



Environnement.ch

Audergon Jacques, ingénieur-conseil EPFL/SIA
Les Planchettes 28, 1731 Ependes

Véhicules électriques, quel avenir

Par Jacques Audergon, ing dipl EPFL/SIA



Sommaire

1. **Le véhicule électrique (VER), de son apparition à nos jours**
2. **Le défi du stockage de l'électricité dans l'électro-mobilité**
3. **Quel avenir pour les VER**
4. **Une piste intéressante : la roue intelligente**



1. Véhicule électrique (VER) de son apparition à nos jours

1.1. – Le début des automobiles



1^{er} véhicule automobile à vapeur en **1873** : L'**Obéissante** d'Amédée Bollorée
Mue par une **chaudière à vapeur**. Vitesse : 40 km/h

1^{er} véhicule automobile à
Moteur à explosion en **1886** :
Tricycle Benz 1



1^{er} véhicule automobile électrique
en **1899**: Lohner Porsche **Semper Vivus**
de Ferdinand Porsche



Première automobile
hybride électrique –
Essence en **1900** :
Lohner Porsche
Semper Vivus de
Ferdinand Porsche



VER de son apparition à nos jours

1.2. – Le VER dans les années 80 - 90: la renaissance

- ❑ Une importante activité de recherche et développement de véhicules électriques (VER) est constatée dès les années **1980**.
- ❑ Le premier véhicule hybride (parallèle) sort des usines Toyota. Il s'agit de la Toyota Prius I (type XW10) en **1997**
– Emissions CO2 **138g/km**



- ❑ La première voiture électrique réellement "moderne" par sa technologie et produite en série est la **EV1** de **General Motors**, développée spécialement pour répondre aux sévères lois anti-pollution californiennes (ZEV). 1'117 ex ont été construites de **1996 à 1999**.



1.3. – La percée actuelle des VER au début du XXI siècle

- ❑ Sous la pression de l'augmentation du prix du pétrole et des préoccupations environnementales, les constructeurs se lancent dans la production de VER.
- ❑ L'un des symboles forts de ce nouvel élan est la Tesla d'Elon Musk.
De **2008 à 2012**, sa firme produit la **TESLA ROADSTER**, batterie au lithium.
Dès **2009**, il propose la **TESLA Model S**, une berline avec **480 km d'autonomie**



- ❑ A l'autre extrémité du panel, le non moins mythique **Renault ZOE électrique** construite dès **2012**.
Puissance 65 à 100 kW
Autonomie d'environ 200 km
le modèle le plus récent atteint une autonomie de 390 km
Emissions CO2 : 12 g/km

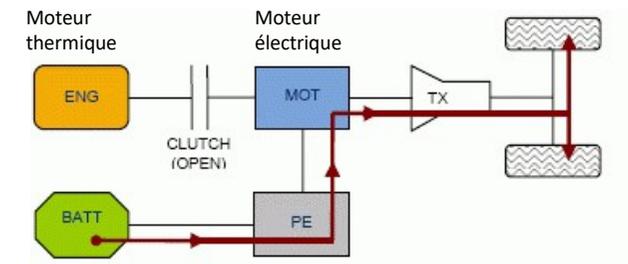


1.4. Automobiles hybrides électriques

- ❑ Fait appel à 2 types d'énergie embarquée (électricité + autre). Associe un moteur électrique avec un moteur en général thermique ou une pile à combustible.
- ❑ On distingue 2 grandes catégories de systèmes hybrides :

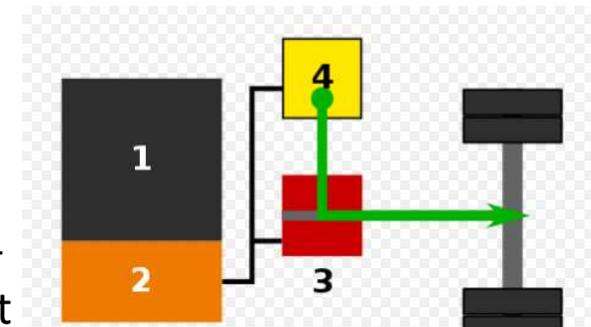
1. Hybride parallèle simple

Le moteur thermique et le moteur électrique sont sur le même axe.



