

Possibilités de récupération de l'énergie cinétique d'un véhicule
Mise à jour du 7 novembre 2009
 Eléments de pré-dimensionnement
 de quelques dispositifs de récupération pour voiture de tourisme



Adapté d'un document original du 2 avril 2005

Note : Ce document ne prétend pas être exhaustif et ne fournit que des ordres de grandeur

Généralités et objectifs	2
I. Les différentes formes d'énergie utilisables dans un véhicule.....	4
I.1. Les énergies chimiques	4
I.1.a) Les énergies chimiques à base d'hydrocarbures (charbon exclu)	4
I.1.b) Les énergies chimiques sans composés carbonés	5
I.2. Les énergies pneumatique/hydraulique	6
I.3 L'énergie mécanique	6
I.4. Les énergies renouvelables.....	6
II. Eléments de pré-dimensionnement des dispositifs de stockage.....	6
II.1. Hypothèses préalables	6
II.2. Les stockages mécaniques	7
II.2.a) Par roue d'inertie.....	7
II.2.b) Par ressort	7
II.3. Les stockages pneumatique/hydraulique	8
II.3.a) Cas d'une énergie pneumatique	8
II.3.b) Utilisation d'une énergie hydraulique	11
II.4. Le stockage chimique.....	14
II.4.a) Description théorique succincte	14
II.4.b) Travail électrique d'une pile.....	15
II.4.c) Exemple : l'accumulateur au plomb	16
III. Classement des solutions de stockage	18
III.1. Elaboration de critères de classement.....	18
III.2. Notation de chaque solution	19
III.2.a) Principe	19
III.2.b) Notation de la roue d'inertie.....	19
III.2.c) Notation du ressort à spirale	20
III.2.d) Notation du ressort de traction	20
III.2.e) Notation du stockage pneumatique/hydraulique	21
III.2.f) Notation du stockage chimique.....	21
III.3. Bilan.....	22
III.3.a) Classement des solutions et remarques	22
III.3.b) Quels systèmes de récupération pour une automobile ?.....	22
Conclusion	23



Concepts innovants, moteurs/pompes et énergies renouvelables → <http://sycomoreen.free.fr>

1

interdit toute reproduction, même partielle, du contenu de ce document à des fins commerciales.

SYCOMOREEN autorise volontiers toute reproduction dans le cadre de recherches scientifiques à but non lucratif, ou d'activités scolaires et pédagogiques.

Généralités et objectifs

La récupération de l'énergie cinétique d'un véhicule n'est pas une idée nouvelle bien qu'elle soit très peu répandue : la plupart des véhicules ralentissent en convertissant la totalité de leur énergie cinétique en chaleur au niveau de leurs freins. Cette énergie est libérée dans l'atmosphère et elle est *définitivement perdue* pour le véhicule. En fait, on peut séparer les sources d'énergie en 2 grandes catégories :

- Les énergies non récupérables : ce sont des énergies qui ne peuvent qu'être déstockées au sein du véhicule *pendant son fonctionnement*. Soit elles sont à fonctionnement *non réversible*, soit il n'existe pas de *dispositifs de régénération* de ces énergies dans le véhicule. Exemple : l'énergie chimique d'un carburant qu'il est impossible de reformer après sa combustion, l'énergie électrique de batteries non pourvues d'un chargeur régénérateur.
- Les énergies récupérables : ce sont des énergies qui peuvent être tantôt déstockées, tantôt stockées *au sein* du véhicule *pendant son fonctionnement* à condition qu'il soit équipé de dispositifs adéquats : elles sont alors à fonctionnement *réversible*. Autrement dit, le déstockage de ces énergies permet de faire avancer le véhicule. Inversement, on peut stocker ces énergies simplement en faisant rouler le véhicule et sans avoir recours à des sources d'énergie extérieures au véhicule (ex : une station service, le réseau EDF, le soleil, le vent...). Exemples :
 - o L'énergie mécanique : elle peut notamment être stockée dans un véhicule soit à l'aide de ressorts (principe des voitures à friction), soit à l'aide de volants d'inertie, soit sous forme électromagnétique avec la charge de condensateurs (« supercapacitors ») ou bobines.
 - o L'énergie chimique : elle est stockée dans des accumulateurs (ou batteries) : des réactions d'oxydoréduction spontanées ou non (électrolyse) permettent de stocker et déstocker cette énergie (le déstockage produit une énergie électrique).
 - o L'énergie pneumatique/hydraulique : un gaz (ou un fluide) sous pression constitue la réserve d'énergie (compression du fluide : stockage ; détente : déstockage).

La récupération de l'énergie cinétique du véhicule est un enjeu majeur pour la réduction de sa consommation d'énergie non récupérable. En effet, dans l'hypothèse où les frottements sont faibles (pneus perfectionnés ou roulage sur voies ferrées, mécanismes soignés de transmission de la puissance vers les roues et moteurs limitant les pertes par frottements), un véhicule pourrait parcourir des milliers de km avec un stock initial d'énergie non récupérable relativement faible : il mettrait à profit toutes les descentes ou les freinages pour stocker de l'énergie récupérable, ce stockage lui servant ensuite pour affronter les montées et vaincre les frottements qui seront toujours présents, même s'ils sont réduits.

L'énergie non récupérable de la majorité des véhicules actuels est une énergie chimique à base d'hydrocarbures couramment appelée « carburants », les plus connus étant l'essence et le gasoil. *La diminution de la consommation de carburants est une évidence flagrante* à la fois d'un point de vue économique (prix toujours plus élevés des hydrocarbures avec accélération certaine de la hausse) et d'un point de vue écologique (la combustion des carburants induit des polluants gazeux cancérigènes et des gaz à effet de serre comme le CO₂). On peut alors s'étonner, en 2008, que pratiquement tous les véhicules gaspillent leur carburant sans chercher à récupérer leur énergie cinétique (à l'exception de quelques très rares véhicules hybrides ou électriques). En fait, ceci n'est qu'une conséquence de la combinaison de 4 facteurs :



- La puissance des industriels du pétrole pour qui la consommation de pétrole des pays développés et bientôt celle de grands pays émergents (Amérique du Sud, Chine, Inde...) est un objectif très important pour amortir les sommes qu'elles investissent dans la prospection de 'nappes huileuses'.
- La condescendance des Etats qui, en taxant massivement les carburants, exploitent insidieusement la situation malgré des déclarations de circonstances sur la protection de l'environnement et l'importance de leur indépendance énergétique.
- L'immobilisme des automobilistes qui dans leur majorité, semblent se résigner dans les stations-service et, dans leur majorité, *n'exigent pas des produits efficaces, mais confortables et puissants*.
- La frilosité des constructeurs d'automobiles qui, à quelques exceptions près, pensent se donner une image valorisante en confiant à leur service R&D le développement de prototypes écologiques, présentés avec une certaine autosatisfaction dans les salons de l'automobile. La bonne foi des services R&D et la qualité de leurs réalisations contrastent avec les stratégies des constructeurs qui, dès le départ, n'envisagent pas l'introduction de ces technologies dans des voitures de série avant 4, 5, 6 ans,... c'est à dire au moment où le marché ou bien un cadre légal les y contraindra, ce qui risque d'être un futur *très* lointain... à moins que le baril de pétrole n'atteigne des sommets plus tôt que prévu suite à une surestimation des réserves « exploitables »...

Les constructeurs automobiles prétendent pourtant être sans cesse innovants. Ceci est à la fois vrai et faux. Certes, sur le plan du design, les automobiles évoluent sans cesse, mais la frontière entre une nouveauté et une innovation est parfois floue dans ce domaine. Sur le plan technique, qui est celui où SYCOMOREEN se place plus volontiers, il faut porter à leur crédit de nombreuses innovations, en particulier dans le domaine de la sécurité passive ou active, du châssis, dans la transmission de la puissance aux roues, ainsi que dans la gestion électronique de la combustion. Mais dans le même temps, il faut remarquer que *depuis les débuts de l'automobile*, soit depuis 110 ans environ, *l'architecture des moteurs thermiques est restée figée* : des cylindres contiennent des pistons dont le mouvement de va-et-vient est converti via une bielle en un mouvement de rotation par un vilebrequin. Nous ne reviendrons pas ici sur la nécessité de changer cette architecture, mais signalons simplement qu'elle est *encombrante* et qu'en conséquence, *elle interdit la présence de dispositifs de stockage d'énergie crédibles dans un véhicule*. Au contraire *l'émergence de moteurs très compacts* de même puissance que les moteurs actuels *rendrait possible un stockage significatif d'énergies récupérables* grâce aux gains d'espace qu'ils offriraient dans le véhicule. Avec les Machines à Pistons Rotatifs à Battement Contrôlé (MPRBC) et le Piston Octogonal à Géométrie Déformable Contrôlée (POGDC), SYCOMOREEN propose des avancées très significative dans la conception de tels moteurs et souhaite ici élargir légèrement le champ de sa réflexion avec les objectifs suivants

- Formaliser qualitativement les conversions d'énergie possibles dans un véhicule
- Evaluer la dimension des dispositifs de stockage pour emmagasiner l'énergie cinétique d'un véhicule de 1000 kg roulant à 72 km/h afin de voir ce qui est envisageable ou pas sur une automobile.
- Esquisser des solutions technologiques permettant les échanges énergétiques au sein du véhicule.



