



# L'hydrogène, nouveau vecteur énergétique

Alexandre Closset

Société Suisse pour l'Energie Solaire, 17 mai 2021



# Agenda

- Motivations et contexte énergétique
- L'hydrogène comme nouveau vecteur énergétique
- Exemples d'intégration de la technologie hydrogène par la société Swiss Hydrogen
- Vision stratégique pour la Suisse

# Motivations

## Global earth warming



⇒ CO<sub>2</sub>-Reduction

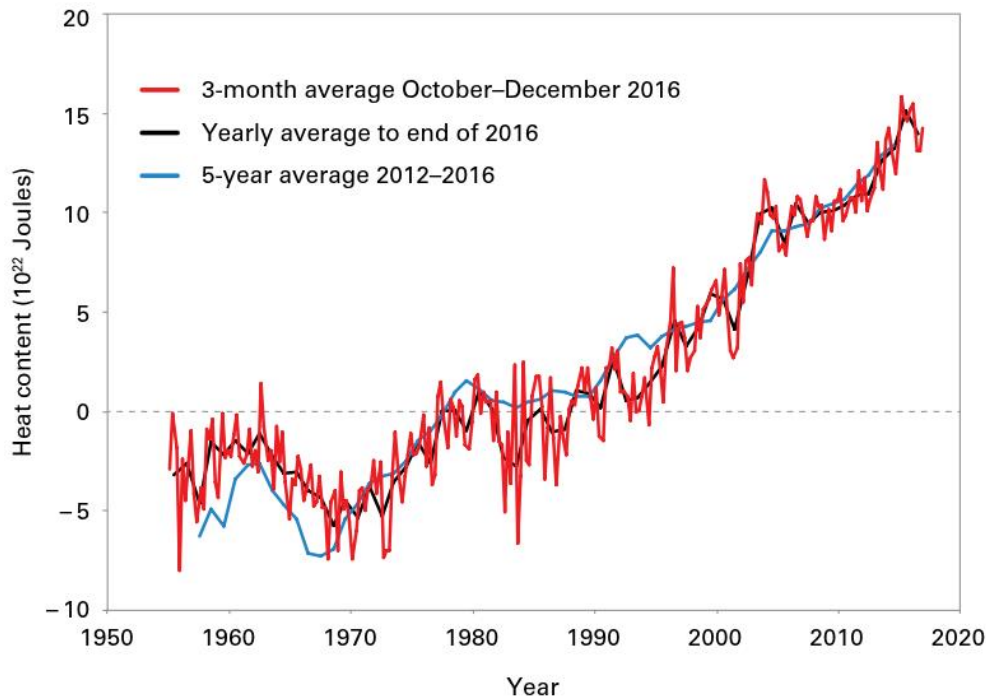
## Energy shortage



⇒ Energy safety

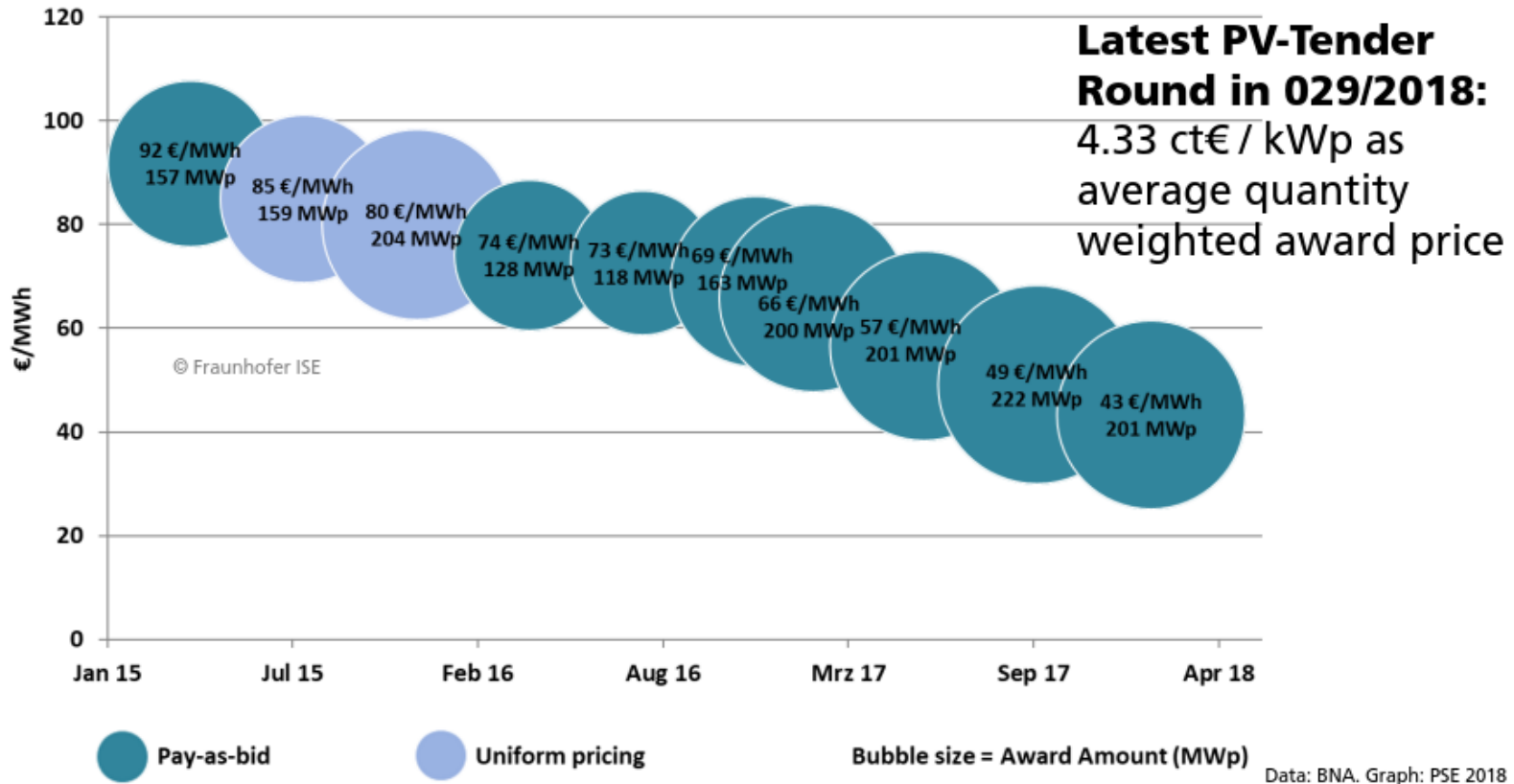
# Augmentation des phénomènes climatiques violents

