

ETUDE DE LA RECUPERATION DE L'ENERGIE CINETIQUE D'UN VEHICULE



Illustration 1: Une Formule 1, premier véhicule sur lequel une récupération d'énergie cinétique a été mise en place

Etudiants :

Raphaël DE FALCO

Matthieu LEON

Alberto QUESADA REYES

Simon MOYON

Leslie SALVAN

Florent MONLAURD

Enseignant-responsable du projet :

Didier Vuillamy

Date de remise du rapport : 18/06/10

Référence du projet : STPI/P6-3/2010 – 36

Intitulé du projet : *Etude des moyens de récupération mécanique de l'énergie cinétique d'un véhicule*

Type de projet : *Etude théorique*

Objectifs du projet :

L'objectif principal de notre projet de physique est d'étudier les divers moyens de récupération de l'énergie cinétique pour savoir si ceux-ci représentent une solution crédible et viable quant à leur installation sur le parc automobile mondial, sur des véhicules comme nous conduisons tous les jours, nous, simples particuliers.

Ainsi cela aurait pour effet d'économiser de l'énergie, en récupérant et en réutilisant l'énergie cinétique dans les phases de décélération, permettant de ce fait une diminution de la consommation de carburant en fournissant une aide aux véhicules dans leurs phases de réaccélération.

Si existant, n° cahier de laboratoire associé : pas de cahier de laboratoire

Table des matières

1 INTRODUCTION.....	2
2 METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL.....	2
3 TRAVAIL REALISE ET RESULTATS	
.....	4
3.1 Les différentes possibilités de liaisons.....	4
3.1.1 Calcul de l'énergie cinétique du véhicule.....	4
3.1.2 Calcul de la puissance.....	4
3.1.3 Calcul des vitesses de rotation	4
3.1.4 Les types de liaisons.....	5
3.1.4.1 Liaisons mécaniques.....	5
3.1.4.2 Liaison électrique.....	5
3.2 Le volant d'inertie.....	6
3.2.1 Système mécanique.....	7
3.2.1.1 Problème.....	7
3.2.1.2 Fonctionnement de la récupération et la restitution de l'énergie.....	7
3.2.2 La roue cinétique.....	7
3.2.2.1 Définition.....	7
3.2.2.2 Fonctionnement dans les voitures.....	8
3.2.3 Calculs.....	8
3.2.3.1 Calculs généraux.....	8
3.2.3.2 Exemples et ordre d'idée.....	8
3.2.3.3 Applications.....	9
3.2.4 Stockage par ressort.....	10
3.2.4.1 Les ressorts en spirale.....	10
3.2.4.2 Les ressorts en traction/compression.....	10
3.3 Etude pneumatique.....	11
3.3.1 Calculs autour d'un cycle de compression	11
3.3.1.1 Travail, température et pression finales.....	11
3.3.1.2 Etude de la restitution de l'énergie.....	12
3.3.1.2.1 Restitution immédiate et restitution après pertes thermiques.....	12
3.3.1.2.2 Étude de la détente.....	12
3.3.2 Étude théorique du moteur à air comprimé.....	13
3.3.2.1 Cycle du moteur à air comprimé mono-énergie MDI	13
3.3.2.2 Exemples d'application.....	14
3.4 Systèmes hydrauliques	15
3.4.1 Principe	15
3.4.2 Technologie	15
3.4.3 Avantages et inconvénients.....	16
3.5 Stockage chimique.....	16
3.5.1 Etude d'un accumulateur.....	16
3.5.1.1 La réaction et le courant engendré.....	16
3.5.1.2 Quotient réactionnel et avancement.....	17
3.5.1.3 Tension, intensité et travail électriques.....	17
3.5.2 Exemple de l'accumulateur au plomb.....	18
3.5.3 Conclusion.....	20
4 CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	21
5 BIBLIOGRAPHIE.....	22
6 ANNEXES.....	24
6.1 Documentation technique	24
6.1.1 Continuously Variable Transmission.....	24
6.1.2 Etude pneumatique – étapes d'un cycle moteur MDI et schéma de fonctionnement.....	25
6.1.3 Etude pneumatique – Système pneumatique.....	27
6.1.4 Cycle NEDC en milieu urbain.....	28
6.2 Propositions de sujets de projets (en lien ou non avec le projet réalisé).....	28

NOTATIONS ACRONYMES

Acronymes

APU : Auxiliary Power Unit
Ar : accélération radiale
CAN : Controller Area Network
CVT : Continuously Variable Transmission
KERS : Kinetic Energy Recovery System
MDI : Motor Development International
MIT : Massachusetts Institute of Technology
NEDC : New European Driving Cycle
Rpm : rotations par minute
SIA : Société des Ingénieurs de l'Automobile

Notations

Mécanique :

V : Volume
R : Rayon
h : hauteur
m : masse
 ρ : masse volumique
J : moment d'inertie
 ω : vitesse de rotation
I : moment d'inertie de masse
 E_c : énergie cinétique
 E_r : énergie cinétique en rotation
d : densité énergétique
c : contrainte tangentielle

Pneumatique :

P : pression
V : volume
 γ : rapport isentropique
W : travail
 τ : taux de compression
T : température
R : constante des gaz parfaits

Chimique - électrique :

E : force électromotrice
R : constante des gaz parfaits
F : constante de Faraday
a : activité
 Q_r : quotient réactionnel
K : constante d'équilibre
 ξ : taux d'avancement
i : intensité
Q : quantité de charges

1 INTRODUCTION

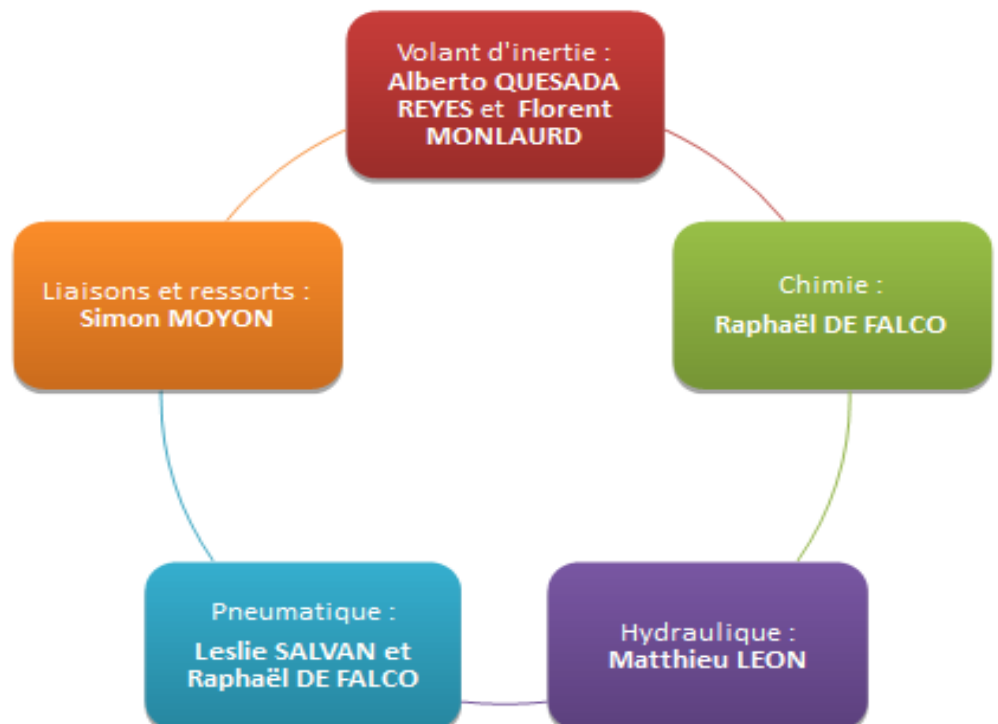
16,2. C'est, en pourcentage, le score affiché par Europe Ecologie au soir des élections européennes de 2009. Nettement derrière l'UMP, mais talonnant le PS (16,4%), Europe Ecologie est devenu la troisième force politique du paysage électoral français. Ce score record pour l'écologie montre bien la prise de conscience de l'opinion publique quant à la nécessité de réduire notre empreinte sur la planète. Peut-être est-il temps de limiter nos émissions polluantes et les gaspillages d'énergie.

Bien souvent, quand on parle pollution, gaspillage d'énergie, on pense automobile. En effet, le moteur thermique utilisé par la quasi-totalité du parc automobile français est une des principales sources de pollution, avec l'industrie. Les gaz d'échappement, que le moteur consomme de l'essence ou du diesel, sont nocifs à long terme pour la planète et pour notre santé. Ainsi, quand on pense écologie, on pense souvent voiture propre. Afin de satisfaire le consommateur, qui souhaite être plus respectueux de l'environnement, tous les constructeurs automobiles se penchent sur les solutions pour limiter la pollution engendrée par leurs véhicules. L'une d'entre elles est la récupération de l'énergie cinétique du véhicule en mouvement. Ce dernier, une fois mis en mouvement par le moteur, possède une énergie due à sa vitesse. Or, lorsque le conducteur décide de stopper ou tout du moins ralentir son véhicule, cette énergie est dissipée. Cette perte se fait par frottement, au niveau des freins. Aussi doit-il être possible de récupérer cette énergie, au lieu de la gaspiller inutilement.

Notre projet consiste en l'étude des différents moyens de récupération mécanique de l'énergie cinétique d'un véhicule. Tout d'abord comment la récupérer, puis comment la stocker, et enfin comment la restituer. L'objectif est de proposer plusieurs solutions qui pourraient être adaptées à des véhicules utilisés quotidiennement par des millions de Français. Nous avons d'ailleurs élargi le sujet de notre travail en nous intéressant au stockage chimique, stockage utilisé dans tous les véhicules.

Cette étude sera purement théorique. Tous les systèmes qui seront évoqués sont complexes, et coûteux. Nous n'avons pas les moyens matériels, ni financiers pour une mise en pratique de ceux-ci. Il est donc peu évident de rendre autre chose qu'une étude se basant sur la théorie. Nous tâcherons d'être complet et précis, de nous appuyer sur des exemples, et ce dans le but de nous rapprocher le plus possible de la réalité, de la mise en pratique de moyens de récupération de l'énergie cinétique bien que nous soyons parfaitement conscients qu'une étude « en conditions réelles », avec de nombreux tests, est irremplaçable.

2 METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL





27/02	Découverte du sujet
05/03	Recherches collectives
12/03	Début des recherches individuelles Répartition des parties du dossier final
19/03	Répartition des rôles
26/03	Premier bilan d'avancement
02/04	Questions posées suites aux recherches effectuées
22/04	Questions posées suites aux recherches effectuées
30/04	Deuxième bilan d'avancement
21/05	Questions posées suites aux recherches effectuées
28/05	Questions posées suites aux recherches effectuées
04/06	Bilan final Résolution des problèmes
11/06	Dossier rédigé
18/06	Dossier rendu
25/06	Oral de soutenance

3 TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

3.1 Les différentes possibilités de liaisons

On définit avant tout par hypothèse un volume de stockage de 20L de manière à fixer une taille raisonnable et similaire à tous nos différents modes de stockages.

Avant de pouvoir stocker l'énergie cinétique, il faut pouvoir la transmettre. Pour cela de nombreuses possibilités s'offrent à nous. Mais tout d'abord, il est nécessaire de faire quelques calculs.

3.1.1 Calcul de l'énergie cinétique du véhicule

Premièrement, il faut calculer l'énergie cinétique du véhicule. On considèrera un véhicule de tourisme, d'une tonne et demi, roulant à 70 km/h environ (20m/s).

Calcul de l'énergie cinétique :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 . \quad \text{Avec } m = 1\,500 \text{ kg et } v = 20 \text{ m.s}^{-1} \text{ on obtient : } E_c = 300\,000 \text{ J.}$$

3.1.2 Calcul de la puissance

Il nous faut calculer la puissance qui doit être transmise au travers de la liaison. D'après le cycle NEDC (New European Driving Cycle, qui est conçu pour imiter de façon reproductible les conditions rencontrées sur les routes européennes, qui nous a été fournis par la SIA), il faut 15 secondes pour passer de 70 km/h à 0km/h.

Calcul de la puissance de freinage nécessaire pour stopper le véhicule :

$$P = \frac{E_c}{t} \quad \text{avec } E_c = 300\,000 \text{ J et } t = 15 \text{ s}$$

$$P = \frac{189\,035}{15} = 20\,000 \text{ W} = 20 \text{ kW}$$

Ce calcul est valable pour un freinage constant. D'après le cycle NEDC toujours, pour un passage de 70 km/h à 0 km/h, la décélération reste dans un même ordre de grandeur. Elle varie en effet 1,02 et 1,38 m.s⁻². On peut donc considérer que la puissance de freinage reste elle aussi dans un ordre de grandeur de 20kW.

3.1.3 Calcul des vitesses de rotation

La récupération doit forcément se faire sur une des pièces en rotation, car elles sont les seules à être en mouvement (si l'on considère le référentiel du véhicule). Cependant, toutes ne tournent pas à la même vitesse. Pour trouver l'endroit le plus adapté pour récupérer l'énergie cinétique, il faut connaître les différentes vitesses de rotation aux différents points.