I. Les différentes formes d'énergie utilisables dans un véhicule

I.1. Les énergies chimiques

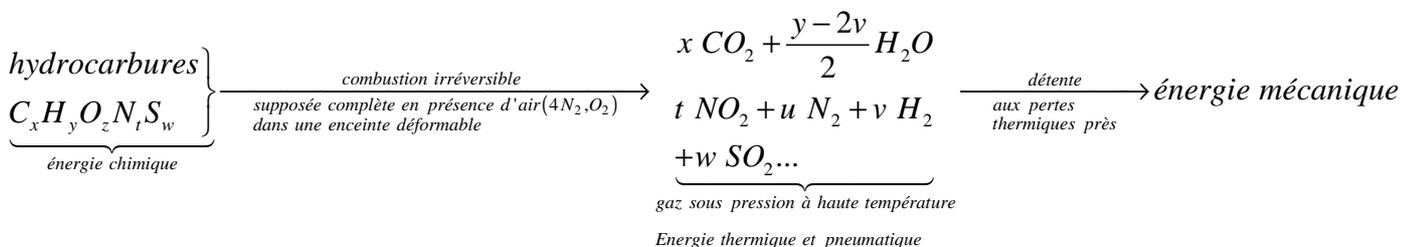
I.1.a) Les énergies chimiques à base d'hydrocarbures (charbon exclu)

Elles sont nombreuses et, pour la plupart, largement utilisées de nos jours. On peut citer :

- Les essences : supercarburant, sans plomb... destinées aux moteurs à allumage commandé
- Le gasoil et les huiles lourdes destinés aux moteurs à allumage spontané (Diesel)
- Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) utilisé comme carburant d'appoint pour les moteurs essence. Leur introduction en France à la fin des années 90 s'est révélée être un échec puisque le taux d'équipement des véhicules essence est inférieur à 5%, bien que leurs émissions de polluants soient réduites et que l'Etat, dans sa grande bonté, limite les taxes sur ce type de carburant, pourtant éminemment fossile et assez polluant (NO_x, CO₂).
- Les *carburants issus de matières organiques alimentaires* : méthanol, esters... qui commencent à émerger, notamment au Brésil, mais entrent en concurrence directe avec les matières alimentaires et ne sont pas aussi écologiques que l'on peut l'espérer. L'*argument écologique majeur* des carburants verts est une *quasi-suppression des rejets de dioxyde de carbone* (CO₂) dans l'atmosphère : la photosynthèse des plantes utilise de grandes quantités de CO₂ et rejette du dioxygène (O₂). C'est ainsi que la photosynthèse des plantes utilisées pour obtenir le biocarburant consommera à l'avance la quantité de CO₂ que la combustion du biocarburant produira, mais quels sont les rejets CO₂ de production et transport des biocarburants ? Quel impact ont les pesticides nécessaires aux rendements requis ? Faut-il affamer la planète pour *alimenter*... des automobiles mal conçues car non économes ?
- Les *carburants issus de la biomasse*, ont l'avantage d'utiliser des parties organiques habituellement pas ou peu valorisées, par des procédés variés (biométhanisation, thermolyse, gazéification...); *ils constituent une voie de recherche qu'il faut assurément développer, mais qui ne permettra pas de soutenir le gaspillage actuel d'hydrocarbures.*

Ces énergies à base d'hydrocarbures sont *extrêmement énergétiques* (chaleur dégagée par combustion de l'ordre de 20 000 kJ/kg de carburant) et faciles à manipuler sous forme liquide, *mais elles sont polluantes.*

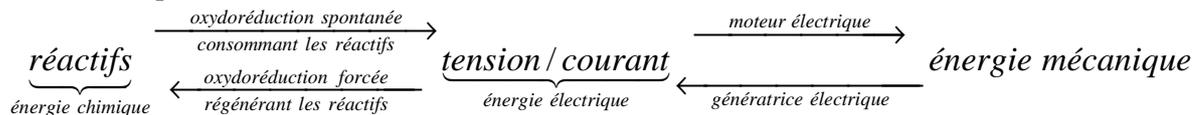
La conversion de cette énergie chimique est *irréversible* : ceci signifie que *l'on ne peut que « déstocker » cette énergie* au sein d'un véhicule terrestre. On exploite schématiquement l'énergie chimique des hydrocarbures ainsi :



1.1.b) Les énergies chimiques sans composés carbonés

Elles sont utilisées sous la forme d'accumulateurs électriques, dont le plus répandu est l'accumulateur au plomb utilisé dans les batteries de voitures (accumulateurs électrolytiques). Elles sont basées sur *des réactions d'oxydoréduction* pour créer un courant électrique. *Leur grand intérêt réside dans la réversibilité de ces réactions*, c'est à dire que l'on peut, en lui appliquant une tension, *recharger* l'accumulateur. Le nombre de cycles de charge/décharge est toutefois limité, mais important (de l'ordre de 2000 selon les technologies utilisées). L'augmentation du nombre de cycles charge/décharge des accumulateurs fait l'objet d'actives recherches, les applications étant nombreuses (batteries de portables, de voitures, de navettes aérospatiales).

On a schématiquement :



On remarque les doubles flèches : ceci signifie que *l'on peut stocker et déstocker cette énergie chimique* au sein du véhicule, et cela de 2 façons : soit le moteur thermique fait tourner une génératrice qui charge les batteries, soit l'énergie cinétique du véhicule est convertie en énergie électrique lors de la décélération du véhicule. C'est ainsi *qu'une voiture va pouvoir freiner sans actionner les freins mécaniques* : le gain énergétique est très important puisqu'*une grande partie de l'énergie cinétique du véhicule* habituellement perdue en totalité par effet Joule au niveau des freins *est récupérée ici* (fig. I.). Cette énergie pourra servir par la suite à accélérer à nouveau le véhicule, etc...

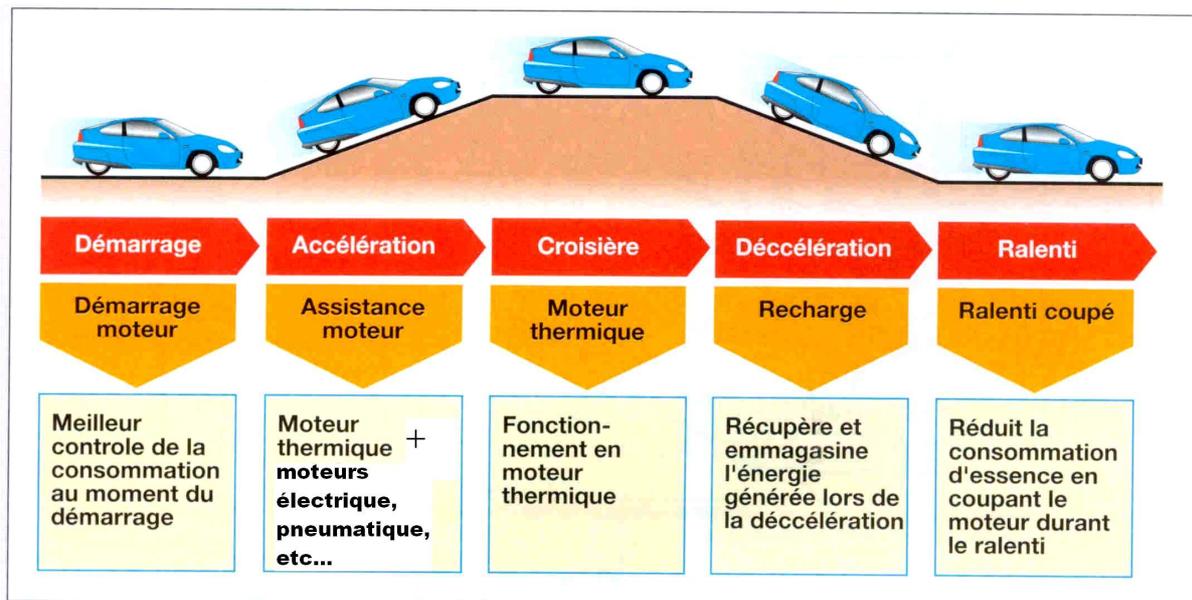


Fig. I. : stratégie de récupération d'énergie et d'assistance moteur d'un véhicule hybride.

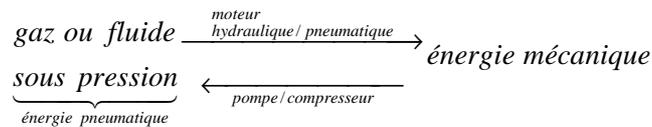
Signalons une variante dans le stockage de l'électricité par le recours aux supercondensateurs appréciés comme tampon énergétique à temps de réponse très courts et capables de délivrer de forts ampérages.

Enfin, on peut citer comme oxydoréduction en phase gazeuse le cas particulier des piles à combustibles dihydrogène/dioxygène qui ont connu récemment un regain d'intérêt après avoir longtemps souffert de l'encombrement des réservoirs et circuits divers. L'industrialisation à grande échelle de tels dispositifs n'est toutefois pas envisagée avant plusieurs années *et le dihydrogène est plus un problème énergétique* (par ses étapes de fabrication, stockage, transport et déstockage) *qu'une solution*.



I.2. Les énergies pneumatique/hydraulique

Elles sont des énergies dont le comportement est voisin et elles sont à *fonctionnement réversible* au même titre que les énergies chimiques d'oxydoréduction :



Elles peuvent donc elles aussi être utilisées pour freiner ou accélérer le véhicule en limitant les pertes Joule au niveau des freins.

I.3 L'énergie mécanique

Ce sont des volants d'inertie préalablement lancés à grande vitesse qui, accouplés à une transmission, assurent la traction du véhicule. Dans les phases d'accélération, le volant ralentit, dans les phases de décélération, les roues accélèrent la rotation du volant (récupération d'énergie cinétique). Ces dispositifs nécessitent des transmissions très complexes pour adapter la vitesse des roues à celle du volant (trains épicycloïdaux à variation continue assistés d'embrayages et d'une gestion électronique). De plus, les volants sont généralement lourds, encombrants, voire dangereux dans le véhicule et sont toujours assistés d'un moteur pour les relancer si nécessaire. En dépit de ces difficultés, des études tendent à introduire cette technologie en Formule 1 (projet KERS : Kinetic Energy Recovery System). L'autre alternative de stockage est la mise sous tension de ressorts en traction/compression ou en torsion, l'énergie étant alors stockée sous forme d'énergie potentielle élastique. La détente du ressort *libère* cette énergie alors que sa mise sous tension en freinage ou en descente la *stocke*.

I.4. Les énergies renouvelables

Ce sont les énergies éolienne et solaire. *Elles ne peuvent actuellement pas être utilisées pour mouvoir le véhicule*, sauf s'il est ultraléger (moins de 300kg, passagers compris), ce qui n'est généralement pas le cas. *Elles ne sont pas réversibles* : la voiture ne peut pas régénérer le vent qui l'a poussée ou bien renvoyer la lumière solaire qu'elle a reçue. Toutefois, l'énergie solaire via des cellules photovoltaïques peut faire fonctionner les accessoires électriques ou recharger des batteries, que le véhicule soit en marche ou non. Par exemple, on peut citer une voiture solaire ayant traversé l'Australie dans le sens Sud/Nord. Les panneaux solaires ne peuvent malheureusement pas être très grands sur une automobile (surfaces limitées au toit, au capot moteur et aux ailes), et ils sont chers et fragiles.