L'augmentation de la température dans l'atmosphère augmente la quantité d'énergie qu'elle contient et par conséquent la fréquence des événements climatiques violents



Source: WMO using data from the US NOAA National Centers for Environmental Information

# L'électricité photovoltaïque de plus en plus compétitive



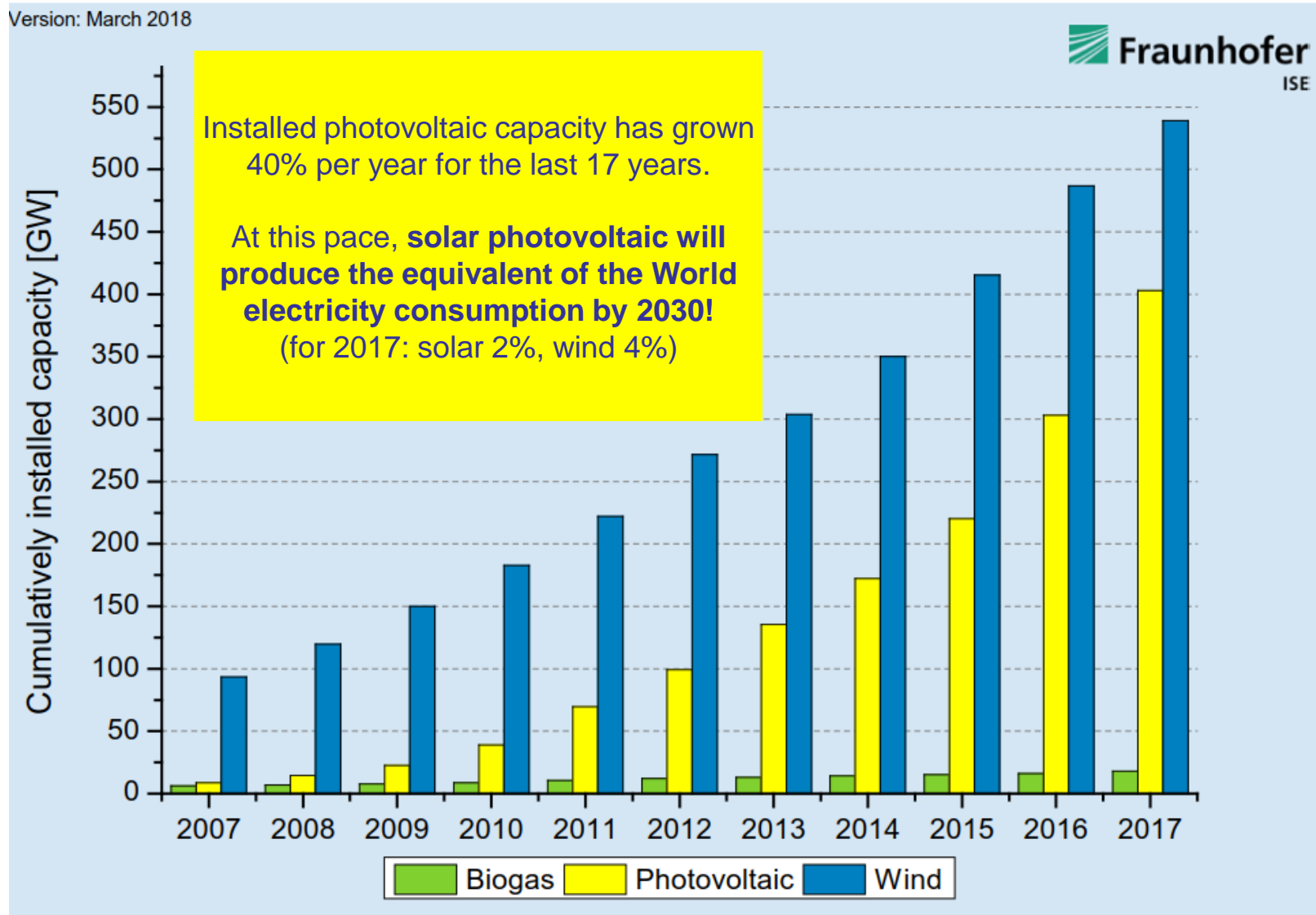
Last bid in October 2017 for a 300MW solar project in Saudi Arabia pitched at just **18\$/MWh** – with no subsidies.

The consortium behind the offer is made up of **EdF** and Abu Dhabi-based Masdar.