Le moteur du véhicule a une vitesse de rotation comprise entre 800 tours par minute (au ralenti) et 4000 tours par minute (pour une utilisation que l'on pourrait qualifier de normale). Pour un véhicule roulant à 70 km/h, nous pouvons raisonnablement estimer la vitesse de rotation du moteur à 2500 tours par minute.

L'autre composant en rotation est l'essieu, qui entraîne les roues. Calculons sa vitesse de rotation pour une vitesse de 70 km/h du véhicule. Cette vitesse est la même que la vitesse de rotation des roues. On prendra ici un pneu de petit monospace, par exemple le Citroën Xsara Picasso, avec pour caractéristique 185/65 R 15

185 correspond à la largeur de semelle (en mm), 65 est le ratio $\frac{\text{hauteur de flanc}}{\text{largeur de semelle}}$

R indique le type de structure (ici, radiale), 15 est le diamètre intérieur du pneu (en pouces)

Calcul de la hauteur de flanc :

hauteur de flanc = $0,65 \times \text{largeur de semelle} = 120,25 \text{ mm}$

Calcul du diamètre du pneu : (diamètre intérieur du pneu + hauteur des flancs multiplié par deux)

$D = 15 \times 0,0254 + 2 \times 0,12025 = 0,6215 \text{ m}$

Calcul du périmètre d'une roue :

$P = \pi \times D = 1,9525 \text{ m}$

Calcul de la vitesse de rotation de la roue pour une vitesse de 20 m/s :

$\omega = 20 / 1,9525 = 10,24 \text{ tours par seconde}$

Cela équivaut à environ 615 tours par minute. La vitesse de rotation étant plus faible, le couple y est plus important.

Cette différence de vitesse est liée à la boîte de vitesse. Nous avons donc deux possibilités quant à la position de l'élément de transmission : à la sortie du moteur, avant la boîte de vitesse, avec un nombre de tours élevé et un couple un peu plus faible; ou à la sortie de la boîte de vitesse "directement" sur les roues, avec une vitesse de rotation moins élevée, mais un couple un peu plus important. La première solution semble la plus intéressante.

3.1.4 Les types de liaisons

Passons maintenant aux liaisons permettant le stockage de l'énergie cinétique. Il en existe plusieurs types à notre disposition pour transmettre cette énergie. Car pour être stockée, il faut bien qu'elle transite depuis le contact du véhicule avec la route jusqu'au système de stockage.

3.1.4.1 Liaisons mécaniques

Les liaisons mécaniques ont pour but de transmettre la puissance résultant de l'énergie cinétique du véhicule de manière directe au système de stockage choisi. Il existe plusieurs sortes de liaisons mécaniques.

Premièrement, celles s'appuyant sur un embrayage. Il s'agit de mettre en contact une partie en rotation (vilebrequin ou essieu) en contact avec le système de stockage. Lors de la décélération du véhicule, la liaison se crée grâce à un embrayage qui transmet la puissance. Ce système impose un complexe assemblage (engrenage et/ou courroies, etc). Ce type de liaison pose cependant de nombreux problèmes. Tout d'abord, les pertes par frottement sont considérables. En effet, jusqu'à ce que les deux disques de l'embrayage tournent à la même vitesse, l'énergie se perd par frottement. A ce problème vient s'ajouter celui lié à la perte de vitesse du véhicule. L'embrayage va en effet ralentir le système de stockage, ce qui est un inconvénient dans le cas de la roue cinétique. Enfin, la complexité d'un tel système rend sa mise en œuvre coûteuse et peu fiable.

Une deuxième possibilité est l'utilisation d'un CVT, ou Continuously Variable Transmission. C'est un mécanisme complexe qui est développé ci après car inclus dans le système de stockage par volant d'inertie.

Mis à part le CVT, la liaison mécanique est peu intéressante de par sa complexité et la perte d'énergie.

3.1.4.2 Liaison électrique

Si la liaison mécanique est une liaison envisageable, la liaison électrique l'est tout autant. La liaison électrique est simple : elle consiste simplement en une génératrice électrique que l'on fixe sur un des éléments en rotation, et cette génératrice alimente un moteur.

Tout d'abord, intéressons nous au premier élément. Aussi appelé alternateur, il fournit de l'électricité grâce à un rotor qui tourne dans un stator. L'induction, assurée par le rotor, est due à un électroaimant (bobinage alimenté en courant continu). Le stator, lui, est constitué d'enroulements qui vont être le siège de courant électrique alternatif induit par la variation du flux du champ magnétique due au mouvement relatif du rotor. Comme le nom d'alternateur l'indique, le courant produit à partir de l'énergie mécanique de rotation est alternatif.

L'électricité produite est très simple à transporter puisque deux fils électriques suffisent. La liaison électrique a cet avantage d'avoir plusieurs applications possibles une fois l'énergie cinétique transformée en électricité. Cette électricité peut être stockée directement dans des batteries (stockage chimique). C'est donc le même principe que l'alternateur, sauf que ces batteries alimenteront plus tard un moteur électrique. Mais ce n'est pas la seule possibilité. L'électricité générée peut aussi alimenter un moteur la transformant de nouveau en énergie mécanique de rotation. Cette option permet le stockage mécanique, pneumatique ou hydraulique. En effet, ce moteur peut entraîner la roue cinétique, comprimer le ressort, faire fonctionner le compresseur. L'intérêt est de limiter les inconvénients de la liaison mécanique. La liaison est nettement moins complexe, et les pertes par frottements sont nulle voire moindres, contrairement au système mécanique par embrayage. Le rendement est particulièrement intéressant car il s'élève à 95%.

Concrètement, une génératrice électrique nécessite une vitesse de rotation relativement importante, de l'ordre de plusieurs milliers de tours par minute. Cela implique donc de la positionner entre la sortie du moteur et l'entrée de la boîte de vitesse, en la branchant directement sur le vilebrequin. C'est un système parfaitement envisageable puisqu'il se base sur le même principe que l'alternateur alimentant la batterie du véhicule (celle servant au moteur thermique). Un simple système de courroie permettrait de faire tourner le rotor à l'intérieur du stator. Il doit même être possible d'utiliser la courroie de l'alternateur pour notre génératrice récupératrice d'énergie cinétique.

Pour réaliser ce type de liaison, il nous faut une génératrice électrique de 20kW. 20KW est une puissance que peut parfaitement fournir ce type d'appareil. C'est d'ailleurs la puissance que peut atteindre les éoliennes qui sont vendues aux particuliers.

Cette génératrice doit être débrayable. En effet, elle ne doit être actionnée que lorsque le véhicule décélère, sinon elle sera une résistance au bon fonctionnement du moteur thermique et élèvera la consommation en carburant. Une fois embrayée, elle accentuera donc le "frein-moteur" en produisant l'énergie électrique.

Pour ce qui concerne les moteurs électriques, 20k W est une puissance tout à fait satisfaisante, puisque des moteurs d'une puissance identique sont déjà embarqués sur certaines voitures, suppléant le moteur thermique, directement sur les roues, notamment au démarrage. C'est le cas pour le Peugeot 3008 HyBrid4, ou pour nombre de petites voitures électriques en tant que moteur principal. C'est donc amplement suffisant pour faire fonctionner nos moteurs servant au stockage mécanique ou pneumatique.

De par la puissance à transmettre, la simplicité de mise en œuvre et le rendement important, la liaison électrique est plus qu'intéressante, pour le stockage de l'électricité directement dans des batteries, mais aussi pour les divers stockages mécaniques et pneumatiques.

3.2 Le volant d'inertie

Un volant d'inertie est une masse animée d'un mouvement de rotation, répartie autour d'un axe de telle sorte qu'elle confère à l'ensemble une plus grande inertie en rotation.

Son principe repose sur le stockage et la restitution d'énergie cinétique. Sa caractéristique physique est le moment d'inertie qui exprime la répartition des masses autour de l'axe. Dans le cas de notre sujet, il s'agit de pouvoir stocker l'énergie cinétique libérée au freinage dans ce volant, et de la restituer quand on souhaite un apport d'énergie.



Figure 1: Volant d'inertie

3.2.1 Système mécanique

3.2.1.1 Problème

La principale difficulté d'une récupération purement mécanique de l'énergie cinétique d'une voiture résulte dans la restitution de l'énergie cinétique: En effet, quelque que soit le système installé, la mise en rotation du volant va dépendre de la rotation des roues du véhicule. A contrario, lors de la restitution, il y a aura un décalage entre la vitesse de rotation du volant d'inertie et la vitesse des roues du véhicule. Alors comment palier cette différence de vitesse pour que le volant soit un apport d'énergie au niveau des roues même si sa vitesse de rotation est inférieure à celle des roues ? Et bien la réponse, la clé de tout le système a été donnée par les sociétés Torotrak et Xtrac et leur variateur toroïdal appelé CVT. Le CVT est un élément central des systèmes mécaniques à volant d'inertie. Il fournit une transmission de rapport variable de façon continue entre le volant et la transmission du véhicule et assure un système de stockage d'énergie très efficace et compact. Le cousin de ce variateur existe depuis longtemps sur les mobylettes, le CVT à courroie, mais ce CVT toroïde les deux sociétés l'ont inclu au système lorsqu'il a fallu fournir un système de récupération de l'énergie cinétique (KERS) à plusieurs écuries de Formule 1 durant la saison 2009. Nous développerons cet exemple quand nous nous intéresserons aux résultats des différents mise en œuvre de ce système. Ce variateur a l'avantage de présenter un rendement supérieur à 92 % et il permet de mettre en correspondance progressivement deux arbres dont les vitesses de rotation sont différentes.

Voir annexe, figure 4 : "CVT : Continuously Variable Transmission" et figure 5 : "Transmission CVT : embrayage et volant"

3.2.1.2 Fonctionnement de la récupération et la restitution de l'énergie

Voir figures pour un schéma explicatif de la récupération mécanique à l'aide de cette transmission.

On retrouve un moteur standard (ENGINE) avec son embrayage (CLUTCH) ses pignons (CLUSTER) ainsi que le différentiel (DIFF). Greffer à cela, nous avons le fameux CVT, avec un embrayage pour le volant d'inertie (FLYWHEEL).

Fonctionnement :

- Lorsque le véhicule est en fonctionnement standard, c'est à dire que l'utilisateur roule normalement, l'embrayage lié au moteur est engagé, celui du volant est débrayé.
- Lors du freinage, l'embrayage du volant s'engage (que l'utilisateur débraille ou non celui de la boîte de vitesse), et la rotation libre des roues va, à l'aide du CVT qui va compenser le ralentissement de l'arbre lié aux roues, transmettre l'énergie au volant qui se met en rotation.
- Ensuite, lorsque l'utilisateur souhaitera apporter un peu de vitesse à son véhicule, il pourra à l'aide d'une commande réengager l'embrayage du volant qui libèrera son énergie, et qui grâce au CVT, ne pourra qu'amplifier la vitesse des roues du véhicule et donc sa vitesse globale.

3.2.2 La roue cinétique

3.2.2.1 Définition

Un volant d'inertie est, dans une machine tournante, une masse liée à la partie animée d'un mouvement de rotation, répartie autour de l'axe de telle sorte qu'elle confère à l'ensemble une plus grande inertie en rotation, dans le but de rendre plus régulier le régime de fonctionnement, en s'opposant aux à-coups dus au moteur entraînant le dispositif ou au récepteur consommant l'énergie transmise.

Son principe repose sur le stockage et la restitution d'énergie cinétique. Sa caractéristique physique est le moment d'inertie qui exprime la répartition des masses autour de l'axe.

3.2.2.2

Fonctionnement dans les voitures

Le volant d'inertie installé dans une voiture, a pour but de récupérer l'énergie cinétique au moment du freinage, pour en suite la redonner aux roues au moment de la ré-accélération. Ces volants sont accouplés à une transmission, assurant la traction du véhicule. Dans les phases d'accélération, le volant ralentit, dans les phases de décélération, le freinage des roues accélèrent la rotation du volant (récupération d'énergie cinétique). Ces dispositifs nécessitent des transmissions très complexes pour transmettre la vitesse des roues à celle du volant. Par exemple des embrayages couplés à une gestion électronique.