2. Hybride série

Utilise uniquement le moteur électrique (4) pour entraîner les roues. Le moteur thermique (1) a pour unique fonction d'entraîner un générateur électrique (2) pour produire de l'électricité pour alimenter une batterie (4) ou directement le moteur électrique (3). Une variante est la production d'électricité par une pile à combustible (remplace 1 et 2)



1.4. – Automobiles hybrides électriques (suite)

Exemple d'un VER hybride série et rechargeable : la Chevrolet Volt

- Voiture électrique à extension d'autonomie (hybride rechargeable).
- Autonomie en mode purement électrique : 60 km
- La batterie lithium-ion se recharge au freinage.
- Première génération : 2011-2015**
- Consommation mixte : 2,5 litres/100 km**
- Variante commercialisé en Europe : Opel Ampera
- Autonomie totale : 680 km.**



VER de son apparition à nos jours

1.5. – Parc 2020-21 en Suisse selon prix d'achat d'achat (TCS)

Citroën C-Zero Séduction



- Autonomie : 100 Km
- Prix : ~22'500 CHF

Mitsubishi i-MiEV Style



- Autonomie : 100 Km
- Prix : ~22'500 CHF

Peugeot iOn Active



- Autonomie : 100 Km
- Prix : ~22'500 CHF

Seat MII Electric: Meilleur rapport prix / autonomie



- Autonomie : 260 Km
- Prix : ~23'500 CHF

Skoda City-go e-iV : Top 5 (prix & autonomie)



- Autonomie : 260 Km
- Prix : ~24'590 CHF

Smart fortwo EQ



- Autonomie : 145 Km
- Prix : ~24'900 CHF

Smart forfour EQ



- Autonomie : 145 Km
- Prix : ~25'900 CHF

VW e-Up! : Top 5 (prix & autonomie)



- Autonomie : 260 Km
- Prix : ~26'000 CHF

Smart fortwo cabrio



- Autonomie : 145 Km
- Prix : ~28'600 CHF

Renault Kangoo Z.E.



- Autonomie : 215 Km
- Prix : ~29'550 CHF

Peugeot 208 Electric Active



- Autonomie : 256 Km
- Prix : ~34'350 CHF

VW e-Golf



- Autonomie : 230 Km
- Prix : ~35'200 CHF

1.5. – Parc 2020-21 en Suisse selon prix d'achat d'achat (TCS)

Opel Ampera e-Edition: Top 5 (autonomie)



- Autonomie : 330 Km
- Prix : ~35'000 CHF

Renault Zoé R90 Life



- Autonomie : 310 Km
- Prix : ~35'500 CHF

Mazda MX-30



- Autonomie : 200 Km
- Prix : ~36'990 CHF

Opel Corsa-e



- Autonomie : 330 Km
- Prix : ~36'990 CHF

Renault Zoé R110 Zen : Top 5 (Autonomie)



- Autonomie : 395 Km
- Prix : ~37'200 CHF

Nissan Leaf Acenta



- Autonomie : 275 Km
- Prix : ~38'990 CHF

Mini 3 Doors Cooper SE



- Autonomie : 236 Km
- Prix : ~39'000 CHF

Hyundai Ioniq electric Origo



- Autonomie : 310 Km
- Prix : ~40'990 CHF

BMW i3



- Autonomie : 260 Km
- Prix : ~41'400 CHF

Honda e



- Autonomie : 230 Km
- Prix : ~43'100 CHF

Tesla Model 3 Standard Range Plus



- Autonomie : 410 Km
- Prix : ~45'980 CHF

Hyundai Kona Electric : Top 5 (autonomie)



- Autonomie : 445 Km
- Prix : ~47'000 CHF

Nissan Leaf e+N-connecta



- Autonomie : 380 Km
- Prix : ~47'500 CHF

Opel Ampera e-Excellence



- Autonomie : 520 Km
- Prix : ~52'700 CHF

VW ID 3.1 ST: Top 5 (autonomie)



