surchauffe de l'air est possible grâce à l'échappement chaud (dans l'échangeur de chaleur qui permet de récupérer la chaleur de l'échappement).
- L'air surchauffé est envoyé dans le moteur dans lequel on injecte de l'essence (clearance volume  $V_{clr}$ ). L'injection a lieu lorsque le piston approche le point mort haut. (P2) (2-2')
- L'étincelle de la bougie allume le mélange et la chaleur occasionne une augmentation de pression (2-3).
- Avec le bon ratio de détente dans le moteur ( $V_4/V_3$ ), le produit de combustion peut se détendre.

Dans ce graphique, nous pouvons changer la forme en supposant que l'utilisation de l'air comprimé dans le moteur supprime la section (0) et 1. Donc le travail de la pompe cryogénique devient nul.

Le travail net de ce cycle est déterminé par la somme des travaux de chaque procédé.

## Le travail d'injection dans le moteur

$$W_{inj} = \eta_e (P_2 - P_{amb}) (V_2 - V_{clr})$$

$\eta_e$  est le rendement mécanique similaire au cycle Otto standard.

En ce qui concerne  $P_2$  dans le présent calcul, il s'agit de la pression que la pompe doit fournir au fluide en incluant la chute de pression de l'échangeur de chaleur à air ambiant pour lui permettre d'être injecté dans le moteur.  $P_{amb}$  est égal à la pression ambiante.

## Le travail d'échappement

Le travail d'échappement est similaire au cycle Otto standard mais, il est important que  $V_{clr}$  soit pris en compte.

$$W_{exh} = (1/\eta_e) (P_{exh} - P_{amb}) (V_4 - V_{clr})$$

## Le travail de la pompe

Le travail de la pompe cryogénique est déterminé pour un volume constant avec un rendement  $\eta_p$ .

$$W_{pump} = V_0 (P_1 - P_2) / \eta_p$$

$V_0$  = volume spécifique du fluide cryogène dans le thermos.

## Le travail d'admission

Le travail d'admission ne nécessite aucun effort (le remplissage de  $V_{cl}$  ne demande aucun travail). L'évaluation de cycle se fait sous forme d'un moteur 2 temps.

### Le travail de détente

Le travail du piston sur l'air dans le carter est maintenant inclus dans la détente :

$$W_{exp}' = W_{exp} - P_{amb} (V_4 - V_3)$$

### Le travail spécifique net

$$W_{net} = W_{exp}' + W_{inj} - W_{pump} - W_{exh}$$

En observant l'équation précédente, on peut apercevoir que le travail d'injection est positif donc, qu'il aide à produire un travail net plus élevé.

### La chaleur nécessaire au cycle pour le travail net

Dans le cas du cycle Otto, la chaleur nécessaire se calcul comme suit :

$$q = C_v (T_3 - T_2)$$

$$T_2 = T_1 (1 + 1/\eta_c ((P_2/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1))$$

Par contre, en ce qui concerne les moteurs diesel, il est impératif de changer  $C_v$  pour  $C_p$  parce que le moteur fonctionne à pression constante et pas à volume constant.

De plus, la masse du carburant doit être égal à :

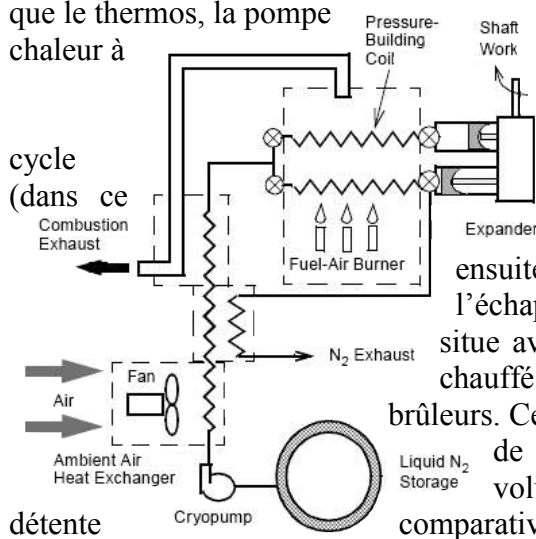
$$m_f = q/(\eta_b H_{lhv})$$

Donc, si la température maximum est spécifiée et que l'air entrant à une température près de celle ambiante, l'augmentation de la différence de température d'un procédé de combustion à volume constant produit une pression maximum plus grande.

De ce fait, un ratio de compression plus élevé (comme celui des moteurs diesel) peut être envisageable étant donné que la température de pré-ignition de la mixture a tendance à moins détonner, réduisant ainsi le besoin d'une essence à haut indice d'octane. Autre chose importante, le ratio de détente n'étant pas contraint par le procédé de compression (le temps de compression a été supprimé par l'étape d'injection de la mixture lorsque le piston arrive au point mort haut), il devient donc possible d'envisager une détente optimale.