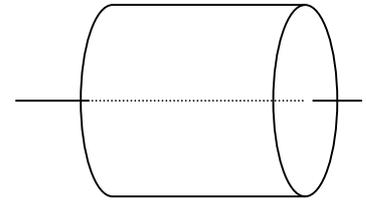
II. Eléments de pré-dimensionnement des dispositifs de stockage

II.1. Hypothèses préalables

Le stockage d'énergie se justifie pour tous les véhicules terrestres, en particulier pour les automobiles qui roulent en ville. L'idéal serait qu'avec une quantité d'énergie initiale, l'automobile puisse se propulser jusqu'à la vitesse maximale en situation urbaine, puis par récupération au freinage, accélérer jusqu'à environ la même vitesse *sans apport d'énergie supplémentaire*. Les vitesses urbaines se situent entre 0 km/h (feux rouges ou bouchons) et 70 km/h (périphériques). En arrondissant la vitesse maximale à 72 km/h, soit 20 m/s, l'énergie à récupérer au cours d'un freinage complet est pour une masse roulante de $m=1000 \text{ kg} : E_c = \frac{1}{2}mv^2 = 200\,000 \text{ J}$. Le stockage doit être *efficace* (au moins 90% de l'énergie cinétique récupérée), *rapide* (durée du temps de freinage, tout au plus quelques dizaines de secondes) et permettre au véhicule de freiner sans actionner les freins mécaniques, si ce n'est au dernier moment pour immobiliser complètement le véhicule. Par ailleurs, les dispositifs de stockage doivent avoir une taille raisonnable. On se donne *par hypothèse* un *volume dédié au stockage* de l'énergie de **20 000 cm³**.



II.2. Les stockages mécaniques



II.2.a) Par roue d'inertie

On considère un cylindre d'acier de masse volumique 7850 kg/m^3 , d'un rayon $R = 25 \text{ cm}$ et d'une hauteur $h = 10 \text{ cm}$. Son volume V vaut : $V = \pi R^2 h = 19635 \text{ cm}^3$, et $m = \rho V = 154.13 \text{ kg}$

Et le moment d'inertie J par rapport à son axe de révolution vaut : $J = \frac{m_{\text{cylindre}} R^2}{2} = \frac{\rho \pi h R^4}{2}$

L'énergie cinétique de rotation de ce solide : $E_{\text{rotation}} = \frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{\rho \pi h R^4}{4} \omega^2$ avec ω sa vitesse de rotation

En supposant une vitesse de rotation de 2800 tr/min (comparable à celle d'un moteur en charge moyenne), le fait de lancer cette roue d'inertie de 0 à 2800 tr/min (293,2 rad/s) stocke une énergie de :

$$E_{\text{rotation}} = \frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{\rho \pi h R^4}{4} \omega^2 = 207058 \text{ J}$$

qui permet théoriquement de relancer le véhicule à environ 70 km/h. Mais cela est loin d'être parfait :

- Le poids est important : la roue d'inertie pèse ici à elle seule plus de 154 kg, et il faut prévoir des transmissions magnétique ou à variation continue, elles aussi lourdes et encombrantes.
- La complexité mécanique de ces transmissions entraîne des coûts élevés.
- Pour accélérer brutalement la roue d'inertie (freinage vif), celle ci va opposer un fort couple en « $J \frac{d\omega}{dt}$ ». Ce couple risque d'être trop important et de bloquer les roues : une gestion électronique s'impose donc (embrayage ou réglage du rapport $\omega_{\text{roues}} / \omega_{\text{roue d'inertie}}$).

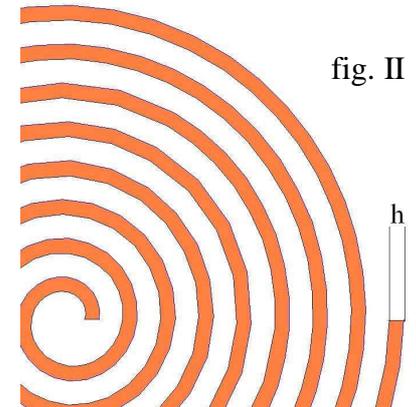
II.2.b) Par ressort

Pour les ressorts de torsion en spirale, la raideur en torsion du ressort

s'exprime par : $K = \frac{E b h^3}{12 L}$ Avec : E le module d'Young du matériau

(acier, 210 GPa), b la profondeur du ressort, h l'épaisseur de la lamelle enroulée (fig. II) et L la longueur développée de la lamelle.

Dans l'approximation des déformations linéaires, le couple de rappel du ressort en fixant une de ses extrémités et faisant tourner l'autre d'un angle θ vaut $C_{\text{rap}} = K \theta$. L'énergie élastique stockée vaut $E = \frac{1}{2} K \theta^2$



En choisissant un rayon maxi de 25 cm, une augmentation de rayon 2,875 cm/tour (soit 8 spires), un rayon moyen initial de 2 cm, une épaisseur h de 12 mm et une profondeur b de 10 cm, on obtient : $L = 6,79 \text{ m}$, $K = 445,25 \text{ N.m/rad}$, le volume du ressort : 19635 cm^3

Et pour une rotation de 2.5 tours : $C_{\text{rap}} = 6994 \text{ N.m}$ et $E = 54 931 \text{ J}$ équivalent à une relance à 38 km/h.

L'allure du ressort est donnée sur la figure II. L'énergie stockée est intéressante. Il faudrait toutefois vérifier que l'on reste bien dans des déformations réversibles du métal. Le couple de rappel important nécessite l'utilisation d'un réducteur d'un rapport d'environ 10 entre le mouvement de rotation des roues et l'arbre solidaire du centre de la spirale. Par ailleurs, il faut prévoir un dispositif d'inversion du mouvement (à embrayages par exemple), sinon, la détente du ressort tend à faire reculer la voiture !

Pour un même volume, le ressort à spirale stocke 50 000 J, soit 4 fois moins que la roue d'inertie. Il est toutefois beaucoup plus léger et, a priori, il ne nécessite pas de transmission à variation continue.

Pour les ressorts en traction/compression, la raideur est donnée par : $k = \frac{G d^4}{8 n D^3}$



Avec : G le module au cisaillement du matériau (pour l'acier : $G = \frac{E}{2(1+\nu)} \approx 80 \text{ GPa}$ avec $\nu=0,28$), d le diamètre du fil enroulé, n le nombre de spires du ressort, et D le diamètre moyen du ressort

Si l'on reste dans le domaine linéaire du ressort (déformations réversibles), la force de rappel du ressort à la suite d'un allongement x vaut $F_{rap} = kx$ et l'énergie élastique stockée est $E = \frac{1}{2}kx^2$.

La contrainte dans le ressort est donnée par $\sigma = \frac{8F_{rap}D}{\pi d^3}$

Si l'on choisit un ressort de traction à spires jointives avec les caractéristiques suivantes : d = 34 mm, R = 85 mm, longueur initiale 30 mm, allongement x = 30 mm, on obtient le ressort à 9 spires de la figure III (en positions initiale et allongée) avec les caractéristiques suivantes :

- raideur du ressort : k = 308 267 N/m
- force nécessaire pour l'allongement : F = k x = 92 480 N
- énergie élastique stockée : 13 872 J
- contrainte mécanique : 1 018 MPa
- volume du ressort allongé : 19611 cm³

L'énergie stockée est ici nettement inférieure au ressort à spirale. Ceci s'explique par la perte d'espace au centre du ressort. La contrainte est élevée, mais les aciers HLE présentent des limites élastiques allant jusqu'à 1500 MPa. Enfin, la force nécessaire à l'allongement est importante : elle représente une pression de 100 Bar s'exerçant sur 100 cm².

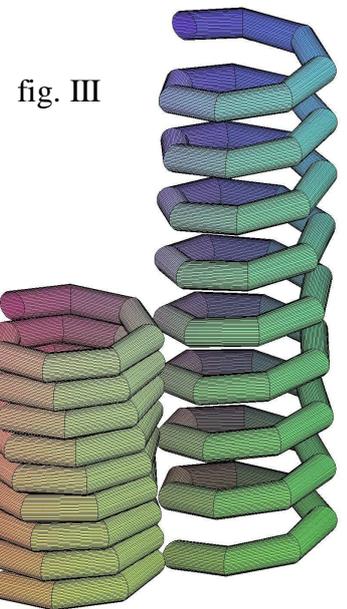


fig. III

II.3. Les stockages pneumatique/hydraulique

II.3.a) Cas d'une énergie pneumatique

- *Choix du fluide :*

Ce sera un fluide gazeux qui assurera les échanges énergétiques, le moins coûteux et le plus disponible est l'air ambiant.

- *Avantages :*

- Les compresseurs ou les moteurs pneumatiques sont plutôt bon marché.
- Une cuve d'air sous pression est moins dangereuse qu'une cuve d'hydrocarbures sous pression, en particulier en cas d'incendie du véhicule.
- Le compresseur pourrait être *intégré* dans le moteur :
 - *On peut tout à fait envisager de transformer une chambre de combustion en compresseur intermittent à l'aide du calage variable des soupapes et d'une valve aiguillant les gaz tantôt vers l'échappement de cette chambre, tantôt vers la cuve sous pression. On peut même renoncer définitivement à utiliser cette chambre comme une chambre de combustion et s'en servir exclusivement comme un compresseur (la valve bidirectionnelle devenant alors inutile).*
 - *On peut ainsi atteindre des pressions d'au moins 50 Bars, en particulier si le taux de compression de la chambre est grand et les volumes morts restreints.*



- *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.
- A ma connaissance, 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.

On va considérer le travail mécanique W qu'il faut fournir à un gaz pour le comprimer d'un état $[P_1, V_1]$ à un état $[P_2, V_2]$ avec $P_2 > P_1$ et $V_1 > V_2$. On supposera une transformation polytropique du type $PV^k = cte$ avec k un paramètre positif. Le cas où $k = \gamma$, avec γ le coefficient de Mayer, correspond à une compression adiabatique réversible, c'est-à-dire isentropique. Pour les gaz parfaits diatomiques, $\gamma = 1,4$. Le cas où $k = 1$ correspond à une compression isotherme puisque dans ce cas, avec la loi des gaz parfaits, $PV = nRT = cte \Rightarrow T = cte'$. On posera de plus $\tau = V_1/V_2$ le taux de compression.

La loi polytropique nous donne en cours de compression : $PV^k = cte = P_1V_1^k \Rightarrow P = P_1 \left(\frac{V_1}{V}\right)^k$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} -PdV = -\int_{V_1}^{V_2} P_1 \left(\frac{V_1}{V}\right)^k dV = -P_1V_1^k \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^k} = \frac{P_1V_1^k}{1-k} [V_1^{1-k} - V_2^{1-k}] = \frac{P_1V_1^k}{1-k} V_1^{1-k} \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1-k}\right]$$

D'où $W = \frac{P_1V_1}{k-1} \left[\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1-k} - 1\right] = \frac{P_1V_1}{k-1} \left[\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} - 1\right]$ soit finalement $W = \frac{P_1V_1}{k-1} [\tau^{k-1} - 1]$

A.N. : $\tau = 16$, $P_1 = 1 \text{ Bar} = 10^5 \text{ Pa}$, $V_1 = 0.02 \text{ m}^3 = 20000 \text{ cm}^3$, $W = 10\,157 \text{ J}$

Si l'on veut 200 000 J (20 fois plus), il faut un réservoir d'air sous pression de 400 L, ce qui est *très encombrant à l'échelle d'une voiture*, bien que ce réservoir soit a priori léger. Qualitativement, on a des caractéristiques *inverses* de celles de la roue d'inertie.

