



Du Réservoir d'air Comprimé à la Voiture ...

1- Le Réservoir : énergie contenue dans un réservoir d'air comprimé

Un réservoir de volume V contenant de l'air à la pression P_a qu'on laisse se détendre contient effectivement de l'énergie mécanique qu'on peut récupérer.

Dans le cas d'une détente adiabatique réversible, à énergie thermique constante sans perte, (rendement énergétique égale à 100 %), l'énergie délivrée (en J/kg d'air) sera :

$$W = -\frac{\gamma}{\gamma-1} * Z * r * T_a * \left[\left(\frac{P_r}{P_a} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

- avec - gamma = Cp/Cv = 1,4 pour de l'air - Z = coefficient de compressibilité = 1
- r = constante du gaz = R/M
- où R= 8,314 J.mole⁻¹.K⁻¹ et M = masse molaire en kg/mole (= 0,028 pour de l'air)
d'où r = 287,058 J Kg⁻¹ K⁻¹
- Ta = température absolue (en °K) à l'aspiration = t (en °C) +273
Si t = 27 °C alors Ta = 300 °K et Si Pr= 1 bar (= atmosphère)
alors W = = -301410 x [(1/Pa)^{0,285} x 1] - 1]
- pour Pa = **300 bars**, W = (-3,5 x 1 x 287,058 x 300) x [(1/300)^{0,285} - 1]
W = **242,43 KJ/kg** et Ro = 343 kg/m³
- pour Pa = **100 bars**, W = **220,28 KJ/kg** et Ro = 129 kg/m³
- où Ro est la masse volumique de l'air à la pression considérée

Tableau 3 : la densité de l'air ρ en kg/m³ en fonction de la pression et de la température

Pression en bar	Température en °C							
	0	20	50	100	150	200	300	400
1	1,2514	1,066	1,067	0,915	0,807	0,722	0,596	0,507
1,033	1,2930	1,204	1,092	0,9458	0,8343	0,7457	0,6157	0,5242
20	25,28	23,46	21,19	18,26	16,08	14,35	11,83	10,07
40	50,98	47,14	42,39	36,38	31,97	28,51	23,49	20,02
60	77,01	70,84	63,47	54,29	47,61	42,45	34,97	29,80
80	103,0	94,54	83,34	72,03	63,05	56,15	46,26	39,43
100	128,9	118,0	105,0	89,45	78,22	69,60	57,33	48,90
150	191,2	174,5	154,9	132,5	114,9	102,3	84,18	71,87
200	248,8	226,9	201,5	171,2	149,6	133,3	109,8	93,88
250	297,8	273,4	243,7	207,9	182,0	162,4	134,1	114,9
300	342,9	316,5	283,3	242,5	218,8	190,2	157,3	135,0

Si on a un réservoir de **300 litres** (soit cinq fois un réservoir normal), soit 0,3 m³ pour Pa = **300 bars** on a **103 kg d'air** (en supposant le gaz parfait, ce qui n'est pas vraiment exact dans cette gamme de pression) pour Pa = **100 bars** on a **39 kg d'air**.

On peut donc stocker (en supposant que la pression est toujours maximale jusqu'à l'utilisation du dernier kg d'air ce qui majore considérablement...) pour Pa = **300 bars**

Énergie = 25000 kJ = **7 kWh** pour Pa = **100 bars** Énergie = 8600 kJ = **2,4 kWh**

Ces calculs concernent la détente adiabatique, ce qui correspond à une détente rapide (ce qui est habituellement le cas dans une machine) le rendement est bien meilleur avec une détente lente en maintenant le gaz à température constante (détente isotherme).

Autre calcul

L'énergie E contenu dans un volume V de gaz comprimé à une pression P vaut :

où

$$E = \frac{i}{2} \cdot P \cdot V$$

i = 3 pour un gaz monoatomique, (par exemple du He)

i = 5 pour un gaz diatomique et (par exemple de l'O₂ ou du N₂)

i = 6 pour un gaz triatomique ou plus (par exemple du CO₂)



Cette énergie peut être récupérée par décompression adiabatique, c'est-à-dire sans échange de chaleur avec l'environnement.

