

Transport 21

Numéro 6
Novembre 2009



Une infolettre sur les transports terrestres écologiques du 21^e siècle

Les voitures à air comprimé se dégonflent

Depuis déjà une dizaine d'années, la compagnie [MDI](#) tente de commercialiser des petites voitures à air comprimé en Europe.

Or, le 17 novembre 2009 paraissait, dans le journal électronique *Environmental Research Letters*, un article intitulé «[Economic and environmental evaluation of compressed-air cars](#)». Cet article est signé par quatre chercheurs états-uniens de l'Université de Californie à Berkeley.

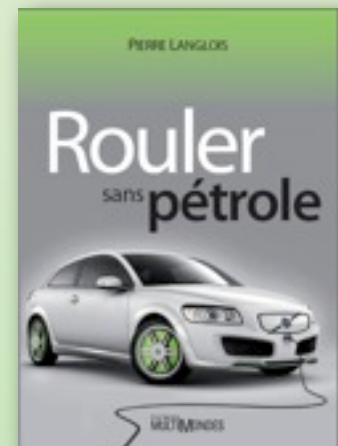
Leurs conclusions sont sans équivoque: les voitures à air compri-

mé ne constituent pas une avenue viable, pour plusieurs raisons.

Pour le démontrer, les auteurs comparent trois voitures de 900 kg comme la *Smart Fortwo* (incluant le poids du conducteur), On sait que la version essence de cette petite voiture allemande consomme 5,2 litres/100 km, et la [version électrique récente](#) utilise 13,7 kWh/100 km. La version simulée à air comprimé consomme également de l'électricité puisqu'elle utilise un compresseur électrique.

Dans leurs simulations, les chercheurs considèrent une conduite urbaine et des autonomies de 115 km pour les trois voitures. Ils

Cette revue commentée de l'actualité en écomobilité est réalisée par Pierre Langlois, physicien, auteur de [Rouler sans pétrole](#)



Selon [une étude parue en novembre 2009](#), une voiture à air comprimé consomme beaucoup plus d'énergie qu'une voiture électrique (par un facteur supérieur à 2,4), et émet plus de gaz à effet de serre qu'une voiture à essence en Allemagne ou aux États-Unis où l'on retrouve une portion importante de centrales au

considèrent également un compresseur performant de bonne qualité à 2 paliers de compression pour la voiture à air comprimé, de même qu'un système d'expansion à deux paliers. Ils évaluent ainsi la perte d'énergie à 55 % entre le réseau électrique et le moteur à air comprimé de la voiture. Les auteurs précisent que cette estimation est conservatrice et que les pertes en situation réelle de conduite seraient supérieures. Le réservoir à air comprimé est pressurisé à 310 bar (4 500 psi) dans leur simulation.

La première constatation de cette étude est qu'on aurait besoin pour la Smart à air comprimé d'un réservoir de 780 litres, soit deux fois le volume du coffre de la *Smart Fortwo*! Une batterie Li-ion occuperait 374 litres pour la Smart électrique, selon eux.

La deuxième constatation est que la Smart à air comprimé consomme 2,4 fois plus d'électricité que la Smart électrique, au minimum.

Finalement, en utilisant l'électricité du fournisseur RWE en Allemagne (887 g CO₂/kWh), qui compte un fort pourcentage de centrales au charbon, la Smart à air comprimé émet presque 3 fois plus de CO₂ que la Smart à essence. Aux États-Unis, alors que les centrales émettent en moyenne 710 g CO₂/kWh, de la terre à la prise (voir mon livre *Rouler sans pétrole*, édition 2008, à la page 140), on aurait 2.2 fois plus de gaz à effet de serre.

Les voitures électriques ou hybrides rechargeables constituent donc une option beaucoup plus durable. N'oublions pas que ces dernières vont faire 80 % de leur kilométrage en mode électrique.

En fait, les voitures à air comprimé font face au même problème que les voitures à hydrogène. L'efficacité énergétique est très médiocre dans les deux filières. Pour les voitures à air comprimé, le compresseur fait perdre beaucoup d'énergie sous forme de chaleur, alors que le refroidissement de l'air dans le détendeur en fait perdre également.

