

# Les véhicules électriques et hybrides branchables

Lorsqu'on veut faire avancer un véhicule de façon autonome, on a besoin d'un moteur. Deux choix s'offrent à nous présentement : les moteurs thermiques qui consomment des carburants et les moteurs électriques qui ont besoin d'une source d'électricité. Comme nous le verrons, on peut remplacer, de façon durable, environ 10% de la consommation actuelle de pétrole par des biocarburants. Certains scénarios qui prévoient en remplacer 30% mettent en péril les ressources naturelles de la planète (forêts vierges, terres arables, qualité de l'eau...) et sa biodiversité, tout en plaçant les gens les plus démunis dans une situation d'insécurité alimentaire en raison de l'inévitable augmentation des prix des aliments qui s'ensuivrait. Par conséquent, on peut dire que **rouler sans pétrole est synonyme, en grande partie, de rouler avec des véhicules mus par des moteurs électriques, ce qui constitue l'objet de ce chapitre.**

La grande révolution dans le domaine des batteries rechargeables, depuis 2005, fait en sorte que la principale source d'électricité pour les véhicules sera celle des batteries qui seront rechargées régulièrement sur le réseau. En ajoutant un petit moteur-générateur thermique embarqué, on peut recharger la batterie en cours de route, lors de longs trajets. Il suffit d'alimenter ce groupe électrogène avec un peu de biocarburant de deuxième génération, fabriqué sans utiliser de plantes alimentaires. On a alors une voiture hybride branchable, la voiture sans pétrole de demain. Mais pour mieux savoir où l'on va, regardons tout d'abord d'où l'on vient en ce qui concerne les automobiles.

## 2.1 – Des véhicules électriques à la fin du 19<sup>e</sup> siècle

Plusieurs seront peut-être surpris d'apprendre que les voitures électriques ont constitué l'alternative de choix aux voitures à cheval, à la fin du 19<sup>e</sup> siècle. Les voitures à essence ont également vu le jour à cette époque, mais elles étaient bruyantes

Par exemple, la Ford Modèle T à essence introduite en 1908 pouvait atteindre une vitesse de 70 km/h et sa production sur une chaîne de montage permettait de la vendre pour 850 \$, alors que les voitures électriques de l'époque coûtaient environ 2000 \$. Une partie importante de ce coût était attribuable aux batteries<sup>1</sup>. Peu de temps après, en 1912, une Ford Modèle T pouvait être achetée pour 550 \$, et pour 300 \$ seulement en 1921<sup>2</sup>.

Par ailleurs, l'abondance du pétrole au début du 20<sup>e</sup> siècle et sa facilité d'extraction ont rendu ce carburant disponible à faible coût et à grande échelle, ce qui a permis de faire le plein un peu partout en quelques minutes. De plus, l'invention du démarreur automatique, en 1912, a éliminé un inconvénient important des voitures à essence, grâce à l'ajout d'une batterie et d'un générateur électrique embarqué pour la recharger.

Le peu de puissance des batteries de l'époque a conduit Ferdinand Porsche à introduire les moteurs-roues, en 1899 (figure 2.2), afin d'éliminer les pertes encourues par tous les engrenages qui transmettaient la force du moteur aux roues dans une voiture électrique traditionnelle. En 1900, il a construit une voiture hybride prototype munie d'un moteur-générateur à essence, afin d'alimenter quatre moteurs-roues avec plus de puissance. Avec l'hybridation des véhicules, on pouvait obtenir une voiture électrique en ville et une voiture à essence pour les longs trajets, le meilleur des deux mondes. Mais, les véhicules hybrides coûtaient trop cher. La voiture hybride commercialisée par la compagnie Woods, en 1916, coûtait presque 1000 \$ de plus qu'une voiture électrique<sup>3</sup>. On comprend dès lors pourquoi ces véhicules n'ont pas eu un succès commercial.

