

GROUPE DE REFLEXION

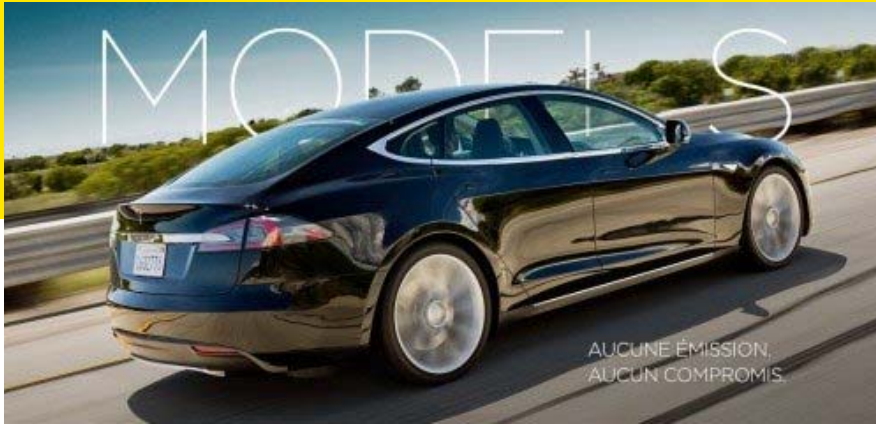
Idées

Quel carburant pour demain ?

Batteries ou pile à combustible ?

Séminaire
lundi 15 avril 2019
Fondation Tück Rueil-Malmaison





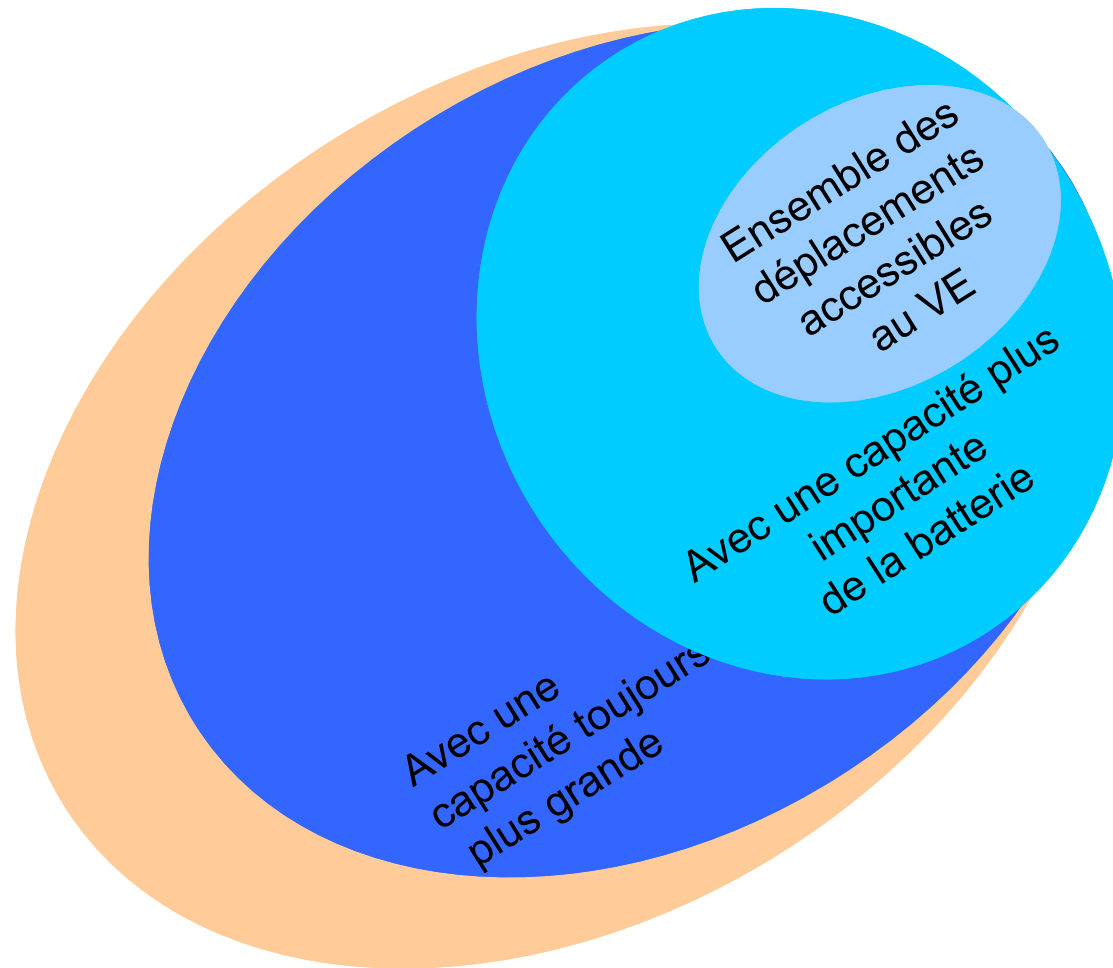
Aspects macro énergétiques à prendre en compte lors du choix d'un vecteur pour les transports terrestres : électricité ou hydrogène