Un inconvénient de ce type de récupération d'énergie, c'est le poids du système. Cette donnée est si importante qu'on pourrait se poser la question par rapport à la sécurité de ce système. Considérons un cylindre d'acier d'une masse volumique de 7850 kg/m³, d'un rayon R = 25 et d'une hauteur h = 10. Son volume est égal à: $V = \pi R^2 h = 19635 \text{ cm}^3$ et $m = \rho V = 154.13 \text{ kg}$. Le moment d'inertie J par rapport

à son axe de révolution vaut: $J = \frac{m R^2}{2} = \frac{\rho \pi R^4 h}{2}$

L'énergie cinétique de rotation de ce solide est : $E = J \omega^2 = \frac{\rho \pi h R^4}{4 \omega^2}$. Avec ω sa vitesse de rotation

suppose de 2800 tr/min (Moteur moyen), le fait de lancer cette roue d'inertie de 0 à 2800 tr/min stocke

donc une énergie de : $E = \frac{J \omega^2}{2} = 207058 \text{ J}$ qui permet, théoriquement (négligence "abusive" des frottements), de relancer le véhicule à environ 70 km/h

3.2.3 Calculs

3.2.3.1

Calculs généraux

L'énergie cinétique d'une masse tournante est : $E_r = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$ avec : ω : Vitesse angulaire (en rad/s),

$\omega = \frac{\text{rpm} \cdot 2 \cdot \pi}{60}$ avec rpm le nombre de tours par minute. I : Moment d'inertie (en kg.m²) de la masse autour du centre de rotation. Le moment d'inertie mesure la résistance qui s'oppose à un couple tendant à faire tourner l'objet. (pour un cylindre: $J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (R_1^2 + R_2^2)$ avec m la masse R1 le rayon extérieur et R2 le rayon intérieur .)

L'énergie cinétique d'un point matériel est donnée par la relation suivante: $dE_c = \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \cdot R^2 \cdot dM$ avec :

R : le rayon de la trajectoire du point considéré et dM : la masse élémentaire de ce point.

Un volant d'inertie, ou tout corps tournant autour d'un axe fixe, a pour énergie cinétique la somme des énergies cinétiques en chaque point. Le mouvement de rotation étant commun à tous les points, on peut mettre en facteur le paramètre de vitesse angulaire. Apparaît alors l'expression du moment d'inertie de l'ensemble:

$$\iiint dE_c = \iiint \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \cdot R^2 \cdot dM = \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \cdot \iiint R^2 \cdot dM$$

3.2.3.2 Exemples et ordre d'idée

Supposons le freinage d'une voiture de masse m=1 T de 70 à 0 km/h. La variation d'énergie cinétique est : $E_c(\text{fin}) - E_c(\text{début}) = \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot (0 - 70^2) = 2450 \text{ KJ} = 0,68 \text{ Kwh} = 680 \text{ Wh}$

En sachant que :

- $I = \frac{1}{2} \cdot m \cdot R^2$ pour un cylindre plein

- $I = m \cdot R^2$ pour un cercle
- Densité énergétique (en J/kg) : $d = E/m$
- Accélération radiale (en m/s^2) : $a_r = R \cdot \omega^2$ avec R le rayon extérieur en m et ω la vitesse angulaire
- Contrainte tangentielle (en N/m^2) : $c = \rho \cdot R^2 \cdot \omega^2$ avec ρ la masse volumique en Kg/m^3

Les meilleurs volants d'inertie actuels ont une densité énergétique de 130Wh/kg soit comme les batteries Li-ions. Pour donner un ordre de grandeur, si on prend un volant cylindrique plein en acier de 1m de diamètre par $l=1m$ de long, tournant à une vitesse de 5300tr/min (soit vitesse périphérique de 1000km/h !) :

$$\omega = \text{rpm} \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{60} = 5\,300 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{60} = 555 \text{ rad/s}$$

$$m = \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot l = 7\,850 \cdot \pi \cdot 0.5^2 \cdot 1 = 6\,165 \text{ Kg}$$

$$I = \frac{1}{2} \cdot m \cdot R^2 = 0.5 \cdot 6\,165 \cdot 0.5^2 = 771 \text{ Kg.m}^2$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 = 0.5 \cdot 771 \cdot 555^2 = 119\,106 \text{ J} = 33 \text{ kWh}$$

$$d = E/m = 33\,000 / 6\,165 = 5,35 \text{ Wh/Kg}$$

$$a_r = R \cdot \omega^2 = 0.5 \cdot 555^2 = 154\,000 \text{ m/s}^2 = 15\,700 \text{ g !}$$

$$c = \rho \cdot R^2 \cdot \omega^2 = 7\,850 \cdot 0.5^2 \cdot 555^2 = 605 \cdot 106 \text{ N/m}^2 = 61,6 \text{ Kg/mm}^2$$

En prenant un cylindre en acier évidé de rayon extérieur $R_1 = 0.15 \text{ m}$ et de rayon intérieur $R_2 = 0.10 \text{ m}$, de longueur $l = 0.20 \text{ m}$ tournant à 20 000tr/min (soit vitesse périphérique de 1131km/h !) :

$$\omega = \text{rpm} \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{60} = 20\,000 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{60} = 2\,094 \text{ rad/s}$$

$$m = \rho \cdot \pi \cdot (R_1^2 - R_2^2) \cdot l = 7\,850 \cdot \pi \cdot (0.15^2 - 0.10^2) \cdot 0.2 = 61,65 \text{ Kg}$$

$$I = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (R_1^2 + R_2^2) = 0.5 \cdot 61,65 \cdot (0.15^2 + 0.10^2) = 1 \text{ Kg.m}^2$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 = 0.5 \cdot 1 \cdot 2\,094^2 = 2,2 \cdot 106 \text{ J} = 610 \text{ Wh}$$

$$d = E / m = 610 / 61,65 = 9,90 \text{ Wh/Kg}$$

$$a_r = R \cdot \omega^2 = 0.15 \cdot 2\,094^2 = 658\,000 \text{ m/s}^2 = 67\,100 \text{ g !}$$

$$c = \rho \cdot R^2 \cdot \omega^2 = 7\,850 \cdot 0.15^2 \cdot 2\,094^2 = 775 \cdot 106 \text{ N/m}^2 = 79,0 \text{ Kg/mm}^2$$

Remarque : Il existe des tableurs permettant de trouver toutes ces valeurs.

Conclusion : Le stockage d'énergie dans un volant cinétique pour un véhicule particulier est parfaitement envisageable : nous nous rendons compte par ces calculs que le stockage demandé rentre parfaitement dans les standards des volants d'inertie.

3.2.3.3 Applications

Le système mécanique de récupération de l'énergie avec volant d'inertie a été utilisé, comme nous l'avons dit, en formule 1 durant la saison 2009 chez McLaren. Deux sociétés travaillant sur les technologies de transmission ayant signé un agrément de licence qui a permis au concepteur et fabricant de boîtes de vitesses de compétition Xtrac de développer un variateur (CVT) toroïdal accouplant un volant d'inertie à la transmission de la future Formule 1. Le KERS a obtenu de probants résultats avec McLaren alors que d'autres écuries ont décidé de supprimer le système de leurs voitures car trop volumineux.

Il a permis une récupération d'énergie lors du freinage, que les pilotes pouvaient réutiliser par la suite (400 kJ maximum par tour) en poussant sur un bouton, déclenchant un afflux supplémentaire de puissance de 80 chevaux pendant 6,67 secondes (ou 40 chevaux pendant 13 secondes) dans les phases d'accélération. Grâce à ce système, le 26 juillet 2009, à l'occasion du Grand Prix de Hongrie, Lewis Hamilton décrocha la première place et la première victoire d'une monoplace avec récupération d'énergie, la McLaren MP4-24.

Mais selon Torotrak et Xtrac , la puissance du système pourrait être doublée de 60kW à 120kW pour 2011 et augmentée jusqu'à 200kW en 2013, ce qui permettrait aux pilotes de disposer, à chaque tour de circuit, d'un "push-to-pass" d'une puissance supplémentaire 4 fois plus importante qu'en 2009. De plus, Xtrac et Torotrak considèrent que ce système pourrait être appliqué aux véhicules d'usage quotidien, évitant le recours aux architectures hybrides électriques. Annonçant un rendement énergétique de 90%, cette alliance risque bien d'enterrer les systèmes hybrides à seulement 36% max.

Le système a aussi été utilisé en motocyclisme et en endurance automobile : Par exemple, Porsche a conçu une Porsche 911 GT3 de compétition hybride, celle-ci embarquant, en plus de son moteur à explosion, deux moteurs électriques de 60 kW chacun, alimentés par un volant d'inertie capable de tourner à 40 000 tr/min pendant les phases de freinage. Le système pourrait fournir jusqu'à 164 ch supplémentaires pendant des périodes de 6 à 8 secondes. La technologie a été développée par le britannique Williams Hybrid Power12, partenaire de l'écurie de Formule 1 Williams F1 (La voiture sera engagée pour disputer les 24 heures du Nürburgring 2010).

3.2.4 Stockage par ressort

Un autre moyen de stocker l'énergie cinétique mécaniquement sont les ressorts. Le principe est simple. On applique un effort dont l'énergie provient de l'énergie cinétique sur un ressort, et une fois cet effort relâché, le ressort restitue l'énergie en revenant à son état d'équilibre.

Il existe deux types de ressorts : les ressorts en spirale, et les ressorts en traction/compression. Ce sont des éléments très différents, qui obligent une étude séparées. Cependant, ces études théoriques sont relativement complexes (d'après un enseignement de Résistance Des Matériaux, nous n'avons pas les moyens de résoudre ce type de système), mais essayons d'en comprendre les bases et le principe.

3.2.4.1 Les ressorts en spirale

Pour ce genre de ressorts, la constante de raideur K est la suivante : $K = \frac{Eb^3}{12L}$

Avec :

E : module de Young

b : profondeur du ressort

h : épaisseur de la lame

L : longueur développée de la lamelle

On fixe une extrémité du ressort, et on fait tourner l'autre d'un angle Θ .

Dans l'approximation des déformations linéaires, l'énergie stockée

$$E = \frac{1}{2} K \Theta^2$$



est :

La difficulté à étudier ce système est du au fait qu'il faut impérativement rester dans le domaine élastique du ressort. En effet, si on applique une trop forte pression au ressort, la déformation sera du domaine plastique, et donc irréversible. Nous n'avons pas les moyens d'étudier cette limite pour l'instant. De plus nous avons utiliser la formule des déformations linaire, or si elles n'en sont pas si loin, les déformations subies par le ressort ne sont pas linéaire.

Mais d'après nos recherches, il semblerait que ce type de stockage s'avère intéressant de par les quantités importantes d'énergie qu'il est capable d'emmagasiner.

3.2.4.2 Les ressorts en traction/compression

La constante de raideur k pour ce type de ressort peut s'écrire : $k = \frac{Gd^4}{8nD^3}$ avec :

G : module de cisaillement

d : diamètre du fil enroulé

n : nombre de spires

D : diamètre moyen du ressort.

Encore une fois, en restant dans le domaine élastique du ressort (linéaire, déformations réversibles), la force F due à l'allongement x du ressort est : $F = kx$

L'énergie stockée alors s'écrit : $E = kx^2$

On se retrouve une nouvelle fois limité dans notre étude par les raisons évoquées précédemment. Cependant il existe un grand frein à l'utilisation des ressorts en tant que moyen de stockage de l'énergie cinétique. En effet, les ressorts ont tendance à réagir d'une manière progressive, doucement au début, puis de plus en plus fort. Or, le freinage se présente différemment : plutôt appuyé au début, puis plus léger sur la fin. Cela représente un gros risque pour le confort, que peu de constructeurs seraient prêts à courir.

3.3 Etude pneumatique

3.3.1 Calculs autour d'un cycle de compression

3.3.1.1 Travail, température et pression finales

On sait que l'on veut récupérer une E_c de 300 000J et que la taille du stockage sera de l'ordre de $V_0 = 20L$. Le stockage de l'énergie en comprimant de l'air résulera d'un changement, entre autres grandeurs thermodynamiques, de pression et de volume.

On peut dès lors établir : $P_1, V_1 \rightarrow P_2, V_2$ avec $P_2 > P_1$ et $V_1 > V_2$ (1 représentant l'état initial et 2 l'état final)

On considère la transformation adiabatique réversible. Ainsi : $P V^\gamma = cste$, sachant P et V sont la pression et le volume de référence, et que l'air est diatomique ($\gamma = 1,4$).

On a : $P V^\gamma = P_1 V_1^\gamma$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} -P dV = - \int_{V_1}^{V_2} P_1 \frac{V_1}{V} dV = -P_1 V_1^\gamma \int_{V_1}^{V_2} \left(\frac{dV}{V^\gamma}\right) \Leftrightarrow W = \frac{-P_1 V_1^\gamma}{1-\gamma} (V_1^{1-\gamma} - V_2^{1-\gamma})$$

$$\Leftrightarrow W = \frac{P_1 V_1^\gamma}{1-\gamma} V_1^{1-\gamma} \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1-\gamma}\right)$$

Et donc : $W = \frac{P_1 V_1}{\gamma-1} \left(\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1-\gamma} - 1\right)$

On pose $\tau = \frac{V_1}{V_2}$ le taux de compression. Ainsi $W = \frac{P_1 V_1}{\gamma-1} (\tau^{\gamma-1} - 1)$

On choisit $\tau = 16$, ce qui correspond à un taux de compression d'un compresseur standard.

Avec $P_1 = 10^5 Pa$ et $V_1 = 20 L = 0,02 m^3$, on obtient un travail de : $W = 10 157 J$

Mais si l'on veut les 200 kJ, soit 20 fois plus, par linéarité il nous faudrait : $V' = 20 V_1 = 400 L$

Or ce volume serait trop encombrant pour un véhicule urbain !

