

Essayer de se faire une opinion sur la voiture individuelle à air comprimé

(22 Aout 2007)

Frédéric Livet
SIMaP, UMR CNRS 5266, INPG-UJF, BP 75 38402-St Martin d'Hères- cedex
(frederic.livet@ltpcm.inpg.fr)

0.1 Introduction

Trouver un moyen écologique de propulser une voiture, ou autre moyen de transport individuel semble une tâche urgente, principalement pour réduire les émissions de CO₂ accompagnant l'utilisation d'essence. Mais il est difficile de trouver mieux que le moteur thermique tel que mis au point à la croisée des XIX et XX ièmes siècles: non seulement on a beaucoup de puissance sous un faible volume, mais l'énergie stockée dans le carburant liquide est abondante (10 KWh/litre). La voiture électrique avec batterie se voit reprocher une plus faible autonomie, un temps de recharge trop important, une longévité limitée, un coût encore important et le caractère polluant de sa batterie, qu'il faut récupérer et recycler.

Beaucoup de questions nous sont adressées sur la voiture à air comprimé (VA), telle que proposée par exemple par Monsieur Nègre sur le site "MDI". Comme toujours, il est difficile de porter une opinion claire sur un problème complexe, mais je vais essayer de voir si ce concept permet de contribuer à la lutte contre la pollution principale, à savoir les émissions de CO₂.

0.2 Energie stockée dans un réservoir d'air

Le concept de base de la VA est hérité des nombreux systèmes de trains-trams pneumatiques en service jusqu'aux années vingt. La base en est un réservoir d'air de volume V à la pression P et à la température ambiante (300 K) dont la détente va servir à fournir un travail W . On peut estimer le travail maximum créé avec une détente isotherme (P_0 : pression ambiante):

$$W_{max} = \int_P^{P_0} p dv = nRT \log(P/P_0) \quad (1)$$

On va discuter deux aspects dans cette equation: nRT (en Joules, n est le nombre de moles du réservoir, R est la constante des gaz parfaits: $R = 8.314J/K$ et $T \simeq 300$ K, la température est en Kelvins), qui va servir de base à l'estimation de l'énergie disponible, et le facteur "décoratif", ici un log, qui va mesurer l'efficacité du procédé.

Dans ce cas, on suppose que le gaz se conforme à la "loi de Mariotte" des gaz parfaits:

$$p \times V = nRT \quad (2)$$

Dans le moteur prévu par MDI pour une voiture urbaine, le volume de gaz est $V \simeq 360$ litres et on travaille à partir d'un réservoir de 300 bars. Dans ce cas, on peut estimer qu'au départ: $n = 300 \times (360/22.4) \simeq 4850$ moles d'air, pour un poids de $0.029 * 4850 \simeq 135$ Kg. Comme un tel réservoir pèse au moins 120 Kg, il faut embarquer à peu près 250 Kg comme réservoir d'énergie, de l'ordre de ce qu'on accepte d'embarquer en batteries dans une VE (évidemment on s'allège au fur et à mesure que l'air est consommé).

Le terme nRT donne ici $4850 \times 8.314 \times 300 = 12 \text{ MJ} \simeq 3.4 \text{ KWh}$.

Si on parvient à faire une détente isotherme, on peut obtenir $3.4 * \log(300) \simeq 19 \text{ KWh}$. Cela se compare bien à une batterie de 200 Kg d'accumulateur au Lithium, qui peut fournir 20 KWh. Dans une discussion sur le VE, j'ai montré qu'une voiture de poids et d'aérodynamique raisonnable a besoin de 10 KW pour rouler vers 90 Km/h, mais sans doute plus de 20 KW pour aller à 120 Km/h. Je doute que le VA proposée pèse moins de 900 Kg, et on a une autonomie route théorique autour de 160-180 Km.

Je ne suis pas sûr que ce soit le cas...