Gilbert Cazenobe
Chef de projet
Orano projets
St-Quentin-en-Yvelines

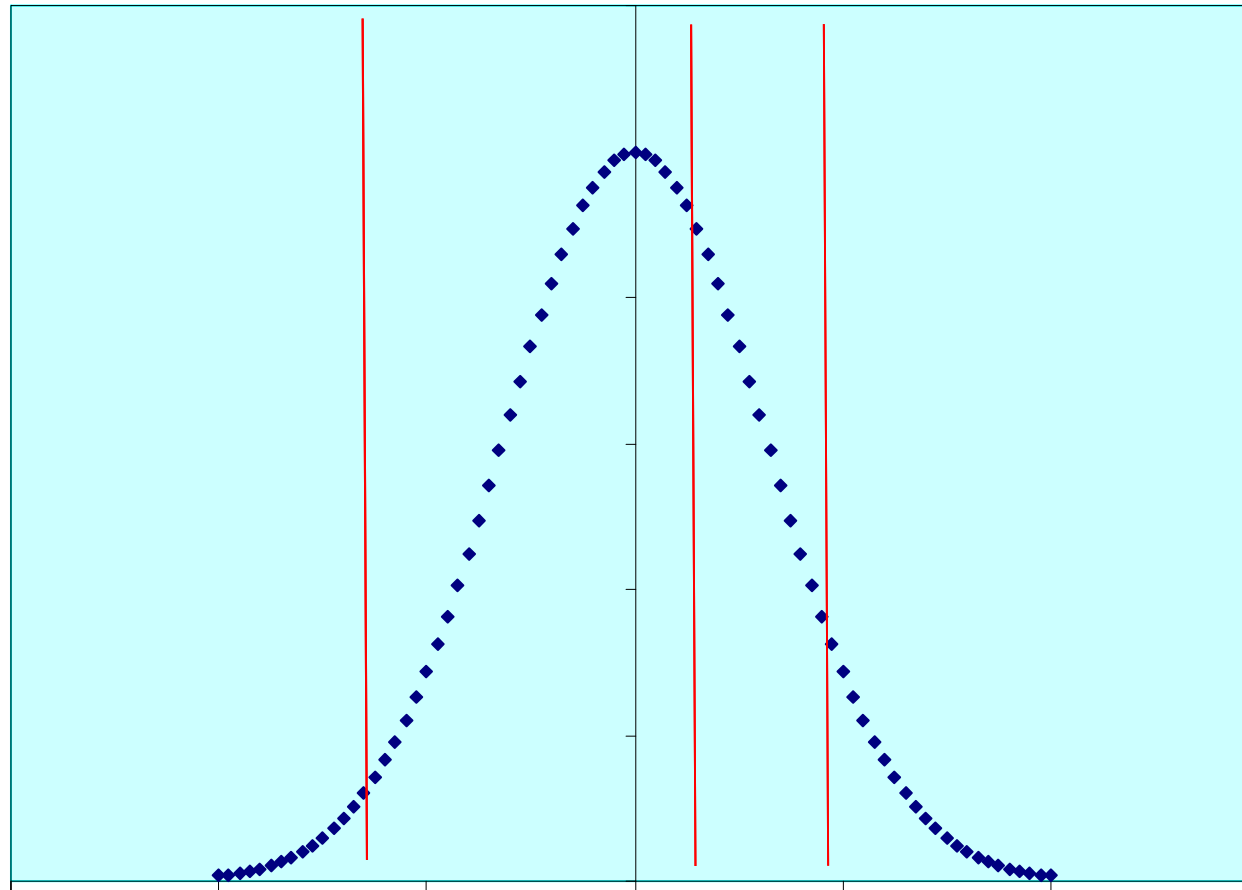


Château de Vert-Mont
Rueil Malmaison
15/04/2019

Ensemble des déplacements observés présentation par surface



Ensemble des déplacements observés présentation par simili gaussienne



Proximité (déplacement < 100km)

entre 1/2 et 2/3

entre 6500 et 9000 km/an

Longs parcours (déplacement > 100km) entre 1/2 et 1/3

entre 6500 et 4500 km/an



Consommation d'un VE

Concours des fiacres de 1898 :
110 Wh/t.km mesurés

Tout a changé S , C_x , kg/t, V_m et V_{max} , γ

Sauf ...

**les 110 Wh/t.km
qui demeurent !**

Dans un raisonnement par l'absurde ...

Deux coups de baguette magique

Une batterie miracle assurant la même autonomie que le VT

Une capacité de production infinie des usines d'assemblages de VE

Consommation du parc français

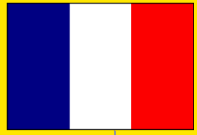
Un exemple bien documenté (2012 ~ 2019)

type	millions	tonnes	km/an	km	Wh/km	Wh	TWh
	véhicules	masse du VE	par VT	par type	consommation	par type	à produire
VP	30,7	2	13 000	3,99E+11	220	8,78E+13	98
VUL	5,7	2,5	16 400	9,35E+10	275	2,57E+13	29
<12t	0,09	10	50 100	4,51E+09	1 155	5,21E+12	6
<20t	0,48	20	50 100	2,40E+10	2 200	5,29E+13	59
bus/cars	0,083	17	32 000	2,66E+09	1 870	4,97E+12	6