- Autonomie : 420 Km
- Prix : ~54'000 CHF

Tesla Model 3 Long Range : meilleure autonomie



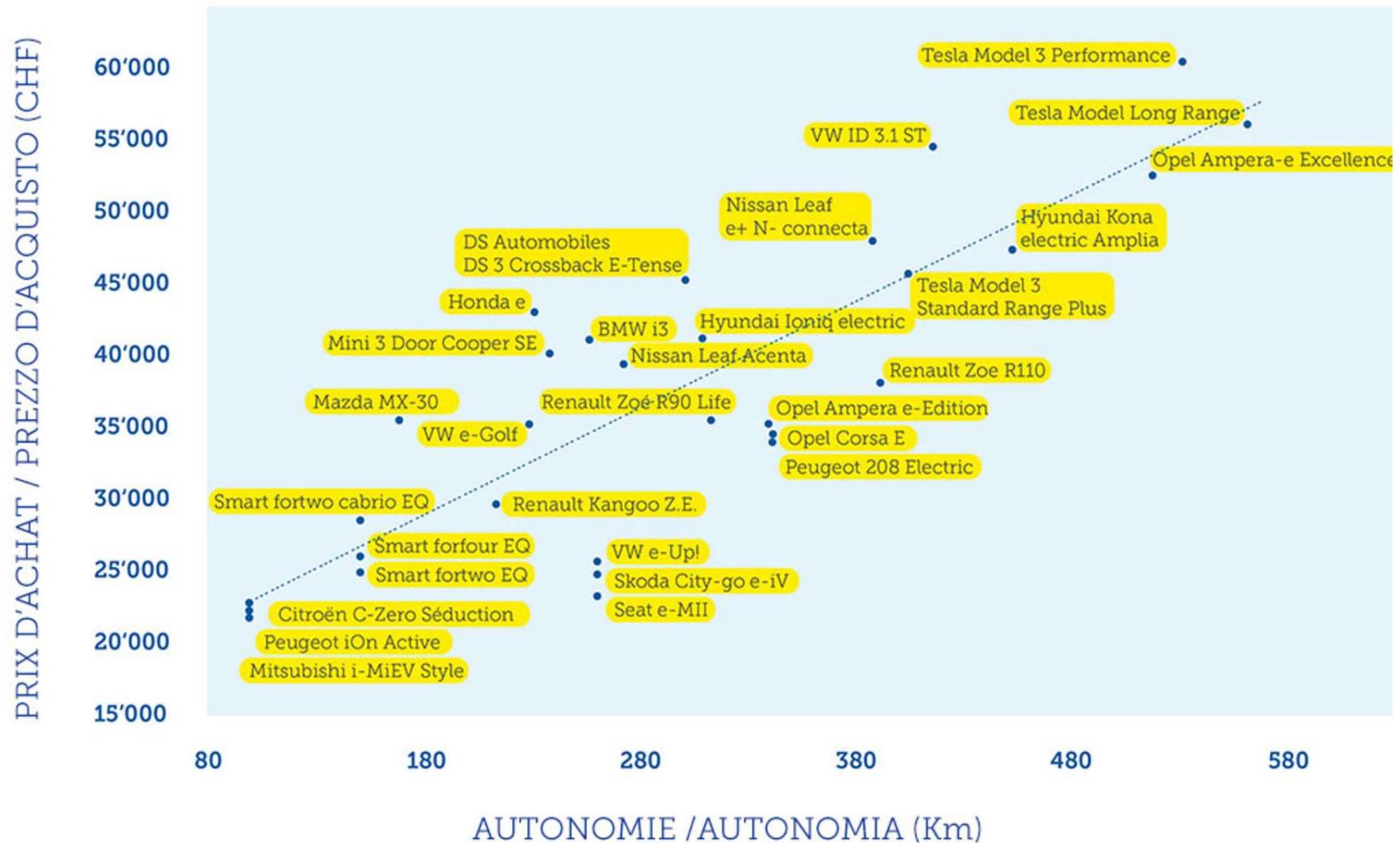
- Autonomie : 560 Km
- Prix : ~56'000 CHF