A l'issue de cette compression polytropique, la température finale de l'air supposé être un gaz parfait avec

$PV = nRT$ sera de $T_1V_1^{k-1} = T_2V_2^{k-1} \Rightarrow T_2 = T_1 \left[\frac{V_1}{V_2}\right]^{k-1}$

Si $k = \gamma = 1.4$, $\tau = 16$ et $T_1 = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$, $T_2 = 888 \text{ K}$ soit 615°C et $P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k = P_1\tau^k = 48.5 \text{ Bar}$

Si cet air sous pression est stocké peu de temps, il n'aura pas le temps de se refroidir et sa détente pourra presque restituer l'énergie cinétique du véhicule initialement stockée. En revanche, si la restitution n'est pas immédiate, l'air va se refroidir jusqu'à la température ambiante T_1 à volume V_2 constant. Par conservation de la matière dans la cuve sous pression, la nouvelle pression disponible P_2^{ref} sera alors :

$$\left. \begin{array}{l} P_2^{ref} V_2 = nRT_1 \\ P_2 V_2 = nRT_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{P_2^{ref} V_2}{RT_1} = \frac{P_2 V_2}{RT_2} \Rightarrow P_2^{ref} = P_2 \frac{T_1}{T_2} = P_2 \left[\frac{V_1}{V_2}\right]^{1-k} = P_2 \tau^{1-k} = P_1 \tau^k \tau^{1-k}$$

Donc $P_2^{ref} = \tau P_1$ A.N. : $P_2^{ref} = 16 \text{ Bar}$



On cherche maintenant le travail W restituable au cours d'une détente polytropique jusqu'à $\{P_{finale}=1 \text{ Bar}, V_{final}\}$. Le volume à partir duquel $P=1 \text{ Bar}$ vérifiera :

$$P_2^{ref} V_2^k = P_{finale} V_{final}^k \quad P_{finale}=P_1 \Rightarrow V_{final} = \left(\frac{P_2^{ref}}{P_1}\right)^{1/k} V_2 = \tau^{1/k} \frac{V_1}{\tau} \Rightarrow V_{final} = V_1 \tau^{\frac{1-k}{k}} \quad \text{A.N. } V_{final} = 9,06 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \approx 9 \text{ L}$$

La loi polytropique nous donne en cours de détente : $PV^k = cte = P_2^{ref} V_2^k \Rightarrow P = P_2^{ref} \left(\frac{V_2}{V}\right)^k$

$$W = \int_{V_2}^{V_{final}} -PdV = -\int_{V_2}^{V_{final}} P_2^{ref} \left(\frac{V_2}{V}\right)^k dV = P_2^{ref} V_2^k \int_{V_{final}}^{V_2} \frac{dV}{V^k} = \frac{P_2^{ref} V_2^k}{1-k} [V_2^{1-k} - V_{final}^{1-k}] = \frac{P_2^{ref} V_2^k}{1-k} V_2^{1-k} \left[1 - \left(\frac{V_{final}}{V_2}\right)^{1-k}\right]$$

$$W = \frac{P_2^{ref} V_2}{1-k} \left[1 - \left(\frac{P_2^{ref}}{P_1}\right)^{\frac{1-k}{k}}\right] = \frac{1}{1-k} (\tau P_1) \frac{V_1}{\tau} \left[1 - \left(\frac{\tau P_1}{P_1}\right)^{\frac{1-k}{k}}\right] \quad \text{D'où } W = \frac{P_1 V_1}{k-1} \left[\tau^{\frac{1-k}{k}} - 1\right]$$

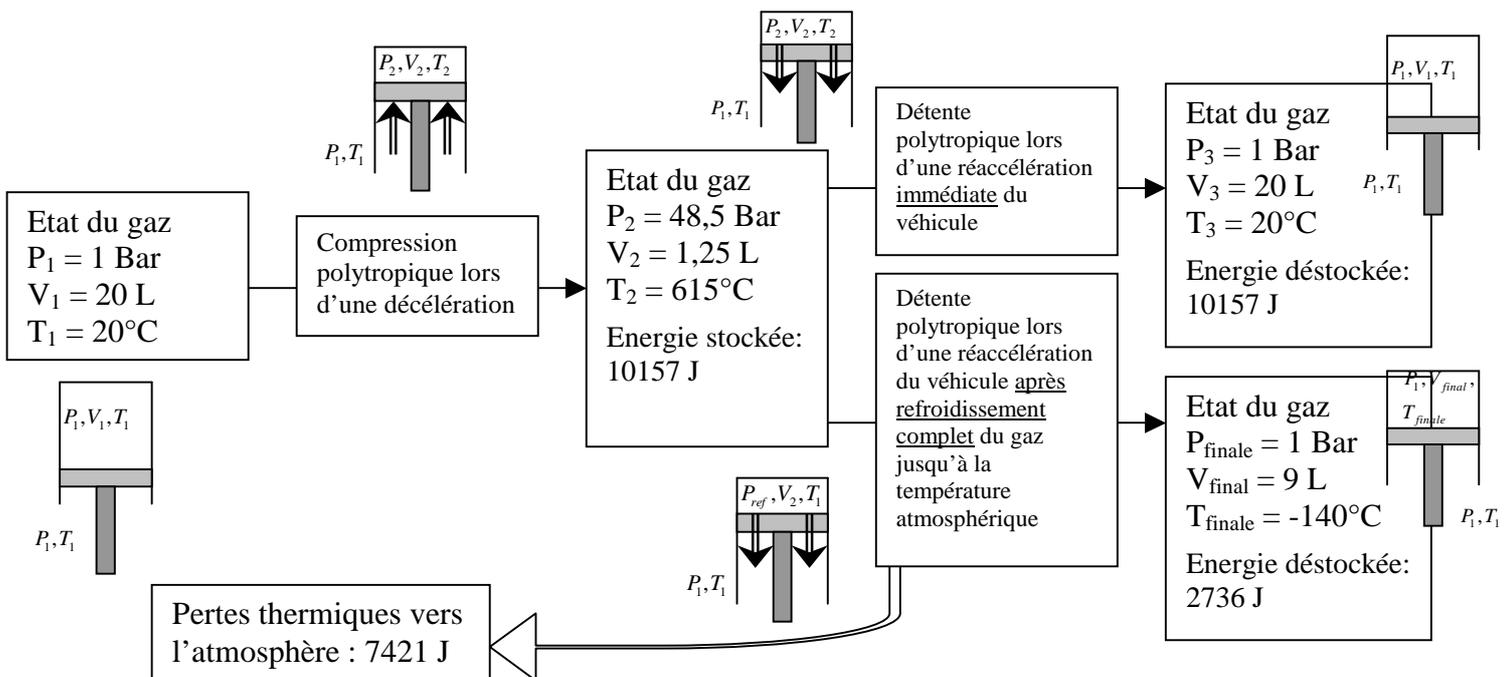
A.N. : $W = -2735,7 \text{ J}$ (énergie négative car fournie par le gaz vers les roues du véhicule).

Remarque : $T_{finale} V_{final}^{k-1} = T_1 V_2^{k-1} \Rightarrow T_{finale} = T_1 \left(\frac{V_2}{V_{final}}\right)^{k-1} = T_1 \left(\frac{V_1 \tau^{-1}}{V_1 \tau^{\frac{1-k}{k}}}\right)^{k-1} = T_1 \left(\tau^{\frac{1}{k}}\right)^{k-1} = T_1 \tau^{\frac{1-k}{k}}$

A.N. : $T_{finale} = 132,7 \text{ K}$ soit $-140,3^\circ\text{C}$

Bilan énergétique avec les hypothèses suivantes :

- Les transformations sont adiabatiques réversibles $k = 1.4 = \gamma$
- Il n'y a aucune perte mécanique lors du stockage ou déstockage de l'énergie (pas de frottements dans la cuve sous pression)
- Aucune perte mécanique, ni dans les transmissions entre les roues du véhicule et le dispositif compresseur, ni dans le compresseur, ni dans les canalisations.
- La cuve a un volume V_1 de 20 L.



Commentaires :

- On remarque immédiatement que la quantité d'énergie stockée est très modeste par rapport au 200 000 J souhaités, sauf avec une cuve de 400L qui n'est pas raisonnablement implantable dans une voiture. Toutefois, le tableau ci-dessous donne en fonction du volume de la cuve l'énergie cinétique stockable* et la vitesse correspondante du véhicule (vitesse au-delà de laquelle le stockage de l'énergie cinétique ne sera que partiel).

Volume de la cuve (L)	20	40	50	60	100	150	200
Energie stockable (J)	10157	20314	25393	30471	50786	76179	101571
Vitesse correspondante* (km/h)	16.2	23	25,6	28,1	36.3	44,4	51.3
$v_{km/h} = 3.6 \times \sqrt{\frac{2 \left(10157 \frac{V_{cuve}}{Litres} \right)}{m_{véhicule}^{kg}}}$							

*Aux frottements près

Pour information : m = 1000 kg. Avec 60 L, volume raisonnable, on pourrait relancer le véhicule jusqu'à 28 km/h, ce qui est *largement suffisant* dans les bouchons.

- De plus, cette énergie peut *a priori être stockée en peu de temps*.
- Le rendement stockage/déstockage est de 100% si la relance du véhicule est immédiate après son arrêt. Il n'est plus que de 27% si le refroidissement de l'air est complet. Il faudra peut-être un *réservoir thermiquement isolé*, ce qui n'est très pas pénalisant en poids, mais risque d'être *très encombrant*... Par ailleurs, on remarque qu'on obtient une *température très basse* à l'issue de la détente. Elle peut être *mise à profit pour la climatisation de l'automobile* en liquéfiant par exemple un gaz frigorigène. Ainsi, le compresseur de la climatisation fonctionnera moins et diminuera la consommation de la voiture.

II.3.b) Utilisation d'une énergie hydraulique

- Choix du fluide :**

Ce sera un fluide liquide qui assurera les échanges énergétiques. Le moins coûteux est l'eau, mais elle est corrosive et génère des cavitations dans les conduites en se vaporisant. De ce point de vue, une huile est plus stable, mais aussi plus chère. Toutefois, si l'huile circule en circuit fermé, cet aspect n'est pas gênant.

- Avantages :**

- Les pompes ou moteurs hydrauliques présentent un rendement proche de 95%.
- Il existe des moteurs hydrauliques réversibles :
 - En décélération, on les utilisera en compresseur d'huile (énergie cinétique → énergie hydraulique),
 - On utilisera le dispositif en moteur hydraulique pour restituer cette énergie lors d'une accélération ultérieure du véhicule (énergie hydraulique → énergie cinétique). *Ces techniques sont actuellement développées sur des poids-lourds* pour réduire leur consommation de carburant.
 - L'avantage d'un moteur réversible est évident sur le plan de la compacité, et en plus il n'y aura pas à synchroniser plusieurs dispositifs hydrauliques.