**L'avènement du démarreur électrique pour les voitures à essence, le prix inférieur de ces voitures, leur vitesse supérieure, leur plus grande autonomie et la rapidité pour faire le plein de carburant ont fait pencher la balance en leur faveur.** Les voitures à essence ont pris définitivement le dessus sur les voitures électriques dans les années 1920. Toutefois, les véhicules électriques ont continué d'être appréciés pendant une vingtaine d'années, particulièrement pour la livraison des marchandises en ville, alors que les limitations sur l'autonomie et la vitesse des



**Figure 2.2** – Voiture électrique Porsche-Lohner à moteurs-roues construite en 1899 par le fabricant autrichien Lohner dont le groupe de traction a été conçu par Ferdinand Porsche. Source : Ultimatecarpage.com.

1. J.A. Anderson et C.D. Anderson, *Electric and Hybrid Cars – A History*, McFarland & Company Inc., Jefferson (Caroline du Nord), 2005.  
 2. M.H. Westbrook, *The Electric Car*, The Institution of Electrical Engineers, Royaume-Uni, 2005.  
 3. M.H. Westbrook, *op. cit.*

En fait, l'industrie automobile n'a jamais cessé de prétendre que les batteries n'étaient pas prêtes, alors que les véhicules électriques RAV4 de Toyota, maintenant discontinués, roulent allégrement depuis 1998 toujours avec leur batterie Ni-MH d'origine...

## 2.6 – La conversion de véhicules traditionnels en véhicules électriques

Face à cette inertie, pour ne pas dire cette mauvaise volonté, plusieurs personnes déterminées et qualifiées en électrotechnique ont monté leur propre véhicule électrique à partir d'un véhicule traditionnel usagé dont ils ont enlevé le moteur et les accessoires inutiles, comme le système d'échappement des gaz, le radiateur et le réservoir de carburant.

Près de Montréal, Alain St-Yves est un de ces pionniers. En 1998, ce technologue en électromécanique a converti une camionnette Chevrolet S-10 1996 qu'il a baptisée: Le Véhicule Vert (**figure 2.15**). Pour ce faire, il a utilisé des batteries plomb-acide.



**Figure 2.15** – Dès 1998, Alain Saint-Yves, spécialiste québécois en électrotechnique, a transformé une camionnette S-10 de Chevrolet en véhicule électrique qu'il a appelé Le Véhicule Vert. Ses batteries au plomb lui donnent une autonomie de 64 km. Sa vitesse maximale est de 104 km/h. Une génératrice à essence de 5 kW en prolonge l'autonomie à 120 km. Plus d'informations sur son site Internet: [www.vehiculevert.org](http://www.vehiculevert.org). (Photo: gracieuseté d'Alain St-Yves)



**Figure 2.16** – Une génératrice de 5 kW agit comme prolongateur d'autonomie sur le Véhicule Vert d'Alain St-Yves. (Photo: gracieuseté d'Alain St-Yves)



**Figure 2.20** – La compagnie californienne Aptera Motors a mis sur le marché, en 2008, l’Aptera, un véhicule électrique à trois roues avec une autonomie de 200 km. L’Aptera peut transporter deux passagers avec une consommation minimale d’énergie et atteindre 140 km/h. (Source: Wikimedia Commons, auteur: Aptera Motors, juillet 2008)

**Figure 2.21** – La compagnie canadienne Zenn Motor a mis en marché, en 2007, une voiture électrique à basse vitesse, la Zenn, acronyme pour Zero Emission No Noise, qui offre une autonomie de 50 km à 80 km et une vitesse maximale de 40 à 55 km/h. (Source: Wikimedia Commons, auteur: Leonard G., décembre 2007)



La compagnie canadienne Zenn Motor ([www.zenncars.com](http://www.zenncars.com)) fait office de pionnier pour ce genre de véhicules. En 2007, la compagnie a mis sur le marché la Zenn, acronyme de Zero Emission No Noise (zéro émission sans bruit), qui offre une autonomie de 50 km à 80 km, avec des batteries plomb-acide scellées (**figure 2.21**). Cette voiturette utilise la carrosserie de la Microcar, un véhicule à essence français, et son groupe de traction électrique est intégré à Saint-Jérôme, au nord de Montréal. Le prix de vente avoisine les 16000\$. Par ailleurs, en 2009, Zen Motor devrait utiliser les supercondensateurs de EEstor dont nous avons parlé à la section 2.2 et pour lesquels Zenn Motor détient une licence exclusive pour les petites voitures.