Revenons aux calculs, Dans le cas d'un gaz parfait,

$$T_f = T_2 \quad . \quad T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1} \Rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} = T_1 \tau^{\gamma-1}$$

L'application numérique avec $\Rightarrow \gamma = 1,4$, $\tau = 16$, $T_1 = 20^\circ C$ soit $293 K$ donne $\Rightarrow T_2 = 888 K = 612^\circ C$

De même : $P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma = P_1 \tau^\gamma = 48,5 \text{ bar}$

La pression est convenable et la chaleur peut être maîtrisée avec les matériaux adéquates. Notons que pour une faible variation du volume, on pourrait faire sensiblement baisser la température

3.3.1.2 Etude de la restitution de l'énergie

3.3.1.2.1 Restitution immédiate et restitution après pertes thermiques.

Considérons maintenant la restitution de cette énergie. Si la restitution est immédiate, alors il y a restitution de $W = 10 \text{ kJ}$. Sinon, il y a refroidissement de T_2 jusqu'à $T_1 = T_{\text{ambiante}}$ à $V_2 = \text{cste}$.

Ainsi, par conservation de la matière et dans ce cas de gaz parfait diatomique :

$$\begin{cases} P_2' V_2 = n R T_1 \\ P_2 V_2 = n R T_2 \end{cases} \Rightarrow \frac{P_2' V_2}{R T_1} = \frac{P_2 V_2}{R T_2} \Rightarrow P_2' = P_2 \frac{T_1}{T_2} = P_2 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{1-\gamma} = P_2 \tau^{1-\gamma} = P_1 \tau^\gamma \tau^{1-\gamma}$$

Et donc : $P_2' = \tau \cdot P_1 = 16 \text{ bar}$

Mais quel travail W_{rest} peut-on restituer ?

On est dans le cas d'une détente adiabatique : $P_2', V_2 \rightarrow P_1, V_f$

Le volume à partir duquel $P = 1 \text{ bar}$ est :

$$P_2' V_2^\gamma \Rightarrow V_f = \left(P_2 \frac{V_1}{P_1} \right)^\gamma V_2 = \tau^\gamma \frac{V_1}{\tau} \Rightarrow V_f = V_1 \tau^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \quad \text{Application numérique : } V_f = 9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 9 \text{ L}$$

3.3.1.2.2 Étude de la détente

On a toujours : $P V^\gamma = P_2' V_2^\gamma \Rightarrow P = P_2' \left(\frac{V_2}{V} \right)^\gamma$

$$W = \int_{V_2}^{V_f} -P dV = - \int_{V_2}^{V_f} P_2' \left(\frac{V_2}{V} \right)^\gamma dV = P_2' V_2^\gamma \int_{V_2}^{V_f} \frac{dV}{V^\gamma} = \frac{P_2' V_2^\gamma}{1-\gamma} (V_2^{1-\gamma} - V_f^{1-\gamma})$$

$$\Leftrightarrow W = P_2' V_2^{1-\gamma} \left(1 - \left(\frac{V_f}{V_2} \right)^{1-\gamma} \right)$$

Alors : $W_{\text{rest}} = \frac{P_2' V_2}{1-\gamma} \left(1 - \left(P_2 \frac{V_1}{P_1} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right) = \frac{1}{1-\gamma} \tau P_1 \frac{V_1}{\tau} \left(1 - \left(\frac{\tau P_1}{P_1} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right)$

D'où : $W_{\text{rest}} = \frac{P_1 V_1}{\gamma-1} (\tau^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} - 1) = -2735 \text{ J}$

De l'énergie est restituée, mais le rendement est ridicule ... $\frac{|W_{\text{rest}}|}{W} = \frac{2735}{10157} = 26,9\%$

(sans compter le coût énergétique de la compression ... En comptant ce coût on arriverait à un rendement de 10,7% selon le compresseur ...)

Quelle serait alors la température finale ?

$$T_f V_f^{\gamma-1} = T_1 V_2^{\gamma-1} \Rightarrow T_f = T_1 \left(\frac{V_2}{V_f} \right)^{\gamma-1} = T_1 \left(\frac{V_1 \tau^{-1}}{V_1 \tau^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}} \right)^{\gamma-1} \Leftrightarrow T_f = T_1 (\tau^\gamma)^{\gamma-1} = T_1 \tau^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

Application numérique : $T_f = 132 \text{ K} = -140^\circ \text{C}$.

La température finale étant très froide, il se pose alors le problème d'attendre le réchauffement de cet air contenu dans le système de compression avant de restocker de l'énergie avec. On pourrait alors imaginer placer celui-ci dans le compartiment avec un circuit du liquide de refroidissement de manière à se servir de cette perte de chaleur, mais le refroidissement ne serait certainement pas immédiat, sans compter que l'air contient quelques particules et le gel pourrait endommager le système mécanique.

La compression semble alors un bon moyen de stockage à court terme, mais très problématique à long terme (sauf si les pertes thermiques sont compensées).

3.3.2 Étude théorique du moteur à air comprimé

Le moteur à air comprimé est un moteur qui fonctionne grâce à l'énergie pneumatique fournie par une réserve d'air comprimé présente dans le véhicule. Il s'agit d'une source d'énergie récupérable. Le principe est le suivant : un fluide, le plus souvent un gaz sous pression constitue la réserve d'énergie. Le fonctionnement idéal est constitué de deux étapes principales :

- Détente lors du déstockage → création d'énergie mécanique
- Compression du fluide lors du stockage → création d'énergie pneumatique

Voir annexe, figure 10 : "Schéma de fonctionnement du moteur à air comprimé"

- Avantages :
 - Les compresseurs et les moteurs pneumatiques sont plutôt bon marché.
 - Un réservoir d'air sous pression est moins dangereux qu'un réservoir d'hydrocarbures, en particulier en cas d'incendie du véhicule.
 - Le compresseur pourrait être intégré dans le moteur.
- Inconvénients :
 - Le rendement des moteurs pneumatiques est souvent inférieur à celui des moteurs hydrauliques ou électriques et le bilan énergétique risque d'être plus faible. Les meilleurs résultats à l'heure actuelle s'élèvent à environ 40%.
 - Pour le moment, il n'est pas usuel d'utiliser un moteur pneumatique « à l'envers », c'est à dire comme un compresseur, or un moteur pneumatique réversible serait plus compact que 2 dispositifs séparés.

3.3.2.1 Cycle du moteur à air comprimé mono-énergie MDI

Moteurs mono énergie : air comprimé seul

L'air ambiant est comprimé dans les réserves du véhicule. L'air provenant du réservoir haute pression traverse un détendeur (breveté par MDI et dont le fonctionnement permet une transformation quasi isotherme). Il est ensuite utilisé dans un système de détente avec travail composé d'une chambre active et d'un cylindre de détente. Ce nouveau cycle thermodynamique est composé :

- d'une alimentation à pression constante du cylindre de charge (ou chambre active). Cette phase est réalisée à pression et température constante et produit un travail important sur le vilebrequin. Elle permet de doubler le rendement d'une détente de charge classique.
- d'une détente du volume d'air créé par la chambre active dans un cylindre de détente.
- d'un échappement.

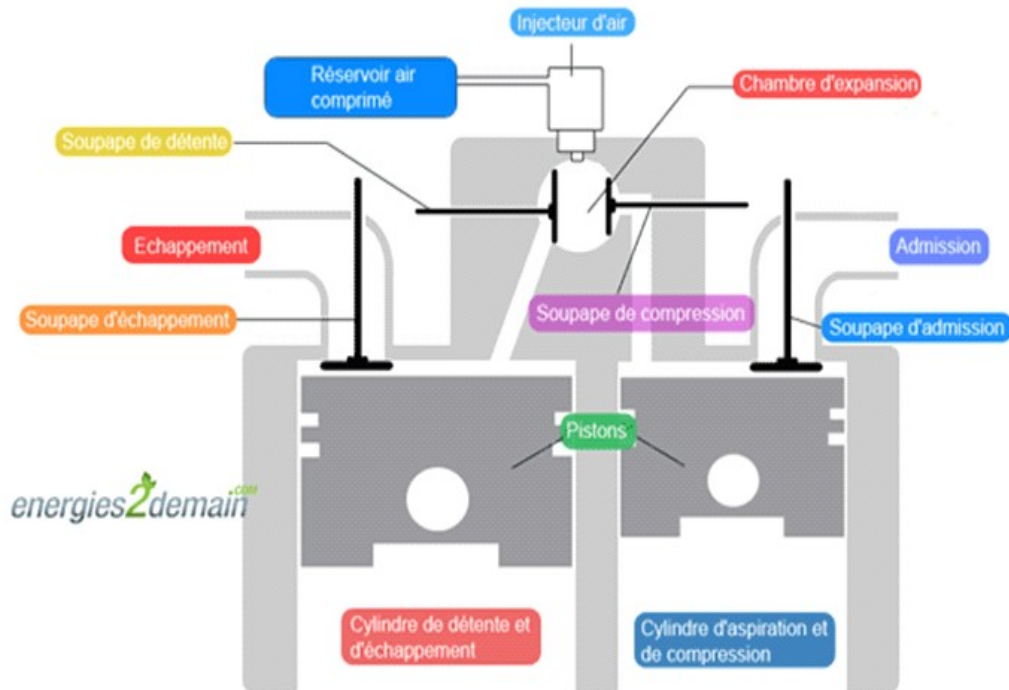


Figure 2: Schéma d'ensemble du moteur à air comprimé

Les moteurs à air comprimé mono énergie sont "dits" totalement propres du réservoir à la roue.

Étape 1 : Lorsque le moteur tourne, de l'air extérieur est aspiré en bleu. Pendant ce temps, la soupape de détente laisse échapper de la chambre d'expansion l'air du temps précédent en violet.

Voir annexe, figure 6 : "Moteur à air comprimé, étape 1"

Étape 2 : L'air aspiré subit une compression dans la chambre d'expansion jusqu'à 21 bars (en orange). Sa température atteint alors 400°C. Au même moment, la détente de l'air pousse le piston, c'est le temps moteur (en vert).

Voir annexe, figure 7 : "Moteur à air comprimé, étape 2"

Étape 3 : On injecte de l'air comprimé entre 40 et 50 bar ; sa température est de 25°C. Le choc de ces deux fluides crée une augmentation de pression entraînant une surchauffe du mélange (en violet). Pendant ce temps se produit l'échappement (en rouge).

Voir annexe, figure 8 : "Moteur à air comprimé, étape 3"

Étape 4 : La soupape de détente s'ouvre vers le cylindre de détente-échappement tandis que l'air est aspiré pour le cycle suivant (en bleu).

Voir annexe figure 9 : "Voir figure "Moteur à air comprimé, étape 4"

3.3.2.2 Exemples d'application

Chez MDI : (puissances allant de 4 à 75 cv)

- Les transporteurs urbains,
- Les voitures propres MDI OneFlowAIR, MiniFlowAIR et CityFlowAIR,
- Le concept de transports urbains MDI MultiFlowAIR,
- Les groupes électrogènes de secours et de production,
- Les tracteurs de traction et de levage,
- Les tracteurs agricoles,
- Les moteurs de bateaux,
- Les moteurs d'avions légers et les groupes APU.

Cependant, les voitures conçues par MDI ne semblent pas prendre en charge la récupération d'énergie lors du freinage. L'option étudiée dans cette partie n'est donc pas utilisée à l'heure actuelle.

3.4 Systèmes hydrauliques

3.4.1 Principe

Le principe des systèmes de stockage hydrauliques est à peu près le même utilisé que pour le stockage pneumatique, la différence se situant dans le fluide utilisé. Dans le cas d'un système pneumatique, il s'agit d'un gaz, de l'air en général. Dans le cas d'un système hydraulique, il s'agit en revanche d'un liquide. Le procédé de stockage de l'énergie ensuite est le même. On comprime le liquide à l'aide d'un compresseur et on le stocke dans un réservoir à haute pression.

3.4.2 Technologie

Il existe deux types principaux de stockages hydrauliques : un type purement hydraulique où on a un réservoir de capacité fixe rempli uniquement de fluide liquide et un type hybride où on a un réservoir rempli pour moitié de fluide liquide et pour l'autre moitié de fluide gazeux, séparés par une paroi déformable ou un piston comme montré sur le schéma. Dans ce cas, c'est l'air qui est en réalité comprimé par l'augmentation du volume liquide. Le choix de l'un ou de l'autre dépendra de l'utilisation, c'est-à-dire de la quantité d'énergie à stocker et aussi de la place disponible. Un hydraulique pur prend moins de place mais l'énergie est plus difficile à stocker et demande plus de travail pour la stocker. Pour un hydraulique pur, on aura environ 30 L contre environ 50 L pour un système hybride dont 20 L d'air au repos (à pression atmosphérique). Dans la pratique, on utilise surtout des systèmes hybrides car ils permettent un stockage plus facile.