# La domination du photovoltaïque

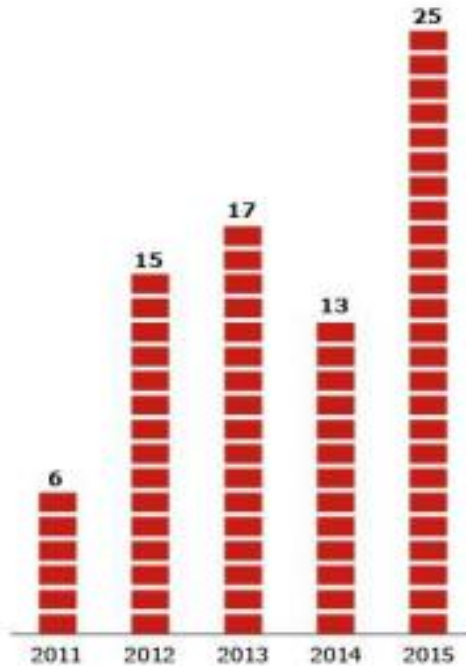
Version: March 2018



# L'augmentation des productions renouvelables intermittentes induit des prix négatifs fréquents

## Wie oft und warum es in Deutschland negative Strompreise gibt

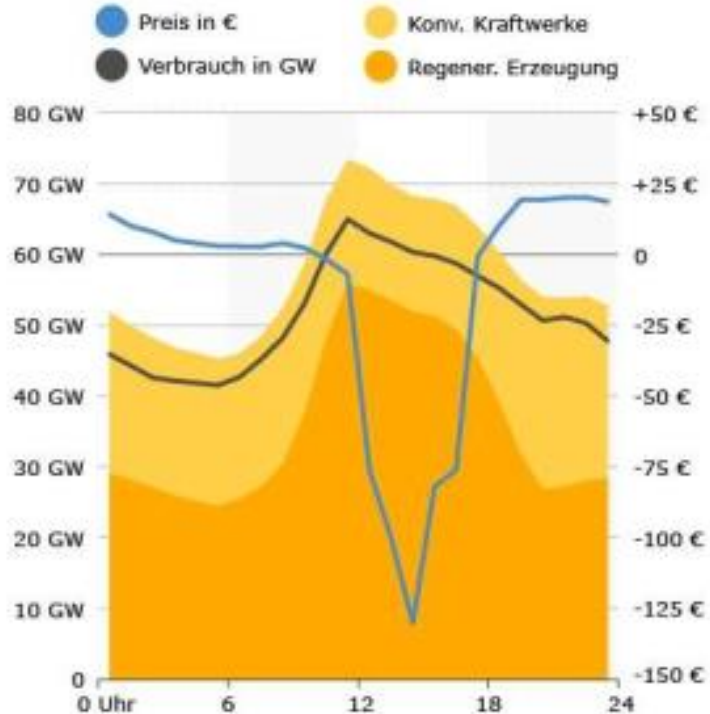
Tage im Jahr mit negativen Preisen\*



\* in Deutschland, Österreich, Luxemburg

statista SPIEGEL ONLINE

8. Mai 2016 – Preissturz auf dem deutschen Strommarkt



Quelle: EPEX SPOT / AGORA

# La prédiction de Jules Verne

318

## L'ÎLE MYSTÉRIEUSE

— Mais que trouvera-t-on ? demanda Pencroff. L'imaginez-vous, monsieur Cyrus ?  
— A peu près, mon ami.  
— Et qu'est-ce qu'on brûlera à la place du charbon ?  
— L'eau, répondit Cyrus Smith.  
— L'eau, s'écria Pencroff, l'eau pour chauffer les bateaux à vapeur et les locomotives, l'eau pour chauffer l'eau !

— Oui, mais l'eau décomposée en ses éléments constitutifs, répondit Cyrus Smith, et décomposée, sans doute, par l'électricité, qui sera devenue alors une force puissante et maniable, car toutes les grandes découvertes, par une loi inexplicable, semblent concorder et se compléter au même moment. Oui, mes amis, je crois que l'eau sera un jour employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène, qui la constituent, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisables et d'une intensité que la houille ne saurait avoir. Un jour, les soutes des steamers et les tenders des locomotives, au lieu de charbon, seront chargés de ces deux gaz comprimés, qui brûleront dans les foyers avec une énorme puissance calorifique. Ainsi donc, rien à craindre. Tant que cette terre sera habitée, elle fournira aux besoins de ses habitants, et ils ne manqueront jamais ni de lumière ni de chaleur, pas plus qu'ils ne manqueront des productions des règnes végétal, minéral ou animal. Je crois donc que lorsque les gisements de houille seront épuisés, on chauffera et on se chauffera avec de l'eau. L'eau est le charbon de l'avenir.

— Je voudrais voir cela, dit le marin.

— Tu t'es levé trop tôt, Pencroff, » répondit Nab, qui n'intervint que par ces mots dans la discussion.

Toutefois, ce ne furent pas les paroles de Nab qui terminèrent la conversation, mais bien les aboiements de Top, qui éclatèrent de nouveau avec cette intonation étrange dont s'était déjà préoccupé l'ingénieur. En même temps, Top recommençait à tourner autour de l'orifice du puits, qui s'ouvrait à l'extrémité du couloir intérieur.

« Qu'est-ce que Top a donc encore à aboyer ainsi ? demanda Pencroff.

— Et Jup à grogner de cette façon ? » ajouta Harbert.

En effet, l'orang, se joignant au chien, donnait des signes non équivoques d'agitation, et, détail singulier, ces deux animaux paraissaient être plutôt inquiets qu'irrités.

« Il est évident, dit Gédéon Spilett, que ce puits est en communication directe avec la mer, et que quelque animal marin vient de temps en temps respirer au fond.

*« ...l'eau décomposée en ses éléments constitutifs, (...) et décomposée, sans doute, par l'électricité, (...) sera devenue alors une force puissante et maniable, ... »*

