



Haute école d'ingénierie et d'architecture Fribourg
Hochschule für Technik und Architektur Freiburg

SeSi

Sustainable Engineering
Systems Institute

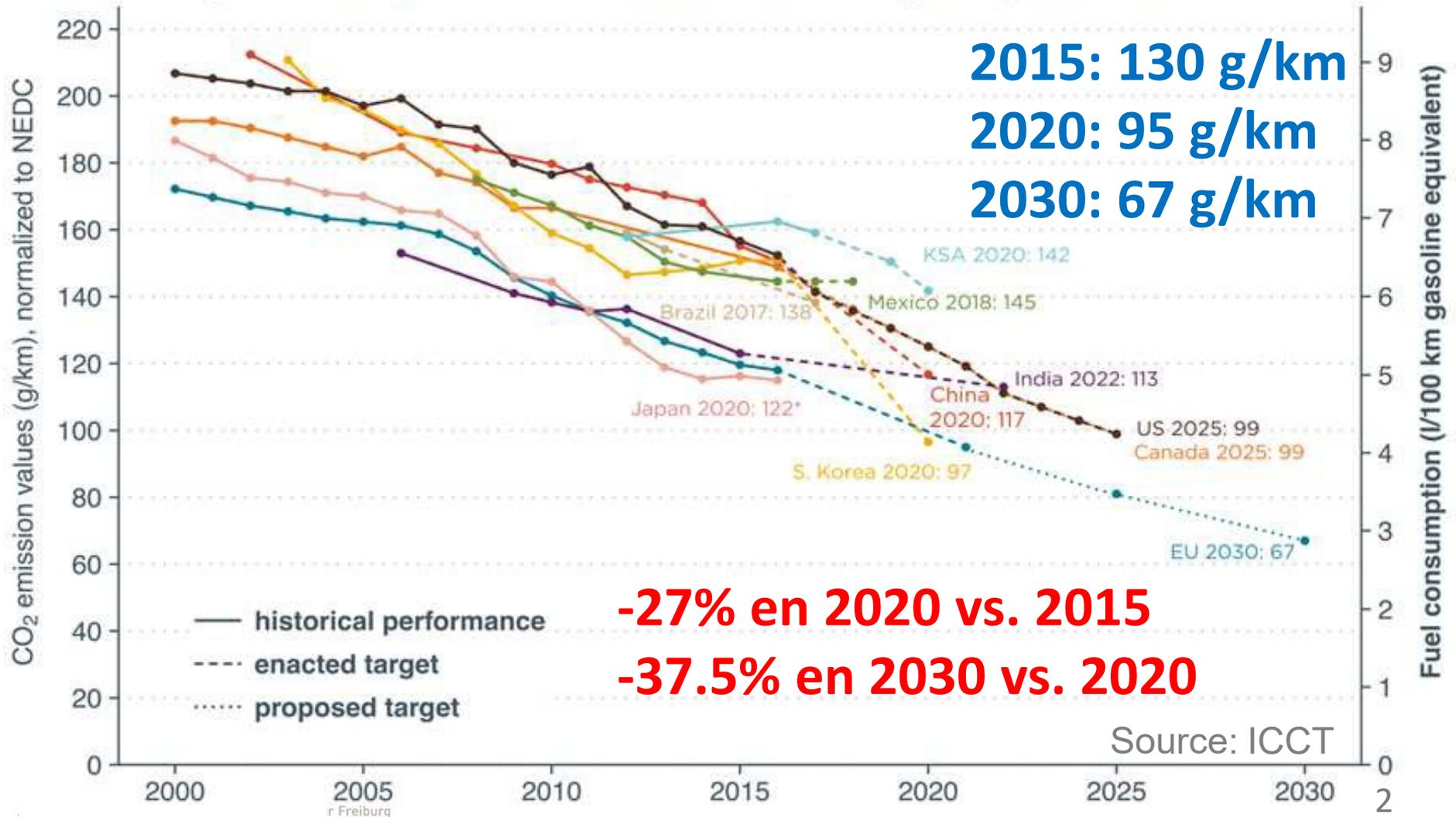
Hes·SO

Haute Ecole Spécialisée
de Suisse occidentale
Fachhochschule Westschweiz

Motorisation alternative pour les véhicules de transport

Enjeu actuel: réduction CO2

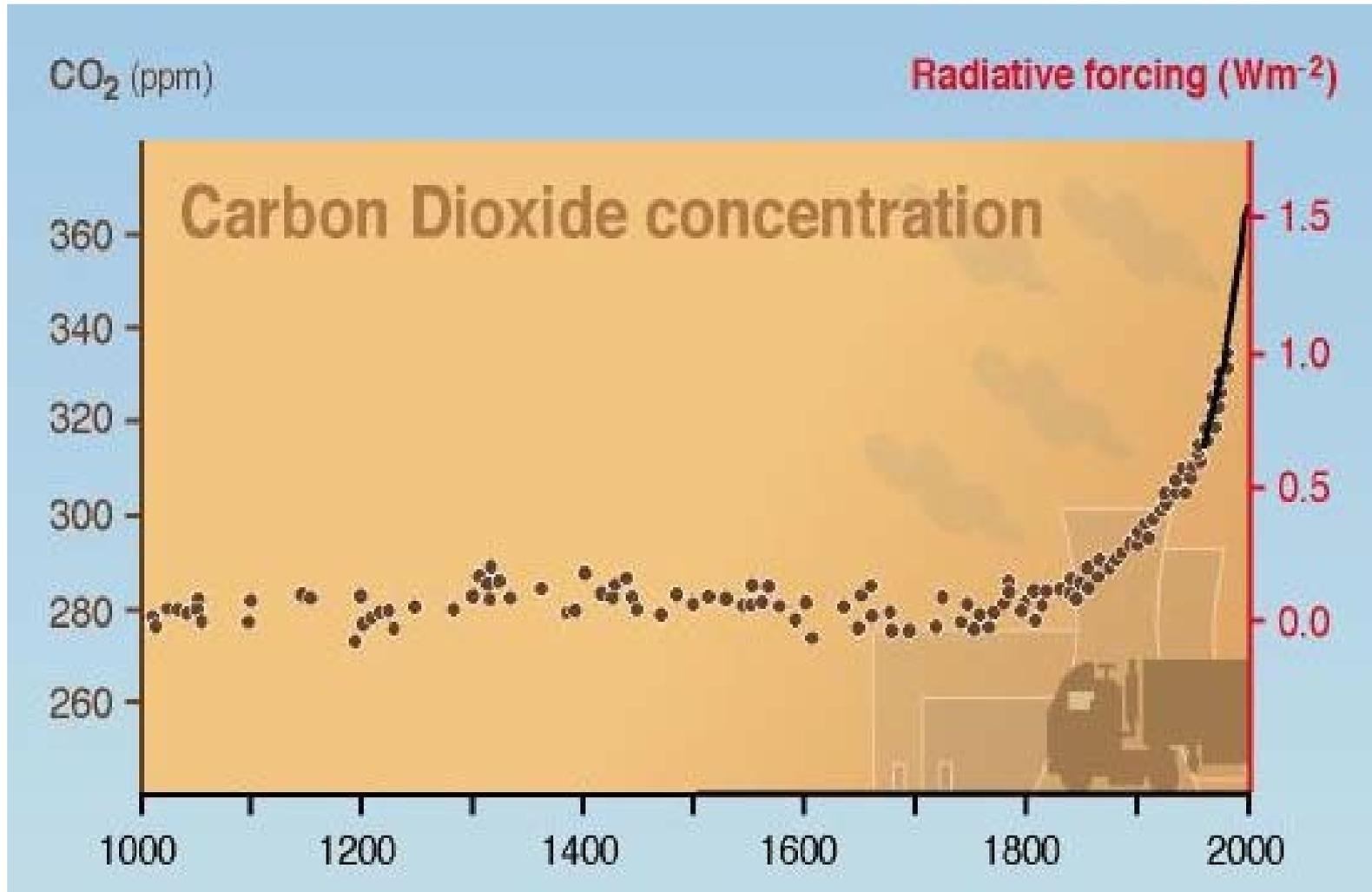
Passenger car CO₂ emissions and fuel consumption, normalized to NEDC



-27% en 2020 vs. 2015

-37.5% en 2030 vs. 2020

Pourquoi ?



Les transports a l'échelle mondiale

DEMOGRAPHIE

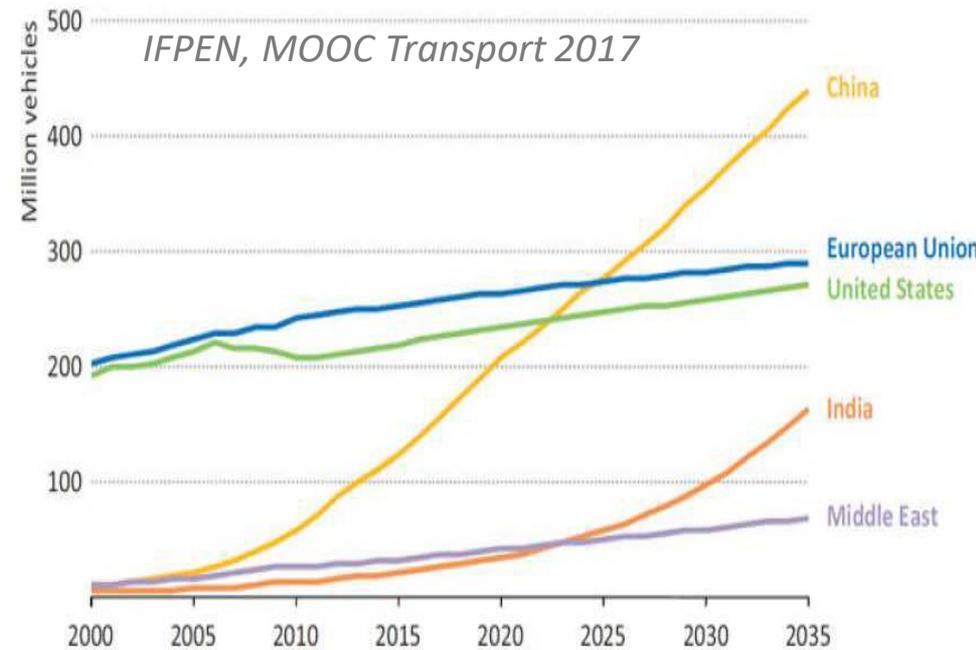
7 milliards en 2018
> 9 milliards en 2050
d'après les Nations Unies

URBANISATION POPULATION

1/3 en 1950, 1/2 en 2017, 2/3 en 2050
augmente les besoins de transport
au quotidien des personnes et marchandises

CROISSANCE ECONOMIQUE

Fait croître le nombre de véhicules
(170 véhicules/1000 habitants en 2017)



Source : IEA New Policies Scenario

Prévision de croissance du secteur des transports dans les prochaines années !