Dans le cas d'une décompression isotherme, c'est-à-dire à température constante, on peut récupérer plus d'énergie, car une partie vient de l'environnement sous forme de chaleur.

Dans ce cas, l'énergie récupérée vaut : $E = \ln(P_2/P_1) \cdot P \cdot V$

P_2 étant la pression avant décompression et P_1 après décompression.

$P \cdot V$ étant constant, on peut prendre $P_2 \cdot V_2$, avant décompression ou $P_1 \cdot V_1$ après décompression.

Par exemple :

l'énergie contenue dans 300 litres d'air ($0,3 \text{ m}^3$) à 300 bars ($3 \cdot 10^7 [N/m^2]$)

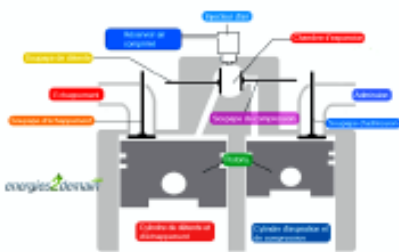
vaut : $E = \frac{6}{2} \cdot 3 \cdot 10^7 \cdot 0,3 = 27 [MJ]$ soit **7,5 kWh (décompression adiabatique)**

Ceci correspond à l'énergie contenue dans 0,6 kg d'essence, soit 0,83 litres d'essence.

Si la **décompression est isotherme**, $E = \ln(300/1) \cdot 3 \cdot 10^7 \cdot 0,3 = 51,3 [MJ]$ soit **14,2 kWh**.

Ceci correspond à l'énergie contenue dans 1,14 kg d'essence, soit 1,6 litre d'essence.

2 - Le Moteur : Efficacité énergétique d'un moteur à air comprimé



Un moteur à air comprimé utilise le principe de la "détente" d'un gaz, comme dans la partie "détente" d'une machine frigorifique. Comme celle-ci, il peut théoriquement avoir une efficacité énergétique supérieure à 100 %. En effet, l'efficacité énergétique est le rapport entre l'énergie (mécanique) restituée par le moteur et l'énergie fournie par le réservoir d'air. Or dans une détente isotherme, de