### Combustion externe dans le cycle Otto modifié

Nous retrouvons encore quelques éléments qui sont communs à tous les cycles tel que le thermos, la pompe cryogénique et finalement l'échangeur de chaleur à



cycle cryogénique et finalement l'échangeur de chaleur à air ambiant. Son fonctionnement est quasi-similaire au précédent, la pompe pousse le fluide de travail cycle, l'azote liquide et l'air peuvent être utilisés) dans l'échangeur à air ambiant et, ensuite dans l'échangeur qui récupère la chaleur de l'échappement. Le différence entre les deux cycles se situe avant l'entrée dans le moteur du gaz. Celui-ci est chauffé dans une sorte de boîte où se trouve des brûleurs. Ces brûleurs chauffe le gaz qui circule à l'intérieur de spires de différentes longueurs mais, avec un volume restreint favorisant ainsi une meilleure comparativement au cycle précédent où l'on chauffait le gaz directement dans le moteur.

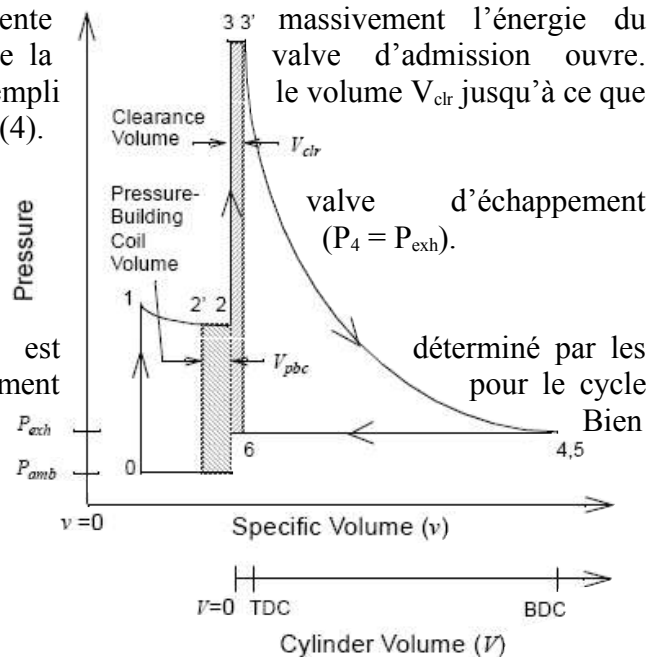
détente  
gaz directement dans le moteur.

Si on regarde le diagramme Pression-Volume, la vaporisation du fluide de travail est réalisée de la même méthode que le cycle précédent. Aussi, il est important de mentionner que la chute de pression dans l'échangeur de chaleur à air ambiant est prise en compte dans ce graphique.

La chaleur fournie au gaz augmente le gaz entre l'état 2 et 3 jusqu'à ce que la valve d'admission ouvre. Cette valve une fois ouverte, le gaz rempli le volume  $V_{clr}$  jusqu'à ce que la pression d'échappement soit atteinte (4).

Une fois la détente terminée, la valve d'admission ouvre et le gaz est poussé à l'extérieur

Le travail dans ce cycle est déterminé par les mêmes équations écrites précédemment pour le cycle Otto modifié à combustion interne. entendu, les calculs sont fait en assumant que les rendements sont similaires.



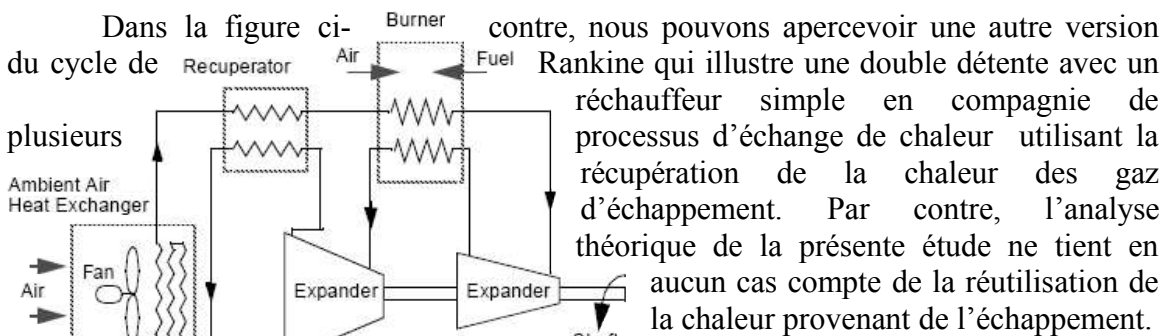
Trois choses importantes à noter :

- L'ajout de chaleur dans les spires tend à réduire le taux de chute de pression durant la détente, en supposant que celle-ci soit adiabatique.
- Le ratio de détente est choisi pour  $V_4/(V_{clr}+V_{pbc})$  pour détendre complètement la pointe de pression.
- Le travail d'injection dans ce cycle est nul.
- L'ajout de chaleur, donc de fuel (débit massique) est déterminé par les mêmes équations que précédemment.