Conséquences

- On a besoin de nouveaux systèmes de transport plus efficaces pour optimiser le transport.
- On a besoin de nouveaux systèmes de motorisation pour réduire le CO₂.
- On doit faire attention aux autres problèmes, y compris ceux générés par les solutions potentielles.

Quelles solutions pour ces nouveaux besoins ?

Solutions de motorisation

- Moteur **électrique** entraîne les roues
- Moteur à **combustion** entraîne les roues
- Voie hybride parallèle: Les moteurs électriques et à combustion entraînent les roues.

Solutions de fourniture énergétique au moteur **électrique**

- Batteries
- Caténaire
- Pile à combustible (hydrogène) associée à des batteries
- Un moteur à combustion avec une génératrice (hybride série)

Solutions de fourniture énergétique au moteur à combustion

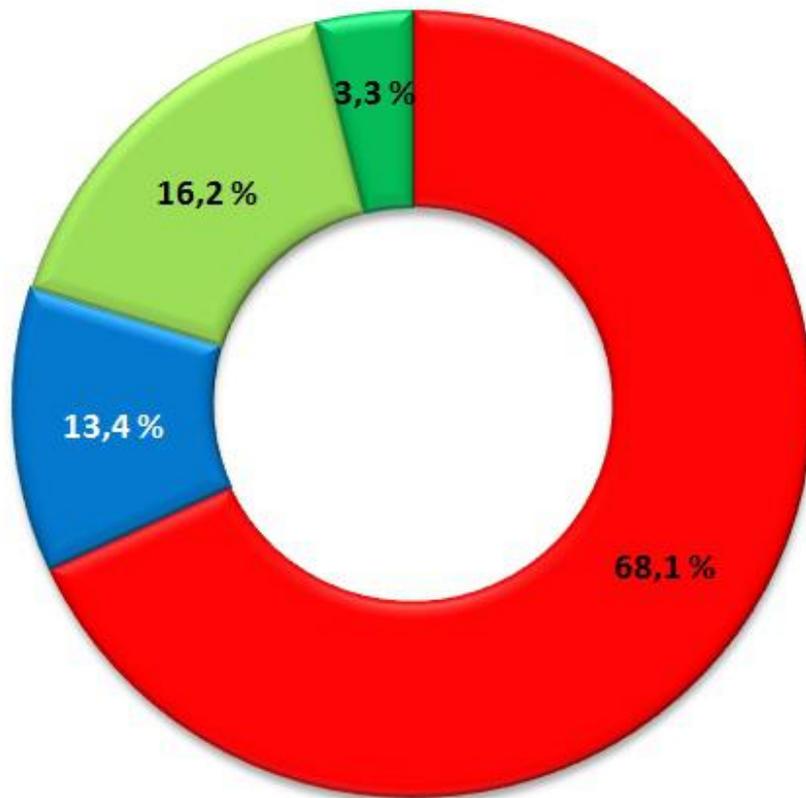
- Diesel
- Essence
- Gaz naturel (25% de CO₂ en moins)
→ *production de CO₂*
- Carburants alternatifs produits à partir de biomasse ou de CO₂+H₂ (**neutres en CO₂**)
- Hydrogène pur (**zéro CO₂**)

Electricité et production de CO2

En fonction de la méthode de production d'électricité, on a plus ou moins d'émissions de CO2.

Sources d'énergies pour la production mondiale d'électricité

Production mondiale d'électricité en 2011
(Source: AIE)



■ Energies carbonées (charbon, gaz, pétrole)

■ Energie nucléaire

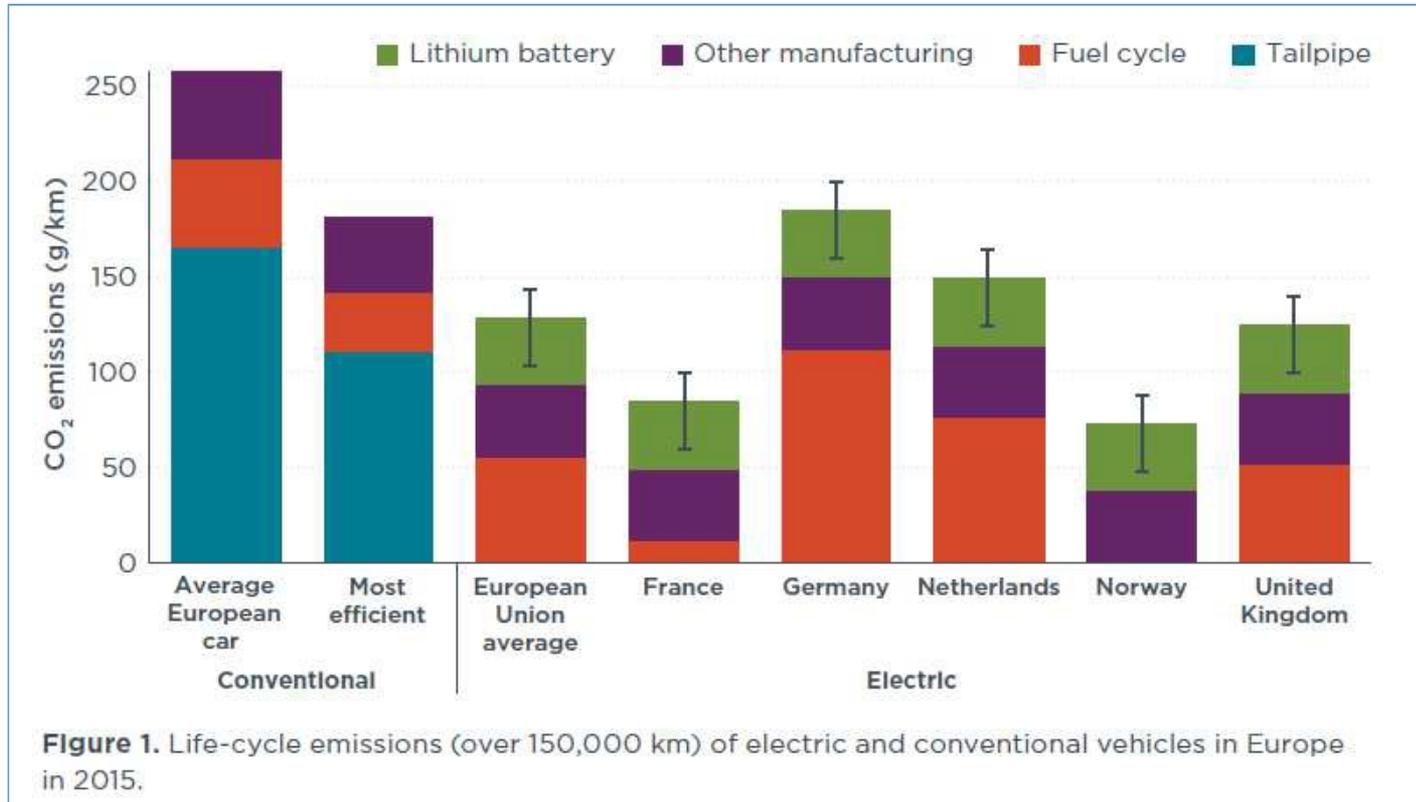
■ Energie hydraulique

■ Energies renouvelables

**Energies fossiles 68%
dont charbon 40% !**

Et renouvelable 3.3%...

Gain des émissions de CO₂ : véhicules électrifiés



Impact de la manufacture mais surtout du mix énergétique de chaque pays...