La deuxième question est le fluide à utiliser. Le moins cher et le plus abondant est l'eau. Mais l'eau est corrosive et peut provoquer des cavitations en cas de vaporisation. C'est pourquoi on lui préférera généralement une huile, plus stable de ce point de vue. Cependant, on fera attention au prix de cette huile, plus coûteuse que l'eau. C'est pourquoi on s'assurera d'avoir une circulation en circuit fermé afin de conserver la même huile tout au long du cycle de vie du véhicule.

Le schéma suivant présente un exemple de mécanisme de circulation des fluides sous pression avec récupération d'énergie dans un véhicule. On a plusieurs composants de base absolument nécessaires, à savoir le réservoir, le moteur hydraulique qui fait également office de pompe et de compresseur, le moteur hydraulique étant réversible, une pompe auxiliaire, un réservoir à pression atmosphérique et le système de lubrification du moteur thermique. Les autres composants sont optionnels. La situation représentée sur le schéma est une situation de stockage d'énergie : le véhicule décélère, les roues actionnent alors le moteur hydraulique qui agit comme un compresseur pour l'air du compartiment supérieur du réservoir. On utilisera dans la plupart des cas un moteur hydraulique à plateaux inclinables, ce qui permet de régler le débit d'huile entrant, et aussi de l'annuler si l'on veut stopper le stockage. Quand on passe en phase d'accélération, l'air comprimé se détend et envoie l'huile vers le moteur hydraulique qui envoie ensuite l'énergie mécanique créée aux roues, ce qui permet une économie de carburant. Dans cette phase également, l'inclinaison des plateaux permet de choisir le débit d'huile sortant, et donc la vitesse de déstockage de l'énergie emmagasinée. Cependant, tous les dispositifs reliés au réservoir d'huile en prennent dans le réservoir. On rajoutera donc une pompe auxiliaire simple et peu chère (on la choisira en général à engrenages), actionnable par un moteur thermique ou électrique pour maintenir la quantité et la pression d'huile nécessaires au bon fonctionnement de tous les dispositifs. Cette pompe n'aura en principe pas un fonctionnement continu.

Voir figure 11 : "Principe général de circulation de fluides avec récupération d'énergie au sein du véhicule"

3.4.3 Avantages et inconvénients

Avantages :

- Les pompes et moteurs hydrauliques ont un rendement d'environ 95 %.
- Il existe des moteurs hydrauliques réversibles. Ils fonctionnent comme compresseur en décélération et en moteur hydraulique lors de l'accélération.

L'avantage de ces systèmes est la compacité et l'unicité du dispositif, donc il n'y a pas de synchronisation des différents dispositifs à effectuer.

- L'utilisation d'huile sous pression dans le moteur est très probable : en maintenant une pression importante dans la cuve, le moteur hydraulique pourrait donc être une source d'huile sous pression commune à des fonctions spécifiques au moteur thermique et au véhicule telles que la lubrification du moteur thermique, le réglage du taux de compression des chambres de combustion, des dispositifs hydrauliques annexes et la mise de gaz sous pression pour un éventuel moteur pneumatique.

Inconvénients :

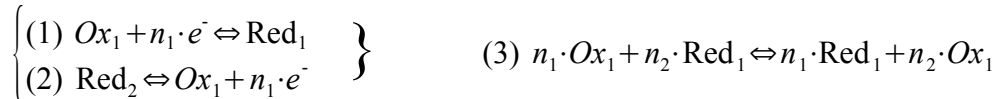
- Une cuve d'huile sous pression peut être dangereuse en cas d'incendie du véhicule.
- L'huile est quasi-incompressible et ne peut donc presque pas être mise sous pression par les chambres de combustion du moteur thermique. Contrairement au gaz, si l'on ferme les soupapes d'admission, le moteur se bloquera car le volume initialement contenu dans la chambre au moment de la fermeture des soupapes ne variera quasiment pas, contrairement à un gaz qui peut se détendre ou se comprimer. Ceci oblige à utiliser un fluide gazeux ou un ressort en plus pour stocker de l'énergie.
- Si l'énergie n'est pas utilisée tout de suite, l'air se refroidit et la détente induit des températures négatives qui ont pour conséquence de diminuer très fortement le rendement. La solution serait de maintenir l'huile à haute température pour avoir un transfert thermique entre l'huile et l'air qui permettrait d'éviter ce refroidissement ou au moins le ralentir.

3.5 Stockage chimique

3.5.1 Etude d'un accumulateur

3.5.1.1 La réaction et le courant engendré

Nous allons étudier un accumulateur ou plus simplement une pile rechargeable, une batterie. Celle-ci met en jeu 2 couples réducteur oxydant qui réagissent entre eux selon la réaction d'oxydoréduction suivante :



En canalisant les électrons dans un circuit, on obtient un courant électrique. La force électromagnétique de cette pile est alors : $E = E_2 - E_1$

Avec $E_2 > E_1$ c'est à dire que l'anode se situe en 1, où l'oxydation a lieu et la cathode en 2, où la réduction a lieu.

D'après la formule de Nernst, $E_2 = E_2^0 + \frac{RT}{n_2 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{a_{\text{Ox}_2}}{a_{\text{Red}_2}} \right)$ et $E_1 = E_1^0 + \frac{RT}{n_1 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{a_{\text{Ox}_1}}{a_{\text{Red}_1}} \right)$

avec F la constante de Faraday soit 96500 C.mol⁻¹
et R la constante des Gaz Parfaits soit 8,314 J.K⁻¹.mol⁻¹.

De l'équation (3) on a : $E = E_2 - E_1 = E_2^0 + \frac{RT}{n_2 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{a_{\text{Ox}_2}}{a_{\text{Red}_2}} \right) - E_1^0 + \frac{RT}{n_1 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{a_{\text{Ox}_1}}{a_{\text{Red}_1}} \right)$

$$\Leftrightarrow E = E_2^0 - E_1^0 + \frac{RT}{F} \cdot \left(\frac{1}{n_2} \cdot \ln \left(\frac{a_{Ox_2}}{a_{Red_2}} \right) - \frac{1}{n_1} \cdot \ln \left(\frac{a_{Ox_1}}{a_{Red_1}} \right) \right) \quad (4)$$

3.5.1.2 Quotient réactionnel et avancement

On pose le quotient réactionnel :

$$Q = \frac{a_{Red_2}^{n_1} \cdot a_{Ox_1}^{n_2}}{a_{Ox_1}^{n_1} \cdot a_{Red_1}^{n_2}}$$

qui est le rapport des activités des composants affectées en puissance de leurs quantités.

On cherche alors à retrouver Q dans l'équation (4), de manière à simplifier son écriture et calcul :

$$\begin{aligned} \frac{RT}{F} \cdot \left(\frac{1}{n_2} \cdot \ln \left(\frac{a_{Ox_2}}{a_{Red_2}} \right) - \frac{1}{n_1} \cdot \ln \left(\frac{a_{Ox_1}}{a_{Red_1}} \right) \right) &\Leftrightarrow \frac{RT}{F} \cdot \frac{1}{n_1 \cdot n_2} \left(n_1 \cdot \ln \left(\frac{a_{Ox_2}}{a_{Red_2}} \right) - n_2 \cdot \ln \left(\frac{a_{Ox_1}}{a_{Red_1}} \right) \right) \\ &\Leftrightarrow \frac{RT}{F \cdot n_1 \cdot n_2} \cdot \left(\ln \left(\frac{a_{Ox_2}}{a_{Red_2}} \right)^{n_1} - \ln \left(\frac{a_{Ox_1}}{a_{Red_1}} \right)^{n_2} \right) \Leftrightarrow \frac{RT}{F \cdot n_1 \cdot n_2} \cdot \left(\ln \left(\frac{a_{Ox_2}^{n_1} \cdot a_{Red_1}^{n_2}}{a_{Red_2}^{n_1} \cdot a_{Ox_1}^{n_2}} \right) \right) \\ &\Leftrightarrow \frac{RT}{F \cdot n_1 \cdot n_2} \cdot \left(\ln \left(\frac{1}{Q} \right) \right) \Leftrightarrow - \frac{RT}{F \cdot n_1 \cdot n_2} \cdot \left(\ln(Q) \right) \end{aligned}$$

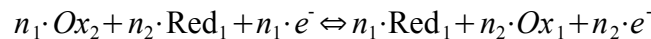
Et donc : $E = E_2^0 - E_1^0 + \frac{RT}{F} \cdot \left(\frac{1}{n_2} \cdot \ln \left(\frac{a_{Ox_2}}{a_{Red_2}} \right) - \frac{1}{n_1} \cdot \ln \left(\frac{a_{Ox_1}}{a_{Red_1}} \right) \right) \quad (4) \Leftrightarrow E_2^0 - E_1^0 - \frac{RT}{F \cdot n_1 \cdot n_2} \cdot \ln Q$

La pile continuera de débiter un courant jusqu'à égalité des 2 potentiels. $E_2 = E_1 \rightarrow E = 0$
Ce qui signifie $Q=K$, constante d'équilibre de la réaction.

On a donc : $0 = E_2^0 - E_1^0 - \frac{RT}{F \cdot n_1 \cdot n_2} \cdot \ln K \Leftrightarrow - \ln K = - \left(E_2^0 - E_1^0 \right) \cdot \frac{F \cdot n_1 \cdot n_2}{RT}$

Avec $E^0 = E_2^0 - E_1^0$ on a : $\ln K = E^0 \cdot \frac{F \cdot n_1 \cdot n_2}{RT}$

On s'intéresse alors au travail électrique de la pile. On a toujours la réaction (3) c'est à dire :



On note ξ l'avancement de cette réaction.

$$\xi(t) = \frac{n_{Ox_{2t=0}} - n_{Ox_{2t}}}{n_2} = \frac{n_{Red_{1t=0}} - n_{Red_{1t}}}{n_1} = \frac{n_{Ox_{1t}} - n_{Ox_{1t=0}}}{n_2} = \frac{n_{Red_{2t}} - n_{Red_{2t=0}}}{n_1}$$

3.5.1.3 Tension, intensité et travail électriques

Pendant dt , $d\xi$ et $n_1 \cdot n_2 \cdot d\xi$ moles d' e^- sont échangées.

Le générateur fournit alors :

- une tension : $E = \frac{RT}{F \cdot n_1 \cdot n_2} \cdot \left(\ln \left(\frac{1}{Q} \right) \right)$
- une intensité : $\frac{dq}{dt} = n_1 \cdot n_2 \cdot F \cdot \frac{d\xi(t)}{dt} \rightarrow i \cdot dt = n_1 \cdot n_2 \cdot F \cdot d\xi$

On obtient donc le travail électrique suivant :

$$d W_{elec} = E \cdot i \cdot dt = E_2^0 - E_1^0 + \left[\frac{RT}{F \cdot n_1 \cdot n_2} \cdot \left(\ln \left(\frac{a_{Ox_2}^{n_1} \cdot a_{Red_1}^{n_2}}{a_{Red_2}^{n_1} \cdot a_{Ox_1}^{n_2}} \right) \right) \right] \cdot [n_1 \cdot n_2 \cdot F \cdot d \xi]$$

La réaction s'arrêtera quand la force électromagnétique sera nulle.

Les activités des espèces chimiques dépendent de $\xi(t)$ donc $\xi(t \rightarrow \infty) = \xi_\infty$. L'avancement est calculable si aucun réactif n'est limitant. (car sinon l'activité serait nulle, or dans la formule ci dessous $a \neq 0$). On a donc :

$$\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot F \cdot (E_2^0 - E_1^0)}{RT} = \ln \left(\frac{a_{Ox_2}(\xi(t))^{n_1} \cdot a_{Red_1}(\xi(t))^{n_2}}{a_{Red_2}(\xi(t))^{n_1} \cdot a_{Ox_1}(\xi(t))^{n_2}} \right)$$

Ce qui, rapporté au travail, donne :

$$W_{elec} = \int_0^{\xi_\infty} d W_{elec} = \int_0^{\xi_\infty} \left[E_2^0 - E_1^0 + \left[\frac{RT}{F \cdot n_1 \cdot n_2} \cdot \left(\ln \left(\frac{a_{Ox_2}^{n_1} \cdot a_{Red_1}^{n_2}}{a_{Red_2}^{n_1} \cdot a_{Ox_1}^{n_2}} \right) \right) \right] \cdot [n_1 \cdot n_2 \cdot F] \right] \cdot d \xi$$

On remarquera que si :

- Si la réaction se fait dans le sens direct $n_1 \cdot Ox_2 + n_2 \cdot Red_1 + n_1 \cdot e^- \rightarrow n_1 \cdot Red_1 + n_2 \cdot Ox_1 + n_2 \cdot e^-$ alors l'avancement $\xi(t) > 0$ et donc le travail $W_{elec} > 0$.
L'oxydoréduction est spontanée et elle consomme les réactifs.
→ L'énergie chimique se transforme alors en énergie électrique.
- Si la réaction se fait dans le sens indirect $n_1 \cdot Ox_2 + n_2 \cdot Red_1 + n_1 \cdot e^- \leftarrow n_1 \cdot Red_1 + n_2 \cdot Ox_1 + n_2 \cdot e^-$ alors l'avancement $\xi(t) < 0$ et donc le travail $W_{elec} < 0$. L'oxydoréduction est forcée et elle régénère les réactifs. C'est une électrolyse.
→ L'énergie électrique se transforme alors en énergie chimique.