Des véhicules hybrides à air comprimé

Mais, l'air comprimé peut être très bénéfique pour récupérer l'énergie au freinage dans des véhicules hybrides non rechargeables, L'[EPA \(Environmental Protection Agency\)](#) travaille déjà depuis plusieurs années à démon-

trer les bienfaits d'un système hybride hydraulique.

En 2006, l'EPA a présenté un camion de livraison UPS transformé en hybride hydraulique série, capable d'économiser environ 40 % de carburant et diminuer d'autant les émissions de CO₂. Pour ce faire, l'EPA a collaboré avec des partenaires industriels, dont, entre autres, UPS et Eaton corporation.

Pour comprendre le fonctionnement, rappelons tout d'abord les principes d'un véhicule hybride électrique série non rechargeable. Dans un tel véhicule, on utilise le moteur thermique pour actionner un générateur qui recharge une batterie. C'est un moteur électrique qui fait avancer le véhicule à l'aide de l'électricité stockée dans la batterie. La future Chevrolet Volt en est un exemple.

Les appels de puissance pour accélérer le véhicule sont gérés par la batterie qui débite plus de



Un camion de livraison UPS transformé en hybride hydraulique, en 2006, par l'EPA et ses partenaires, dont UPS et Eaton corporation.

courant. Le moteur thermique, lui, tourne toujours au même régime, celui où il consomme le moins de carburant. Il n'a pas besoin d'être aussi puissant, et il est en fait plus petit que le moteur thermique d'un véhicule traditionnel de même calibre. C'est une des deux raisons principales pour lesquelles un véhicule hybride consomme moins de carburant.

Par ailleurs, le moteur électrique peut également fonctionner comme générateur et récupérer une partie de l'énergie au freinage, en agissant comme frein électromagnétique. Le courant ainsi généré recharge la batterie, ce qui contribue à diminuer la consommation de carburant. Car, l'énergie cinétique récupérée au freinage serait normalement perdue en chaleur dans les freins mécaniques d'un véhicule traditionnel.

Maintenant, les mêmes principes s'appliquent à un véhicule hybride hydraulique série. La différence c'est qu'on stocke l'énergie en comprimant de l'azote (principal constituant de l'air) dans un réservoir. On utilise pour cela un moteur/pompe hydraulique qui transmet la force via un liquide hydraulique. Le moteur/pompe hydraulique est lui-même actionné par un moteur thermique.

Le moteur thermique comprime l'azote dans un réservoir à haute pression via la pompe hydraulique et actionne en même temps le moteur hydraulique qui propulse le véhicule. L'azote comprimé est utilisé pour aider le moteur thermique lors des accélérations,

ou pour monter une côte. Par ailleurs, l'énergie cinétique du véhicule comprime l'air au freinage via le moteur/pompe hydraulique. On récupère ainsi de l'énergie qui serait normalement perdue dans un véhicule traditionnel. Le site [How Stuff Works](#) présente une très bonne explication animée des deux systèmes hybrides hydrauliques (série et parallèle).

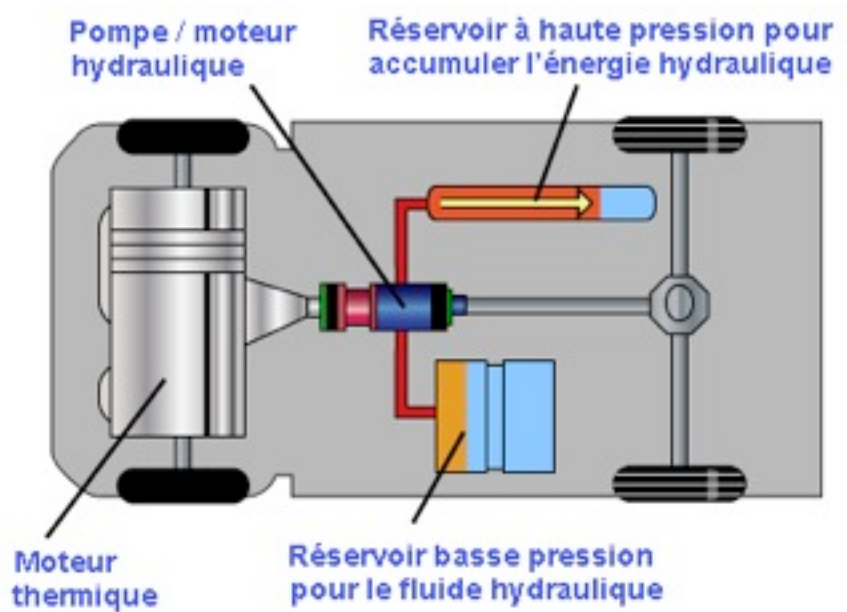
La société [Lightning Hybrids](#), fondée en 2008, développe présentement une voiture expérimentale hybride hydraulique très légère (fibres de carbone), la LH4, qui devrait être prête en 2010 et avoir une consommation de biodiesel inférieure à 2,3 litres / 100 km, tout en affichant les performances d'une voiture sport. L'accélération anticipée pour passer de 0 à 100 km/h est de 5,9 secondes.