- coûtent moins de 20% plus cher que les véhicules de départ, en raison du coût des batteries, un excédent qui se paye en 4 ans par les économies d'essence et d'entretien.

Il est tout de même étonnant de voir ce qu'une poignée de jeunes de 20 ans, bien encadrés par un professeur compétent et passionné, peuvent faire comparativement à ce que font les grands constructeurs d'automobiles, avec leurs milliers d'ingénieurs professionnels. Ça devient gênant...

## 2.9 – Pierre Couture réinvente le moteur-roue en 1994

Notre prochain pionnier, Pierre Couture (**figure 2.25**), est également un promoteur inconditionnel des voitures hybrides branchables depuis plus de deux décennies. Il est surtout connu pour avoir développé des moteurs-roues ultra-performants.



**Figure 2.25** – Pierre Couture, un autre grand pionnier de la motorisation électrique des véhicules hybrides branchables.

C'est un physicien québécois, spécialiste en fusion thermonucléaire par confinement magnétique (il a été un des principaux concepteurs du Tokamak canadien à Varennes, dans les années 1980, et a travaillé sur celui de Princeton), avec une connaissance approfondie de l'électromagnétisme appliqué. En 1973, il a réalisé l'ampleur du non-sens des véhicules traditionnels alors qu'il était coincé dans un embouteillage sur une autoroute à huit voies à New York. Comme il le dit lui-même : « Je voyais un petit pipeline de pétrole qu'on brûlait en pure perte et ça m'a révolté. » La solution était pourtant évidente, il suffisait d'introduire une motorisation électrique dans les véhicules.

Au début des années 1980, alors qu'il travaille au centre de recherche d'Hydro-Québec, le docteur Couture voit bien que les prototypes de voitures électriques n'ont que des performances réduites, ce qui n'est pas gagnant.

Il est convaincu que pour prendre la place des véhicules traditionnels, les véhicules électriques doivent avoir des performances supérieures aux véhicules à essence. Il donne l'exemple des disques compacts numériques qui ont remplacé les disques de vinyle analogiques pour la musique. La transition n'a pas été difficile, car la qualité du son et les fonctionnalités des lecteurs de disques compacts étaient bien supérieures. Les gens en voulaient tout simplement. Pierre Couture décide donc de chercher la solution optimale pour la mobilité électrique qui pourra réduire au maximum les émissions de CO<sub>2</sub> et de gaz nocifs, tout en offrant au conducteur une expérience inégalée de conduite qui le fascinerait dès le premier essai routier.

Cette solution optimale, tous ses calculs lui démontrent que c'est une voiture hybride branchable à moteurs-roues. Il développe donc, avec son équipe, les moteurs-roues les plus performants qui soient et les installe sur une Chrysler

- aucun poids excédentaire par rapport aux véhicules actuels;
- et le fait que la technologie est entièrement modulaire.

Voilà donc en quelques mots la description de la technologie que nous avons développée.