Totaux	37,053					177E+12	198

rendement chargeur 0,92

rendement réseau 0,97





Gaz carbonique émis lors de la génération d'électricité

Systeme énergétique français

75 g de CO₂/kWh



Gaz carbonique émis lors de l'utilisation d'un VE

On multiplie ces données
 $75 \text{ g CO}_2/\text{kWh} \times 220 \text{ Wh/km} / 0,92 \times 0,93$

20 g de CO₂/km

Contre 128 g de CO₂/km des VT neufs de 2011



Parc roulant (2010-2012)

Deux types de véhicules raisonnablement accessibles à l'électrification

VP **31,5 MVT** **13 000 km/an** (Source : INRETS)

VUL **3,8 MVT** **16 400 km/an** (Source : INRETS)



A l'échelle du parc roulant (2010-2012)

Deux valeurs issues de la Σ , dans l'hypothèse « absurde » où les 31,5 MVP et 3,8 MVUL seraient remplacés par des VE

**Energie consommée (incluant les pertes)
127 TWh, 23% des 550 TWh produits en 2018**

**GAES émis au niveau des actifs de production
9,6 Mt de CO₂**



Conséquences à l'échelle du parc roulant (2010-2012)

En énergie

Avec, entre 30 et 60 TWh de manque à produire

La quasi-totalité des déplacements de proximité (<100 km) serait possible

Les batteries pour ces distances existent

Les usines de production de ces batteries sont en cours de construction

En puissance ... extrême prudence ...