*« L'eau est le charbon de l'avenir. »*

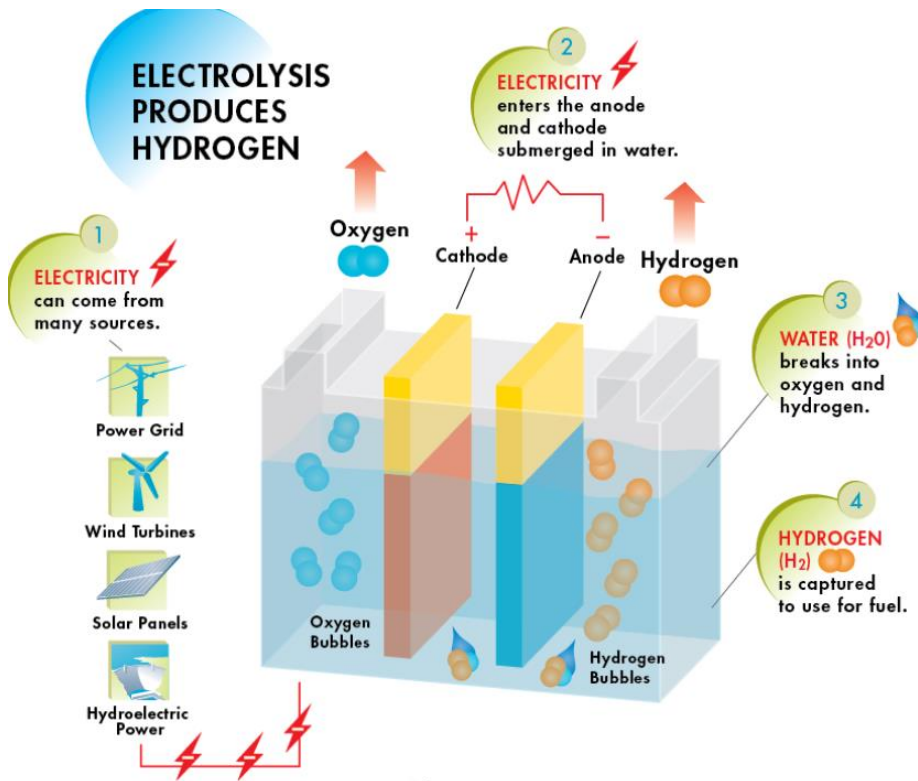
*Jules Verne, l'Île Mystérieuse, 1874*



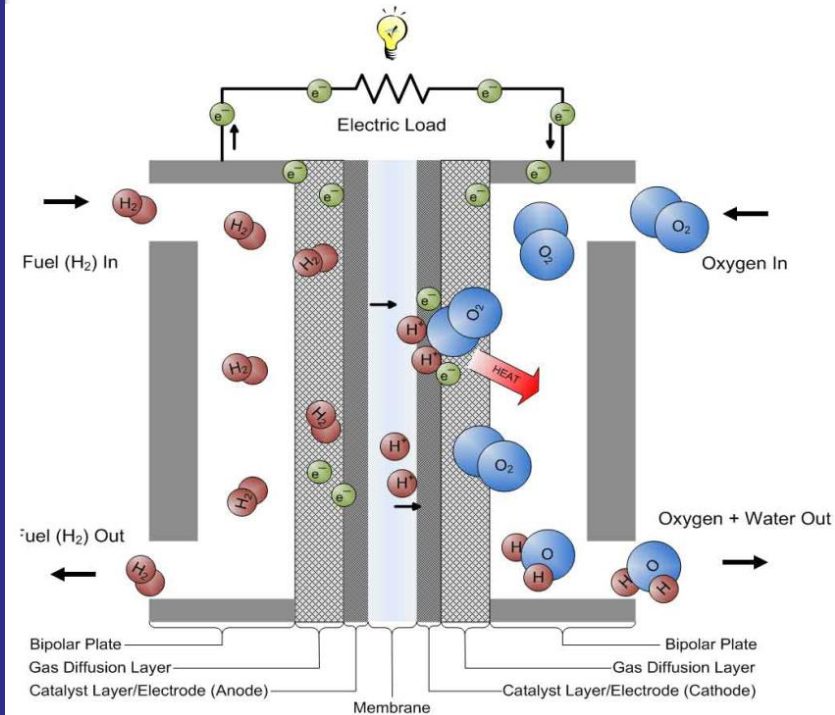


# Principes de base du cycle hydrogène

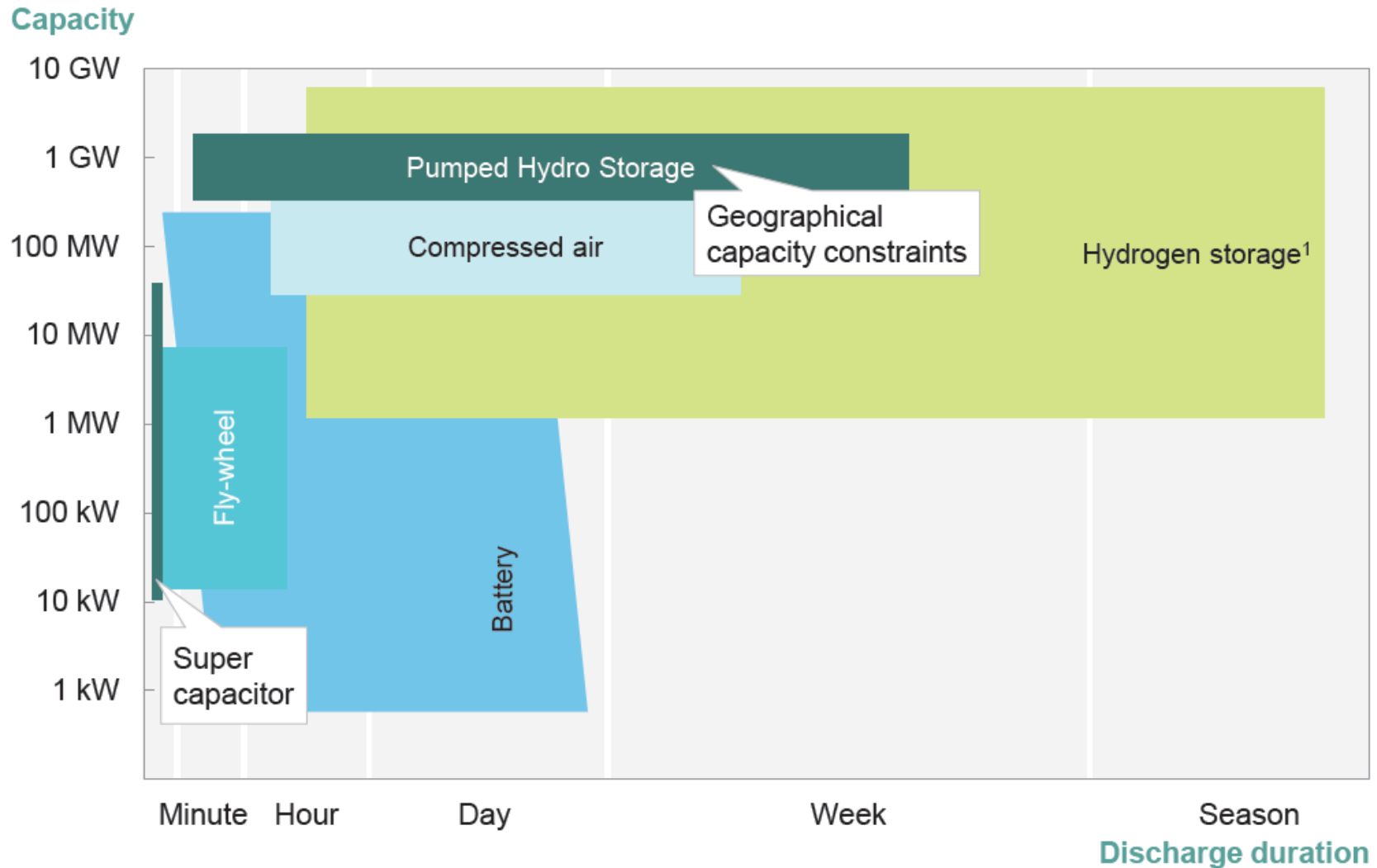
## Electrolyse



## Pile à combustible



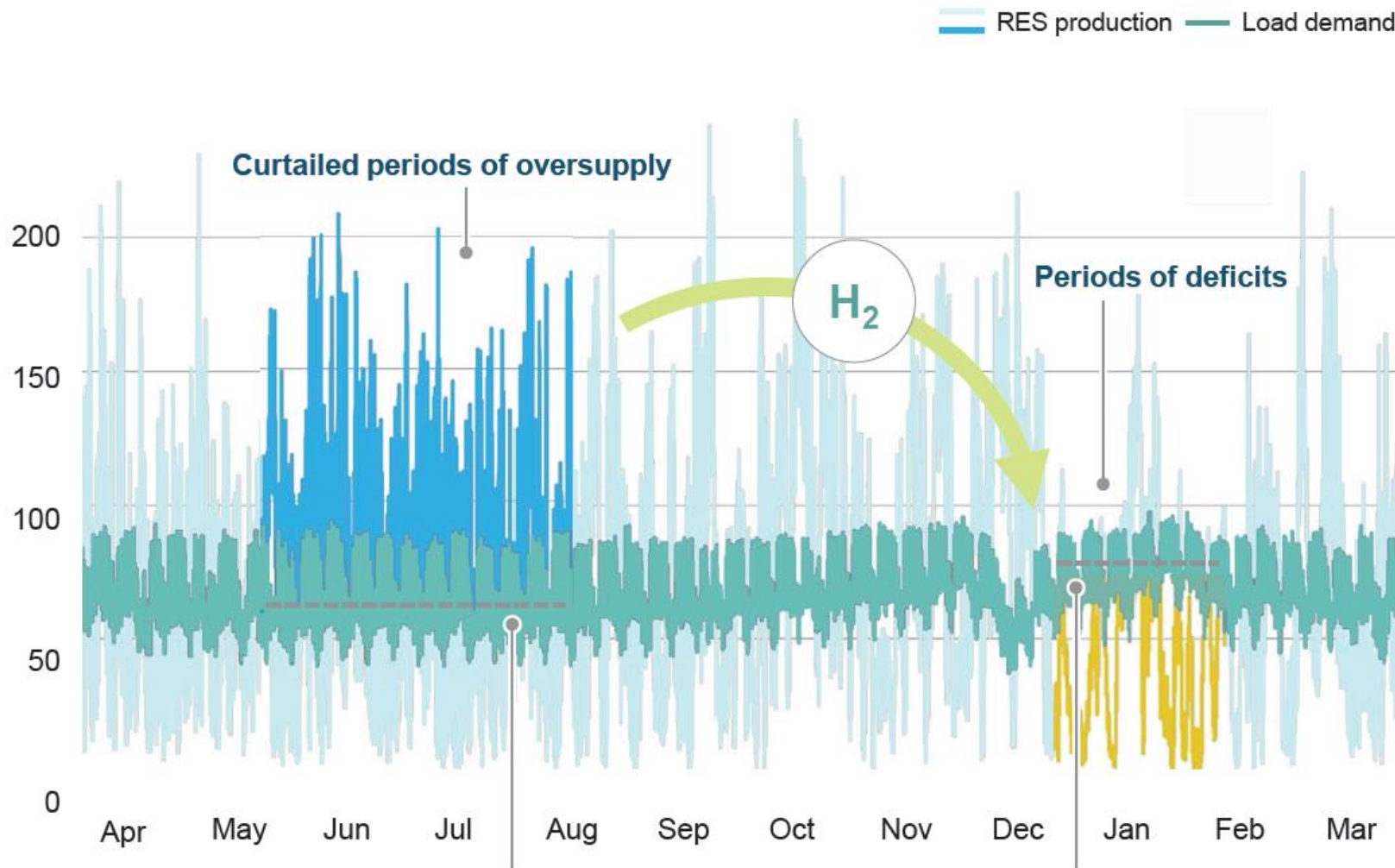