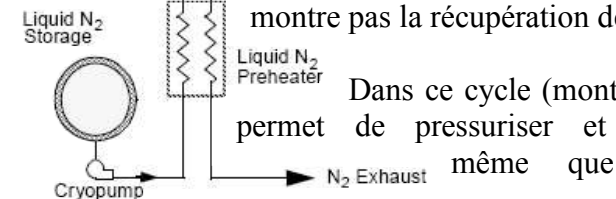
# Cycle de Rankine Cryogénique à combustion externe

Dans un cycle de Rankine, la pression maximum du cycle utilisant de l'air liquide comme fluide de travail est habituellement généré par la pompe cryogénique. Dans ce cycle, le procédé d'addition de chaleur est idéalement isobarique et le procédé de détente peut être adiabatique ou isotherme (idéalement) dépendant de la température maximum du cycle.

Dans le schéma où l'on retrouve le cycle à combustion externe tel que montré précédemment, nous pouvons transformer ce cycle en un cycle de Rankine en supprimant la valve d'isolation entre l'échangeur ambiant et la «boîte» de chauffage.



Dans la figure qui suit, il est important de mentionner que graphique ne montre pas la récupération de chaleur du cycle.

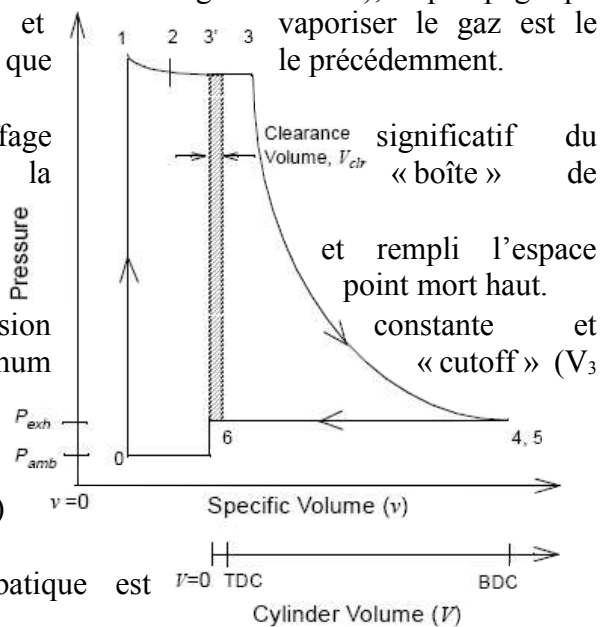


Dans ce cycle (montré sur la figure à droite), le pompage qui permet de pressuriser et vaporiser le gaz est le même que le précédemment.

- L'étape 2-3' montre un chauffage gaz à pression constante dans la chauffage.
- Le gaz est injecté dans le moteur  $V_{clr}$  lorsque le piston approche le point mort haut.
- L'injection se fait à une pression continue jusqu'au point optimum  $(V_3 - V_3')/V_4$  produisant le travail d'injection déterminé par :

$$W_{inj} = \eta_e (P_2 - P_{amb}) (V_2 - V_{clr})$$

- Le travail de la détente adiabatique est déterminé comme précédemment.



Finalement, le travail net du cycle Rankine est déterminé par :

$$W_{\text{net}} = W_{\text{exp}} + W_{\text{inj}} - W_{\text{pump}} - W_{\text{exh}}$$

## La consommation de carburant du cycle Rankine

La consommation de carburant pour ce cycle est basée sur la plus basse valeur énergétique du fluide utilisé et le rendement de combustion.

$$q_{23} = C_p (T_3' - T_2)$$

Dans la précédente formule, on remarque le coefficient utilisé est celui de la capacité de chaleur à pression constante. Dans les moteurs diesel, on retrouve exactement la même équation pour déterminer la quantité de chaleur nécessaire dans la chambre à combustion afin de produire le travail voulu.

## Représentation des valeurs théorique

Afin d'être en mesure de bien comprendre tout les équation et de bien interpréter les résultats qu'il permettent d'obtenir, nous devons nous assurer de mettre les bonne valeurs aux bons termes.

Le travail net des quatre cycles décrit précédemment est déterminé en fonction du volume de compression ou par le ratio de détente

$$V_1/V_2 \text{ ou } V_4/V_3$$

Aussi, la température de pointe du cycle se situe au point  $T_3$  et la pression la plus élevée de ce même cycle est  $P_3$ .