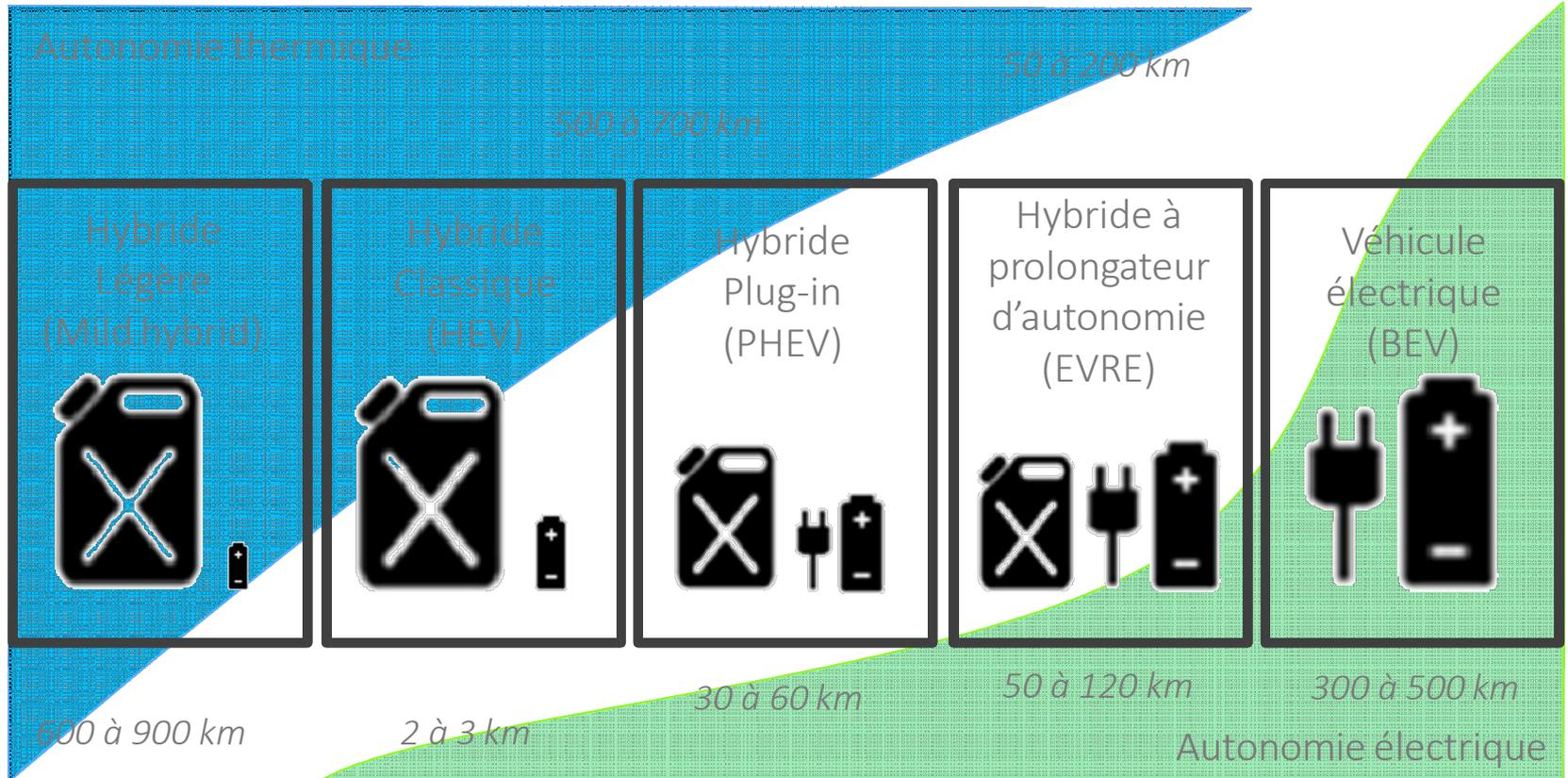
Conséquences

Plusieurs technologies avec des avantages et des inconvénients.

Chaque marché aura ses technologies les plus adaptées.

Idem qu'au début du 20^{ème} siècle

Les véhicules hybrides

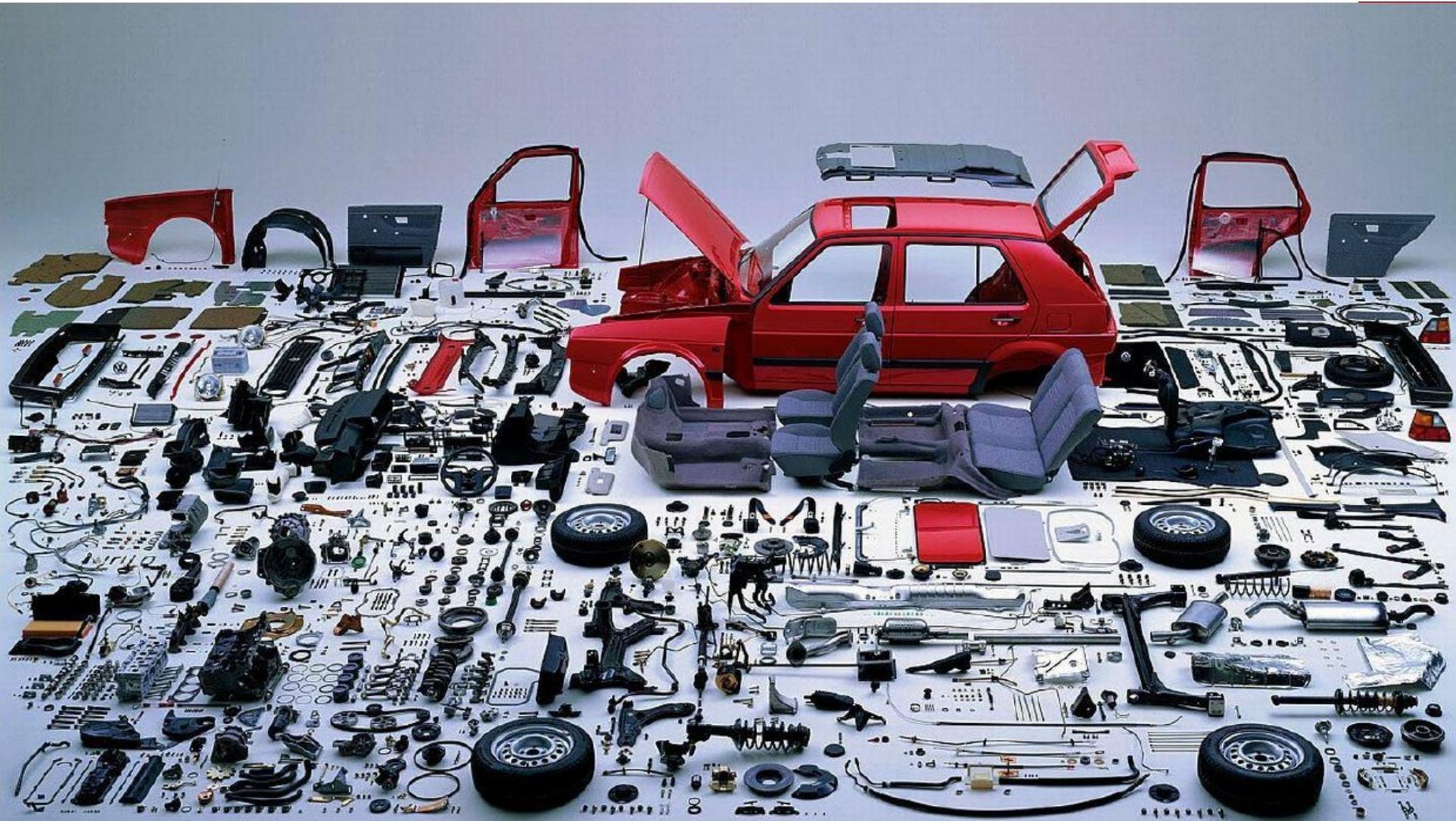


 Puissance thermique d'appoint
 Puissance thermique prédominante

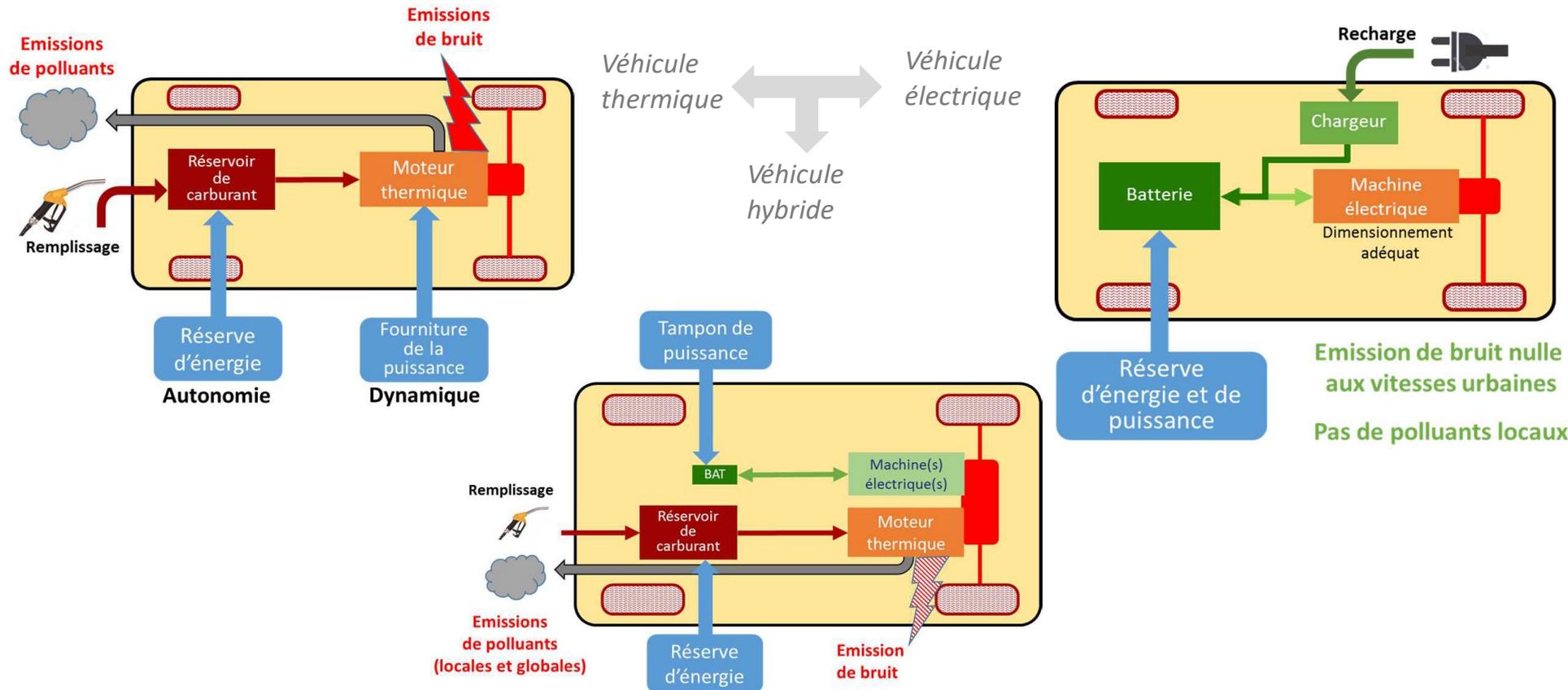
 Puissance électrique d'appoint
 Puissance électrique prédominante

 Rechargeable sur secteur

Qu'est-ce qui change ?