# L'hydrogène est la meilleure solution pour le stockage saisonnier



<sup>1</sup> IEA data updated due to recent developments in building numerous 1MW hydrogen storage tanks

Source: IEA Energy Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells, JRC Scientific and Policy Report 2013

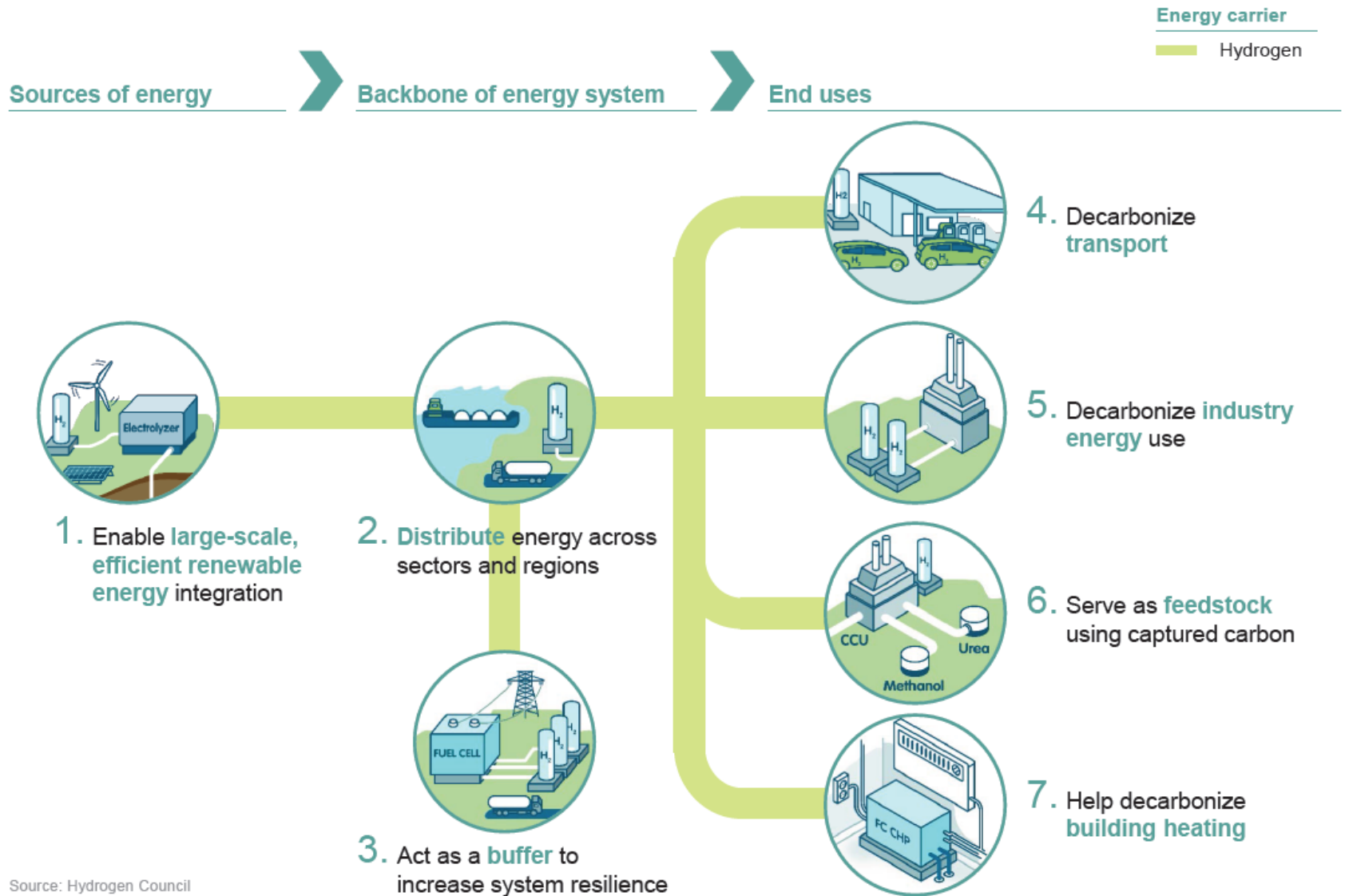
# L'hydrogène permet le transfert d'une production estivale à l'hivers