## Le potentiel de la technologie

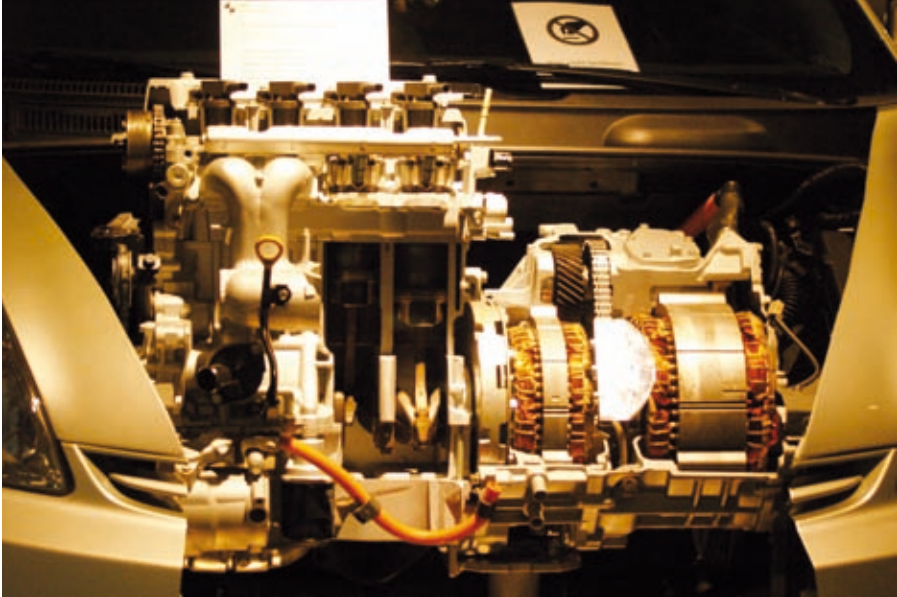
La démonstration du potentiel de la technologie du Groupe de Traction Couture a été reprise en 1997, à l'émission de télévision *Découverte*, diffusée sur les ondes de Radio-Canada. Près d'un million de personnes ont pu constater les véritables performances de la Chrysler Intrepid équipée d'un groupe de traction Couture (GTC). Elles ont vu les roues motorisées du véhicule décrocher de la chaussée sèche et tourner sur place, presque sans déplacement, en dégageant la fumée du caoutchouc brûlé! (figure 2.28) Une telle performance n'est simplement pas possible avec la Chrysler d'origine munie d'un moteur à essence V8. En fait, le petit vidéo diffusé sur les ondes de Radio-Canada est lourd de conséquences, puisqu'il démontre la fin de l'hégémonie des moteurs à combustion interne. Pour les experts, on apprenait à l'émission, que le couple («force») développé par chaque moteur-roue était de 1200 N-m, soit 4800 N-m pour quatre moteurs, comparativement à 475 N-m pour un moteur de Corvette! (figure 2.28)



Figure 2.28 – Images tirées de l'émission *Découverte* de Radio-Canada, présentant un reportage sur le moteur-roue réalisé en 1997. (Photos: Archives de Radio-Canada)

Reprenons le fil du temps. Le lendemain de la conférence de presse, le 2 décembre 1994, un petit groupe d'Hydro-Québec, incluant Pierre Couture, partait pour Anaheim en Californie où se déroulait le douzième symposium international sur les véhicules électriques (EVS12). C'est là que l'industrie automobile a pris connaissance, pour la première fois, du Groupe de Traction Couture et compris qu'une véritable révolution s'annonçait et devait prendre son essor au Québec.

Les voitures entièrement électriques sur lesquelles travaillaient les fabricants automobiles de l'époque ne s'adressaient qu'à un marché de niche, en raison de leur



**Figure 2.34** – Motorisation d’une Prius de deuxième génération (2004-2008) telle qu’exposée au Deutsches Technikmuseum de Berlin. Le moteur thermique est à gauche, le générateur au centre, et le moteur électrique à droite. (Source : Wikimedia Commons, <http://commons.wikimedia.org>, Deutsches Technikmuseum Berlin, février 2008)

lui conférant ainsi un diamètre de 38 cm, soit le double environ du diamètre des moteurs de la Eliica. Par ailleurs, ces derniers sont des moteurs traditionnels dans lesquels c’est la partie centrale du moteur qui tourne (rotor central), ce qui réduit davantage la distance du centre de rotation où s’appliquent les forces magnétiques, d’où la réduction du couple.

## 2.11 – Véhicules hybrides ordinaires et branchables

### La Prius de Toyota

Par définition, une voiture hybride possède deux moteurs : un à combustion interne et l’autre électrique. La Prius, de Toyota, commercialisée en 1997 au Japon, a été la première voiture hybride de série à être produite. La **figure 2.34** montre les deux moteurs cohabitant sous le capot d’une Prius de deuxième génération (2004-2008). On y trouve également un générateur, et une batterie dans le coffre arrière, capable d’alimenter le moteur électrique. Dans une voiture hybride ordinaire, comme la Prius de deuxième génération, il n’est pas nécessaire de recharger la batterie sur le réseau. C’est le moteur à combustion qui entraîne le générateur pour la recharger.