Evolution des motorisations thermiques à électriques ou hybrides



Regulation des émissions : un enjeu sociétal

Les villes allemandes ont le droit d'interdire les véhicules diesel

EUROPE > ÉCONOMIE > ALLEMAGNE > COURRIER INTERNATIONAL - PARIS

Publié le 27/02/2018 - 17:47



Directement concernées par ce jugement rendu en dernière instance, Stuttgart et Düsseldorf pourraient être les premières à instaurer cette interdiction – à partir du 1^{er} septembre 2019, au plus tôt, dans la capitale du Bade-Wurtemberg pour les véhicules de norme Euro 5 (commercialisés jusqu'en 2015). Mais la décision ouvre de fait la voie à ce que toutes les villes allemandes qui dépassent les seuils autorisés de pollution de l'air bannissent les moteurs diesel les plus anciens. Il pourrait cependant y avoir des exemptions, pour les artisans par exemple.

Asphyxiée, Londres accélère sa lutte contre les voitures

Le péage urbain du centre-ville passe à 24 euros pour les véhicules les plus polluants, avant une extension à toute la ville en 2021.

LE MONDE | 23.10.2017 à 06h39 • Mis à jour le 23.10.2017 à 11h11 |

Par **Eric Albert** (Londres, correspondance)

Lundi 23 octobre, la première de ses grandes mesures entre en vigueur. Le péage urbain du centre-ville va doubler de prix pour les voitures les plus polluantes. Créé en 2003 pour réduire les embouteillages, il s'élève actuellement à 11,50 livres (13 euros) par jour pour tous les véhicules qui entrent dans cette zone. A cette somme viendra désormais s'ajouter une

Pollution : Paris ne veut plus de voitures à essence dans ses rues d'ici à 2030

Cet objectif du plan climat de la Ville doit être débattu au Conseil de Paris en novembre. La maire Anne Hidalgo avait déjà annoncé la fin du diesel pour 2024.

LE MONDE | 12.10.2017 à 09h56 • Mis à jour le 13.10.2017 à 06h46 |

Par **Stéphane Mandard**

Rome programme à son tour la fin du diesel

© 28/02/2018 à 13h26

A partir de 2024, les automobilistes roulant au diesel n'auront plus droit de circuler dans le cœur historique capitale de l'Italie, a annoncé Virginia Raggi, la maire de la capitale italienne.

Regulation des émissions : un enjeu sociétal

L'ambitieux pari indien d'un parc automobile 100% électrique

Par Sébastien Farcis

Publié le 15-07-2017 • Modifié le 15-07-2017 à 15:59



D'ici à 2030, plus aucune voiture à essence ne devrait être vendue en Inde.

Vipin Kumar/Hindustan Times

Il y a deux semaines, le ministre français de l'environnement Nicolas Hulot annonçait la fin de la vente des véhicules à essence d'ici à 2040, pour les remplacer par des véhicules électriques et prenait comme exemple un autre pays engagé dans la même direction : l'Inde. New Delhi a en effet répété son intention d'aller encore plus vite : d'ici à 2030, plus aucune voiture à essence ne devrait être vendue dans le pays, si l'on en croit les autorités. Un pari qui s'avère toutefois très difficile à tenir.

Le ministre de l'environnement a répété deux fois en un an cet engagement : d'ici à 2030, plus aucune voiture à essence ne sera vendue en Inde. Seulement des véhicules électriques. Le gouvernement a l'intention de subventionner le secteur pendant deux ou trois ans, après quoi il espère que le marché prendra le relais : les experts considèrent en effet que le prix des batteries devrait rapidement chuter pour rendre ces véhicules électriques aussi abordables, voire moins chers que ceux à essence.

L'objectif de cette révolution est d'abord de réduire **la pollution atmosphérique** dans un pays qui compte 12 des 20 villes les plus polluées du monde, ce qui entraîne la mort de près de deux millions de personnes chaque année. Ainsi que de lutter contre le réchauffement climatique et de diminuer la facture de pétrole : l'Inde est aujourd'hui le troisième importateur de brut au monde.



Haute école d'ingénierie et d'architecture Fribourg
Hochschule für Technik und Architektur Freiburg

La Chine songe à son tour à interdire les voitures à essence ou diesel

Par [Iatribune.fr](#) | 11/09/2017, 8:50 | 469 mots



Le régime communiste a entrepris de sabrer les incitations pour les consommateurs sur les véhicules à moteur thermique, et veut désormais forcer la main aux constructeurs. (Crédits : Mike Blake)

Pékin se dit prêt à emboîter le pas à la France et au Royaume-Uni, qui ont récemment fait part de leur intention d'interdire la vente des voitures diesel ou essence sur leurs marchés d'ici à 2040. Quel que soit le calendrier envisagé par les autorités chinoises, le défi à relever s'annonce herculéen: 28 millions de véhicules (dont 24,38 millions de voitures individuelles) ont été vendus l'an dernier en Chine, en hausse de 14%.

LE ZOOM DE LA RÉDACTION

mardi 3 octobre 2017

Chine : la voiture électrique ou l'asphyxie

4 minutes



En Chine, en 2016, 28 millions de voitures ont été vendues. Le gouvernement veut donc imposer des quotas de véhicules électriques, faute de quoi le pays risquerait l'asphyxie.



Chaque jour, les habitants de Pékin doivent vivre dans un environnement de plus en plus pollué notamment par les très nombreux véhicules qui circulent dans la mégapole. © AFP / GREG BAKER

En Chine, la voiture électrique sera bientôt obligatoire. En effet le pays le plus peuplé du monde, et ses 6 milliards d'individus, est aussi l'un des plus pollués. Il suffit pour s'en convaincre de plonger dans les embouteillages de Pékin, la capitale. En 2016, 28 millions de voitures ont été vendues dans le pays. La Chine, le premier marché mondial de l'automobile, a donc décidé de mettre en place des quotas pour rendre la voiture électrique obligatoire.

Que fait la HEIA-FR ?

- Expérience de différents systèmes (air, terre, mer)
- Expérience véhicule autonomes
- Expérience véhicules électrique / hybrides
- Expérience moteurs à très haut rendement (50%)
- Expérience moteurs à gaz
- Expérience système (sécurité, interdisciplinarité, ingénierie système, compétition)

*Volonté de contribuer à des solutions orientées sur le **développement durable** et en ligne par rapport aux engagements de **Kyoto** et à la **stratégie énergétique 2050**.*

Que fait la HEIA-FR ?

Elle développe des méthodologies pour trouver des solutions fiables à des problèmes difficile...