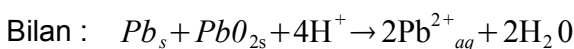
3.5.2 Exemple de l'accumulateur au plomb

Malgré la plus mauvaise énergie massique 35 Wh/kg, l'accumulateur au plomb est capable de fournir un courant de grande intensité, utile pour le démarrage électrique des moteurs à combustion interne. Elle est donc encore très utilisée en particulier dans les véhicules automobiles du fait de son coût relativement faible et c'est pour cela que nous avons choisi d'étudier cet exemple.

Le fonctionnement de ces batteries est dû à la réaction réducteur oxydant entre les 2 couples suivant : Pb^{2+}/Pb , PbO_2/Pb^{2+} où l'élément plomb a respectivement +II, 0, +IV et +II oxydations.

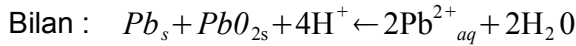
Lorsque le moteur ne tourne pas et que la batterie est sollicitée, celle-ci fonctionne comme une pile :

- la borne + est la cathode où PbO_2 est réduit : $PbO_{2s} + 4H^+ + 2e^- \rightarrow Pb^{2+}_{aq} + 2H_2O$.
- la borne - est l'anode où Pb est oxydé : $Pb \rightarrow Pb^{2+}_{aq} + 2e^-$.



Au contraire lorsque le moteur tourne, il actionne la liaison électrique qui a une fonction génératrice : la batterie se recharge. (électrolyse)

- la borne - est la cathode où Pb^{2+}_{aq} est réduit : $Pb^{2+}_{aq} + 2e^- \rightarrow Pb_s$.
- la borne + est l'anode où Pb^{2+} est oxydé : $Pb^{2+}_{aq} + 2H_2O \rightarrow PbO_{2s} + 4H^+ + 2e^-$



Remarque : On note [EC] la concentration en mol par Litre de l'espèce chimique EC.

Un cellule permettant cette électrolyse utilise généralement de l'acide sulfurique ($2H^+ SO_4^{2-}$) comme électrolyte (substance conductrice, facilite l'électrolyse) à une concentration arbitraire. (environ 2 moles par litre). On note V_{cell} le volume d'électrolyte que contient la cellule. La présence en grande quantité de SO_4^{2-} fait qu'il existe toujours du sulfate de plomb solide en solution, donc on peut écrire : $[Pb^{2+}][SO_4^{2-}] = K_s$, avec K_s le produit de solubilité de $PbSO_{4s}$.

$$\text{Le potentiel à la cathode vaut : } E_2 = E_2^0 + \frac{RT}{2 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{[H^+]^4}{[Pb^{2+}]} \right) = E_2^0 + \frac{RT}{2 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{[H^+]^4 \cdot [SO_4^{2-}]}{[Pb^{2+}]} \right) \quad (1)$$

$$\text{Le potentiel à l'anode vaut : } E_1 = E_1^0 - \frac{RT}{2 \cdot F} \cdot \ln \left([Pb^{2+}] \right) = E_1^0 - \frac{RT}{2 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{K_s}{[SO_4^{2-}]} \right) \quad (2)$$

On a donc comme f.e.m :

$$E = E_2^0 - E_1^0 + \frac{RT}{2 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{[H^+]^4 \cdot [SO_4^{2-}]}{[K_s]} \cdot \frac{K_s}{[SO_4^{2-}]} \right) = E^0 + \frac{2 \cdot R \cdot T}{F} \cdot \ln \left([H^+] \right) \quad (1)-(2) \rightarrow (3)$$

Avec E^0 d'environ 2,1 Volts. Les batteries généralisées sur les véhicule ont un voltage de 12 V, ce qui donne 6 cellules connectées en série.

Ici la concentration en H^+ vaut en fonction de l'avancement : $[H^+] = c_0 - 4 \cdot \frac{\xi}{V_{cell}}$ (4) en mol.

Ainsi : (3) + (4) → (5)

$$W_{elec} = \int_0^{\xi_{\infty}} \left[E^0 + \frac{2 \cdot R \cdot T}{F} \cdot \ln \left([H^+] \right) \right] \cdot 2F d\xi \quad \text{soit : } W_{elec} = V_{cell} \cdot \left[\frac{F E^0 c_0}{2} + RT \cdot (c_0 \ln c_0 - c_0) \right]$$

On choisit alors un volume de 100mL d'acide par cellule, qui est le volume moyen de telles cellules, et une concentration initiale de 1,7 mol/L (en accord avec l'hypothèse préalable d'environ 2 moles par litre).

On obtient pour le travail électrique d'une cellule: $W_{elec}^{1cell} = 17\,027,4 \text{ J}$ (6)

Ce qui donne pour une batterie : $6 * (6) = W_{elec}^{1bat} = 102\,164,4 \text{ J}$

Une telle batterie peut débiter a priori une quantité de charges $Q = 3 \cdot V_{cell} \cdot c_0 \cdot F$ car 2F Coulomb sont échangés par mole d'avancement et que l'avancement final est en mole $V_{cell} \frac{c_0}{4}$ par cellule.

Donc $Q = 49\,215 \text{ C}$ soit en Ampérage, sachant que 1 Ampère heure vaut 3600 C, 13,67 A.h

Le volume moyen d'une telle batterie est actuellement de 2L. Comme par hypothèse, on a accordé 20L au stockage, on pourra utiliser environ 10 batteries, soit une énergie de 10^6 J .

La décharge de ces batteries peut alors dans un cas parfait (sans frottements) lancer le véhicule à :

$$\frac{1}{2} m v^2 = 10 \cdot W_{elec}^{1bat} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot W_{elec}^{1bat}}{m}} = 45,2 \text{ m.s}^{-1} = 162,73 \text{ km.h}^{-1}$$

3.5.3 Conclusion

Les batteries présentent une forte capacité de stockage mais ont un inconvénient majeur : elles peuvent être très lentes à se décharger ou à se charger. Ce temps dépend de la conception de la batterie, à cause du courant maximal d'électrolyse. Remarquons que ces charges nécessitent une source de courant continu : soit un moteur électrique utilisé en générateur, soit une génératrice de courant alternatif qu'il faut redresser avec des dispositifs encombrants donc non idéaux.

Ce courant dépend de la surface des électrodes en contact avec le bain électrolytique, du matériau des électrodes ainsi que son état et de la tension d'électrolyse appliquée aux bornes de la batterie.

Les tensions d'électrolyses doivent être généralement faibles ($< 5V$). Mais la mise en série des cellules évoquée précédemment palie le problème, la tension globale étant divisée par le nombre de cellules. Mais le temps de décharge est incompressible, dû aux mêmes paramètres que ceux de l'électrolyse.

Pour une cellule électrolytique au plomb moyenne, le courant d'électrolyse est de 30 A et il faut environ $\frac{1}{2}$ heure pour recharger une batterie. Avec 10 batteries en parallèle, les courants s'ajoutent et l'ampérage peut monter à 300 A. L'énergie stockée par une batterie en 30 min se répartit sur les 10 mais en 3 min. Or ce temps devrait correspondre au temps de décélération d'un véhicule en trajet urbain. Le temps de charge est donc encore trop long pour être une solution vraiment récupératrice de l'énergie cinétique. (De plus l'ampérage paraît peu réaliste).

Une solution à ces problèmes de temps serait un supercondensateur. En effet, un supercondensateur est un condensateur permettant d'obtenir une densité de puissance et d'énergie intermédiaire entre les batteries et les condensateurs électrolytiques classiques. Ces composants permettent donc de stocker une quantité d'énergie intermédiaire entre ces deux modes de stockage, et de la restituer plus rapidement qu'une batterie. On peut comparer les différents modes de stockage en termes de grandeur comme suit :

	Pile à combustible	Batterie	Supercondensateur	Condensateur électrolytique
Densité de puissance (W/kg)	120	150	1 000 à 5 000	100000
Densité d'énergie (Wh/kg)	150 à 1500	50 à 1500	4 à 6	0,1

Le reproche que l'on pourrait faire à ces condensateurs est leurs densités énergétiques : il prennent beaucoup de place (Honda a testé les supercondensateurs sur l'Honda FCX 4e génération : Sur le plan technique, un « supercondensateur » de 34 kg peut délivrer pendant quelques secondes une puissance de 40 kW pour relancer le véhicule, soit environ 55 Ch. mais son volume occupe la moitié du coffre de la voiture... . Cependant, l'université du M.I.T. en a réalisé un atteignant 30 Wh/kg.

Aussi, aujourd'hui sont développées les batteries lithium ion (Li-ion) qui ont un rapport beaucoup plus élevé d'énergie au poids et au volume. Une batterie au plomb a les caractéristiques moyennes suivantes : énergie/poids : 20-40 Wh/kg, énergie/volume : 40-100 Wh/l, rendement charge-décharge 50% alors qu'une batterie Li-ion : énergie/Poids 100-200 Wh/kg, énergie/Volume 200-400 Wh/l, rendement charge-décharge 99,9 %.

Ces batteries sont alors mises en séries et contrôlées par un système électronique qui rassemble un superviseur, un microcontrôleur et un émetteur récepteur. En sortie de ce système un isolant galvanique. Cet ensemble forme un module de batterie. Ces modules sont alors mis en parallèles et contrôlés en sortie par un module de contrôle CAN (Controller Area Network). On distingue alors différents types de batteries : les batteries Li-ion polymère, Li-ion manganèse ...

Dans le récent modèle Ampéra d'Opel/Chevrolet, le constructeur fait fonctionner un moteur électrique de puissance maximale 150ch./111kW avec une batterie Li-ion Manganèse de 16kWh. Son autonomie sur batterie est alors de 60km, idéal pour un trajet urbain. L'enjeu de ces batteries est donc énorme.

4 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude des différents moyens de récupération de l'énergie cinétique, qu'ils soient mécaniques, chimiques, électriques nous a démontré qu'il n'existait pas un bon moyen, mais que chacun était une piste à étudier. Chaque moyen de récupération a un aspect (grande capacité de stockage par exemple) très intéressant mais présente des inconvénients non négligeables (rapidité de stockage dans le temps, faible par rapport au temps de décélération moyen d'un véhicule). Ainsi, l'utilisation d'un seul de ces moyens serait absurde mais le couplage de plusieurs d'entre eux apparaîtrait comme LA solution de récupération. Les constructeurs automobiles l'ont bien compris et ont déjà mis ce système en place !

La différence à l'heure actuelle se fait surtout sur l'aspect technologique des choses, et on peut penser que le moyen le plus prisé aujourd'hui parce qu'il est le plus accessible techniquement, le plus rentable, ou à plus fort rendement, sera délaissé demain parce qu'on aura fait une percée technologique rendant un autre meilleur. (exemple simple, les batteries sont très utilisées actuellement mais limitées par leurs vitesses de stockage/déstockage ... Le développement des supercondensateurs rendrait les batteries usuettes (dans le cas de la récupération d'énergie cinétique))

La vague écologique qui a envahit notre planète depuis maintenant une dizaine d'années et la disparition progressive du pétrole poussent les laboratoires à travailler pour rendre nos véhicules les plus propres possibles, et il n'est nul doute que l'avenir nous portera sur ces systèmes qui s'avèrent être chaque année meilleurs, notamment grâce au "coup de pouce" des sports automobiles qui ont énormément investi dans ces procédés.

Les promesses des entreprises concernées nous laissent penser que les premiers systèmes de récupération de l'énergie cinétique pourraient être installés sur nos voitures de particuliers à l'horizon 2012. Et si cela représentait une solution viable pour prolonger la durée de vie restante du pétrole, ou améliorer la puissance des véhicules utilisant d'autres moyens de propulsion ? L'avenir nous le dira.

Apports personnels de cette U.V. :

Pour chacun des membres du groupe, cette U.V. projet a permis de développer plusieurs qualités indispensables, notamment au niveau du travail en équipe. En effet, il a fallu attribuer à chacun des tâches, des parties à traiter puis les regrouper. Cela nécessite une coordination certaine.

En cela, ce projet a été bénéfique, puisqu'il représente le travail en équipe de tout un semestre sur un projet, essence même du travail d'ingénieur. C'est donc sur ce plan de "travail en équipe" que cette U.V. nous a beaucoup apporté.

Ajoutons aussi que ce travail est notre premier projet concret en physique. Il nous a permis de revoir des matières intéressantes et de les approfondir nous même sur un cas plus concret.