Une voiture traditionnelle doit avoir un gros moteur à combustion interne pour faire face à tous les besoins en puissance requis par les divers scénarios de conduite, particulièrement pour les accélérations et les côtes. La plupart du temps, on n’a pas

Cet ancêtre de l'autobus électrique urbain biberonné était parfaitement fonctionnel. Le problème était qu'en 1950, le litre de carburant diesel valait 0,05 \$, alors que l'électricité coûtait 0,03 \$ le kWh. Par conséquent, le coût en énergie pour parcourir un kilomètre était le même avec le carburant qu'avec l'électricité. Les villes étant moins polluées à l'époque et le réchauffement climatique encore inexistant, ces facteurs n'avaient pas autant de poids, sans compter que le pétrole était très abondant pour la demande qu'on en avait alors. Pourtant, le Gyrobus offrait l'avantage d'un fonctionnement silencieux et inodore, tout en ayant un entretien réduit par rapport à un autobus diesel. Cette technologie aurait donc dû prendre une part du marché.

À la même époque, un autre moyen de transport urbain électrique bien connu, les tramways, a cédé la place aux omniprésents autobus diesel polluants et bruyants. À cet égard, Edwin Black, dans son livre *Internal Combustion*<sup>40</sup> dévoile comment les lobbies fonctionnaient. Il nous apprend, entre autres, que General Motors, Standard Oil, Firestone et quelques autres compagnies de moindre importance s'étaient unies pour mettre sur pied la compagnie National City Lines. Dans les années 1930-1950, cette dernière achetait les compagnies de transport en commun des villes étatsuniennes, alors que les tramways électriques étaient rois et maîtres. Pourquoi acheter des tramways électriques munis de roues en fer quand on fait son argent avec les moteurs à combustion, les pneus et le pétrole? Et bien, je vous ai déjà donné la réponse. Les tramways électriques ne sont pas restés longtemps dans le décor; ils ont été remplacés rapidement par un fort contingent d'autobus GM roulant avec des pneus Firestone et alimentés par du carburant diesel de la Standard Oil..

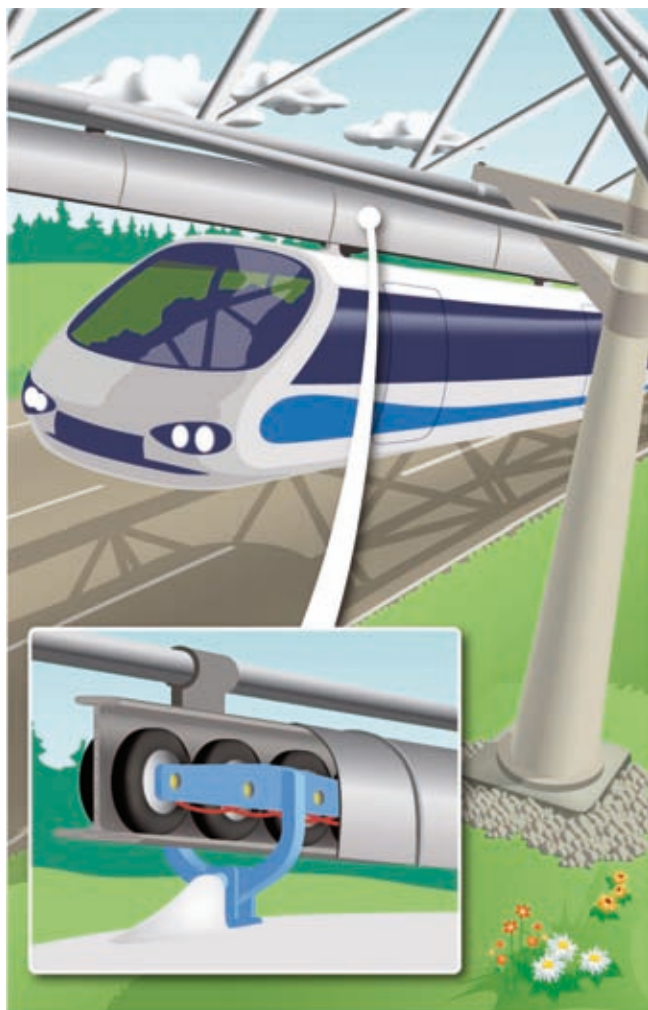
Après cette petite capsule historique, revenons à l'avenir des transports en commun urbains. L'auteur est intimement convaincu que les autobus électriques biberonnés vont sillonner nos rues dans les années qui viennent, en nombre toujours croissant. **Les transports en commun urbains de demain seront à nouveau entièrement électriques.**



**Figure 2.65** – Page couverture de la revue *Science and Mechanics* du mois d'avril 1954, montrant une illustration du Gyrobus biberonné.