La voiture expérimentale hybride hydraulique LH4 de [Lightning Hybrids](#)

Par ailleurs, la compagnie [Hydraulic Hybrid Systems](#), une filiale de Lightning Hybrids, développe un système d'hybridation hydraulique adaptable aux véhicules existants. Ce système pourra transformer les véhicules traditionnels en hybride hydraulique parallèle. L'économie de carburant anticipée devrait pouvoir atteindre 30 % en conduite urbaine avec des arrêts fréquents.

L'intérêt des systèmes hybrides hydrauliques est double. Premièrement, leur coût est inférieur à celui d'un système hybride élec-



Une image tirée de l'animation très bien réussie expliquant les hybrides hydrauliques parallèle sur le site [How Stuff Works](#). (texte traduit par l'auteur de cette infolettre)

trique. Ensuite, les systèmes hydrauliques sont capables de gérer la haute puissance produite lors des freinages alors que les batteries utilisées actuellement (Ni-MH) dans les véhicules hybrides électriques ne peuvent qu'en gérer une partie (on doit freiner lentement). La récupération d'énergie au freinage est donc plus importante pour un système hydraulique.

Toutefois, la haute densité de puissance des nouvelles batteries Li-ion au titanate (9 kW / kg) devrait mettre les deux filières sur un pied d'égalité.

Mais, ce qui rend les systèmes hydrauliques particulièrement intéressants c'est la possibilité de les adapter sur des véhicules existants, ce qui n'est pas trivial pour les systèmes hybrides électriques, à un coût raisonnable. De plus, les systèmes hydrauliques sont utilisés dans les machineries lourdes depuis longtemps et leur fiabilité est éprouvée. Les fabricants sont déjà en place et le savoir faire pour l'entretien est bien maîtrisé par les techniciens.

De leur côté, les systèmes hybrides électriques offrent l'avantage de pouvoir recharger la batterie sur le réseau électrique et diminuer notre consommation annuelle de carburant de l'ordre de 80%, si le moteur électrique est suffisamment puissant. Cela n'est pas possible avec des véhicules hybrides hydrauliques. En effet, comme nous l'avons vu dans le billet précédent, l'air ou l'azote comprimé n'est pas adapté au stockage de grandes quantités

d'énergie pour un véhicule, surtout lorsqu'on veut utiliser l'électricité du réseau pour le faire.

Par ailleurs, la batterie d'un véhicule hybride électrique offre l'avantage de pouvoir faire fonctionner les accessoires lorsque le moteur thermique est arrêté, ce que ne peut faire le réservoir de gaz comprimé d'un véhicule hybride hydraulique.

Un véhicule hybride hydraulique doit donc quand même être équipé d'un alternateur et d'une bonne batterie. C'est la raison pour laquelle on envisage présentement d'installer des systèmes hybrides hydrauliques sur des camions de livraison urbains de préférence aux voitures. En effet, ces camions freinent souvent (peu de circulation sur les autoroutes) et l'énergie récupérée au freinage en comparaison de l'énergie requise pour les accessoires est plus importante que pour une voiture.