0.3 Le problème de la détente adiabatique

Dans l'équation donnant W_{max} , on a supposé une détente à température constante, mais lors d'une détente, les gaz n'ont pas le temps de récupérer de la chaleur dans l'environnement, et ils se refroidissent dans les bonnes vieilles formules ($\gamma = 1.4$ pour un gaz diatomique, comme l'air): $pv^\gamma = \text{constante}$ ou: $Tp^{(1-\gamma)/\gamma} = \text{constante}$. Dans ce cas, on sera amené à définir une énergie minimale récupérable:

$$W_{min} = nRT(\gamma/(\gamma - 1))(1 - (P/P_0)^{(1-\gamma)/\gamma}) \quad (3)$$

Ici le "facteur décoratif" est passé de $\log(300) = 5.7$ à $(1 - 300^{(1-\gamma)/\gamma})/(\gamma/(\gamma - 1)) = 2.8$ On perd donc plus de 50 % de l'énergie stockée. Ajoutons qu'une telle détente aboutit en principe à liquéfier une bonne partie de l'air, ce qui veut dire que la loi des gaz parfaits ne devient plus valable.

Tout le problème de la décompression/compression des gaz se trouve dans cette comparaison. Bien sûr, les pertes thermiques font que la détente ne sera pas purement adiabatique, et on introduit parfois une valeur γ effective intermédiaire entre 1 et 1.4 pour en tenir compte. Dans le cas d'une détente rapide correspondant au fonctionnement d'un véhicule, cet effet semble faible. En outre, dans le fonctionnement réel d'un moteur à air comprimé, on utilise un détendeur car il est difficile d'alimenter une chambre à détente sur une si grande dynamique de pression dans un système à un étage: le rapport effectif P/P_0 est donc plus petit que le maximum de 300 donné ici.

Il me semble raisonnable que le "facteur décoratif" soit in fine de l'ordre de 2.

Dans ce cas, l'autonomie du véhicule sur route n'atteint pas 80 Km. Ce système peut il avoir une meilleure efficacité en ville, sachant qu'une voiture à moteur thermique perd beaucoup de rendement à basse vitesse et que l'énergie de freinage est toujours perdue. Cependant, si, contrairement à la VE, on ne récupère pas cette énergie de freinage et si le moteur de la VA copie le moteur thermique (embrayage, changement de vitesse, pistons), je doute que la gain soit très important.

0.4 La solution "MDI"

On cherche là un cycle thermodynamique où le gaz expansé et refroidi échange de la chaleur avec l'extérieur. On trouve une approche dans les brevets de G. Negre (MDI), où un moteur complexe avec deux cylindres et une chambre de combustion séparée est proposé. Dans le premier cylindre, on comprime de l'air vers 20 bars et cela le chauffe vers 400 C, puis on le mélange dans la chambre avec de l'air comprimé (plus éventuellement du carburant) et on le détend dans une autre chambre. Il semble que l'air comprimé arrive à 40 bars, et 300K (donc il a subi une détente-thermalisation auparavant?). J'imagine que cela peut relever le rapport P/P_0 effectif, et aussi la température avant détente adiabatique, mais je doute que cela améliore de beaucoup les résultats du calcul précédent, compte tenu de la compression initiale et que les systèmes à piston ont souvent des pertes assez importantes dues aux mouvements alternatifs (frottements).

Je pense que les caractéristiques données sur le site MDI sont un peu optimistes: pour une petite voiture urbaine de 870 Kg (dont près de 250 Kg de réservoir plein?) une autonomie de 200 Km en ville et de 80 Km en route à 110 Km/h, et pour une hybride- en injectant du carburant avant admission dans la chambre de combustion- de 1500 Km avec une consommation de 2 l/100 Km, avec vitesse maxi de 130 Km/h. Ce sont des rendements de moteur tout à fait déraisonnables, et si cela existait, Toyota (et même Renault!) le ferait déjà! Un moteur à essence consomme aujourd'hui difficilement moins de 5 l/100 Km pour un tel véhicule...Je rappelle qu'on chiffre les économies qu'amène une propulsion hybride (moteur thermique- batterie- moteur électrique) autour de 25 %.

0.4.1 Le remplissage

Le remplissage nécessite aussi de l'énergie. Le cycle simple pour obtenir de l'air comprimé est de comprimer adiabatiquement l'air à la pression P et ensuite de continuer à appliquer cette pression en le refroidissant (partie isobare). Dans ce cas, l'énergie dépensée (énergie mécanique, évidemment, donc électrique) s'écrit:

$$W_e = \int_P^{P_0} p dv = nRT(\gamma/(\gamma - 1))((P/P_0)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1) \quad (4)$$

C'est une énergie maximale, car les pertes thermiques au cours de la compression donnent encore un γ effectif intermédiaire, et on peut procéder à des compressions étagées séparées par des thermalisations à l'ambiante. Le même problème se rencontre dans la compression de l'hydrogène où 30% de l'énergie véhiculée par l'hydrogène peut être ainsi perdue.