- Les rendements mécaniques des étapes de compression et de détente correspondant à chaque cycle sont les similaire. C'est-à-dire que  $\eta_e$  et  $\eta_c = 0,85$ .
- Le rendement de la pompe, dans le cas de l'utilisation d'un fluide cryogénique est égal  $\eta_{\text{pump}} = 0,5$ .
- L'échangeur de chaleur ambiant vaporise et surchauffe le gaz à 95% de la température ambiante avec une perte de pression de 10% dû au réchauffement et les pertes par viscosité  $\eta = 0,1$ .
- Les rendements de combustion interne et externe sont de  $\eta_b = 0,7$ .
- $V_{\text{cr}} = 0,02$  pour tous les calculs.
- Les fluides de travail sont stockés à pression atmosphérique  $P_0 = P_{\text{amb}}$

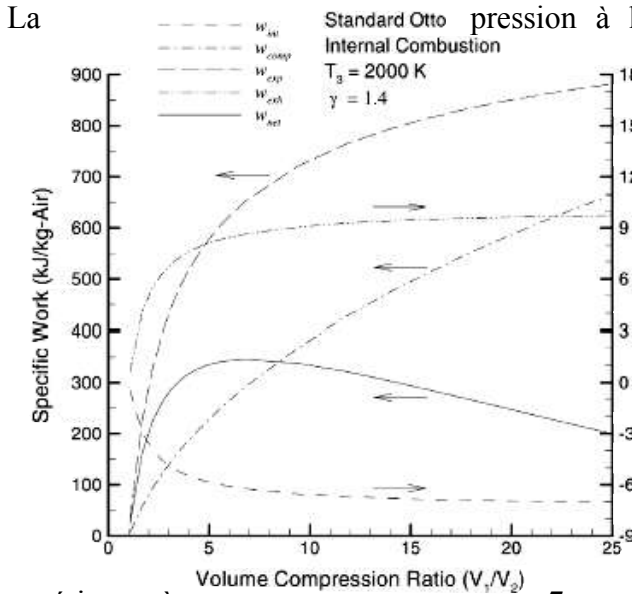
Avec toutes ces valeurs mentionnées ci-haut, il est important de prendre en compte que ces chiffres représentent réellement la technologie disponible présentement.



## Performance du cycle Otto Standard

Le prochain schéma représente le travail net pour chaque temps moteur en fonction du ration de compression pour une pointe de température  $T_3 = 2000\text{K}$ .

Dans ce graphique, le fluide de travail est de l'air et la carburant est l'octane pur. Dans ce graphique, le fluide de travail est de l'air et la carburant est l'octane pur. La pression à l'admission ( $P_{\text{int}}$ ) est de 91 kPa et la pression à l'échappement est de 0.11MPa.



Sur le graphique ci-contre, sur l'axe droit, on peut remarqué que le travail  $W_{\text{int}}$  et  $W_{\text{exp}}$  demeure relativement insensible lorsque le ratio de compression excède 5.

On peut aussi remarquer que le travail de compression augmente à un taux plus rapide que le travail de détente résultant en une diminution du travail spécifique net lorsque le ratio de compression devient

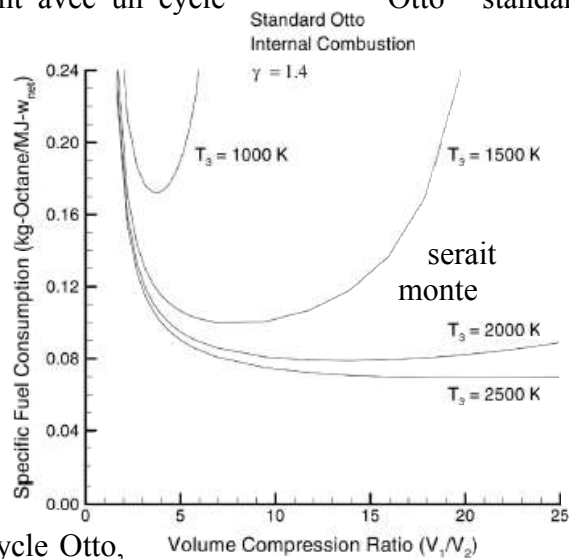
supérieur à 7.

Tout ceci signifie que l'utilisation la plus efficace de l'air serait réalisé avec un ratio de compression d'environ 7. Par contre, le moteur utilise l'air libre donc, non compressé au départ, ce résultat n'est pas nécessairement le meilleur puisque c'est un ratio de compression optimum pour un coût d'opération minime.

La prochaine figure représente la consommation spécifique de carburant par unité de travail net dans un moteur fonctionnant avec un cycle Otto standard pour quatre différentes températures.