À la lueur des connaissances actuelles, on peut dire que le créneau pour les véhicules hybrides hydrauliques devrait durer 10 à 15 ans, le temps que le coût des batteries Li-ion performantes diminue d'un facteur trois. Pendant cette période, il est probable que la technologie hydraulique occupe une place significative sur le marché des véhicules à faible consommation de carburant, offrant aux utilisateurs les bénéfices d'un système hybride à moindre coût.

De plus, le fait qu'on puisse convertir un véhicule traditionnel en véhicule hybride hydraulique pourrait revêtir un intérêt capital dans les prochaines années, lorsque la production mondiale de pétrole ne suffira plus à la demande, entraînant alors une hausse importante des prix à la pompe. Car, tout indique que nous aurons des problèmes avec le pétrole bien avant que les véhicules à motorisation électrique (hybrides branchables ou tout électriques) deviennent une partie importante des parcs.

Des véhicules hybrides à volant d'inertie

Le 24 novembre 2009, la compagnie [Ricardo annonçait](#) que leurs ingénieurs venaient de développer le *Kinergy*, un volant d'inertie à haute vitesse de rotation conçu pour remplacer les batteries dans les véhicules hybrides.

Ce système doit être installé prochainement dans un autobus, le Flybus, où il sera attaché mécaniquement à une transmission Torotrak à variation conti-



Le système Kinergy de Ricardo

nue. De tels systèmes pourraient diminuer la consommation de carburant de 30 %, selon Ricardo, pour un coût inférieur à 1 700 \$.

Ricardo donne très peu d'information sur le *Kinergy*, pour le moment, sinon qu'il s'agit d'un volant d'inertie avec des paliers magnétiques et un couplage magnétique innovant, deux dispositifs qui permettent de maintenir le stockage d'énergie plus longtemps (très faible friction) et d'augmenter la durabilité.

Les volants d'inertie ont fait leur début dans les voitures de course F1 en 2009, pour récupérer une partie de l'énergie au freinage. sous le vocable KERS pour Kinetic Energy Recovery System (système de récupération d'énergie cinétique).

Pour avoir une idée plus précise de la technologie moderne des volants d'inertie pour les véhicules, la compagnie [Flybrid Systems](#) nous donne des [informations techniques sur son site](#). Le KERS purement mécanique qu'ils ont développé a une puissance de 60 kW et peut stocker une énergie de 0,11 kWh. Le volant d'inertie peut tourner à 60 000 tours/min, et le poids du système est de 25 kg.

Pour fin de comparaison, une batterie Li-ion de 1 kg pourrait stocker la même quantité d'énergie. Mais, pour entrer et sortir le courant de la batterie avec une puissance de 60 kW cela nécessite pour la plupart des batteries Li-ion un poids de 25 à 50 kg. Seules les batteries au titanate de



Le système Kinergy à volant d'inertie de la compagnie Ricardo sera bientôt adapté à une transmission Torotrak sur un autobus, le [Flybus](#).

lithium sont capables de fournir une telle puissance de façon répétitive avec un poids beaucoup moindre d'environ 7 à 10 kg. L'énergie stockée dans une telle batterie au titanate de lithium serait approximativement 0,45 kWh, soit quatre fois plus que le KERS de Flybrid, pour un poids près de 3 fois moindre.

Le principal avantage des volants d'inertie est leur coût inférieur aux batteries lorsqu'on considère l'ensemble du système hybride requis pour un véhicule. L'autre avantage est la durabilité, puisque les volants d'inertie peuvent subir jusqu'à 100 000 cycles de charge/recharge, en utilisant presque entièrement l'énergie stockée.

Les deux désavantages des volants d'inertie sont les faibles quantités d'énergie stockées relativement aux batteries, pour un même poids, et la perte rapide de l'énergie stockée. Typiquement, ces systèmes perdent de 10 % à 20 % de l'énergie stockée en 10 minutes à cause de la friction.

Il faut donc que l'énergie récupérée au freinage soit utilisée rapidement par la suite, ce qui est le cas de plusieurs véhicules urbains,

comme les autobus. Pour ce qui est de la faible quantité d'énergie stockée, si on se limite à l'énergie récupérée lors de un (1) freinage, elle est inférieure à 0,5 kWh pour un autobus en cycle urbain.