La charge d'un VE nécessite 3 kW

La charge simultanée de 1 MVE = 3 GW

La charge de plusieurs MVE nécessite plusieurs dizaines de GW

Un minimum d'intelligence est requis à chaque niveau:

- **Véhicule**
- **Réseau local et distribution (transformateur commun)**
- **RTE**

pour profiter du foisonnement et des prévisions à court terme



Données de base pour l'utilisation du dihydrogène à bord de VE (à PàC)

Schéma général

Préparation du dihydrogène

Eau → Dihydrogène → Transport-Stockage- Distribution →
Préparation Electrolyseur Compresseurs Citernes Réservoirs
Pompes de distribution

A bord du VE

Dihydrogène → Eau

Réservoir embarqué Pile à combustible Batterie Electroniques Moteur

Remarques:

☺ **On ne transporte ni l'oxygène (couplage par l'atmosphère), ni l'eau produite**

☹ **Fuites diverses du dihydrogène à toutes les étapes !**



Un peu d'(électro)chimie et d'énergétique 1/3

Elaboration du dihydrogène par électrolyse



18 g d'eau avec 2 faradays (53,6 Ah) donnent 2 g de dihydrogène
 $E_{\text{th}} = 1,23 \text{ V}$ donc au mieux (sans perte aucune) 33 kWh/kg H_2

U constatée $\sim 2\text{V}$; 2% pertes en gaz donc 55 kWh/ kg réalistes
(souvent plus)

Compression du dihydrogène

Ses points triple et critique sont ainsi placés, que comprimé à 700 bars le dihydrogène reste gazeux.

Cette opération requiert 20% de l'énergie contenue 33 kWh/kg H_2
donc l'énergie dépensée passe à 61,3 kWh/kg



Un peu d'(électro)chimie et d'énergétique 2/3

Utilisation du dihydrogène à bord du VE



dans une pile à combustible (R&D de 1837 à nos jours)

Le platine divisé est utilisé pour les électrodes

2 g de dihydrogène donnent 18 g d'eau et 2 faradays (53,6 Ah)

$E_{th} = 1,23 \text{ V}$ donc au mieux (sans perte aucune) 33 kWh/kg H_2

U constatée ~ 0,84 V; 2% pertes dues au compresseur d'air

On obtiendra donc en réalité 22 kWh/kg

Consommation constatée 1 kg/100km pour les taxis

Hype ce qui donne bien les 220 Wh/km attendus



Un peu d'(électro)chimie et d'énergétique 3/3

Bilan global

Pour élaborer un kg de dihydrogène et le comprimer à 700 bars on aura dépensé 61,3 kWh là où sont les installations et 63 kWh à la centrale électrique.

Ce kg de dihydrogène nous aura permis de parcourir 100 km.

Donc la consommation électrique de notre VE à PAC sera de

630 Wh/km.....

À comparer aux **247 Wh/km** d'un VE à batteries équivalent

Soit 2,6 fois plus

Pétrole et G€

72,4 Mt d'hydrocarbures utilisées en France

(Source : MTES, 2019 pour 2017)

Hydrocarbures consommés pour les déplacements routiers (2017) : 44,3 Mt

Dont \approx 26,4 Mt pour VP + VUL (périmètre de l'analyse)

Dont, entre 13,2 et 17,6 Mt pour les déplacements de proximité

Balance des hydrocarbures importés : \approx 80,5 G€

Dont \approx 61 G€ pour les 44,3 Mt des déplacements routiers

Dont \approx 41 G€ pour les 26,4 Mt des VP + VUL

Dont, entre 20 et 27 G€ pour les déplacements de proximité

... une dépense annuelle à comparer avec les investissements nécessaires à déployer le VE

Le dihydrogène est très intéressant pour les poids lourds, les avions et les bateaux

Cahier des charges pour décarboner ces moyens de transport:

- En France 27,4 Mt de pétrole leur sont consacrés trains (1,4), PL (16,4), bateaux tout type (3,1), avions (6,5)
- Les distances parcourues d'une seule traite sont considérables
- Leur nombre est restreint: on peut utiliser du platine dont les réserves sont très limitées
- Ils sont utilisés presque en permanence (95 % du temps): les fuites n'ont pas de conséquences économiques
- La masse des matières actives qu'il faudrait emporter dans une batterie est largement supérieure à celle du dihydrogène

Pourquoi le dihydrogène est-il plutôt intéressant pour les poids lourds, les avions et les bateaux ?