40. E. Black, *Internal Combustion*, St. Martin's Press, New York, 2006.





**Figure 2.68** – Vue artistique du monorail interurbain à grande vitesse, mû par 16 moteurs-roues, conçu par Pierre Couture. (Illustration: Paul Berryman)

Même à 250 km/h, chaque wagon dépenserait beaucoup moins d'énergie que si ses 60 passagers avaient circulé dans 40 automobiles différentes. L'encombrement des routes s'en trouverait ainsi considérablement réduit et nous utiliserions de l'électricité au lieu de carburants. Il y aurait donc moins d'émissions de gaz à effet de serre et d'émissions polluantes tout court. On économiserait les ressources planétaires, puisque le même wagon pourrait servir à près de 1000 personnes différentes dans la même journée, sur un trajet de 250 km. Quelle agréable perspective que de pouvoir parcourir 250 km en une heure dans un wagon confortable et spacieux, d'un centre-ville à l'autre, sans avoir à conduire, ni à chercher de stationnement!

À bien y penser, ce monorail léger et rapide à moteurs-roues, imaginé par Pierre Couture, serait très avantageux un peu partout sur la planète, pas seulement dans les pays froids.

Surtout que le coût des infrastructures serait de 3 à 5 fois moins élevé que celui d'un train à très grande vitesse!

Ces monorails légers et rapides seraient idéaux également pour relier les centres-villes aux aéroports, ou désengorger les ponts à l'heure de pointe, en accrochant les rails aux structures latérales des ponts. Les gens qui habitent la rive sud du fleuve Saint Laurent et qui vont travailler sur l'île de Montréal apprécieraient un tel service de transport en commun, beaucoup moins cher qu'un métro sous le fleuve.

sur une surface plane<sup>42</sup>. Le 21CTP a ensuite fixé des objectifs pour 2010 de réduire de 40 % les diverses dépenses d'énergie qui interviennent (résistance de l'air, résistance au roulement, pertes dans la transmission, pertes au freinage, pertes thermiques du moteur, consommation des accessoires), dans les mêmes conditions. En se basant sur les données du consortium pour le camion de 2010, on peut déterminer qu'en transformant ce camion semi-remorque de 2010 en camion électrique, il consommerait, à 105 km/h, approximativement 120 kWh/100 km, soit trois fois moins que l'énergie consommée sous forme de carburant par un camion semi-remorque diesel typique de 2007 (360 kWh pour 100 km, selon 21CTP). Ce n'est pas la solution envisagée par 21CTP. En ville cependant, le consortium préconise l'hybridation des camions pour réduire la consommation de carburant de 60%.



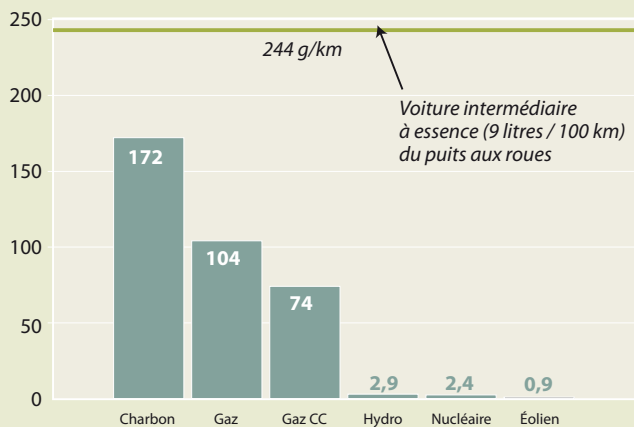
**Figure 2.72** – Un camion semi-remorque traditionnel. (Source: banque d'images IMSI)