Tesla Model 3 Performance



- Autonomie : 530 Km
- Prix : ~60'980 CHF

1.6. – Véhicules électriques : autonomie/prix d'achat





1.7. – Part de marché des VER

- ❑ La part de VER dans le parc roulant national est passé de 0,4% en 2018 à 0,6% en 2019.
- ❑ La part des voitures de tourisme hybrides est passée de 1,7% en 2018 à 2,1 % en 2019.
- ❑ Les ventes de VER ont progressé de 144% en 2019, atteignant 13'200 exemplaires, soit une part de marché de 4,2 %.
- ❑ Les ventes des voitures hybrides ont progressé de 71 % en 2019, atteignant 26'376 exemplaires, soit une part de marché de 8,4 %.
- ❑ La statistique des immatriculations des VER en Suisse de 2008 à 2020 se présente comme suit :

Immatriculations de voitures électriques en Suisse¹²⁵

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Voitures électriques	24	57	201	452	924	1 392	1 948	3 882	3 525	4 929	5 411	13 197	19 765
Part de marché	0,01 %	0,02 %	0,07 %	0,14 %	0,28 %	0,45 %	0,64 %	1,19 %	1,10 %	1,56 %	1,80 %	4,22 %	8,28 %



2. Le défi du stockage de l'électricité dans l'électro-mobilité



2.1. Evolution des batteries pour les VER

- ❑ Les batteries au plomb sont utilisées depuis plus de 150 ans dans l'automobile. Inventée par le français Gaston Paré, elles sont aujourd'hui encore montées non seulement dans des véhicules thermiques mais également électriques.
- ❑ Dès 1990, d'autres solutions ont été appliquées. Dans un premier temps, des batteries au Nickel-Cadmium ont été développées. Une directive européenne 2002/95/CE relative aux substances dangereuses a entraîné la disparition de cette filière pourtant prometteuse.
- ❑ Les batteries au lithium-ion inondent depuis quelques années le marché des véhicules électriques. Les premiers travaux datent de 1970. Ce n'est qu'en 1985 qu'a été réalisée la première batterie lithium-ion.
- ❑ Les batteries lithium-ion polymère sont apparues en 1995. Cataloguées comme dépassées lors de leur apparition, elles ont depuis acquis leurs lettres de noblesse auprès de certains constructeurs coréens.



2.2. Avantages et inconvénients des batteries lithium-ion

Avantages

- Fourchette idéale d'exploitation entre – 20 et 65°C
- Tension élevée et absence d'effet mémoire
- Nombre de cycles élevés
- Energie massique et volumique 4 x supérieure à la batterie au plomb
- Permet une recharge très rapide.
- Rapport entre densité énergétique, poids et prix les classe parmi les meilleurs sur le marchés des accumulateurs à ce jour.
- Utilisation possible pour une seconde vie.

Inconvénients

- Prix d'achat de la batterie par rapport au coût du véhicule (jusqu'à 30%)
- Recyclage très technique
- Dépendance à quelques pays pour la fourniture de lithium.
- Impact environnemental de l'extraction du lithium.
- Comportement dangereux en cas de surcharge, notamment l'emballage thermique et ses effets destructeurs.