On devrait voir apparaître les volants d'inertie pour récupérer l'énergie de freinage des véhicules d'ici quelques années.

Mais, comme pour les systèmes hybrides hydrauliques du billet précédent, le créneau pour les systèmes hybrides à volant d'inertie devrait être de 10 à 15 ans, le temps que le prix des batteries Li-ion performantes diminue d'un facteur trois.

Si les résultats du projet Flybus mentionné plus haut sont concluants, alors la conversion des véhicules traditionnels pour qu'ils puissent récupérer l'énergie au freinage devrait offrir une autre solution pour diminuer de 20 % à 30 % la consommation de carburant des véhicules existants. Ce genre de conversion serait beaucoup plus cher avec un système hybride électrique. Et dans la mesure où le prix du pétrole s'emballe, ces conversions seront certainement en demande.

Des autobus électriques biberonnés en France pour 2011

Le Fonds démonstrateur de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), en France, a confirmé son [soutien à 11 projets de véhicules décarbonés](#), en juin 2009.

L'un d'entre eux, le projet [WATT](#) (Wireless Alternative Trolley Technology) prévoit le développement d'autobus électriques biberonnés par la compagnie française [PVI](#), et la mise en place d'une ligne en 2011.

Je l'ai dit à plusieurs reprises, les autobus électriques biberonnés vont occuper une place TRÈS importante dans le monde du transport collectif urbain de demain (voir mon livre [Rouler sans pétrole](#), le [billet du 10 février 2009](#) de mon blogue [Électron Vert](#), et le [numéro 4 de Transport 21](#), où il était question des autobus biberonnés chinois de [Sinautec](#)).

Dans le projet WATT, l'autobus électrique va être équipé de supercondensateurs qu'on va re-

charger pendant 10 secondes à chaque arrêt d'autobus. L'autobus sera également équipé d'une batterie rechargée à chaque jour au garage, afin de pallier quelques stations de recharge rapide qui pourraient être défectueuses ou inaccessibles (accident de circulation). De manière à diminuer la puissance électrique requise pour les stations de recharge rapide, elles seront également munies de supercondensateurs. Ces derniers se rechargeront plus lentement, entre deux passages d'autobus, et se déchargeront très rapidement lors d'une recharge. PVI estime qu'une puissance de 12 kW devrait être suffisante.

Cet essor récent de la technologie du biberonnage des autobus urbains est très compréhensible, en raison de ses multiples avantages par rapport aux trolleybus. Le système d'approvisionnement en électricité est moins cher pour les autobus biberonnés, on élimine l'impact visuel désagréable des câbles au-dessus des voies, et le système de biberonnage permet de dévier des parcours en cas de travaux publics.



Le Gyrobus développé par Oerlikon en 1950, l'ancêtre des autobus biberonnés, stockait son énergie dans un volant d'inertie

Par ailleurs, je recommande au gouvernement québécois d'initier un projet d'autobus biberonnés qui utiliseraient les superbatteries au titanate de lithium développées à l'IREQ (Institut de recherche d'Hydro-Québec) par l'équipe du Dr Karim Zaghib. Car ces batteries à haute puissance semblent pouvoir subir 100 000 cycles de recharges profondes très rapides (voir les résultats présentés dans le [numéro 4 de Transport 21](#)).



Illustration du projet WATT de [PVI](#) pour développer un système d'autobus biberonnés en France pour 2011.

Pour visionner un reportage enregistré pour Oikos Blogue et mis sur YouTube, cliquez [ICI](#).



Pour visionner le reportage de l'émission Découverte sur les hybrides branchées, auquel j'ai participé, cliquez [ICI](#)



Une conférence dynamisante qui présente des solutions !

Choisissez le format qui vous convient: 30, 60, 90 ou 120 min.

www.planglois-pca.com

pierrel@coopscsf.com

Sommaire

1. Une crise de civilisation
2. Motorisation électrique
3. Les transports en commun
4. Les nouveaux carburants
5. Incidences sur les réseaux électriques et l'économie
6. Conclusions