On peut remarquer que la consommation de carburant diminue avec l'augmentation de la température dans la chambre de combustion. Avec une température située entre 2000K et 2500K l'idéal, puisque le ratio de compression maintenant entre 10 et 15. Cette région du graphique en fait un point de fonctionnement très efficace pour un moteur.

Dans un moteur conventionnel, la température de la flamme atteint tout près de 2200K. Par contre, dans un moteur à cycle Otto,



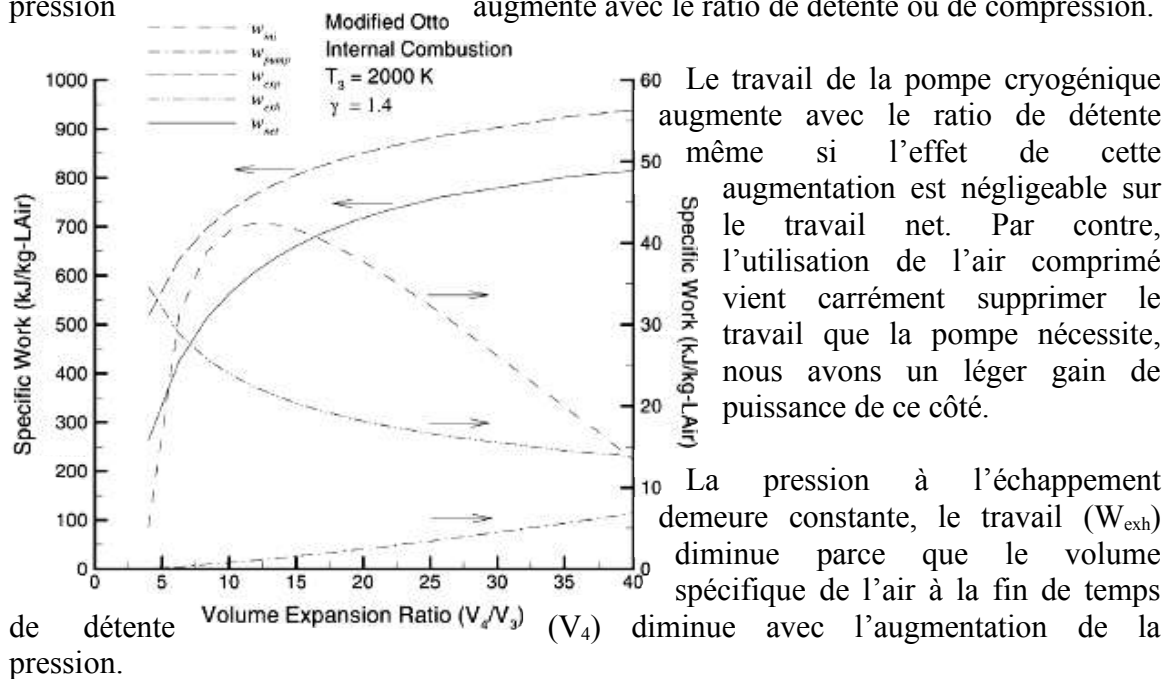
l'essence s'enflamme d'elle-même lorsqu'elle est exposée à un taux de compression supérieur à 12.

En contre partie, le cycle diesel offre cette possibilité au niveau de la chaleur de combustion et du ratio de compression. De plus, le carburant diesel supporte les hauts taux de compression qui permettent d'optimiser le rendement du moteur.

## Le cycle Otto modifié à combustion interne, les performances

Le travail spécifique pour chaque procédé Otto modifié est fonction du ratio de détente ( $V_4/V_3$ ) avec combustion interne utilisant l'air liquide.

Sur le graphique ci-contre, la pointe de température  $T_3 = 2000K$  et la pointe de pression augmente avec le ratio de détente ou de compression.



Le volume actuel du cylindre ( $V_4$ ) nécessaire pour un fluide de travail par unité de masse diminue avec l'augmentation ( $V_4/V_3$ ) quand la pointe de température est gardée constante.

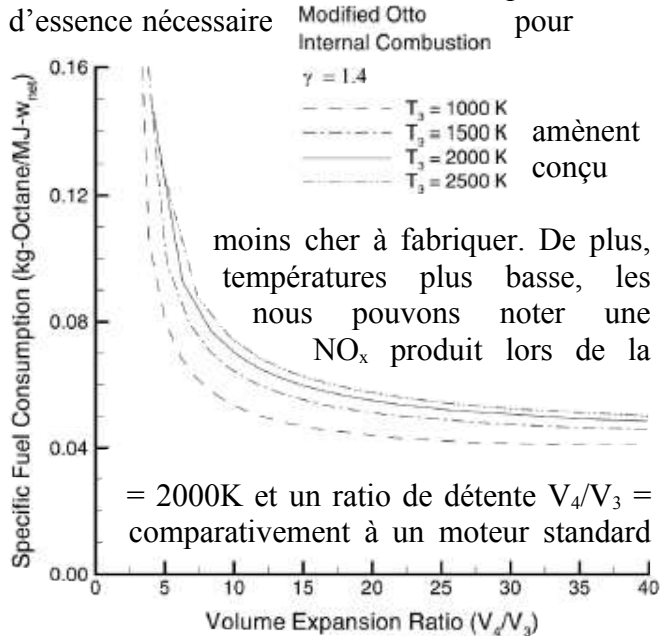
Le travail d'injection ( $W_{inj}$ ) est maximum parce qu'avec un ratio de détente supérieur, le procédé est coupé à un plus petit  $V_2$  et une fraction plus large du gaz doit être utilisé afin de combler le volume  $V_{cyl}$ .