2.3. Caractéristiques des batteries lithium-ion

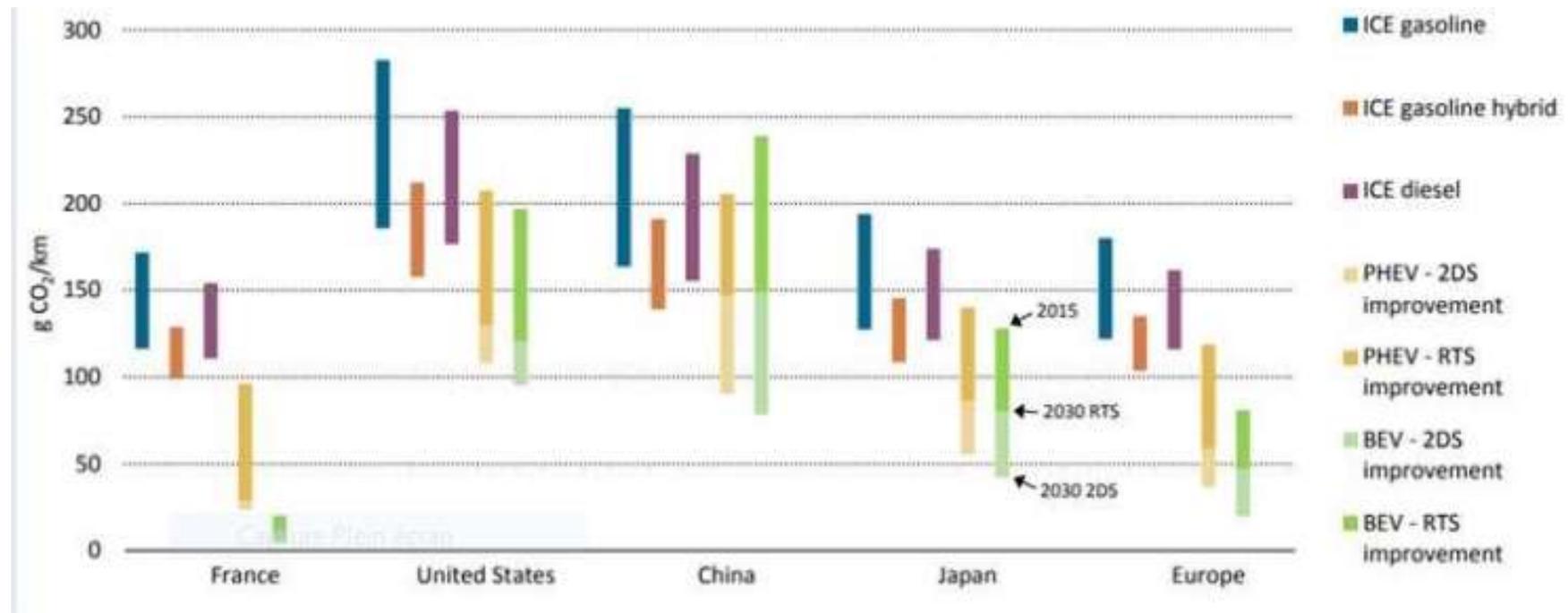
- Nombre de cycles (moyenne) : 3 à 4'000
- Densité énergétique : 240 Wh/kg
- Durée de vie moyenne comme batterie de traction : 100'000 km correspondant à 2'000 heures d'utilisation environ
- Emissions de CO2 par km : 50 à 90 gCO2/km (voir moins)
- Coût par kWh : 140 € /kWh (objectif : 100 €/kWh)
- Part de marché en 2020 : 80 % des batteries de traction pour VER