Les objectifs du consortium 21CTP sont à relativement court terme, soit pour la période 2010-2013. À l'horizon 2020-2030, on pourra encore faire mieux. En matière d'aérodynamisme, par exemple, le 21CTP prévoit économiser environ 10% de carburant, en apportant quelques modifications aux camions déjà existants, comme un profilage partiel de l'arrière de la remorque et l'ajout de panneaux latéraux sur les côtés entre les roues de la remorque. Mais une refonte en profondeur du design des camions semi-remorques pour diminuer leur résistance à l'écoulement de l'air pourrait apporter davantage d'économie d'énergie. Le designer de renommée internationale Luigi Colani (www.colani.ch) en a déjà fait la preuve avec les camions prototypes qu'il a réalisés depuis 2001 (**figure 2.73**). Il affirme qu'il a pu ainsi réduire la consommation de carburant de 40% par rapport à la moyenne des camions de même catégorie.



**Figure 2.73** – Camions conçus par Luigi Colani. (Source: Wikimedia Commons, <http://commons.wikimedia.org>, auteur: wikipedia-ce, août 2005)

42. *21<sup>st</sup> Century Truck Partnership*, Roadmap and Technical White Papers, rapport numéro 21CTP-0003, décembre 2006. Pour télécharger ce rapport, aller à <http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/>, dans la section Research Partnerships.



**Figure 2.85 – Émissions de CO<sub>2</sub> d’une voiture électrique intermédiaire (15 kWh/100 km), de la centrale aux roues pour différentes centrales (g/km)** – Émissions calculées à partir des intensités d’émission du tableau 2.6, en ajoutant 6% pour la recharge de la prise de la batterie.

| Types de centrales                     | Intensités d’émissions (g CO <sub>2</sub> / kWh) |
|--|--|
| Charbon (efficacité de 34%)            | 1075   |
| Gaz naturel (bouilloire: eff. = 36%)   | 653  |
| Gaz naturel (cycles comb.: eff. = 51%) | 461  |
| Hydroélectrique                        | 18   |
| Nucléaire                              | 15   |
| Éolien                                 | 5,5  |

**Tableau 2.6 – Intensités d’émissions des gaz à effet de serre par divers types de centrales électriques, de la terre à la prise, exprimées en équivalent CO<sub>2</sub> (selon le calculateur GHGenius de Ressources naturelles Canada).**

Pour les émissions de CO<sub>2</sub> d’une voiture traditionnelle à essence moyenne (1500 à 1600 kg), nous avons considéré une consommation de 9 litres/100 km, à partir du réservoir. Nous supposons que l’essence est entièrement brûlée, ce qui dégage 2,36 kg de CO<sub>2</sub> par litre<sup>64</sup>. Pour tenir compte du CO<sub>2</sub> dégagé du puits de pétrole au réservoir de la voiture, nous ajoutons 15%<sup>65</sup>. On obtient ainsi pour une voiture intermédiaire traditionnelle à essence, une émission de 244 g CO<sub>2</sub>/km, qui sert de référence. Une voiture neuve plus petite (1300 kg) avec un groupe de traction plus efficace peut, bien entendu, émettre moins de CO<sub>2</sub>, mais nous considérons la moyenne des voitures en circulation en Amérique et en Europe en 2007, et non la moyenne des voitures neuves européennes.

Il est particulièrement intéressant de constater qu’aux États-Unis, avec un parc de centrales qui brûlent des carburants fossiles pour produire 70% de l’électricité, les émissions de CO<sub>2</sub> d’une voiture électrique sont malgré tout moins de la moitié de celles des voitures traditionnelles. **Même dans un pays comme la Chine, dont 80%**

64. R. Edwards *et al.*, *Well-To-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context*, Well-to-Tank Report, version 2c, European Commission, EUCAR et CONCAWE, mars 2007. Voir l’annexe 1 pour les émissions de CO<sub>2</sub>. Téléchargement à <http://ies.jrc.ec.europa.eu/wwt.html>.

65. R. Edwards *et al.*, *Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*, WELL-to-WHEELS Report, version2c, European Commission, EUCAR et CONCAWE, mars 2007. Téléchargement à <http://ies.jrc.ec.europa.eu/wwt.html>.