Le travail net par unité de masse d'air augmente et est deux fois celui d'un cycle Otto standard à un ratio de détente supérieur à 10. Ce qui signifie que pour la même puissance, le moteur modifié pourrait être deux fois plus petit qu'un moteur normal.

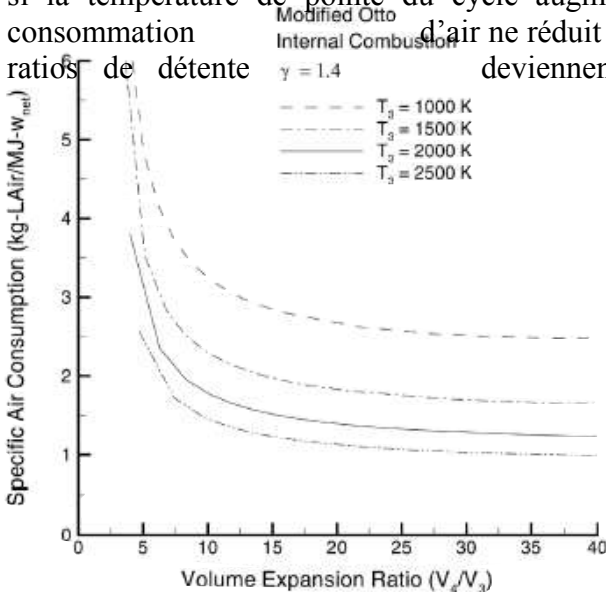
Il est intéressant de constater grâce au graphique suivant que, contrairement au cycle Otto standard, l'économie de carburant diminue avec la baisse de la température de pointe ( $T_3$ ) étant donné que la quantité d'essence nécessaire

Toutes ces observations à penser que le moteur peut être pour tourner plus froidement (à des températures plus basses) donc, si le moteur fonctionne avec des rejets de chaleur sont moindre ainsi, diminution marquée du niveau des combustion.

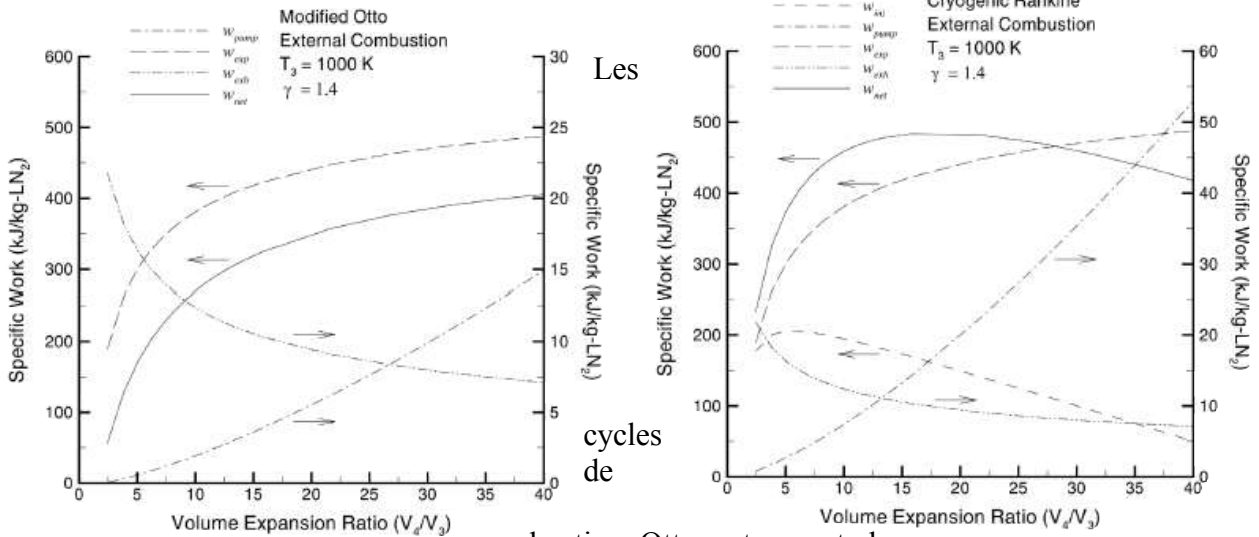
La combustion d'un moteur modifié opérant à une température  $T_3 = 2000$  K est réduite de 33% où la température de pointe  $T_3 = 2000$  K mais  $V_1/V_2 = 10$ .