Load demand in winter is higher while RES production is lower

Source: EC 2050 scenario, McKinsey analysis

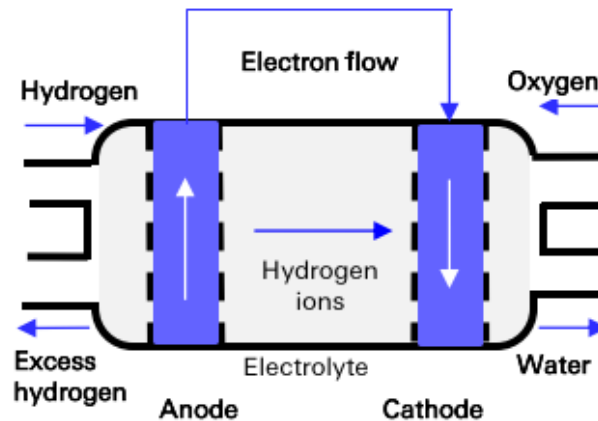
# L'hydrogène peut permettre aux sociétés modernes de devenir zéro carbone et plus résilientes



Source: Hydrogen Council

# Hydrogen Fuel Cells have the highest power densities

*Compared to a battery, a fuel cell uses an external supply of chemical energy*



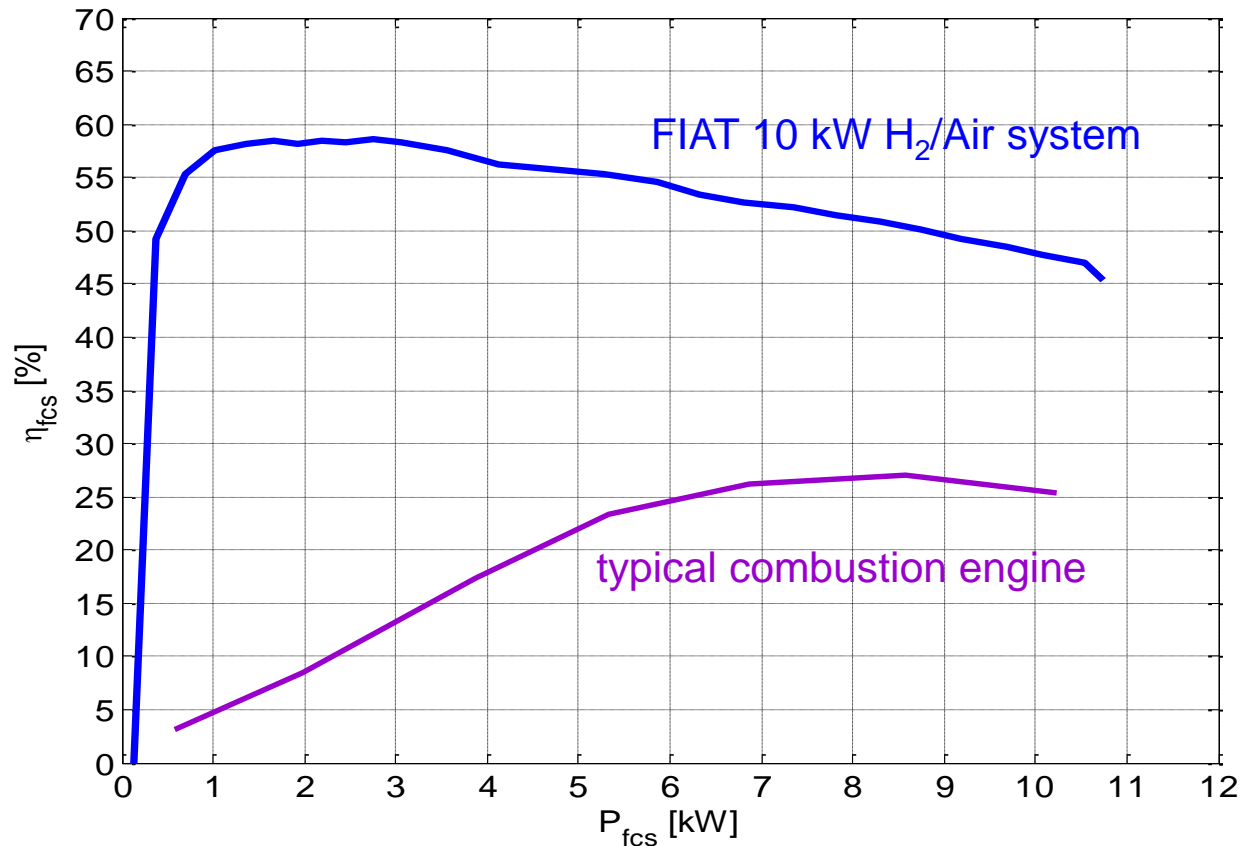
*Source: Deutsche Bank, Fuel Cell Today/Johnson Matthey*

	Wh/kg		TTW
Gasoline	13,100	Gasoline	25%
Diesel	12,700	Diesel	30%
Hydrogen	39,400	FCEV	50%
LiB	280	BEV	90%

*Source: Umicore, Deutsche Bank / Note: TTW refers to "Tank to wheel", the efficiency of fuel usage in the vehicle*