5 BIBLIOGRAPHIE

- [1] Daniel Balou, Eric Fabritius, André Gilles, "Chimie 1ère année PCSI Classes préparatoires scientifiques : Cours et exercices corrigés ", *Ellipse*, 1999.
- [2] Jean Bergua, Philippe Goulley, Dominique Nessi, "PCSI PHYSIQUE : MECANIQUE THERMODYNAMIQUE", *Bréal*, 2001.
- [3] Yvonnick Gazeau, "Dossier : véhicules électriques", *Ingénieurs de l'automobile*, n°708, pages 27 à 40, février 2009.
- [4] J.L. Moreau, "Spécial hybrides", *Ingénieurs de l'automobile*, n°803, pages 18 à 40, novembre-décembre 2009.
- [5] Philippe Saillant, "Genève 2010 : en vert et contre tout", *Ingénieurs de l'automobile*, n°805, pages 6 à 9, mars-avril 2010.
- [6] lien internet : http://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_lithium (valide à la date du 18/05/2010).
- [7] lien internet : http://fr.wikipedia.org/wiki/Batterie_au_plomb (valide à la date du 18/05/2010).
- [8] lien internet : <http://www.peugeot.ch/presse-fr/prologue-hybrid4-113/> (valide à la date du 31/05/2010)
- [9] lien internet : <http://drgoulu.com/2005/12/12/calcul-dun-ressort-spiral-dhorlogerie/> (valide à la date du 13/04/2010)
- [10] lien internet : http://fr.wikibooks.org/wiki/Les_ressorts (valide à la date du 13/04/2010)
- [11] lien internet : <http://www.leblogenergie.com/2009/04/la-transmission-hydraulique-permet-doptimiser-le-rendement-dun-moteur-thermique.html> (valide à la date du 01/05/2010)
- [12] lien internet : <http://www.leblogenergie.com/2008/09/bosch-joue-lhyb.html> (valide à la date du 01/05/2010)
- [13] lien internet : <http://energies2demain.com/transport/les-moteurs-a-air-comprime/le-moteur-mono-energie-a-air-comprime/> (valide à la date du 16/04/2010)
- [14] lien internet : <http://www.mdi.lu/technologie.php> (valide à la date du 16/04/2010)

[15] lien internet : http://www.aci-multimedia.net/bio/voiture_air_comprime.htm (valide à la date du 07/05/2010)

[16] lien internet : http://equideus.free.fr/moteur_pneumatique.php (valide à la date du 21/05/2010)

[17] lien internet : <http://www.hybridcars.com/related-technologies/flywheel-hybrids.html> (valide à la date du 12/06/10)

[18] lien internet : http://fr.wikipedia.org/wiki/Volant_d'inertie (valide à la date du 12/06/2010)

[19] lien internet : <http://www.greencarcongress.com/2007/10/flybrid-flywhee.html> (valide à la date du 12/06/2010)

[20] lien internet : <http://www.greencarcongress.com/2007/10/flybrid-flywhee.html> (valide à la date du 12/06/2010)

[21] lien internet : <http://www.howstuffworks.com/hybrid-car.htm> (valide à la date du 12/06/2010)

[22] lien internet : <http://auto.howstuffworks.com/hybrid-car6.htm> (valide à la date du 12/06/2010)

[23] lien internet : <http://www.porsche.fr> (valide à la date du 12/06/2010)

[24] lien internet : <http://www.guideautoweb.com/articles/5720/> (valide à la date du 02/06/2010)