... et elle expérimente avec les étudiants

Hydrocontest – laboratoire d'innovations maritimes durables

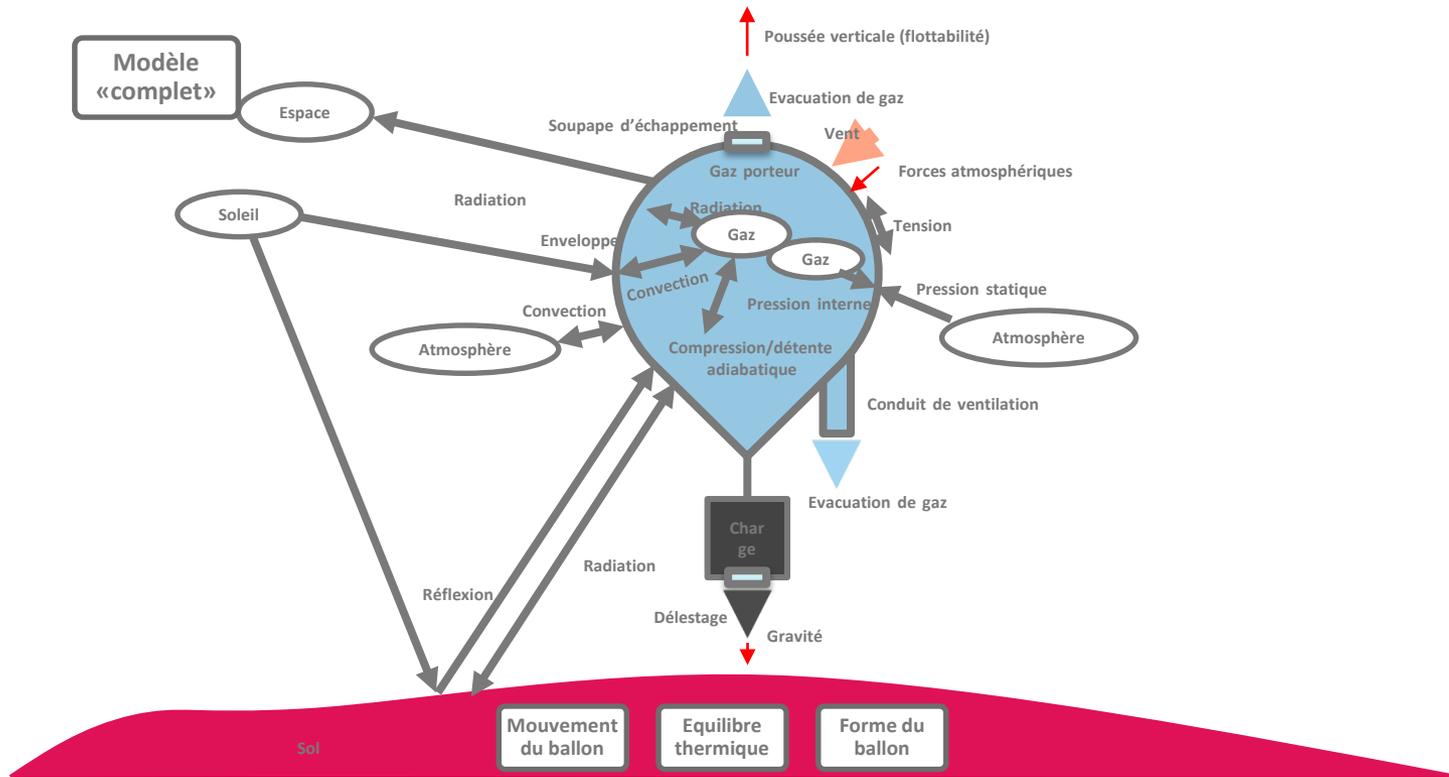


EPFL SwissMoves **hepia**
ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE **Hes-so** VALAIS WALLIS
Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