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/ou au véhicule :

- Lubrification du moteur thermique
 - Réglage des taux de compression des chambres de combustion
 - Dispositifs hydrauliques annexes (direction assistée, suspensions hydropneumatiques)
 - Mise de gaz sous pression pour un moteur éventuel pneumatique. On peut d'ailleurs *regrouper dans une même cuve sous pression l'huile et le gaz* en les séparant par une paroi souple ou mobile compartimentant la cuve en 2 réservoirs distincts.
- *Inconvénients*
 - une cuve d'huile sous pression est relativement dangereuse en cas d'incendie du véhicule.
 - L'huile est quasi incompressible et ne peut donc pas être mise sous pression par une des chambres de combustion du moteur thermique :
 - Pour arrêter le pompage, on ferme les 2 soupapes en permanence : dans le cas du gaz, le moteur peut continuer à tourner car le gaz peut se détendre ou se comprimer.
 - Si c'est de l'huile, *le moteur se bloquera* car le volume de l'huile initialement contenue dans la chambre au moment de la fermeture des soupapes ne variera quasiment pas.
 - Ce caractère incompressible de l'huile obligera à utiliser un fluide gazeux ou un ressort pour stocker de l'énergie comme le suggère le schéma de principe ci-après.

Sur la page suivante, la figure IV donne le principe général de circulation de fluides sous pression avec récupération d'énergie au sein d'un véhicule :

- De nombreux dispositifs sont optionnels, les composants de base étant un moteur hydraulique réversible, une pompe auxiliaire et une cuve cylindrique contenant de l'air et de l'huile sous pression.
- Le schéma présente une situation de stockage d'énergie : le véhicule décélère et les roues actionnent le moteur hydraulique qui joue alors un rôle de *compresseur pour l'air du compartiment 2*. Si l'on utilise un *moteur hydraulique à plateaux inclinables*, il est très facile de régler le débit d'huile entrant dans le compartiment 1, voire même de l'annuler, ce qui *empêchera* le stockage *si nécessaire*.
- Dès que le conducteur souhaite relancer le véhicule, l'air comprimé se détend et chasse l'huile vers le moteur hydraulique qui envoie alors une énergie mécanique vers les roues, énergie qui n'aura évidemment plus à être fournie par le moteur thermique comme c'est le cas actuellement, d'où une économie de carburant... Ici aussi, l'inclinaison du plateau permet de piloter la quantité d'huile partant vers le moteur, (lequel rejette l'huile à basse pression dans le réservoir), et donc de piloter la vitesse de déstockage de l'énergie pneumatique du compartiment 2.

En permanence, les « accessoires » et la lubrification soutirent de l'huile dans le compartiment 1. Il faudra donc une pompe hydraulique auxiliaire simple et bon marché (à engrenages par exemple), actionnable à volonté par le moteur thermique ou par un moteur électrique pour maintenir la quantité et/ou la pression d'huile nécessaire au bon fonctionnement des accessoires et de la lubrification. Le fonctionnement de cette pompe sera *intermittent* car en principe, les accessoires n'utiliseront pas beaucoup d'huile par rapport aux quantités d'huile pompées lors d'une décélération.



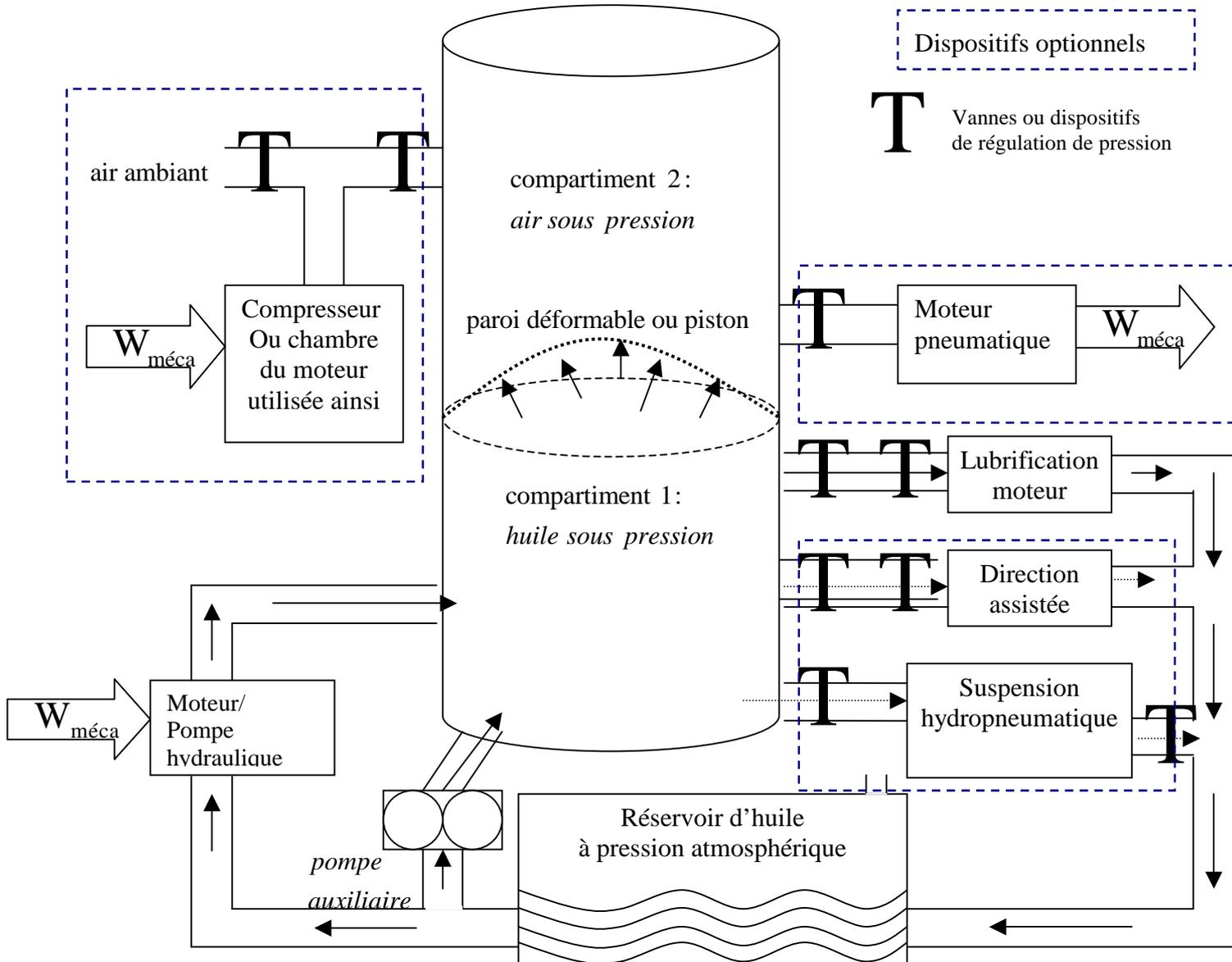
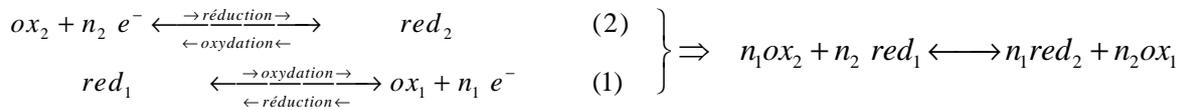


Fig. IV : Principe général de circulation de fluides avec récupération d'énergie au sein du véhicule

II.4. Le stockage chimique

II.4.a) Description théorique succincte

Dans le cas général, un accumulateur aussi appelé abusivement « pile rechargeable » met en jeu 2 couples rédox quelconques qui réagissent entre eux selon une *réaction d'oxydoréduction* :



La canalisation dans un circuit électrique des électrons résultant des échanges électroniques au cours de cette réaction permet d'obtenir un courant électrique. La force électromotrice (f.e.m.) de cette pile, aussi appelée « sa tension à vide » se calcule à l'aide de la formule $E = E_2 - E_1$: en supposant $E_2 > E_1$, E_2 est le potentiel électrique de la cathode où ont lieu les réductions et E_1 celui de l'anode où ont lieu les oxydations. Les expressions de E_2 et E_1 sont données par la formule de Nernst avec « a_i » l'activité chimique de l'espèce i et E_j^0 le potentiel standard du couple rédox n_j :

$$E_2 = E_2^0 + \frac{RT}{n_2 F} \ln \left(\frac{a_{ox2}}{a_{red2}} \right) \quad E_1 = E_1^0 + \frac{RT}{n_1 F} \ln \left(\frac{a_{ox1}}{a_{red1}} \right)$$

Avec F la constante de Faraday (96500 C/mol) et R celle des gaz parfaits (8,32 J/K/mol) et T la température en Kelvin à laquelle fonctionne l'accumulateur.

Calcul : La réaction rédox considérée est $n_1 ox_2 + n_2 red_1 \longrightarrow n_1 red_2 + n_2 ox_1$. Il vient :

$$E = E_2 - E_1 = E_2^0 + \frac{RT}{n_2 F} \ln \left(\frac{a_{ox2}}{a_{red2}} \right) - E_1^0 - \frac{RT}{n_1 F} \ln \left(\frac{a_{ox1}}{a_{red1}} \right)$$

$$E = E_2^0 - E_1^0 + \frac{RT}{F} \left(\frac{1}{n_2} \ln \left(\frac{a_{ox2}}{a_{red2}} \right) - \frac{1}{n_1} \ln \left(\frac{a_{ox1}}{a_{red1}} \right) \right)$$

Cette expression n'est pas très utilisée car on fait apparaître le quotient réactionnel Q de la réaction :

$$E = E_2^0 - E_1^0 + \frac{RT}{n_1 n_2 F} \left(\ln \left(\frac{(a_{ox2})^{n_1}}{(a_{red2})^{n_1}} \right) - \ln \left(\frac{(a_{ox1})^{n_2}}{(a_{red1})^{n_2}} \right) \right)$$

$$E = E_2^0 - E_1^0 + \frac{RT}{n_1 n_2 F} \left(\ln \left(\frac{(a_{ox2})^{n_1} (a_{red1})^{n_2}}{(a_{red2})^{n_1} (a_{ox1})^{n_2}} \right) \right)$$

Et en posant $\frac{1}{Q} = \frac{(a_{ox2})^{n_1} (a_{red1})^{n_2}}{(a_{red2})^{n_1} (a_{ox1})^{n_2}}$, il vient $E = E_2^0 - E_1^0 - \frac{RT}{n_1 n_2 F} \ln(Q)$