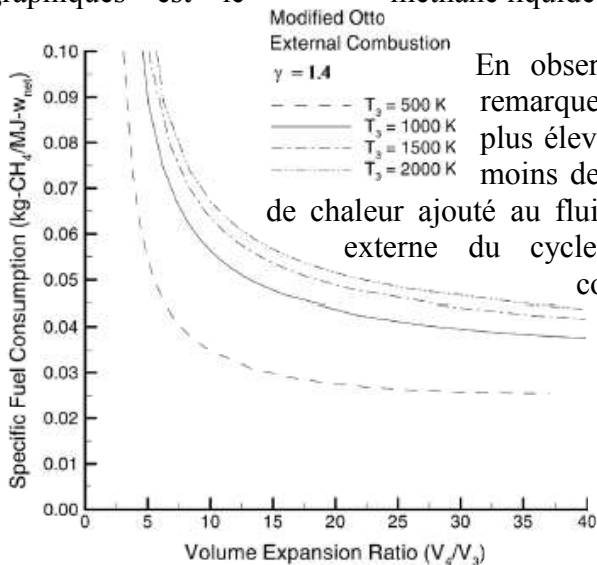
En ce qui concerne la consommation d'air pour un cycle modifié, celle-ci diminue si la température de pointe du cycle augmente. Mais, il est aussi apparent que la consommation d'air ne réduit pas la consommation d'essence lorsque les ratios de détente deviennent supérieur à  $V_4/V_3 = 20$ .



# Le cycle Otto modifié à combustion externe et le cycle de Rankine, les performances

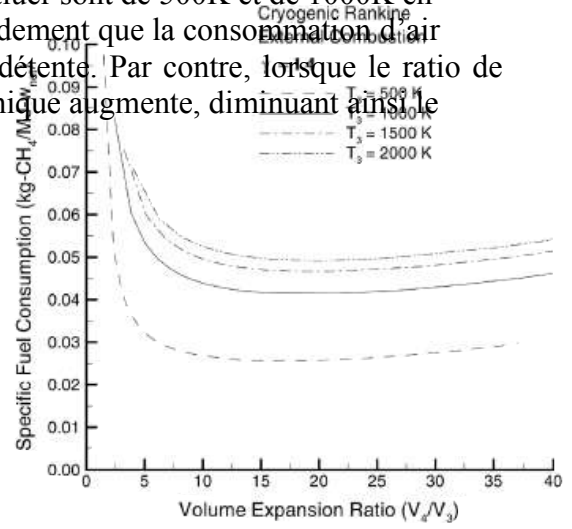
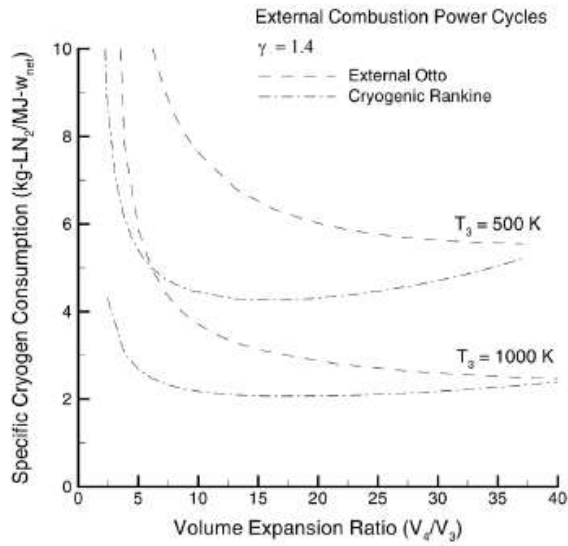


À l'intérieur de chaque cycle, la température de pointe ( $T_3$ ) est de 1000K. L'avantage d'utiliser la combustion externe, dans les deux cycles, est la facilité de prendre différents types de carburants pour chauffer le fluide. Donc, nous pouvons utiliser sans problème des carburants comme le méthane ou le gaz naturel car leur combustion est plus propre. Comme le montre les prochaines figures, le carburant utilisé dans ces graphiques est le méthane liquide.



En observant les graphiques ci-contre, on peut remarquer que le cycle de Rankine à un rendement plus élevé lorsque le ratio de détente est moins de 16 et ce, pour n'importe quelle quantité de chaleur ajouté au fluide de travail. Par contre, la combustion externe du cycle de Otto possède une plus faible consommation pour une détente plus élevée.