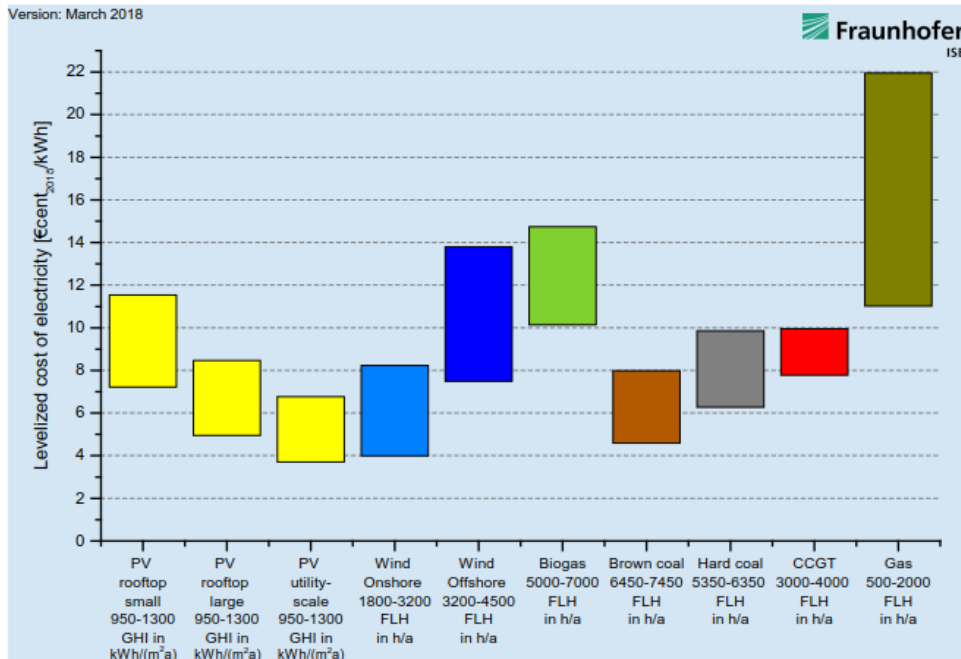


# Rendement d'une pile à combustible



- ❖ 10 kW<sub>net</sub> power achieved
- ❖ Maximum efficiency 59% at 3 kW
- ❖ Very high turn down ratio

# Hydrogène renouvelable vs pétrole



1 barrel of oil = 1590kWh chemical energy = 318kWh useable mechanical energy on the wheel (20% efficiency, refinery + ICE).

If electricity is at 4c\$/kWh an electric car will pay **15\$ the equivalent oil barrel** for the same useable energy on the wheel !

If hydrogen is produced with electricity at 4c\$/kWh, the hydrogen car will pay **50\$ the equivalent oil barrel** for the same useable energy on the wheel !



**Renewable hydrogen can already be competitive to oil today!**



## Battery full power:

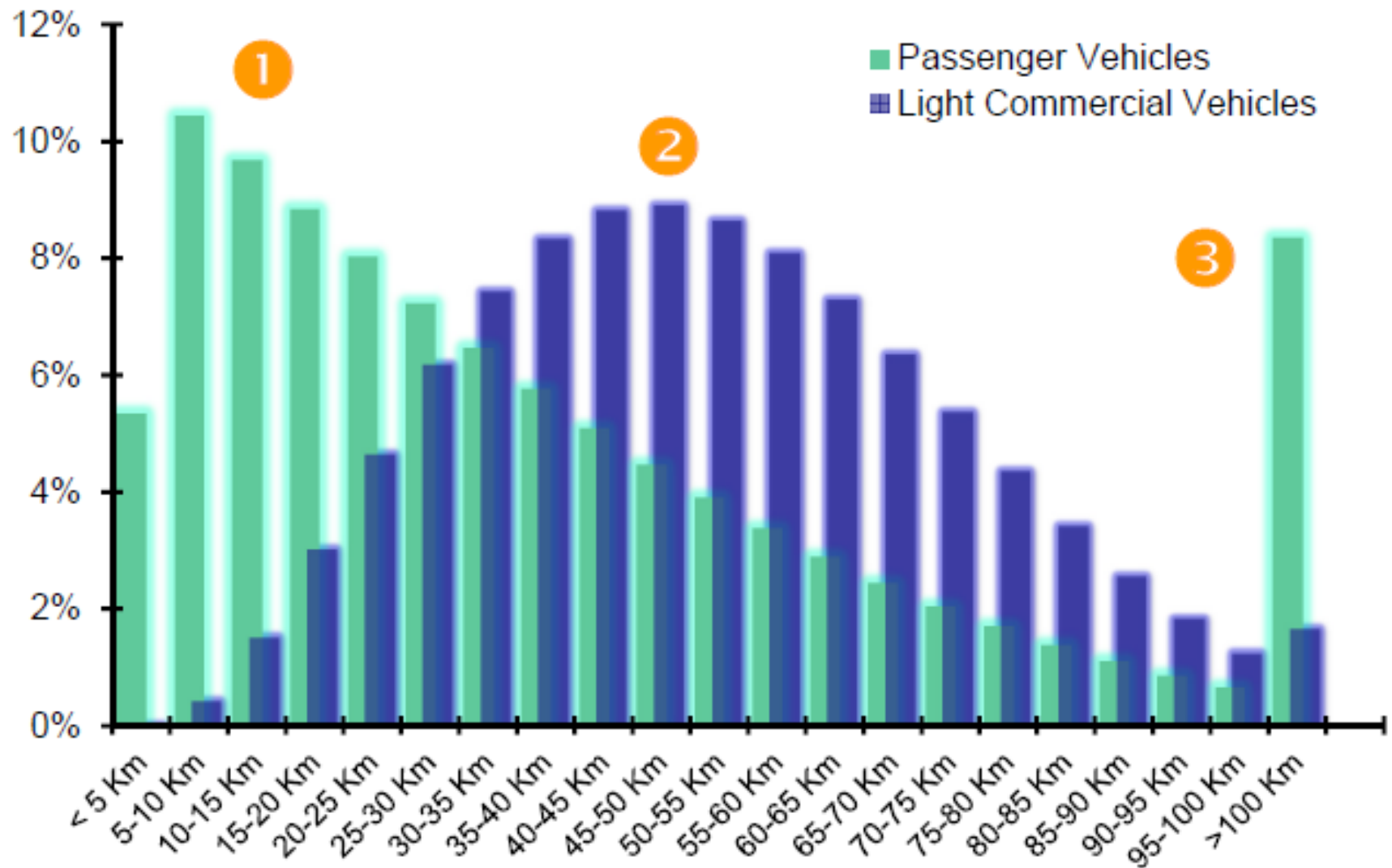
- ++ meilleure accélération
- ++ meilleur prix par km
- ++ meilleure efficacité de cycle  
(~85% el->battery->el)
- Max 400 km autonomie réelle
- batterie très lourde  
(800kg for 400km)
- temps de charge jusqu'à 40h
- vieillissement de la batterie affecte l'autonomie du véhicule
- énergie grise du véhicule  
~2x plus élevée