La pile va débiter jusqu'à l'égalité des potentiels de ses 2 électrodes ($E_2 = E_1 \Rightarrow E = E_2 - E_1 = 0$), c'est-à-dire jusqu'à ce que le quotient de la réaction soit égal à la constante K d'équilibre thermodynamique de la réaction : cette constante d'équilibre $Q_{\text{équilibre}} = K$ se calcule en sachant que $0 = E_2^0 - E_1^0 - \frac{RT}{n_1 n_2 F} \ln(Q_{\text{équilibre}})$

Posons de plus $E^0 = E_2^0 - E_1^0$ la f.e.m. de la pile dans les conditions standard.

$$0 = E_2^0 - E_1^0 - \frac{RT}{n_1 n_2 F} \ln(Q_{\text{équilibre}}) \Rightarrow \ln(K) = \ln(Q_{\text{équilibre}}) = n_1 n_2 \frac{FE^0}{RT}$$



II.4.b) Travail électrique d'une pile

On considère toujours la réaction $n_1 ox_2 + n_2 red_1 + n_1 n_2 e^- \longleftrightarrow n_1 red_2 + n_2 ox_1 + n_1 n_2 e^-$

On notera ξ l'avancement de cette réaction tel que, en désignant le temps par t et le nombre de moles de l'espèce chimique A présentes dans l'accumulateur par (A) :

$$\xi(t) = \frac{(ox_2)_{t=0} - (ox_2)_t}{n_1} = \frac{(red_1)_{t=0} - (red_1)_t}{n_2} = \frac{(red_2)_t - (red_2)_{t=0}}{n_1} = \frac{(ox_1)_t - (ox_1)_{t=0}}{n_2}$$

Pendant dt, il se produit une variation élémentaire $d\xi$ de l'avancement de la réaction et $n_1 n_2 d\xi$ moles d'électrons sont échangées. Le générateur fournit alors :

- une tension $E = E_2^0 - E_1^0 + \frac{RT}{n_1 n_2 F} \ln \left(\frac{(a_{ox2})^{n_1} (a_{red1})^{n_2}}{(a_{red2})^{n_1} (a_{ox1})^{n_2}} \right)$
- une intensité $i = \frac{dq}{dt} = n_1 n_2 F \frac{d\xi}{dt} \Rightarrow idt = n_1 n_2 F d\xi$ avec $F = 96500$ C/mol.

Le travail électrique algébriquement reçu par le circuit électrique branché sur la pile s'exprime alors

par :

$$\delta W_{elec} = E idt = \left[E_2^0 - E_1^0 + \frac{RT}{n_1 n_2 F} \ln \left(\frac{(a_{ox2})^{n_1} (a_{red1})^{n_2}}{(a_{red2})^{n_1} (a_{ox1})^{n_2}} \right) \right] [n_1 n_2 F d\xi]$$

La réaction s'arrêtera au moment où la force électromotrice de la pile sera nulle. Comme les activités des espèces chimiques dépendent a priori de l'avancement de la réaction, l'avancement au bout d'un temps infini, $\xi(t = \infty)$, sera donc calculable à l'aide de la relation suivante en supposant que la disparition de l'un des réactifs ne viendra pas bloquer la réaction avant qu'elle ait atteint l'équilibre thermodynamique :

$$\frac{n_1 n_2 F (E_2^0 - E_1^0)}{RT} = \ln \left(\frac{(a_{ox2}(\xi_\infty))^{n_1} (a_{red1}(\xi_\infty))^{n_2}}{(a_{red2}(\xi_\infty))^{n_1} (a_{ox1}(\xi_\infty))^{n_2}} \right)$$

On montre en thermodynamique que :

- l'activité d'un gaz vaut approximativement sa pression partielle (Pa) sur $P^0 = 10^5$ Pa
- l'activité d'un soluté vaut approximativement sa concentration en mol/L
- l'activité d'un solide vaut approximativement 1.

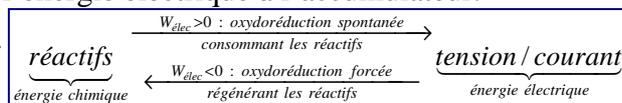
Et le travail électrique total que la pile peut fournir s'obtiendra par :

$$W_{elec} = \int_0^{\xi_\infty} \delta W_{elec} = \int_0^{\xi_\infty} \left[E_2^0 - E_1^0 + \frac{RT}{n_1 n_2 F} \ln \left(\frac{(a_{ox2}(\xi))^{n_1} (a_{red1}(\xi))^{n_2}}{(a_{red2}(\xi))^{n_1} (a_{ox1}(\xi))^{n_2}} \right) \right] [n_1 n_2 F d\xi]$$

Remarquons qu'ici, W_{elec} , travail reçu par le circuit, est algébrique :

- Si $n_1 ox_2 + n_2 red_1 + n_1 n_2 e^- \rightarrow n_1 red_2 + n_2 ox_1 + n_1 n_2 e^-$ la réaction se fait dans le sens direct et spontané $\xi_\infty > 0$. $W_{elec} > 0$. Il y a *consommation des réactifs* dans l'accumulateur qui se *décharge*.
- Si $n_1 ox_2 + n_2 red_1 + n_1 n_2 e^- \leftarrow n_1 red_2 + n_2 ox_1 + n_1 n_2 e^-$ la réaction se fait dans le sens inverse et non spontané $\xi_\infty < 0$. $W_{elec} < 0$, Il y a *régénération des réactifs* dans l'accumulateur qui se *charge*. C'est l'électrolyse où le circuit *fournit* de l'énergie électrique à l'accumulateur.

Ce que l'on peut résumer par

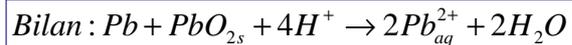


II.4.c) Exemple : l'accumulateur au plomb

C'est celui utilisé par les batteries d'automobiles. On peut ramener le fonctionnement de ces batteries à la réaction rédox entre les 2 couples suivants : $Pb^{2+} / Pb, PbO_2 / Pb^{2+}$ où l'élément plomb a respectivement les nombres d'oxydation +II, O, +IV, +II.

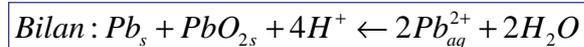
Lorsque le moteur ne tourne pas et que la batterie est sollicitée (démarreur, phares, radio...), celle-ci fonctionne comme une pile :

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



Au contraire, lorsque le moteur tourne, il actionne un alternateur qui a une fonction de générateur : la batterie peut alors se recharger.

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



On notera [A] la concentration en mol/L de l'espèce chimique A.

Une cellule électrolytique au plomb utilise généralement de l'acide sulfurique ($2H^+SO_4^{2-}$) comme électrolyte à une concentration d'environ $c_0 = 1,7$ mol/L. On notera 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 $[Pb^{2+}][SO_4^{2-}] = K_s$ le produit de solubilité $PbSO_{4s}$.

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

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

Elle a donc une f.e.m. de $E = E_2 - E_1 = E_2^0 - E_1^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{[H^+]^4 [SO_4^{2-}]}{K_s} \cdot \frac{K_s}{[SO_4^{2-}]} \right) = E^0 + \frac{2RT}{F} \ln ([H^+])$

Avec $E_2^0 - E_1^0 = E^0$ d'environ 2.1 V, ce qui fait qu'une batterie 12V comporte 6 cellules connectées en série. Ici, la concentration en H^+ vaut en fonction de l'avancement ξ : $[H^+] = c_0 - 4 \frac{\xi}{V_{cell}}$ en mol/L

D'où le travail électrique $W_{elec} = \int_0^{\xi_{\infty}} \left[E^0 + \frac{2RT}{F} \ln ([H^+]) \right] 2Fd\xi$

L'avancement maximal est atteint quand $E = 0$. On se place à une température de 25°C, soit $T = 298K$:

$$E^0 + \frac{2RT}{F} \ln ([H^+]) = 0 \Rightarrow [H^+]_{t=\infty} = \exp \left(-\frac{FE^0}{2RT} \right) = 1,784 \cdot 10^{-18} \text{ mol}$$

Pratiquement tout l'acide a réagi, donc l'avancement final est $\xi_{\infty} = V_{cell} \frac{c_0}{4}$ en mol.



$$\text{Ainsi : } W_{\text{elec}} = \int_0^{\xi_{\infty}} \left[E^0 + \frac{2RT}{F} \ln([H^+]) \right] 2Fd\xi, \text{ soit } W_{\text{elec}} = V_{\text{cell}} \left[\frac{FE^0 c_0}{2} + RT(c_0 \ln c_0 - c_0) \right]$$

En choisissant un volume de 100 mL d'acide par cellule et une concentration initiale de 1,7 mol/L, il vient : $W_{\text{elec}}^{\text{cell}} = 17\,027,4 \text{ J}$ par cellule et pour une batterie de 6 cellules : $W_{\text{elec}}^{\text{bat}} = 102\,164,5 \text{ J}$

Une telle batterie peut débiter a priori une quantité de charges : $Q = 6 \frac{V_{\text{cell}} c_0}{4} 2F$ car $2F$ Coulomb sont échangés par mole d'avancement et que l'avancement final est en mole $V_{\text{cell}} c_0 / 4$ par cellule. Soit $Q = 49\,215 \text{ C}$. Si on souhaite ramener ceci en « ampère.heure » sachant que $1 \text{ A.h} = 3600 \text{ C}$, une telle batterie chargée « à bloc » a une autonomie de 13.67 A.h.

Le volume d'une telle batterie est de l'ordre de $15 \times 13 \times 10 = 1950 \text{ cm}^3$. Comme par hypothèse nous avons un volume de 20 L dédié au stockage, on pourra utiliser environ 10 batteries, soit une énergie de 10^6 J ! D'un point de vue énergétique, les batteries présentent de loin la plus forte capacité de stockage : la décharge complète de ces 10 batteries peut en négligeant les frottements (c'est ici abusif) lancer un véhicule de 1000 kg à une vitesse de 163 km/h (sur une route de pente nulle). En effet :

$$\frac{1}{2}mv^2 = 10 W_{\text{elec}}^{\text{bat}} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \times (10 W_{\text{elec}}^{\text{bat}})}{m}} = 45,2 \text{ m/s} = 162,73 \text{ km/h}$$

En revanche, les batteries peuvent être lentes à se charger ou à se décharger : le temps de charge d'une batterie dépend de sa conception à cause d'un courant maximum d'électrolyse. Signalons ici que ces charges nécessitent une *source de courant continu* : soit un moteur électrique à courant continu utilisé en générateur, soit une génératrice de courant alternatif qu'il faut redresser avec des dispositifs encombrants, ce qui n'est pas idéal sur une automobile... Ce courant dépend selon des lois complexes :

- de la surface des électrodes en contact avec le bain électrolytique
- du matériau constituant ces électrodes ainsi que de son état de surface
- de la tension d'électrolyse appliquée aux bornes de la batterie

Ce courant peut être grand si la surface des électrodes en contact avec le bain électrolytique est grande. Par exemple, pour la métallurgie du zinc par voie électrolytique, on peut aller jusqu'à 4 A/dm^2 d'électrode pour l'électrolyse d'une solution de sulfate de zinc ($Zn^{2+}SO_4^{2-}$) avec une anode en plomb argentifère et une cathode en aluminium sous une tension de 3,4 V. Mais les tensions d'électrolyse sur une cellule doivent être faibles (en général $< 5V$). Une alternative à ce problème est la mise en série des cellules qui divise la tension « globale » d'électrolyse par le nombre de cellules en série.