Dans la dernière figure ci bas, les températures évaluées sont de 500K et de 1000K en fonction du ratio de détente. On peut observer rapidement que la consommation d'air liquide diminue avec l'augmentation du ratio de détente. Par contre, lorsque le ratio de détente ( $V_4/V_3 = 16$ ) le travail de la pompe cryogénique augmente, diminuant ainsi le travail net que doit fournir le moteur.



## Conclusion

Les avantages de l'utilisation de l'air liquide ou comprimé sont bien exposés au travers de cette recherche. On peut entrevoir que l'air comprimé offrira de meilleur résultat encore que l'air liquide étant donné que le travail de la pompe cryogénique se va supprimer.

Le cycle Otto à combustion interne modifié est un cycle intéressant. Bien qu'il permette d'envisager des économies substantielles sur la consommation de carburant, il nécessite un moteur adapté à ce type de fonctionnement. Ce qui signifie, comme l'admission du fluide de travail doit se faire lorsque le piston atteint le point mort haut, il devient important de modifier le moteur utilisé afin que les valves d'admission puissent ouvrir correctement sans endommager la surface du piston. Pour ce faire, il sera nécessaire en premier lieu, de changer la séquence d'ouverture des valves afin qu'elles ouvrent au moment opportun. Ensuite, pour s'assurer que l'ouverture des soupapes se fasse sans contact avec le piston, il faudra augmenter le volume  $V_{clr}$  dans le moteur, ce qui viendra altérer le fonctionnement du moteur si jamais celui-ci devait recommencer, pour une raison ou une autre, à fonctionner de façon normale ; car l'augmentation de  $V_{clr}$  diminue proportionnellement la pression dans la chambre de combustion durant le temps de compression.

De plus, cette technique ne peut être utilisée dans les moteurs pneumatiques étant donné que la chaleur maximum atteinte durant le procédé de combustion peut endommager le moteur pneumatique qui n'a pas été construit pour cette technologie.

Aussi, il est important de considérer que l'allumage des gaz dans la chambre de combustion doit être pris en compte. L'augmentation de pression durant l'admission des gaz augmente aussi la masse de l'air admise. Il faut donc penser que l'essence ou tout autre carburant joint à l'air comprimé doit être dosé de façon non-conventionnelle puisqu'il n'est plus nécessaire d'avoir un mélange stœchiométrique de 14.7 unité d'air pour 1 unité de carburant (pour l'essence). En dernier lieu, il est important de s'assurer que le système d'allumage est en mesure de bien allumer le mélange afin de minimiser la quantité d'hydrocarbure émise à l'échappement. Ceci signifie qu'il est nécessaire de bien positionner la bougie dans la chambre à combustion.

Bref, cette technique me semble complexe et demande une étude plus approfondie au niveau du moteur, qu'il soit à essence ou diesel.

En ce qui concerne la combustion externe du cycle Otto, elle me semble plus réalisable au niveau technique à moins de frais. Comme la combustion se fait à l'extérieur du moteur, nous pouvons carburer à différents produits. De plus, comme la combustion est stable et toujours égale, l'économie de carburant est supérieure au cycle à combustion interne.

Dans le cas où l'on utilise des moteurs à essence ou diesel, les modifications nommées précédemment doivent aussi être prises en compte sauf sur certains modèles de diesel où les têtes de moteur peuvent être interchangeables. Cela signifie que certains moteurs-générateurs diesel de gros calibre ont des versions de moteurs transport qui possèdent le frein moteur appelé « Jacob ». Ce système de freinage utilise une valve placée dans la tête du moteur qui ouvre pour libérer l'air comprimé par le piston lorsque celui-ci termine son temps de compression. Dans notre cas, le temps de compression sera supprimé et la soupape ouvrira pour laisser passer notre air chauffé à l'extérieur pour que cet air puisse pousser sur le piston et produire un travail net.

En second lieu, le fait de chauffer l'air comprimé à l'extérieur peut permettre l'utilisation de moteurs pneumatiques car la température de chauffage est plus basse et la combustion ne se fait pas à l'intérieur du moteur, évitant ainsi d'encrasser de carbone les composants internes du moteur.

Enfin, je crois que le concept de combustion externe est un système qui peut être exploitable et qui permet d'éviter certains problèmes techniques d'allumage, de mélange et de moteur. Par contre, les difficultés techniques pour modifier un moteur diesel sont multiples et peuvent être coûteuses. L'augmentation de l'espace  $V_{cl}$  dans le moteur permettra une meilleure ouverture des soupapes d'admission mais, augmentera la quantité requise dans la chambre pour produire le même travail. Je dois avouer qu'une étude technique plus poussée sur le sujet de la conversion des moteurs diesel devrait être réalisée afin de vérifier les possibilités que peut offrir un tel moteur.