Dans le cas étudié, on a : $W_e = 14.4nRT = 49KWh = 2.5W_{max}$. Pour diminuer cela, les promoteurs de MDI proposent d'utiliser des compresseurs industriels, optimisés pour diminuer ce facteur de 14.4 ou de recharger les réservoirs en autonome en quelques heures, pour sans doute permettre une compression plus proche de l'isotherme.

Dans tous les cas, il faut être conscient que ce sont des processus lourds, qui grèvent les prix et qui ont un coût énergétique en frottements... Par exemple, la meilleure méthode de compression semble être la turbine, dont un étage a un facteur de compression de $R = 1.4$ à peu près. Il semble évident

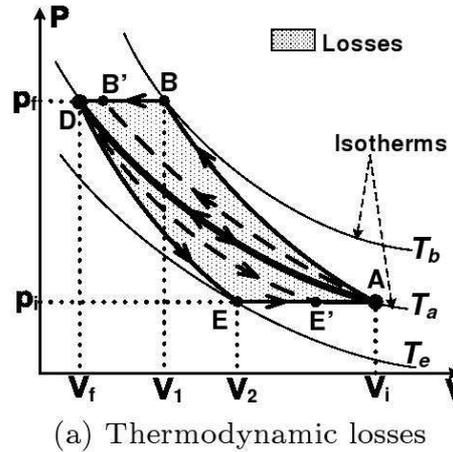


Figure 1: Le cycle d'un moteur à air typique: l'aire grisée correspond aux pertes énergétiques du cycle, la courbe isotherme au milieu minimise les pertes, P_i est la pression atmosphérique (P_0) et P_f est la pression de l'air comprimé ($P = 300$ bars ici)

que c'est l'électricité qui sera le médiateur énergétique et que des moteurs électriques seront utilisés pour la compression. Un compresseur haute pression industriel consomme de l'ordre de $2W_{max}$ pour comprimer l'air (efficacité de 50 %).

0.5 Le rendement du cycle

On peut utiliser pour représenter le cycle la figure 1 Le rendement global dépend fortement de la manière dont est menée la détente et la compression des gaz stockés: le rendement théorique du cycle de la figure 1 est:

$$R_{theor} = \frac{1 - (P/P_0)^{(1-\gamma)/\gamma}}{(P/P_0)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1} \quad (5)$$

de l'ordre de 20 % ici. D'un côté, ce rendement peut être un peu amélioré par des compressions, décompressions plus proches de l'isotherme, de l'autre, les pertes dues aux frottements de nos petits systèmes et au fait que le P/P_0 effectif de la phase propulsive (celui du numérateur) est sans doute bien plus faible compensent au moins cela. Je doute que le rendement global "centrale électrique-roues" soit bien meilleur que 15 %.

0.6 En conclusion

Outre que les caractéristiques des véhicules proposés sur le site:

http://www.mdi.lu/fra/affiche_fra.php?page=accueil

me paraissent bien optimistes quant à l'autonomie des véhicules, les cycles à air comprimé ont un mauvais rendement. Cet effet s'aggrave avec les hautes pressions exigées ici si on veut embarquer suffisamment d'air dans un petit volume: les rendements seraient meilleurs avec une pression de 30 bars, mais il faudrait $3 m^3$ de réservoir!

De plus, je m'étais procuré un article: "MDI: Etude comparative du Rendement Energetique en cycle urbain" qui contient une discussion très intéressante sur les cycles urbains, mais aussi une estimation de l'efficacité du moteur MDI: on annonce un rendement de 65 %, j'imagine comparée à mon estimation de W_{max} , qui me paraît peu raisonnable, je doute que le résultat soit bien meilleur que 40-50 %. En outre, cet article comparait un système électrique avec le système MIDI, et il donnait des caractéristiques tout à fait défavorables aux VE: il existe des chargeurs de batterie d'efficacité supérieure à 70 %, les batteries au lithium peuvent restituer plus de 90 % de l'énergie stockée et les moteurs électriques avoir un rendement de près de 90 %. Je ne trouve pas ce papier sur le web aujourd'hui, et j'en tiens une version pdf à disposition. Un problème avec la société MDI est qu'elle a une longue histoire (article dans Science et Vie en Juin 98, p. 130) et qu'elle a peu dépassé le stade de l'annonce. Dans ce cas, il est difficile d'avoir une vue totalement fondée sur ses projets.