2.4. Bilan environnemental comparé des batteries actuelles

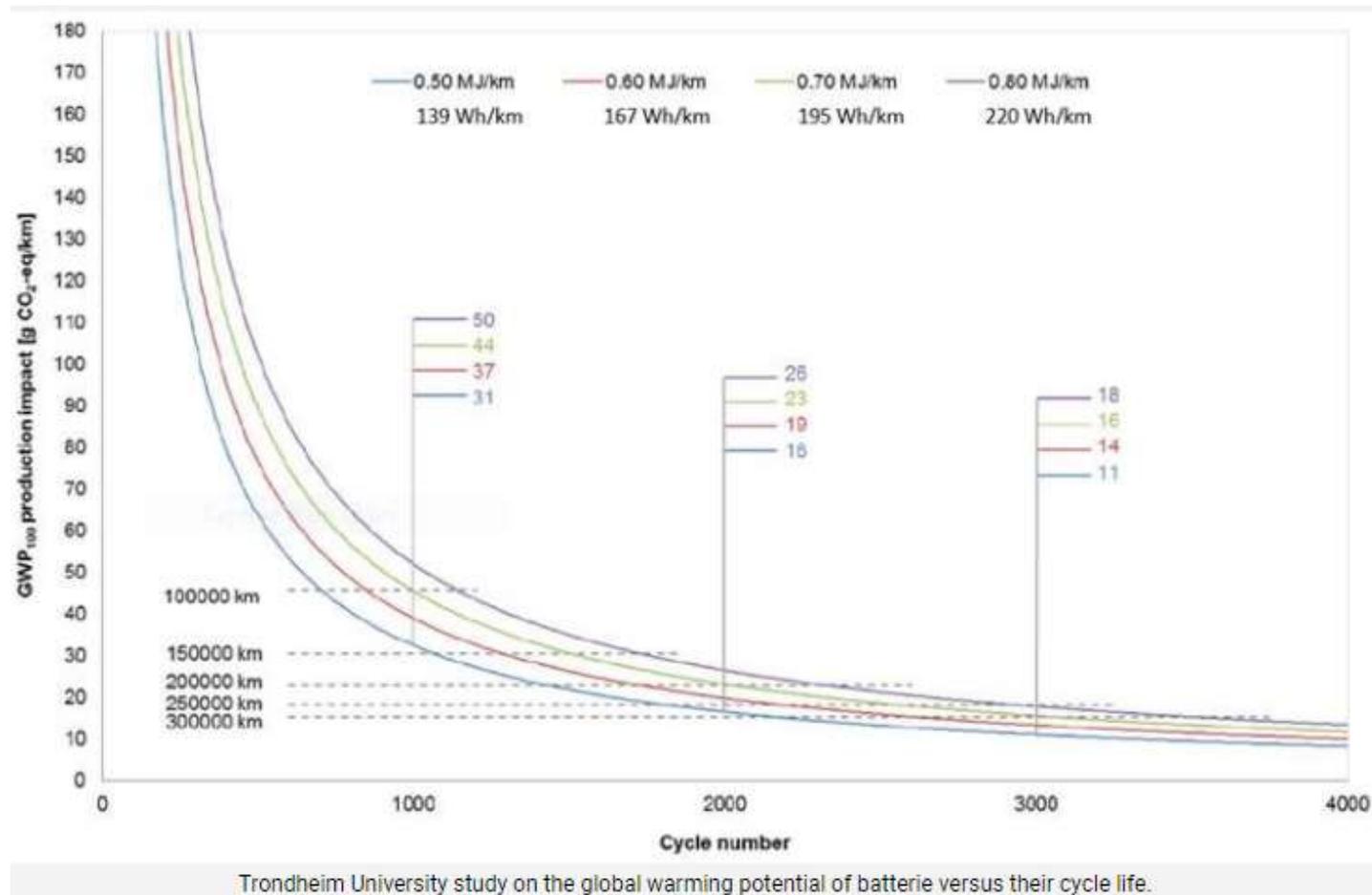
- ❑ Batteries les plus utilisées pour les VER : lithium - ions
- ❑ Impact écologique meilleur pour les batteries lithium-ions que pour les motorisations traditionnelles (diesel ou essence)
- ❑ Etude de l'AIE pour un bilan environnemental selon émissions de CO₂ sur tout le cycle de vie du produit (construction-utilisation-fin de vie)





2.4. Bilan environnemental des batteries actuelles (suite)

- Etude de l'Université Norvégienne de Sciences et Technologies a étudié l'évolution des émissions moyennes de CO₂ en fonction de la durée de vie (nombre de cycles) d'une batterie au lithium-ion :





2.5. Perspectives pour le stockage embarqué d'électricité

- ❑ Dès 2011, des recherches sont lancées pour développer de nouvelles batteries, notamment :
 - a) Projet Life Bibat pour une nouvelle génération de batteries au lithium-ion écologiques.
 - b) Recherche de batteries solides avec capacité de stockage accrue et meilleure sécurité. Electrolyte remplacé par un matériau solide type céramique.
- ❑ En 2020, la firme californienne ENEVATE annonce la commercialisation à partir de 2024 d'une nouvelle batterie lithium-ion très performante dotée d'une anode au silicium. Charge 75% en 5 minutes.
- ❑ Le 26 janvier 2021, La Commission européenne a approuvé une aide publique de 2,9 milliards € au vaste projet de recherche sur les batteries nouvelle génération intitulé : The european battery Innovation.
- ❑ L'option hybride série avec de nouveaux générateurs d'électricité est de plus en plus prise en considération. Dans cette perspective, le recours à des piles à combustible alimentées en hydrogène ou par d'autres sources renouvelables est pleine de promesses.