Victoire au port de Saint Tropez 2018

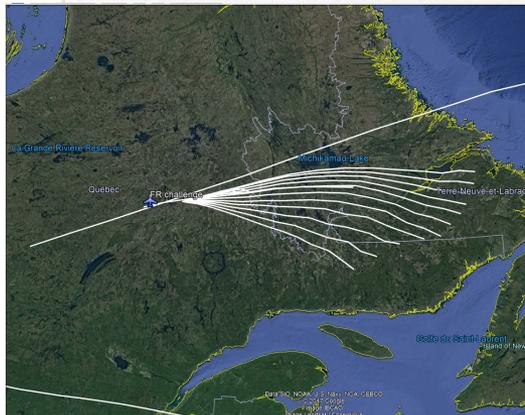


Le ballon et son modèle physique

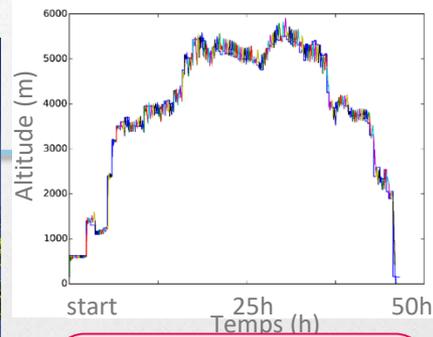


Le ballon et sa trajectoire

prédictions des trajectoires



simulation physique



- échange chaleur
- gas/sable
- météo
- trajectoire

en action



Photo Paul Coppens

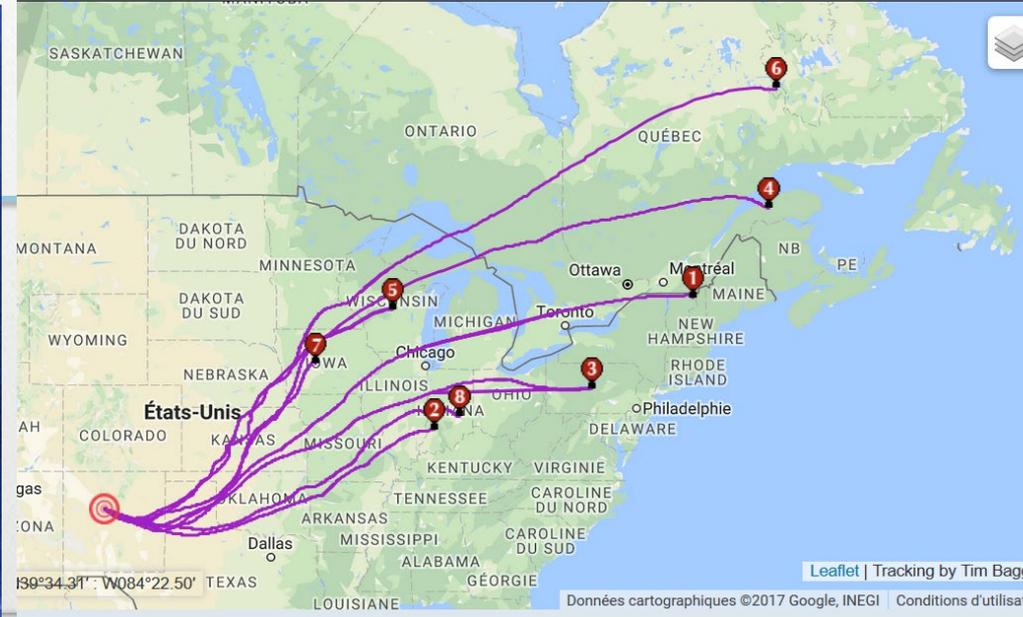
Prof. Richard Baltensperger

Prof. Jean-Luc Robyr

2

4

Record du monde de distance: 3670.76 km



Exemple des portes-conteneurs



diesel-électrique

400 kW

35 tonnes

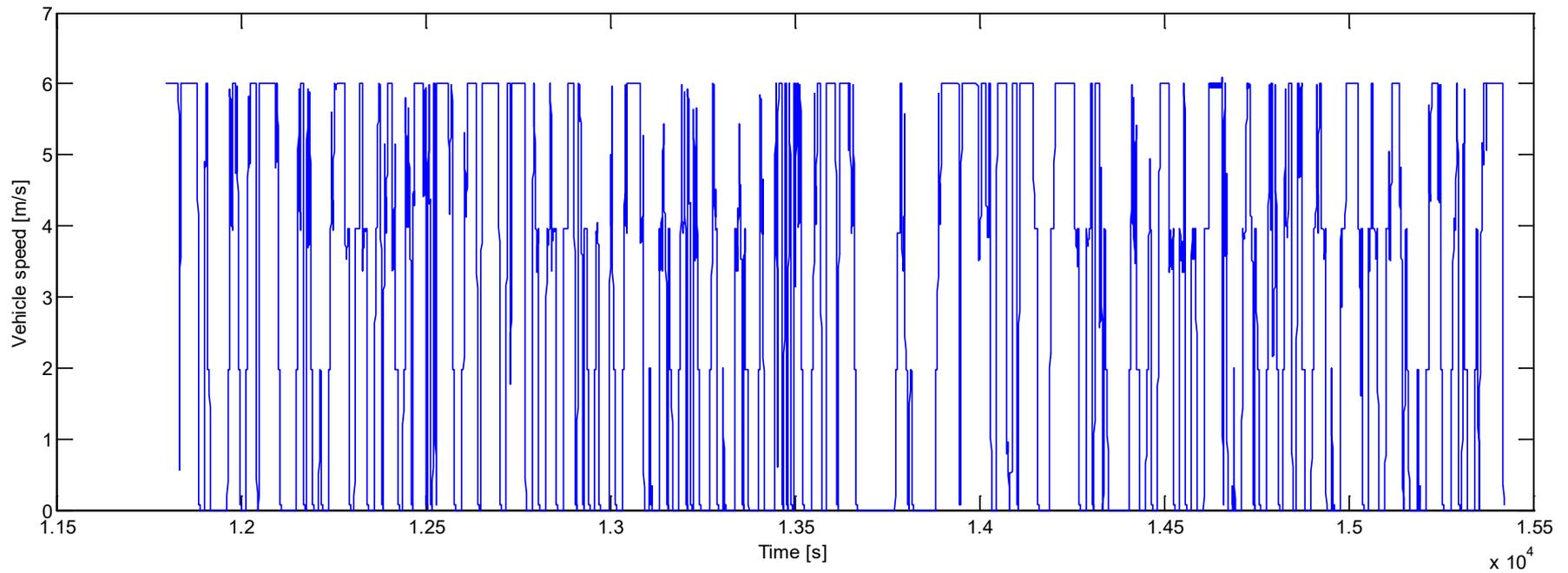
électrique

100 kW

5 tonnes

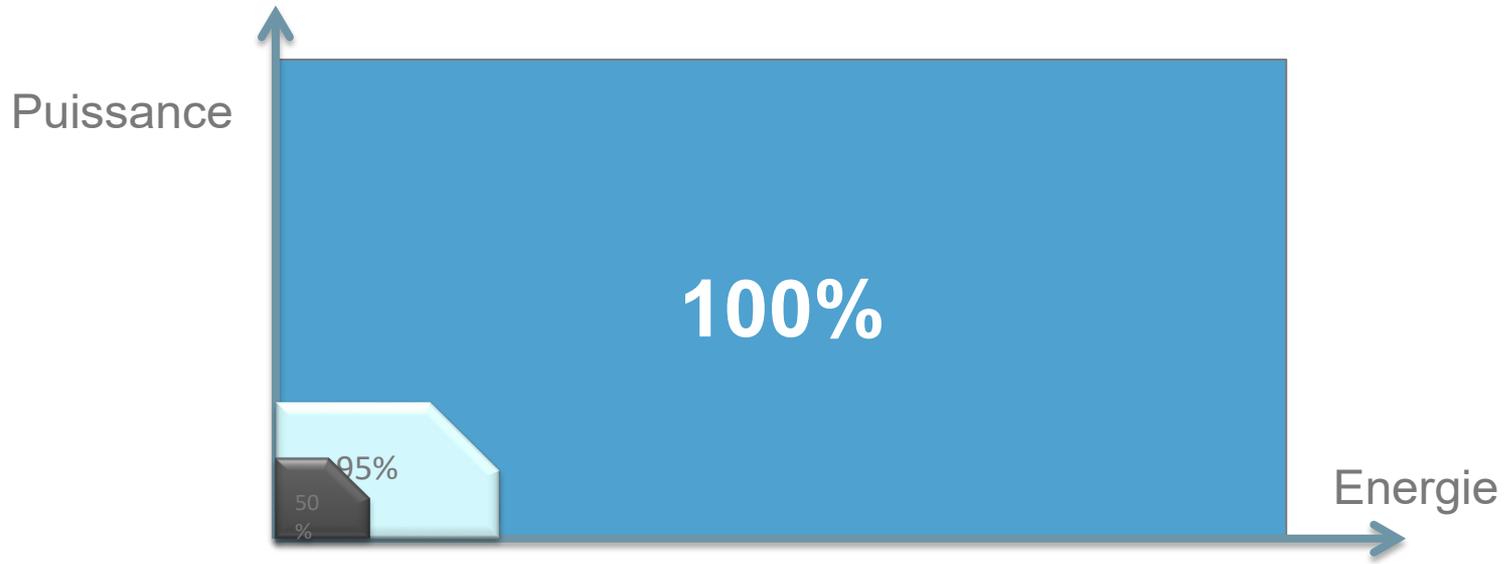


Vitesse en fonction du temps

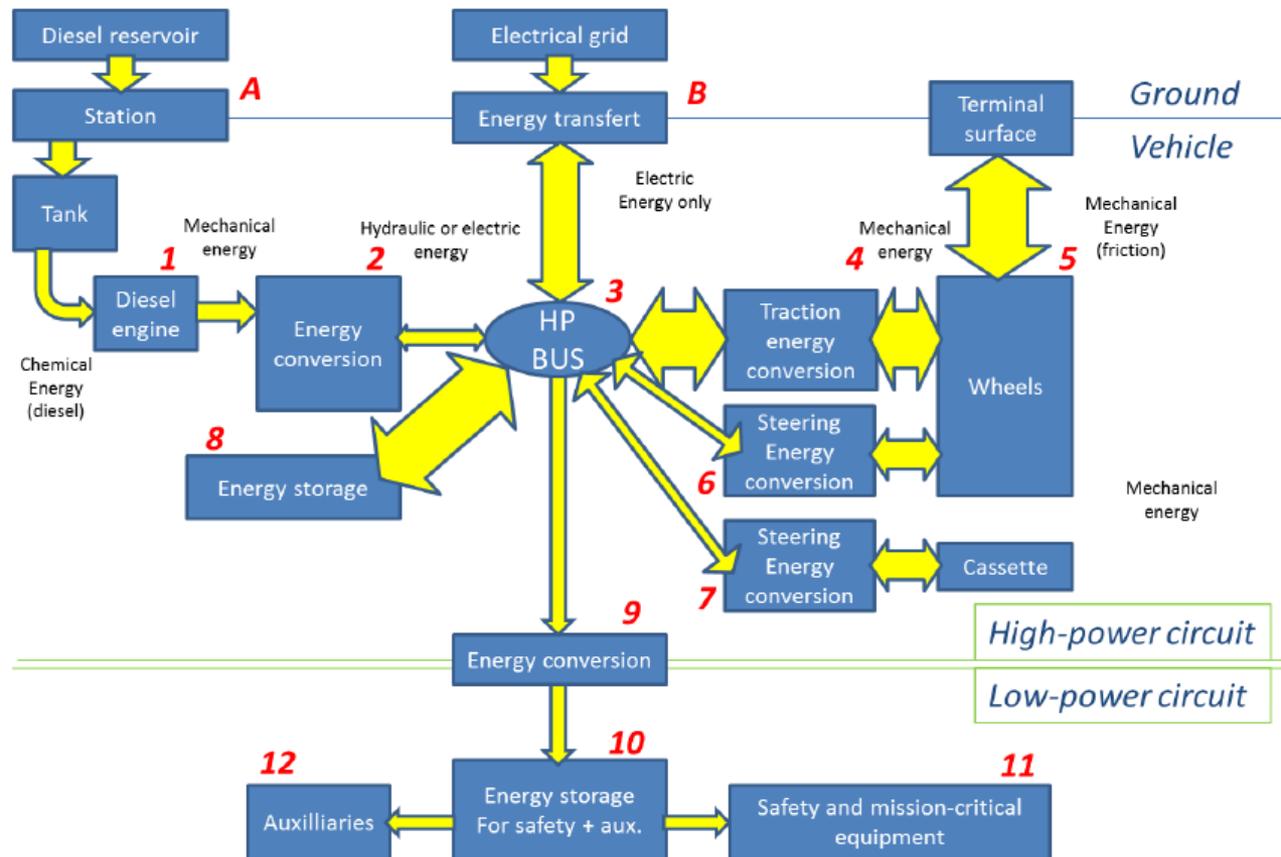


2011-01-31

Energie et puissance



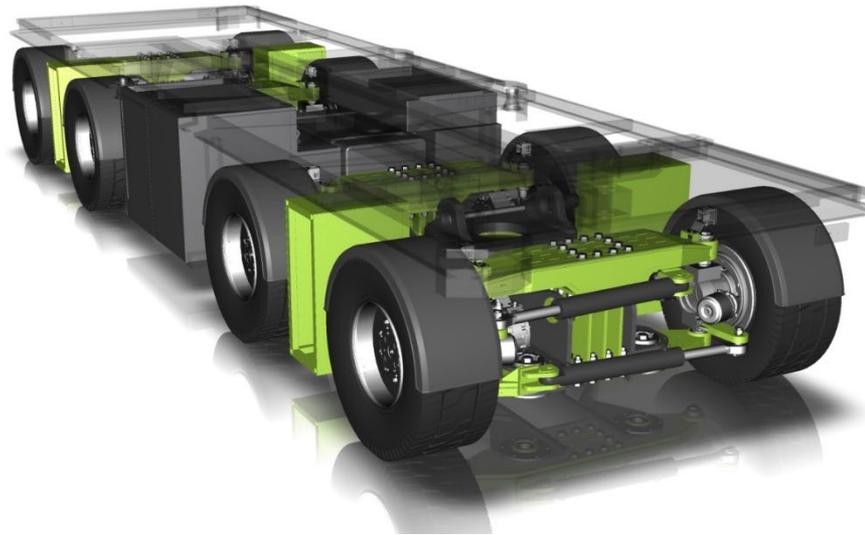
Architecture de puissance



Le système



Le véhicule





[Passion](#)



V10
1989 ▶ 2005



V8
2006 ▶ 2013



2014 : V6



V10
1989 ▶ 2005



V8
2006 ▶ 2013



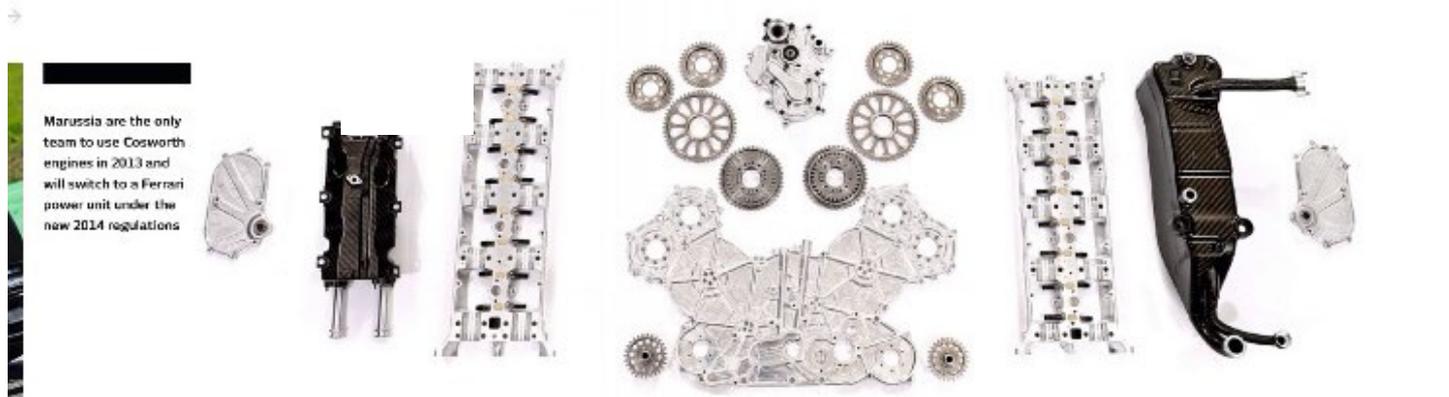
2014 : V6

Puissance moteurs à combustion interne / moteur(s) électrique(s)

V6 turbo :	1000+ ch	-
V10 (3L) :	850 ch	-
V8 (2.4L) :	750 ch	81.6 ch dès 2009 (60kW <u>mais 400kJ/tour</u> →6.67s)
V6 2014 (1.6L)	> 600 ch	163.6 ch (K) & 100+ ch (H)