6 ANNEXES

6.1 Documentation technique

6.1.1 Continuously Variable Transmission

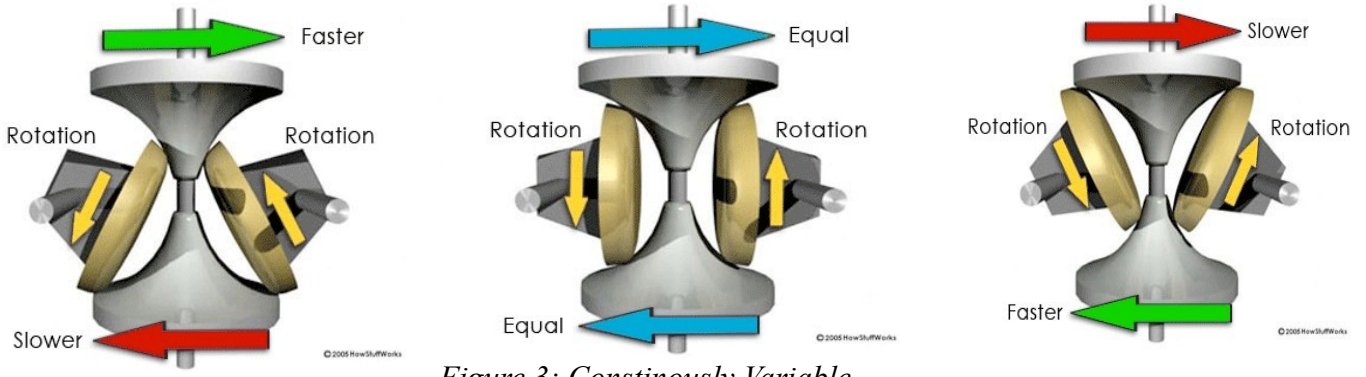


Figure 3: Continuously Variable Transmission

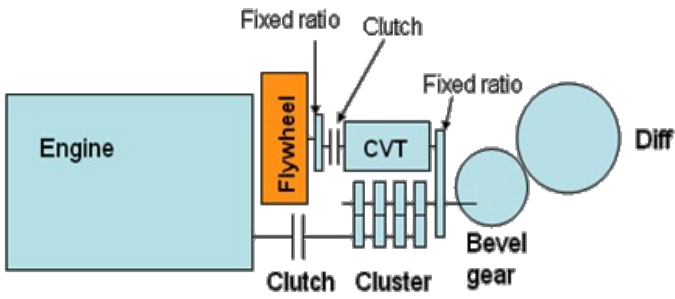


Figure 5: Transmission CVT, embrayage et volant



Figure 4: Le système CVT

6.1.2 Etude pneumatique – étapes d'un cycle moteur MDI et schéma de fonctionnement

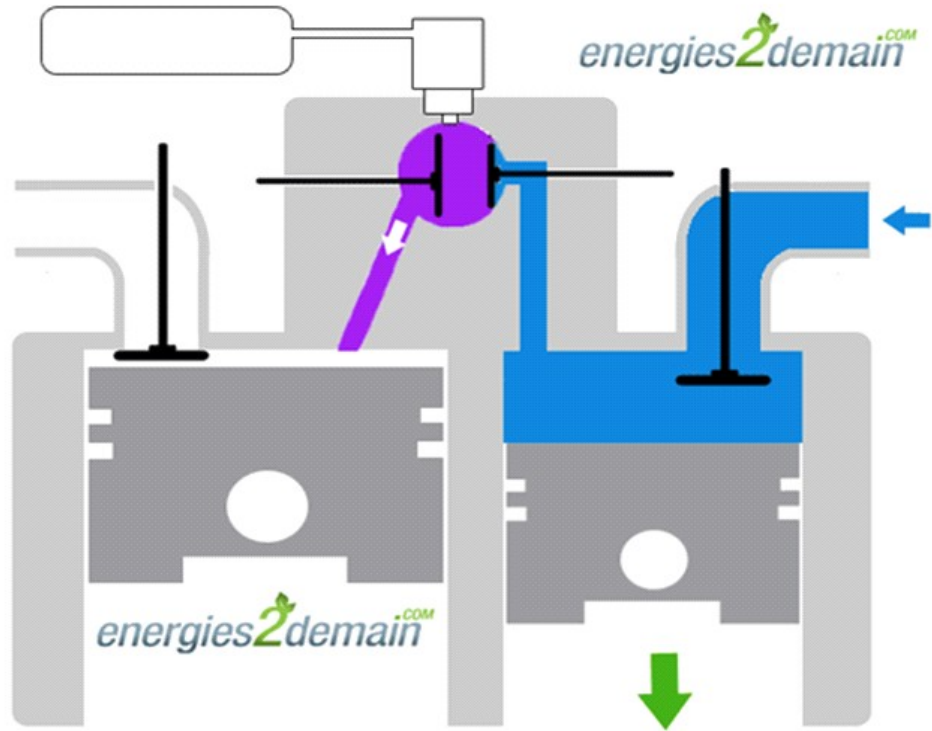


Figure 6: Moteur à air comprimé, étape 1

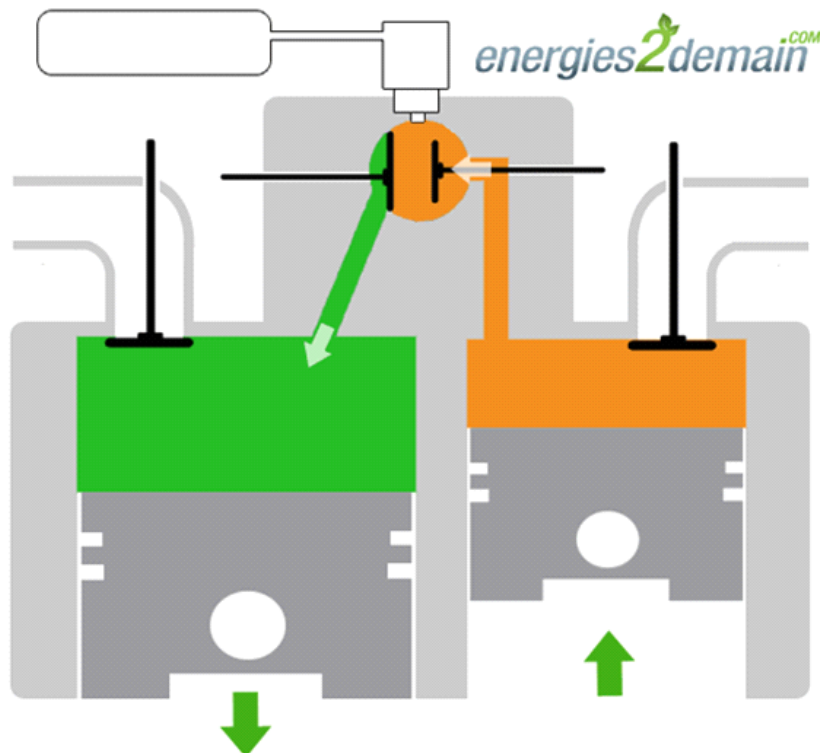


Figure 7: Moteur à air comprimé, étape 2

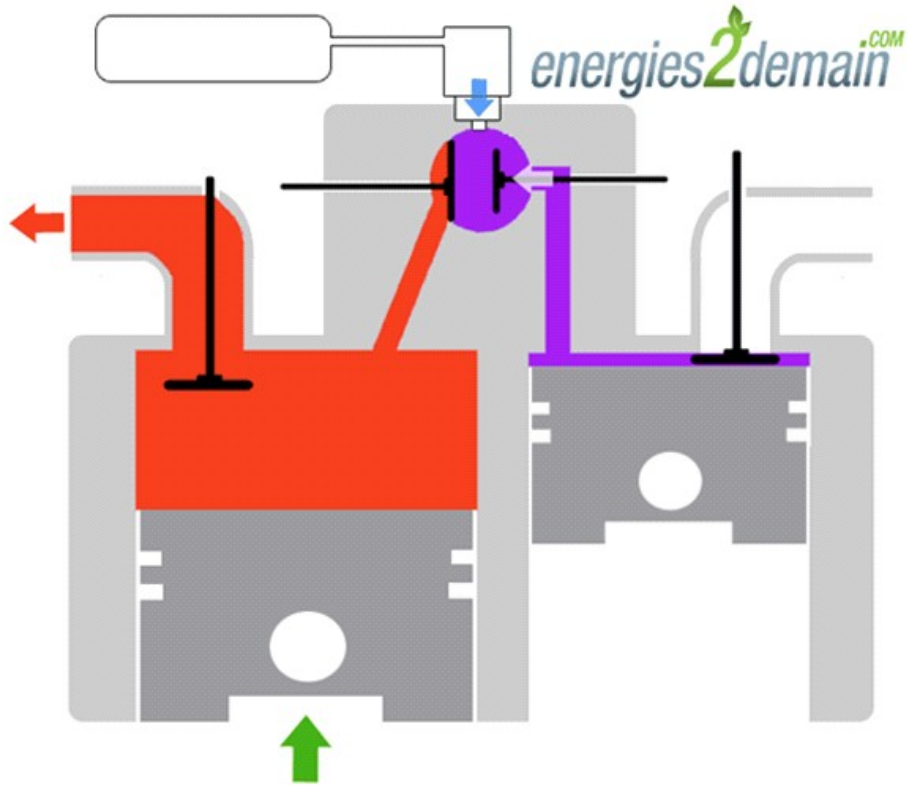


Figure 8: Moteur à air comprimé, étape 3

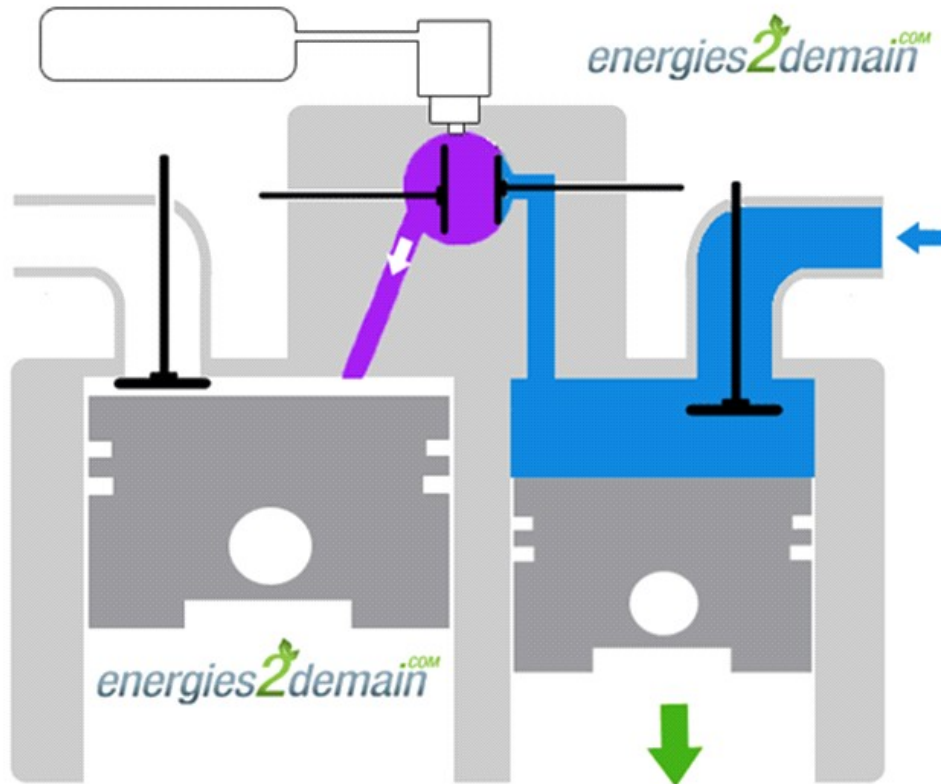


Figure 9: Moteur à air comprimé, étape 4

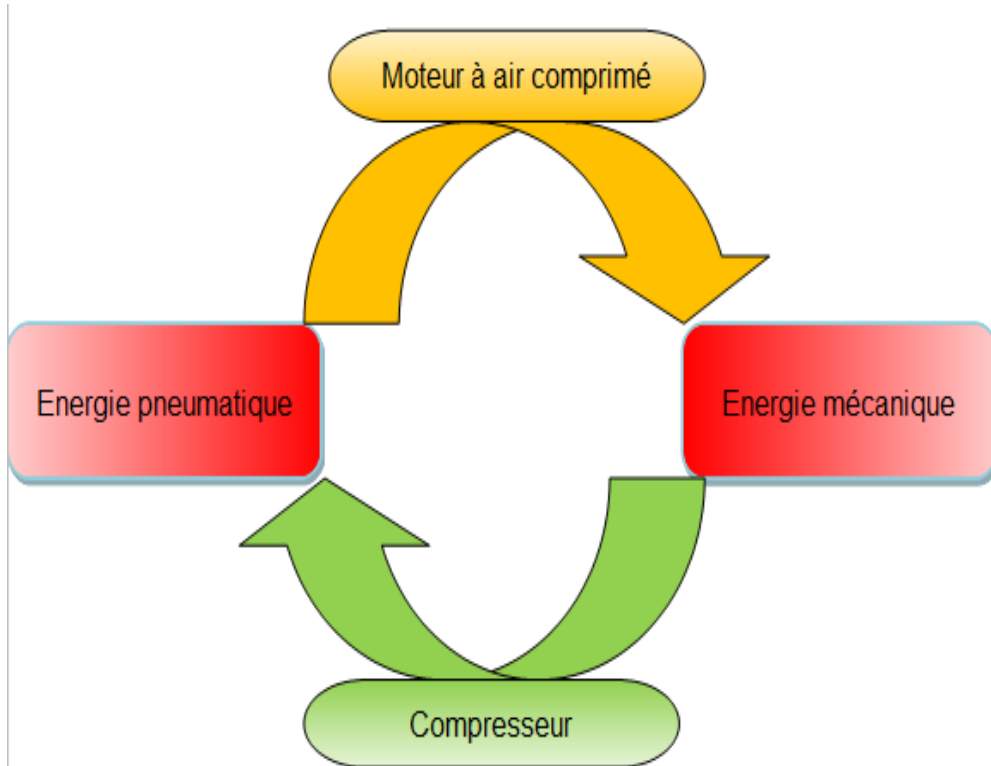


Figure 10: Schéma de fonctionnement du moteur à air comprimé

6.1.3 Etude pneumatique – Système pneumatique

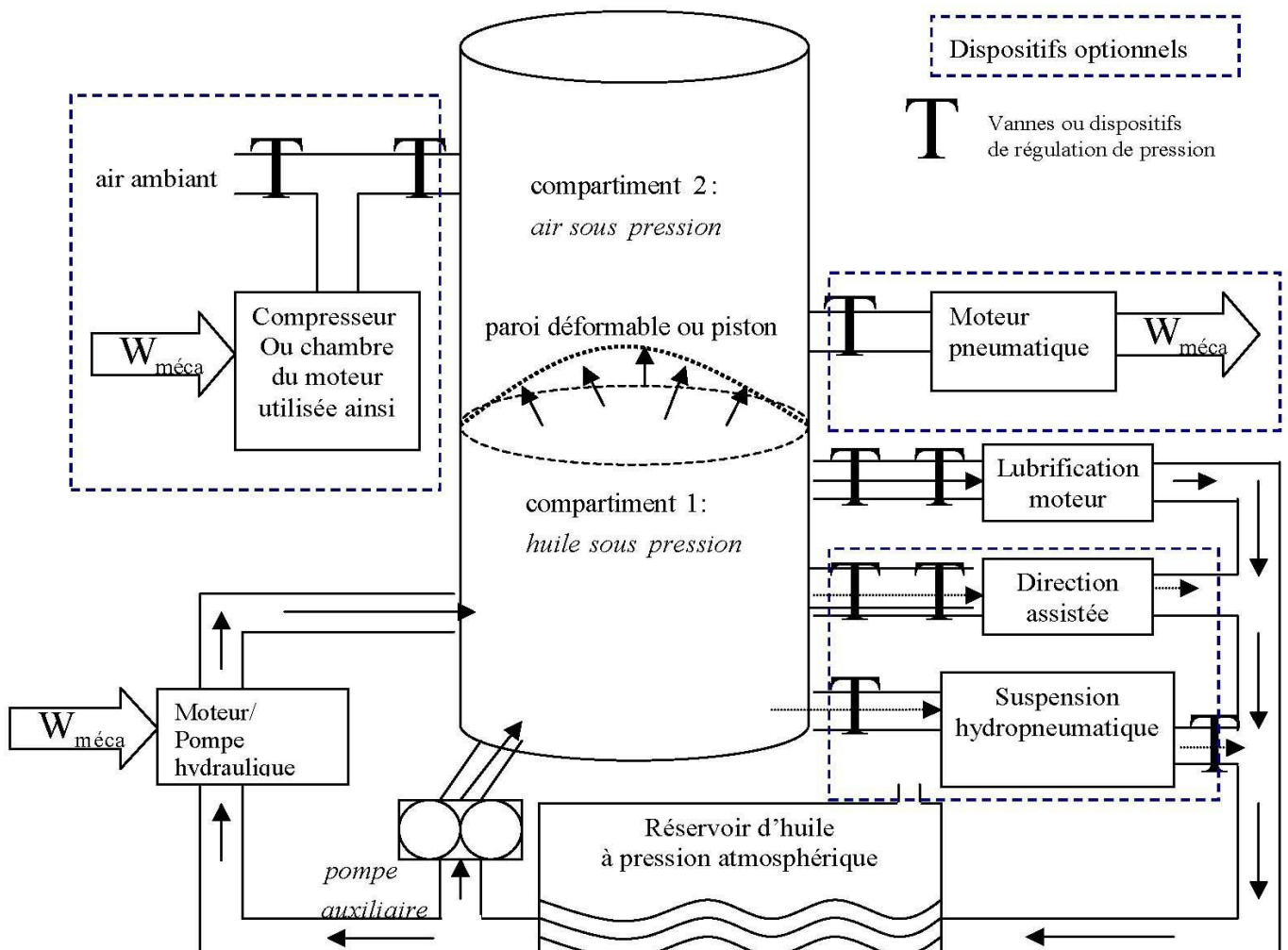


Figure 11: Principe général de circulation de fluides avec récupération d'énergie au sein du véhicule

6.1.4 Cycle NEDC en milieu urbain

FIGURE 1/1

Cycle de conduite pour l'essai du type I

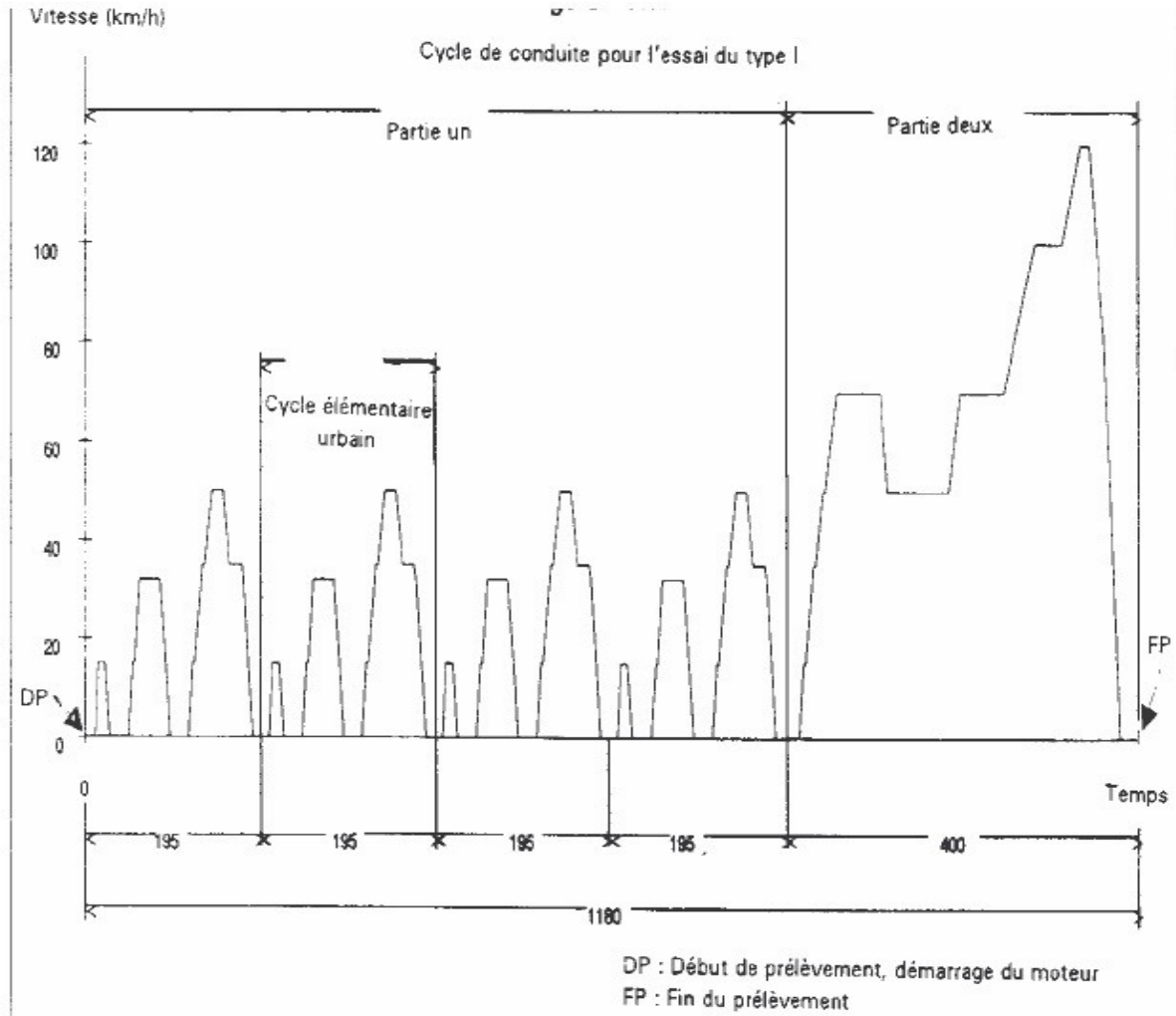


Figure 12: Cycle NEDC en milieu urbain (nous avons un tableau des vitesses et le document d'où est extraite cette image, mais ces 2 documents seraient trop lourd à joindre en annexe au rapport, nous les avons donc mis en ligne à l'adresse suivante : <http://externe.insa.rouen.free.fr/P6-3>)

6.2 Propositions de sujets de projets (en lien ou non avec le projet réalisé)

Comme proposition de sujet on peut imaginer la mise en application de la récupération d'énergie cinétique d'une masse ou d'un véhicule en modèle réduit (avec un petit moteur électrique par exemple).

On pourrait aussi demander à des élèves de fabriquer un système mécanique similaire à celui du CVT.

Ces sujets seraient surtout une application de toutes les théories qui ont été réalisées dans ce projet.