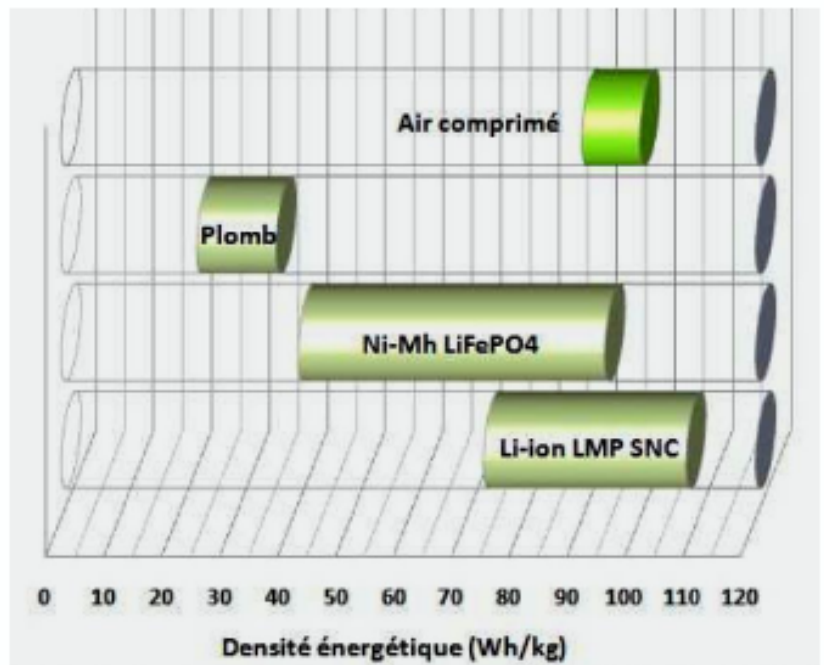
l'énergie thermique ambiante vient s'ajouter à l'énergie du réservoir, pour réchauffer le gaz qui se refroidit lors des détentes successives, ce qui explique que l'énergie mécanique résultante peut être supérieure à l'énergie initiale du réservoir, dans des conditions proches de l'idéal. C'est donc exactement l'effet inverse d'un moteur thermique, dans lequel la compression de l'air est obtenue par une combustion interne au moteur : la température plus haute que la température ambiante entraîne une fuite importante d'énergie thermique vers l'extérieur. Par exemple, pour le Cycle de Carnot, l'efficacité de Carnot entre 300°K et 900°K est de $1 - (300/900)$ soit $2/3$, signifiant $1/3$ de pertes thermodynamiques dans le cas idéal. On voit dans les calculs précédents sur l'énergie pneumatique et dans le cas du processus isotherme idéal, que l'énergie maximale produite peut être de 14,2 kWh, alors que l'énergie fournie en entrée du système, soit l'énergie contenue dans le réservoir calculée par le processus adiabatique, est de 7,5 kWh. On en déduit une efficacité énergétique théorique maximale de 189 % (car $14,2/7,5=1,89$). L'énergie calorifique (gratuite) captable dans l'environnement dans le cas théorique idéal représente 89% de l'énergie mise dans le réservoir, et s'ajoute à celle-ci. Il faudrait certes un moteur parfait pour restituer cela, mais il suffirait de fabriquer un moteur ayant moins de 48 % de pertes internes, pour arriver à une efficacité énergétique réelle dépassant 100 %, ce qui serait mieux que tous les autres systèmes moteurs connus. Cela est possible parce que les meilleurs moteurs à pistons, atteignent 50 % d'efficacité énergétique, ce qui témoigne, en tenant compte de $1/3$ de pertes thermodynamiques pour le cycle de Carnot, de pertes de rendement du moteur de l'ordre de 16 % par rapport aux 100 % de la source d'énergie, ou de l'ordre de 24 % par rapport aux 66 % restants ($16/66=0,24$) après les pertes thermodynamiques fatales du cycle de Carnot.





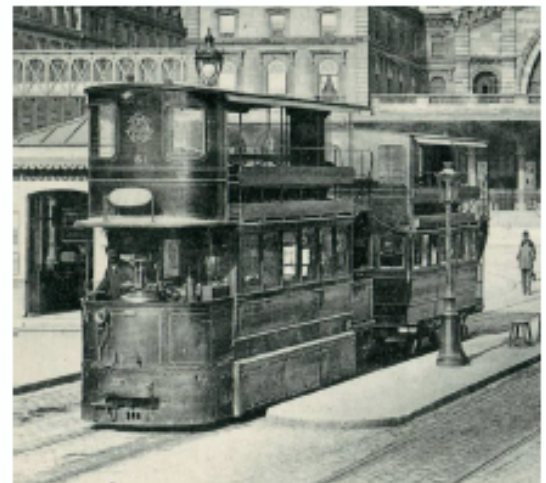
3 - Réservoir en fibre de carbone et densité énergétique

La légèreté des voitures à air comprimé (par rapport aux véhicules tout électrique) conduit à des résultats de consommation énergétique à la roue équivalents à ceux obtenus par les meilleurs véhicules électriques utilisant les dernières générations de batteries au Lithium. La densité énergétique des réservoirs d'air comprimé (fibre de carbone) est par ailleurs similaire à celle des batteries au lithium allant jusqu'à 140Wh/kg .



4 - Le perfectionnement technologique et les nouveaux matériaux relancent les véhicules à air comprimé ...

Pour la petite histoire le tramway Mékarski à air comprimé fut utilisé dans six différentes villes de France pendant six décennies, jusqu'en 1933. À partir de 1879, l'ensemble du réseau des tramways nantais fut équipé progressivement de plus de 90 véhicules à air comprimé qui donnèrent entière satisfaction jusqu'en 1917.



GM janvier 2015