3. Quel avenir pour les VER ?



3.1. Evolution probable du marché

- ❑ L'élan constaté ces 3 dernières années en ce qui concerne la voiture électrique ou hybride électrique renforce l'idée que les conditions sont maintenant réunies pour un véritable essor de la voiture électrique ou hybride électrique :
 - a) le progrès déjà fait dans le domaine des batteries et surtout les progrès annoncés concernant l'autonomie et le coût de ces batteries,
 - b) la pression de l'environnement, même si en termes de bilan CO2, la voiture électrique n'est pas encore si efficace,
 - c) Le fait que l'industrie automobile a entrepris très clairement le tournant vers les véhicules électriques

- ❑ L'étude annuelle de l'Agence Bloomberg sur les véhicules électrique fait les prévisions suivantes :
 - a) en 2025, les véhicules électriques représenteront le 10% des parts de marché.
 - b) en 2040, plus de la moitié des véhicules vendus seront électriques

- ❑ La taille de la flotte mondiale serait dans cette perspective de 116 millions en 2030.



3.2. Quels véhicules pour demain ?

- ❑ Il faut compter avec le développement de 3 catégories de véhicules :
 - a) les véhicules purement électriques,
 - b) La poursuite pendant un certain temps de véhicules hybrides parallèles,
 - c) le développement de véhicules hybride série, en particulier ceux qui seront mus par des piles à combustible à hydrogène alimentant en électricité soit directement le ou les moteurs électriques, soit une petite batterie tampon.

- ❑ La motorisation électrique permettra la mise sur le marché de nouveaux véhicules électriques, meilleurs marché et plus respectueux de l'environnement. Une des pistes est celle du développement de la roue intelligente contenant toutes les fonctions (direction, suspension, motricité), le moteur étant dans la roue.

- ❑ La motorisation électrique permettra le véritable avènement de la voiture intelligente.



3.3. Le rôle de l'approvisionnement des VER

- L'un des problèmes du VER est la nécessité de recharger ses batteries, au moins en ce qui concerne les véhicules purement électriques, et en attendant le développement de batteries permettant l'augmentation significative de l'autonomie.
- Actuellement, d'importants développements de réseaux de bornes d'alimentation des voitures électriques sont annoncés en Suisse.
- En parallèle sont annoncés des développements de stations d'hydrogène.
- C'est la combinaison de l'ensemble de ces réseaux, de la capacité de charge rapide mise à disposition des automobilistes qui favorisera dans notre pays l'essor de la voiture électrique.



4. Une piste intéressante : la roue intelligente

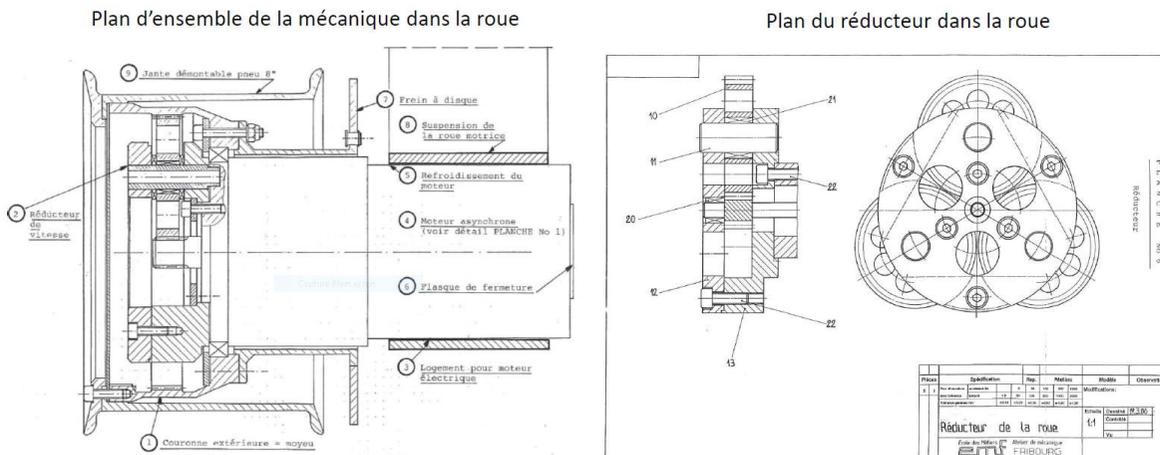
Quelques pistes intéressantes ?