The parts that make up F1's most high-revving engine to date

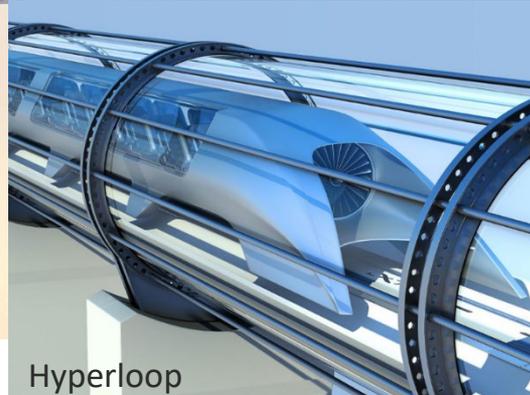
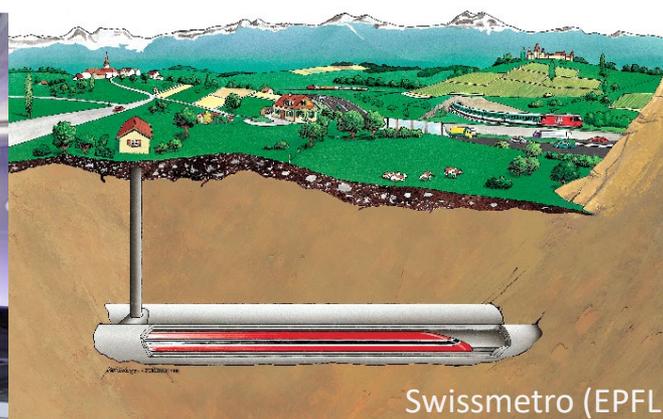


Marussia are the only team to use Cosworth engines in 2013 and will switch to a Ferrari power unit under the new 2014 regulations

Analyse

- Que faire ?

Besoin de nouvelles approches et de nouveaux systèmes en mobilité

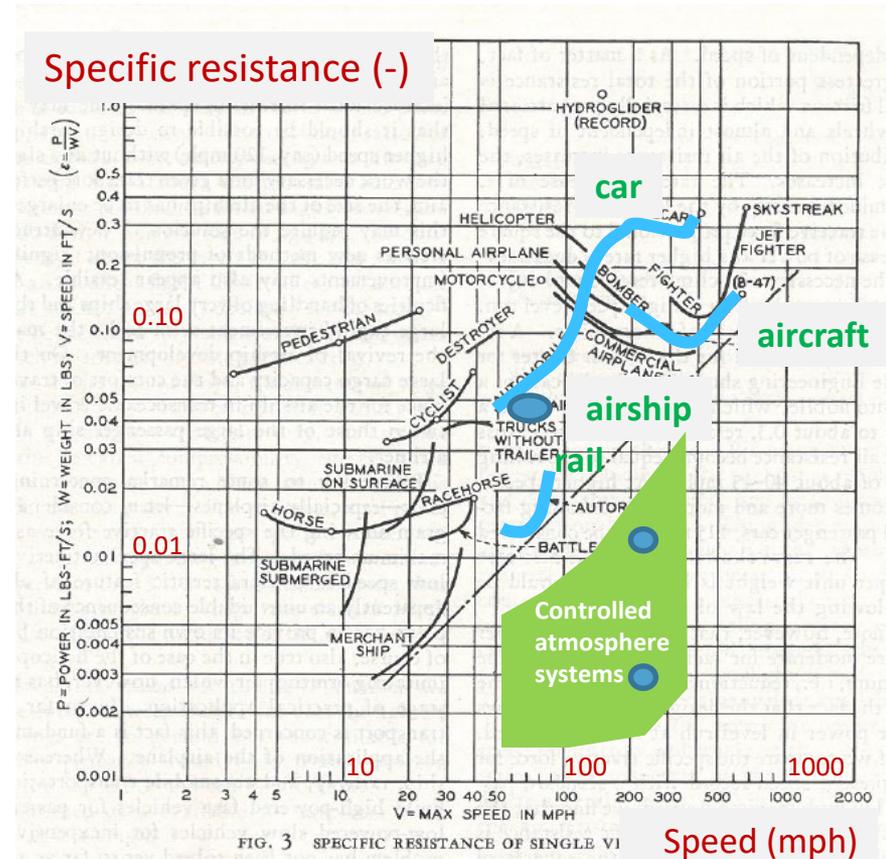
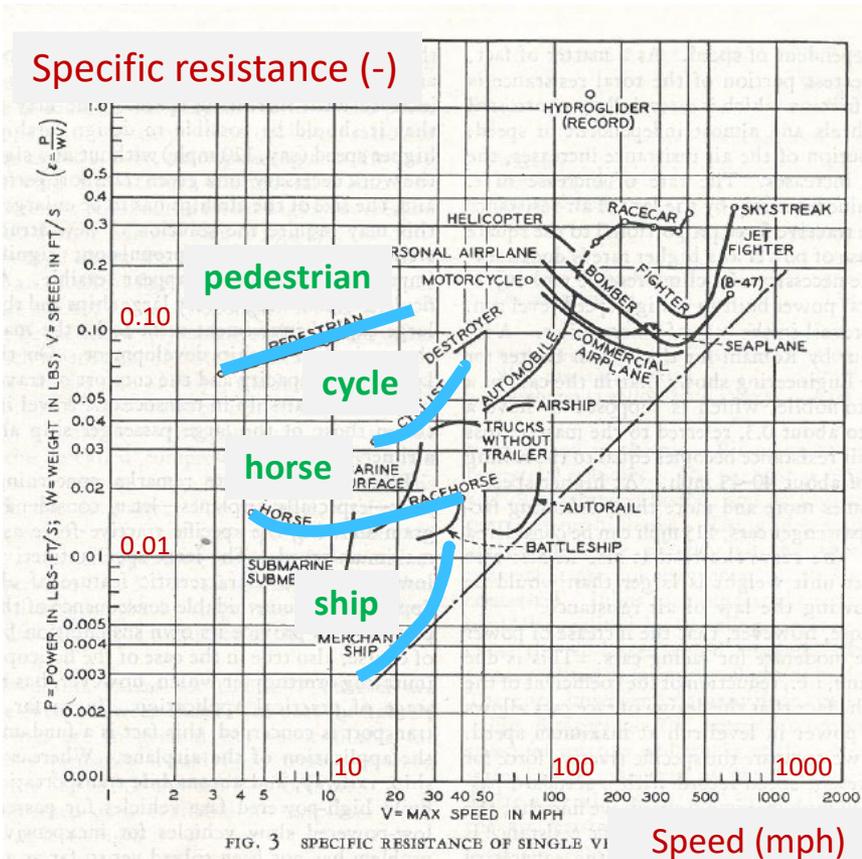


Contexte international: MAGLEV



What price speed ? (energy consumption)

Gabrielli – Von Kàrmàn : ImechE, octobre 1950



Problématique actuelle

- Technologies alternatives actuelles pour ‘sortir’ des énergies fossiles sont :
 - coûteuses
 - volumineuses, lourdes
 - pas toujours fiables
 - difficilement recyclables
- Requièrent utilisation de matières premières qui sont ou deviendront rares (terre rares, Li, Cu,...)
- En plus, la pile à combustible (PAC) requière l’utilisation d’hydrogène pur et doit être maintenue hors gel

Pourquoi le moteur H2?

- Technologie de base déjà bien éprouvée
- Permet la conversion d'un énorme parc de machines avec des investissements faibles, et dans un temps très court
- Rendement à pleine charge peut être meilleur que celui de la PAC
- Se prête bien à une application bus

Utilisation H2 :

- Jusqu'à zéro émission de CO₂
- Permet le stockage d'énergie sur une longue durée