En ce qui concerne le temps de décharge, il peut être très variable en fonction de la sollicitation de la batterie. Toutefois, il existe un temps de décharge « incompressible » à cause de l'existence d'un courant maximum de décharge : ce courant est influencé par les mêmes paramètres qui ont sur lui sensiblement les mêmes effets. Ainsi, pour une batterie de $15 \times 13 \times 10 \text{ cm}$:

- en utilisant pour chaque électrode 3 plaques équidistantes de $12 \times 10 \text{ cm}$: $S_{\text{électrode}} = 720 \text{ cm}^2$ car chaque plaque possède 2 faces de 120 cm^2 .
- en supposant $I_{\text{surfactive}} = 4 \text{ A/dm}^2$

On a un courant d'électrolyse de 28,8 A. Il faudra donc au moins $13,7/28,8 = 0,47 \text{ h}$ pour recharger une batterie soit pratiquement $\frac{1}{2}$ heure ! Avec 10 batteries *en parallèle*, les courants s'ajoutent et on peut monter à 288 A de courant « global » d'électrolyse. L'énergie stockée par une seule batterie en 30 min se répartit alors sur les 10 mais en 3 min. Ce qui est encore long comme temps de décélération avec un ampérage certainement peu réaliste...



Signalons que certains constructeurs comme Honda se sont penchés sur les difficultés de récupération d'énergie par stockage électrolytique sur leurs véhicules à pile à combustible, notamment la Honda FCX (4^{ème} génération). Devant des rendements énergétiques décevants en décélération, Honda a développé un « super condensateur » d'une capacité de 8 Farad qui stocke le courant produit par le moteur à courant continu du véhicule (qui fonctionne comme une génératrice lors des décélérations). Cette énergie électrique est stockée sous la forme d'une énergie électrostatique dans les éléments du « super condensateur ». Il semblerait que le rendement soit très bon (>95%), mais il subsiste un problème d'encombrement et surtout de coûts. Sur le plan technique, un « super condensateur » 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... Toutefois, le concept demeure intéressant pour relancer le véhicule entre 2 feux rouges. Il est en cela une sérieuse alternative au stockage électrolytique, qui en plus d'être difficile à mettre en œuvre, pose aussi des problèmes de pollution au moment où les batteries sont usées (acide, métaux lourds divers), contrairement aux condensateurs.

III. Classement des solutions de stockage

III.1. Elaboration de critères de classement

On cherche ici à mesurer la pertinence d'un système de stockage par rapport à un autre. Le système de stockage idéal doit avoir les qualités suivantes :

- Rendement énergétique élevé :
 - o 100% de l'énergie cinétique initiale stockée
 - o Restitution de 100% de cette énergie au déstockage
- Rapidité de stockage/déstockage de l'énergie
 - o L'énergie cinétique doit pouvoir être stockée sur la même durée que celle d'un freinage à l'aide de freins traditionnels.
 - o L'énergie stockée doit pouvoir être restituée sur la même durée que l'accélération procurée par le moteur thermique du véhicule
- Facilité de récupération de l'énergie vers les roues
 - o Le système ne doit pas nécessiter des éléments de conversion mécanique trop complexes (réducteurs, trains épicycloïdaux, embrayages, transmission à variation continue...) pour restituer l'énergie stockée vers les roues.
- Energie maximum stockable élevée
- Encombrement réduit
- Poids faible
 - o Le poids est pénalisant pour des véhicules sans récupération d'énergie cinétique :
 - Surdimensionnement des suspensions
 - Usure des pneumatiques
 - Enormes pertes énergétiques à chaque freinage
 - o Le poids est beaucoup moins pénalisant lorsque l'énergie cinétique du véhicule est récupérée à chaque décélération.

Selon les véhicules, certains de ces critères sont moins importants que d'autres : dans un train ou un camion, le poids et l'encombrement du système sont moins gênants que sur une petite voiture. Inversement, la rapidité de stockage/déstockage est primordiale sur une voiture (nombreuses accélérations/décélérations relativement courtes) alors que sur un train, elle est moins nécessaire (longues accélérations ou décélérations par ailleurs peu nombreuses). De même, l'énergie maximale à stocker dépend directement de la masse et des vitesses de croisière des véhicules (très grandes pour un TGV, faible pour une citadine).



Il est donc difficile de classer ces critères par ordre d'importance de façon *absolue*. Néanmoins, on peut retenir le classement « typique » suivant dans le cas de petits véhicules dont la vitesse varie très souvent au cours d'un trajet :

1. Rendement énergétique élevé : le bilan énergétique doit être optimisé quel que soit le véhicule
2. Rapidité de stockage/déstockage de l'énergie
3. Facilité de récupération de l'énergie vers les roues
4. Encombrement réduit
5. Energie maximum stockable élevée
6. Poids faible

III.2. Notation de chaque solution

III.2.a) Principe

Pour chaque critère, une note de 1 à 5 est attribuée à chaque solution :

5 : très bon 4 : bon 3 : moyen 2 : mauvais 1 : très mauvais

Par ailleurs, on attribue les coefficients suivants à chaque critère en fonction de leur importance :

Critère n°1 : coeff. 6

Critère n°2 : coeff. 5

Critère n°3 : coeff. 4

Critère n°4 : coeff. 4

Critère n°5 : coeff. 2

Critère n°6 : coeff. 2

Note brute maximale : $23 \times 5 = 115$.

Note finale ramenée sur 20 : $N = \text{Note brute} \times 20 / 115$

III.2.b) Notation de la roue d'inertie

Critère n°	Coeff	Note	Points	Commentaire
Rendement énergétique	6	4	24	Les transmissions nécessaires risquent d'atténuer le bon rendement de la roue en elle-même
Rapidité de stockage/déstockage	5	3	15	La synchronisation entre la vitesse de la roue d'inertie et celle du véhicule ne se fera pas instantanément
Facilité de récupération de l'énergie	4	1	4	Nécessité d'embrayage ou de transmission continûment variable.
Encombrement réduit	4	2	8	L'encombrement des transmissions atténue la compacité de la roue en elle-même
Energie maximum stockable	2	5	10	Le meilleur moyen de stockage de ce point de vue
Poids	2	1	2	A la masse déjà très importante de la roue s'ajoute celle de la transmission.
Note sur 20	10,95	Total	63	Une solution présentant de gros problèmes de poids et de complexité mécanique, mais ayant du potentiel sur des véhicules massifs dont la vitesse fluctue peu souvent.



III.2.c) Notation du ressort à spirale

Critère n°	Coeff	Note	Points	Commentaire
Rendement énergétique	6	5	30	La compression ou la détente d'un ressort présentent un rendement très proche de 100%.
Rapidité de stockage/déstockage	5	5	25	La détente ou la compression rapide du ressort ne posent pas de problème a priori
Facilité de récupération de l'énergie	4	3	12	La détente du ressort tend à faire tourner les roues en sens inverse alors que celles-ci doivent tourner dans le même sens au stockage comme au déstockage.. Un système intermittent d'inversion du mouvement est nécessaire.
Encombrement réduit	4	3	12	L'encombrement du ressort de torsion n'est pas énorme par rapport à l'énergie stockée (Cf. II.2.b).
Energie maximum stockable	2	3	6	Energie correcte, mais 4 fois inférieure à celle de la roue pour un même volume de l'élément de stockage.
Poids	2	4	8	La masse du ressort devrait être faible, mais celle de la transmission est difficile à quantifier ici.
Note sur 20	16,17	Total	93	Une solution séduisante sur le plan de son rendement et de sa rapidité à stocker/déstocker. Des zones d'ombre subsistent sur la résistance de la spirale à tourner de plusieurs tours et sur le système de restitution de l'énergie vers les roues.

III.2.d) Notation du ressort de traction

Critère n°	Coeff	Note	Points	Commentaire
Rendement énergétique	6	5	30	La compression ou la détente d'un ressort présentent un rendement très proche de 100%.
Rapidité de stockage/déstockage	5	5	25	La détente ou la compression rapide du ressort ne posent pas de problème a priori
Facilité de récupération de l'énergie	4	2	8	La détente est un mouvement de translation de course restreinte (quelques cm) peu adapté pour mettre en rotation une roue de façon continue.
Encombrement réduit	4	2	8	L'encombrement du ressort de traction n'est pas énorme par rapport à l'énergie stockée, mais moins bon que celui du ressort de torsion (Cf. II.2.b).
Energie maximum stockable	2	1	2	Energie plutôt faible : 13 fois inférieure à celle de la roue d'inertie pour un même volume de l'élément de stockage.
Poids	2	4	8	La masse du ressort devrait être faible, mais celle de la transmission est difficile à quantifier ici.
Note sur 20	14,08	Total	81	Une solution séduisante sur le plan de son rendement et de sa rapidité à stocker/déstocker, mais une énergie stockable faible car la zone centrale du ressort est perdue et le recours à des matériaux à haute limite élastique semble nécessaire.



III.2.e) Notation du stockage pneumatique/hydraulique

Critère n°	Coeff	Note	Points	Commentaire
Rendement énergétique	6	4	24	La compression ou la détente d'un gaz présentent un rendement très proche de 100% à condition d'empêcher le refroidissement. Les moteurs hydrauliques ont un excellent rendement (>95%).
Rapidité de stockage/déstockage	5	5	25	La détente ou la compression rapide de l'air ne posent pas de problème a priori.
Facilité de récupération de l'énergie	4	4	16	La détente de l'air envoie l'huile dans le moteur hydraulique qui transforme facilement cette pression en un mouvement de rotation continue à fort couple et à vitesse <i>réglable</i> de surcroît.
Encombrement réduit	4	2	8	L'encombrement est assez important au regard de l'énergie stockée. Mais le réservoir d'huile peut intégrer de nombreuses fonctions nécessaires au véhicule, ce qui atténue ce défaut.
Energie maximum stockable	2	1	2	Energie faible en particulier si l'air se refroidit avant de se détendre.
Poids	2	4	8	Le poids devrait être raisonnable car peu d'éléments de transmission sont nécessaires.
Note sur 20	14,43	Total	83	Une solution séduisante sur le plan de son rendement et de sa rapidité à stocker/déstocker. A défaut de pouvoir stocker beaucoup d'énergie, c'est celle qui offre le plus de facilités pour la déstocker.