La comparaison avec les voitures électriques avec batterie au Lithium, telles que décrites dans un autre papier sur ce site, apparaît défavorable aux systèmes pneumatiques, que ce soit pour le poids de la source d'énergie (250 Kg contre 200 Kg), pour son volume (300 litres contre 200 litres), pour son autonomie (moins de 80 Km contre 200 Km). En effet, on récupère plus de 20 KWh avec des batteries et de l'ordre de 8 KWh avec l'air comprimé. La capacité des moteurs électriques à récupérer l'énergie de freinage ou de descente donne un autre avantage aux VE en ville ou en montagne. Même le problème du temps de charge des batteries, en général quelques heures, mais qui peut être de quinze minutes sur les récentes LiFePO_4 , ne donne pas l'avantage à l'air comprimé, s'il faut quelques heures de compression proche de l'isotherme pour recharger le réservoir pneumatique dans son garage personnel.

Mais ce qui rend la comparaison encore plus défavorable est que le cycle basé sur les batteries lithium permet d'espérer des rendements autour de 60-70 % entre la centrale électrique et les roues, ce qui ouvre la possibilité du développement d'un nouveau mode de déplacement. Dans les meilleures conditions, la compression a une efficacité de 50 %, on récupère 50 % de W_{max} et avec les pertes en ligne, le rendement doit être de l'ordre de 20 % entre la centrale électrique et les roues.

Substituer l'usage de l'électricité à celui de l'essence est dans le domaine des transports une grande contribution à la lutte contre l'effet de serre. Evidemment, seule l'énergie nucléaire semble à même de fournir ce supplément d'électricité. Notons cependant que le très bon rendement des centrales au gaz (60 %), combiné avec celui du cycle à base de batteries (60-70 %) donne un cycle complet pour les VE gaz-roues de rendement autour de 40 %, meilleur que le rendement moyen des moteurs thermiques (20 %?), surtout en cycle urbain et émettant moins de CO_2 (gaz naturel) que les moteurs à essence (pétrole). Cela ne semble pas possible avec des VA.

On trouve un excellent papier sur ce sujet de Ulf Bossel, où est discuté de manière théorique un cycle à quatre étages de compression/décompression. Il donne un rendement théorique de 40 %, ce qui in fine n'est pas encore suffisant pour donner un cycle complet meilleur que 30 %. On remarquera que l'électricité a un grand avenir si on peut fournir l'énergie du parc français avec une demi-douzaine de centrales nucléaires de type EPR. Je ne puis cependant m'abstenir de citer cette intéressante conclusion:

"However, such efficiencies may still be attractive in a sustainable energy future when renewable energy is harvested as electricity and transportation needs must be satisfied from available energy sources. With respect to overall efficiency, battery-electric vehicles may be better than air cars, but hydrogen fuel cell systems may be worse. However, with respect to system and operating costs, air cars may offer many advantages such as simplicity, cost, independence, zero pollution and environmental friendliness of all system components." Excellent physicien, mais il fallait placer "renewable"! On sent le "politiquement correct" germanique!

adresse: "<http://www.efcf.com/e/reports/E14.pdf>"

Comme références, outre le site de MDI, donné ci-dessus, je trouve une très intéressante thèse en accès libre sur le web, où les calculs de cycle thermodynamique sont donnés (On y trouve aussi les problèmes de stockage hydro-pneumatiques, mais là aussi l'hybride avec batteries paraît le mieux pour l'automobile.):

Sylvain Lemofouet-Gatsi "Investigation and optimisation of hybrid electricity storage systems based on compressed air and supercapacitors" Thèse EPFL, no 3628 (2006). Dir.: Alfred Rufer.

J'ai trouvé un schéma du moteur à air comprimé MDI sur le site:
"http://hourdequin.ifrance.com/actualite/moteur_air_comprime/moteu%20air%20comprime.html". Je n'ai pas trouvé de papier décrivant en détail le cycle de MDI et calculant son rendement.