- Le générateur électrochimique doit emporter une énergie considérable car la durée de la mission se compte en dizaines, voire centaines d'heures
- Mais sa puissance est raisonnable 200 kW pour les VI, 1MW pour les pousseurs fluviaux, quelques MW trains, jusqu'à quelques dizaines de MW pour les navires de haute mer et pour les avions (70 pour un B747)
- Une batterie devra emporter toutes les matières actives et sa masse réelle sera (donnée d'expérience) comme $2 \times K \times Wh$
- Une pile à combustible se compose:
 - de la pile elle-même et ses accessoires dont la masse est proportionnelle à la puissance et non à l'énergie, kP
 - D'une réserve de dihydrogène dont la masse est due à l'hydrogène et qui est proportionnelle à l'énergie nécessaire avec un coefficient très faible
22 kWh/kg soit 45,3 kg/MWh (k')
- La masse totale sera donc comme $k \times P + k' \times Wh$ et sera $< 2 \times K \times Wh$

Un exemple: Autocars – Autobus

100 000 autobus et autocars en France

Leur masse est de 17 t de moyenne

Ils parcourent 32 000 km/an

Soit 2,72 milliards de km/an

Avec une consommation de 1870 Wh/km (110 x 17),

On aurait 5 TWh annuels à trouver pour alimenter leurs batteries

Cette consommation n'est pas impactante pour le système électrique français (550 TWh produits)

S'ils fonctionnaient à l'hydrogène il faudrait 14,5 TWh, ce qui reste acceptable

Cet exemple est à la frontière des deux mondes

Exemple Boeing 747

Masse au décollage:	334 à 440 t
Distance parcourue:	de 9 800 à 14 815 km
Masse de kérosène emportée:	147 à 193 t
P des 4 moteurs totale:	220 à 300 MW maximale
P des 4 moteurs totale:	56 à 70 MW croisière
Masse de la PAC:	56 à 70 t (~ 4 000 t pour Li-ion)
Masse des moteurs:	15 à 18 t
Masse de l'électronique:	70 t
Masse du dihydrogène:	34 à 45 t
Masse système électrique:	175 à 200 t



Bilans environnementaux et économiques pour le pays et les entités économiques

▶ **GAES**



▶ **Efficacité énergétique**



▶ **Etat**

◆ Taxes



◆ Indépendance aux énergies fossiles



◆ Facture énergétique



▶ **Constructeurs**



▶ **Compagnies d'électricité**



▶ **Pétroliers**



▶ **Entreprises**



▶ **Ménages**





Conclusions

- ▶ Même si :
 - ◆ La réduction des importations de carburant fossile et des émissions de GAES (mais aussi des NO_x ou SO₂ ou particules)
 - ◆ L'amélioration de l'efficacité énergétique devraient inciter au changement
- ▶ Les contraintes, les réticences, l'immobilisme face au changement restent nombreux :
 - ◆ Des capacités de production des usines limitées
 - ◆ Une nécessité pour l'Etat de s'adapter
 - ◆ Une inquiétude des opérateurs de réseau et des électriciens quant à la gestion de la pointe de recharge
 - ◆ Une réduction importante du marché des pétroliers
 - ◆ Une relative indifférence des entreprises et des ménages

**La transition vers le VE sera et ...
devra être longue**

Mono et bi-motorisation

Les déplacements de proximité et de longue distance sont assurés par un seul et unique véhicule, en général (seuls 10 millions de ménages possèdent 2 véhicules ou plus (données CCFA 2009)!)

Des solutions pour contourner la mono-motorisation des ménages et des petites entreprises, pour les longues distances :

Autopartage	Réduit les émissions par voyageur
Train ou avion	Enfants, animaux, bagages, outils
Location de véhicules	Procédurière et heures d'ouverture
Tender avec MT	Bientôt disponible
Etapes en VE	Les chargeurs très rapides existent
VE attribués aux employés	Nécessite l'implication des entreprises