III.2.f) Notation du stockage chimique

Critère n°	Coeff	Note	Points	Commentaire
Rendement énergétique	6	4	24	Le rendement des électrolyses est généralement bon ainsi que celui de la décharge d'une batterie (>90%)
Rapidité de stockage/déstockage	5	3	15	Si la décharge d'une batterie peut être rapide, son temps de charge est beaucoup trop long devant le temps de freinage d'une automobile par exemple.
Facilité de récupération de l'énergie	4	5	20	La décharge d'une batterie se fait rapidement et facilement en principe. La génératrice, ayant chargé la batterie dans un premier temps, se transforme ensuite en moteur électrique à courant continu. Par ailleurs ces moteurs présentent un fort couple à bas régime, ce qui idéal pour lancer un véhicule (transmission élaborée inutile entre le moteur et les roues du véhicule).
Encombrement réduit	4	5	20	L'encombrement des batteries est relativement faible et le mouvement de rotation fourni par un moteur électrique ne nécessite pas de transmissions trop encombrantes.
Energie maximum stockable	2	5	10	La meilleure solution de ce point de vue.
Poids	2	3	6	Le poids des batteries même récentes demeure encore important (10 kg) et on risque d'être obligé d'en avoir une dizaine.
Note sur 20	16,52	Total	95	Une solution séduisante sur le plan de l'énergie stockable et de sa facilité de récupération. Toutefois, le poids reste pénalisant et les temps de recharge sont trop longs.



III.3. Bilan

III.3.a) Classement des solutions et remarques

On obtient finalement pour des voitures courantes le classement suivant :

1. Le stockage chimique : 16,52 /20
2. Le stockage par ressort de torsion : 16,17 /20
3. Le stockage pneum/hydraulique : 14,43
4. Le stockage par ressort de traction: 14,08 /20
5. Le stockage par roue d'inertie : 10,95 /20

Comme on l'a remarqué, ces solutions présentent des avantages et des inconvénients très différents, ce que ne traduit pas la note finale. **Plutôt que d'opposer ces solutions entre elles, il vaut mieux s'interroger sur la possibilité de faire cohabiter au moins 2 d'entre elles sur un même véhicule.** En effet, **il semble très judicieux d'utiliser 2 systèmes :**

- l'un lent mais à forte capacité de stockage efficace dans les longues descentes ou les décélérations très prolongées,
- l'autre efficace dans les décélérations courtes (peu d'énergie à stocker, mais en peu de temps), par exemple en circulation urbaine.

Par ailleurs, certains de ces systèmes peuvent fusionner en un seul : par exemple, on peut remplacer l'air comprimé par la compression d'un ressort, voire comprimer un ressort dans un compartiment contenant *aussi* de l'air comprimé pour bénéficier des énergies pneumatique *et* élastique *dans un même compartiment* globalement cylindrique.

Enfin, certains de ces systèmes apportent des fonctionnalités au véhicule qu'il faudrait *de toute façon lui fournir à travers d'autres dispositifs* : c'est le cas d'une part, des batteries électriques du stockage chimique car l'énergie électrique est indispensable dans une voiture (allumage, phares, radio, ordinateur de bord...), et d'autre part de l'énergie hydraulique souvent très utile (lubrification, assistance volant ou suspension...). C'est ainsi que même si un dispositif peut paraître encombrant en lui-même, il va libérer de l'espace ailleurs, ce qui atténuera cet aspect négatif.

Par rapport à la maîtrise technologique de ces solutions, *le stockage chimique se développe considérablement avec des progrès réguliers depuis des années* (technologies lithium-ions, lithium-métal-polymères...); il est à l'origine du développement récent des voitures hybrides à l'échelle industrielle et de l'électronique portable (ordinateur, téléphone, MP3...). Le stockage par roue d'inertie est connu depuis longtemps, mais ne s'est pas développé. Enfin, il semblerait que le stockage par ressort n'a pas d'application en dehors des petites voitures à friction pour enfants.

III.3.b) Quels systèmes de récupération pour une automobile ?

Comme on l'a déjà vu, les roues d'inertie ne sont envisageables que sur des véhicules suffisamment spacieux et très lourds ayant une grande énergie cinétique (camion ou train). Il ne semble pas raisonnable de les utiliser sur des voitures. Par ailleurs, *l'utilisation de 2 systèmes de stockage paraît judicieuse* car il n'existe pas de système à grande capacité de stockage qui soit rapide pour stocker/déstocker son énergie. De plus, le stockage chimique est utile et pourrait faire passer à l'architecture 42V. Cette architecture a été plébiscitée à une époque pour les gains énergétiques qu'elle offre (par diminution de l'effet Joule) mais n'est plus à l'ordre du jour actuellement. Enfin, le stockage hydraulique apporte aussi des fonctionnalités nombreuses et souvent nécessaires pour le véhicule.

Pour SYCOMOREEN, le système le plus approprié pour une automobile semble donc être composé :

- d'un stockage rapide pneumatique/hydraulique à pistons (le piston pouvant éventuellement étirer/comprimer un ressort de traction) ou bien d'un système à ressort en spirale : *les pistons pouvant être ceux du moteur MPRBC ou POGDC avec une chambre dédiée.*
- d'un stockage lent, à accumulateurs électriques.



Conclusion

Cette annexe a permis de dessiner les grandes lignes de ce que pourraient être les dispositifs de stockage d'énergie pour des véhicules hybrides dont l'un des modes de propulsion est thermique. Toutefois, il est bien évident que cette première approche mériterait d'être approfondie avec une étude plus rigoureuse des différents systèmes de stockage proposés et une recherche plus aboutie des moyens de stockage envisageables.

Il faut rappeler qu'avant tout, l'objectif de SYCOMOREEN dans le domaine des moteurs/pompes est de concevoir des machines suffisamment compactes pour que l'implantation de tels dispositifs dans un véhicule ne soit plus utopique, mais au contraire, sérieusement envisageable ; d'une part, le contre-argument de l'encombrement de ces systèmes n'est plus recevable compte-tenu de la grande économie de carburant permise par la récupération de l'énergie cinétique du véhicule et du gain d'espace dû à la compacité du moteur thermique, d'autre part, nous avons vu qu'avec 20 000 cm³ (volume d'une petite valise) dédiés au stockage d'énergie (système éventuel de transmission non compris), on arrivait à stocker une énergie capable de relancer un véhicule de 1000 kg entre 16 et 160 km/h, avec une « moyenne » de 35 km/h, ce qui est amplement suffisant en milieu urbain.

L'étape la plus difficile, à savoir la conception d'architectures ultra-compactes de moteurs thermiques, a été franchie et à n'en pas douter, la fabrication et la mise au point des moteurs MPRBC et POGDC ouvriront de nombreuses pistes de réflexions et de recherches capables de modifier en profondeur le fonctionnement et l'image des véhicules du 3^{ème} millénaire.

à droite, en haut POGDC non rotatif
à droite, en en bas POGDC rotatif

Ci-dessous, coupe de l'étage thermomécanique de la MPRBC.

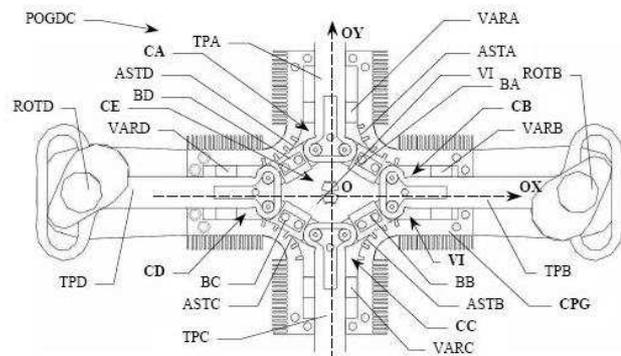
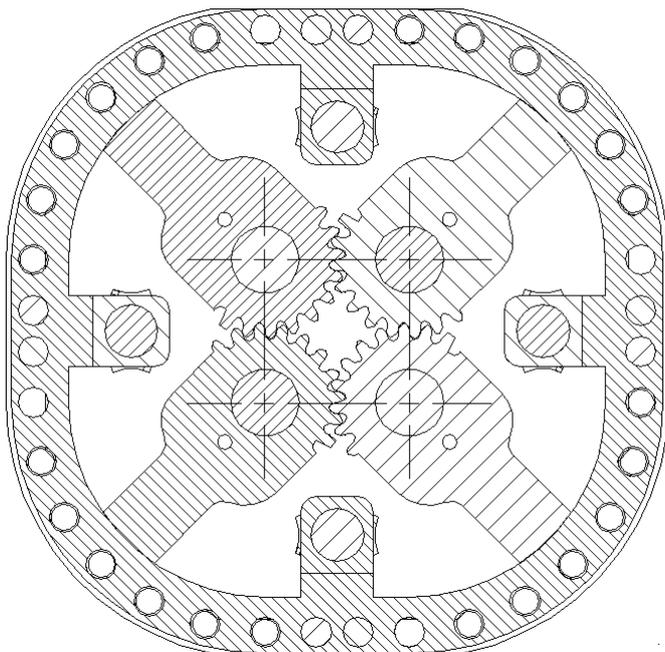


FIG. 3A

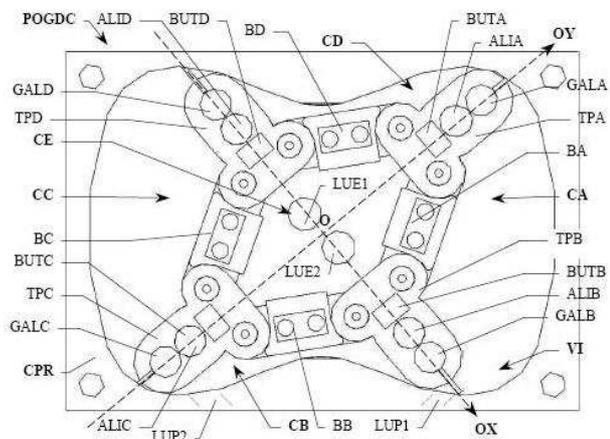


FIG. 3B



Concepts innovants, moteurs/pompes et énergies renouvelables → <http://sycomoreen.free.fr> 23

interdit toute reproduction, même partielle, du contenu de ce document à des fins commerciales.

SYCOMOREEN autorise volontiers toute reproduction dans le cadre de recherches scientifiques à but non lucratif, ou d'activités scolaires et pédagogiques.