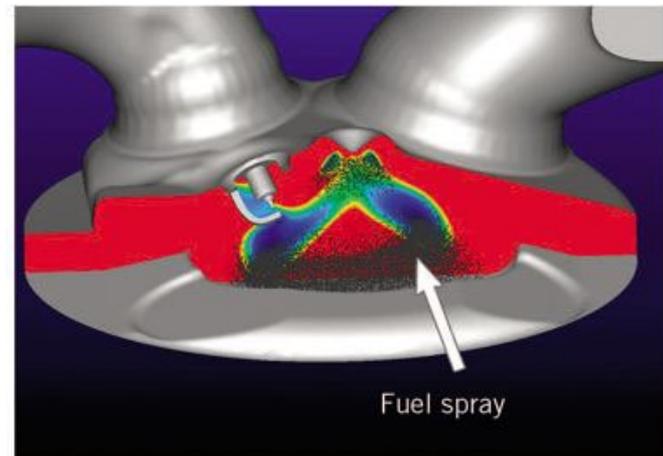


Activités H2ICE HEIA

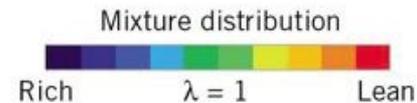
Recherche et développement



Source : Dynaparts



Stratified combustion 2000 rpm; imep = 2 bar



Injection directe stratifiée (essence). Source : Mercedes

Activités H2ICE HEIA

Moto à moteur à combustion à l'hydrogène



Moteur KTM



Moto KTM

Activités H2ICE HEIA

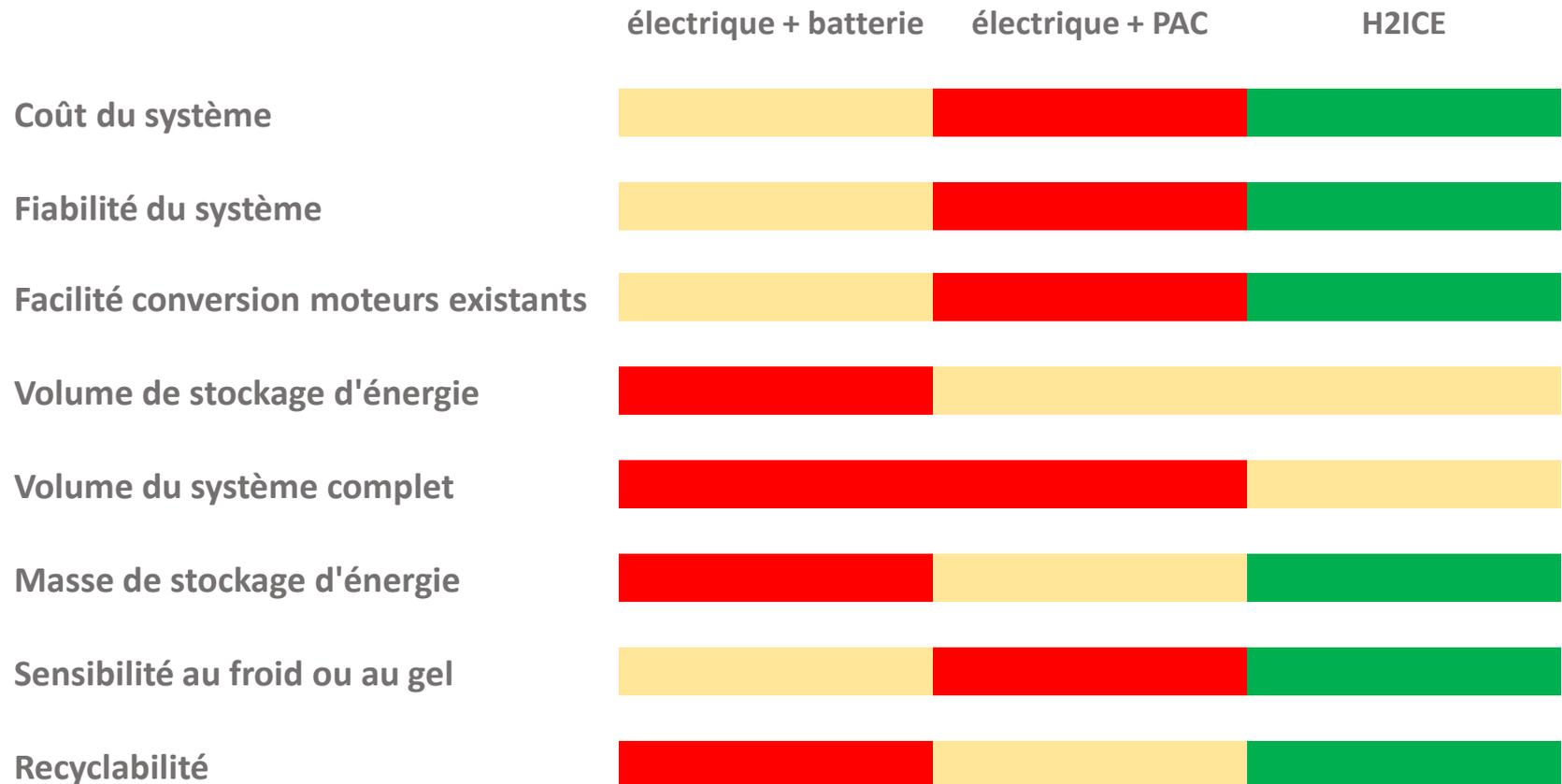
Analyse de l'application des moteurs à combustion à hydrogène sur des flottes de bus.



Bus TPF

Moteur à hydrogène (H2ICE)

- Comparaison H2ICE avec technologies zéro CO2





LA MAITRISE DES PROPRIÉTÉS

Essence:
43.3 MJ / kg

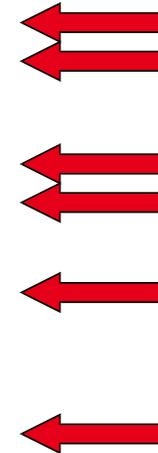
Diesel:
42.6 MJ / kg

Hydrogène:
118 MJ / kg

**Environ un
facteur 3**

Basic Properties of Hydrogen, Methane, and Propane

Gas Properties:	Hydrogen	Methane	Propane
Chemical Formula	H ₂	CH ₄	C ₃ H ₈
Molecular Weight	2.016	16.04	44.097
Gas Density (kg/m ³) @ STP	0.0808	0.643	1.767
Diffusivity (m ² /sec) x 10 ⁵	6.11	1.60	1.00
Combustion Properties:			
Stoichiometric Fuel Volume Fraction %	29.5%	9.48%	4.03%
Lower Heating Value (MJ/m ³)	9.9	32.6	81.2
Lower Heating Value (MJ/kg)	118.8	50.0	46.35
Adiabatic Flame Temperature (K)	2380	2226	2267
Flammability Limits (Volume %)	Lean Limit:	5.3%	2.2%
	Rich Limit:	15%	9.5%
Max. Flame Velocity (m/sec)	3.06	0.39	0.45
Min. Ignition Temperature (K) ¹	845	905	766
Min. Ignition Energy (10 ⁻⁵ J) ¹	2.0	33	30.5
Storage Conditions:			
Tank Type	Cylinder	Cylinder	Barbecue
Volume (liters)	49	49	21
Pressure (psi) ²	34 MPa	17 MPa	1.6 MPa
Phase	Gas	Gas	Liquid
Mass (kg)	1.35	5.36	0.61



¹ At stoichiometric conditions

² Pressure conversions: 5000 psi = 34 MPa; 2500 psi = 17.0 MPa; 240 psi = 1.6 MPa

Source: Robert Schefer, Sandia National Laboratory

DES MARCHES DÉJÀ ACCESSIBLES POUR CERTAINS USAGES INDUSTRIELS

Alcaline

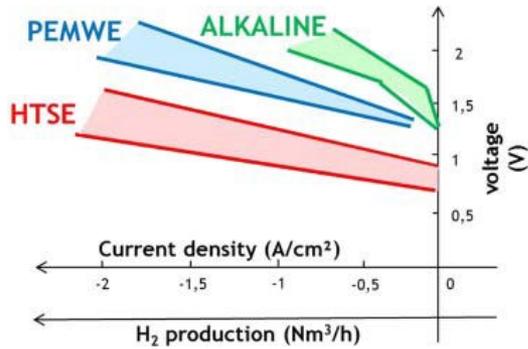
		Duration of operation by year				
		8200 h	5000h		3000h	
Massification of electrolyzers production (MW/year/plant)	CAPEX of electrolyzer system (€/kW)	Electricity price (€/Mwh _e)				
		80	60	40	40	30
1	1000	5,60	3,87	3,32	5,39	4,88
20	750	5,15	3,27	2,71	4,36	3,85
200	500	4,46	2,49	1,97	3,10	2,62
1000	350	3,95	1,93	1,44	2,19	1,75

cost of producing hydrogen today
between 2 and 4,5 €/kg



- **Decarbonization of merchantable hydrogen: medium consumer (500 to 5000T / year)**
Replace a centralized carbon production with truck distribution by on-site production by electrolysis.
- **Decarbonization of highly CO2-emitting industries (recovery of CO2 in methane, e-fuel or other molecule of interest)**
Install electrolyzers on the site of cement works, steel mills, ..., to combine H2 and CO2 (model cementery to territories)

L'ETAPE D'APRES L'ELECTROLYSE HT



CEA Solid Oxide Electrolyzer
HTSE

Rated electrical Power – 6 kW
 Load variation – 0% - 100%
 Electrical efficiency (HHV) – **85%**
 Specific electric Power – 3,5 kWh/Nm³
 H₂ Production – 2 Nm³/h
 H₂ pressure – 3 bar

cost of producing hydrogen in 2030
between 1 and 1,5 €/kg

Massification of electrolyzers production (MW/year/plant)	CAPEX of electrolyzer system (€/kW)	Duration of operation by year			Electricity price (€/Mwh _{el})				
		8200 h	5000h	3000h	80	60	40	40	30
1	4000	10,03	12,87	12,48	15,47	15,08			
20	1500	4,59	4,15	3,78	4,82	4,45			
200	1000	3,91	3,02	2,66	3,23	2,87			
1000	400	3,06	1,49	1,14	1,32	0,97			

Bancs d'essais

- Intégration en cours de 2 bancs d'essais
- Puissance jusqu'à 400kW (compatible 6cyl. LMB)
- Possibilité d'intégrer un monocylindre
→ à anticiper (travaux supplémentaires)
- Possibilité d'intégrer une alimentation en carburants gazeux (gaz naturel, H2)
- Gestion de la sécurité et des modifications au bâtiment.

Impact sur les bâtiments

H2:

- Analyse de sécurité
- Ventilation
- Détection et gestion des fuites

Batteries:

- Manipulation
- Thermique / incendie
- Electrocutation / soudage

Impact sur le savoir-faire

- Développement de compétences spécifiques pour comprendre et gérer les nouvelles technologies.
- Rôle important des écoles d'ingénieurs et des écoles techniques pour profiter des premières expériences et développer des formations pour partager.

Next steps

- Réflexions sur les opportunités de développement.
- Recherche de partenariats pour la mise en œuvre des solutions développées.

- Merci de votre attention

Contacts

Vincent Bourquin

Head of SeSi Institute

vincent.bourquin@hefr.ch

christian.nellen@hefr.ch

+41 26 429 68 41

Christian Nellen

Head of Powertrain R&D

+41 26 429 68 46

Haute école d'Ingénierie et d'Architecture

Hochschule für Technik und Architektur

Fribourg