4.1. Projet MOBILEC – le moteur dans la roue

- ☐ Vue d'une roue motrice avec moteur asynchrone dans la roue



- ☐ Plan de la mécanique de la roue motrice



4.2. Projet MOBILEC – le prototype qui circulé sur 1'000 km

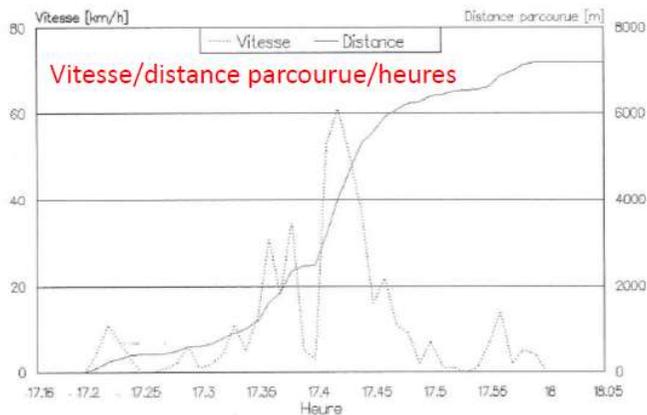
□ Vues du prototype (1986) MOBILEC



4.3. Projet MOBILEC – les premiers résultats

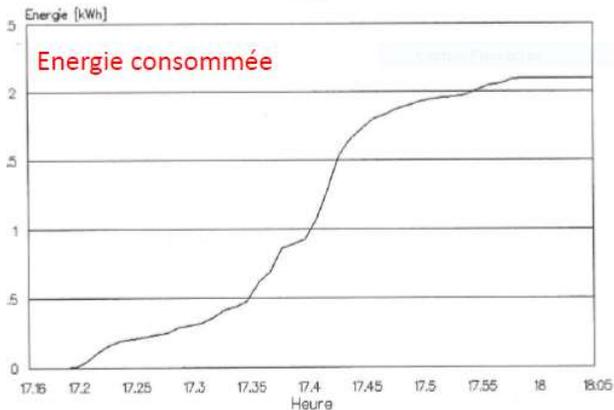
ETAPE III Expérimentation du prototype MOBILEC - performances

Exemple : parcours 3 Villars-sur-Glâne – Rosé / Résultats des mesures de la chaîne d'acquisition embarquée

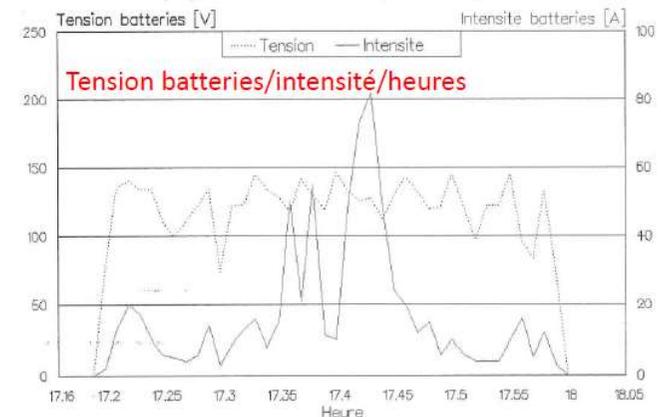
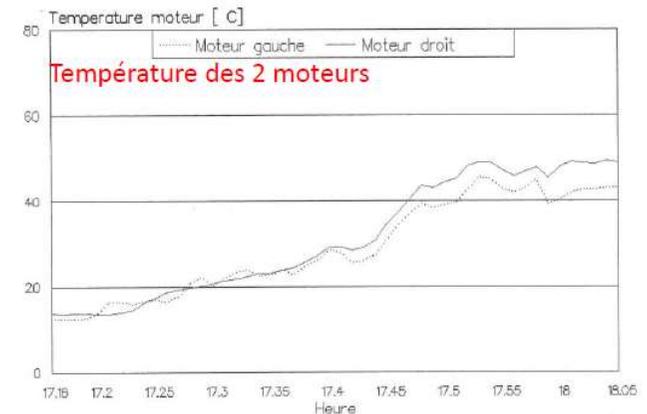


Vitesse max : 60 km/h

Consommation électricité :
Moyenne 292 Wh/km



Projet MOBILEC 12 mai 2016





Merci pour votre attention