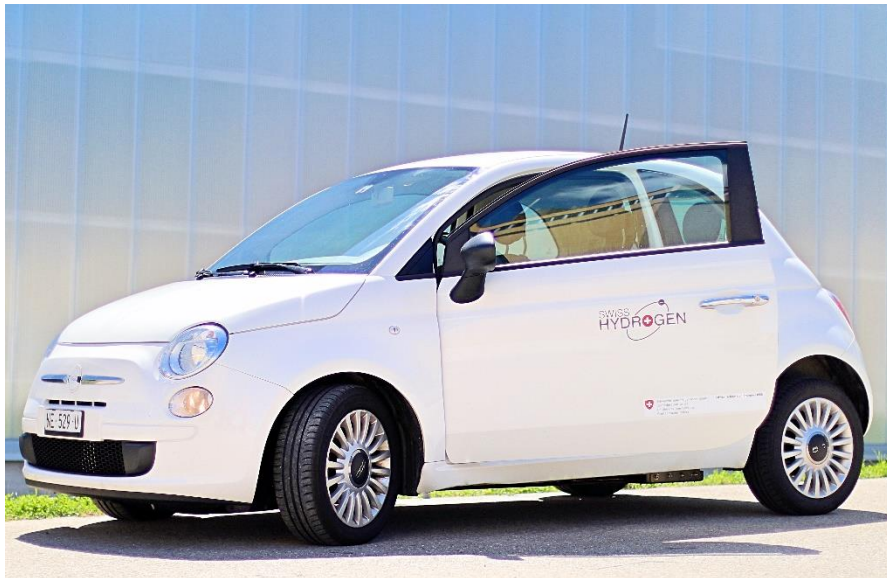


## Hydrogen full power:

- accélération moyenne
- prix par km (comme l'essence)
- faible efficacité de cycle  
(~30% el->hydrogen->el)
- ++ >500 km autonomie réelle
- + poids acceptable du réservoir d'énergie (100kg pour 500km)
- ++ plein d'énergie en 3 minutes
- + peu de perte d'autonomie avec le vieillissement du système
- + énergie grise du véhicule comparable à une hybride

# La réalité des trajets en voiture





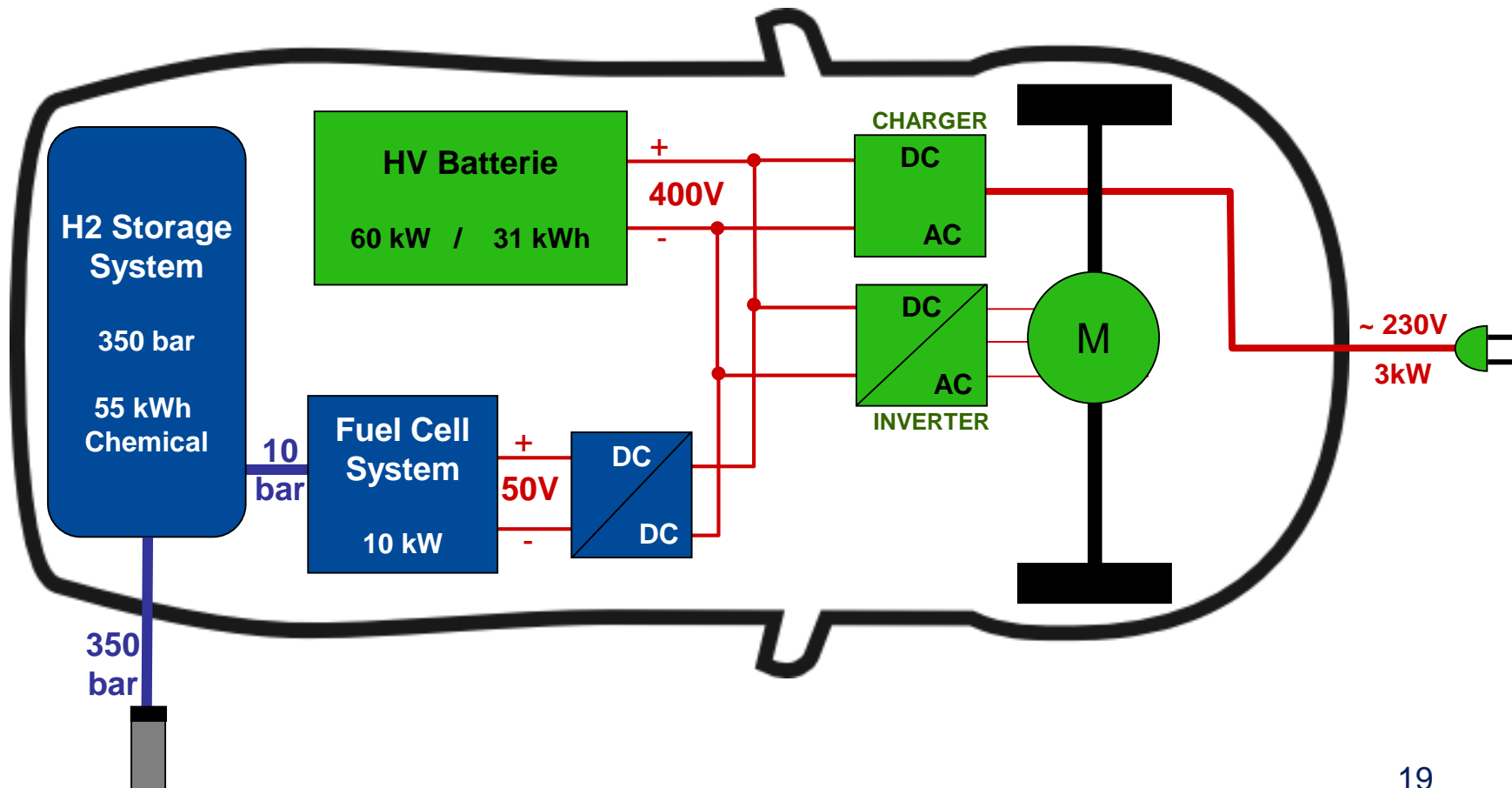
## Battery powered with hydrogen range extension:

- ++ meilleure accélération
- + bon prix par km
- + bonne efficacité de cycle
- ++ >500 km autonomie combine (batterie + hydrogène)
- ++ charge lente et plein en 3 minutes
- + autonomie moins affectée par le vieillissement du système
- + pas 100% dépendent des stations d'hydrogène



# Hydrogen fuel cell as a range extender

- Electric drive integration
- Fuel cell range extender integration



# Développement d'une FC de 10 kW

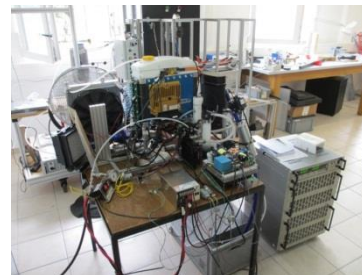
Final design of bipolar plates



Fuel Cell stack tested at PSI



Fuel Cell system taken into operation



Fuel Cell system tested on Swiss roads



2013 Jan Feb Mar Apr Jun Jul Aug



Fuel Cell stack assembled



Fuel Cell system assembled



Fuel Cell system installed in electric FIAT 500

# Station d'hydrogène avec production sur site

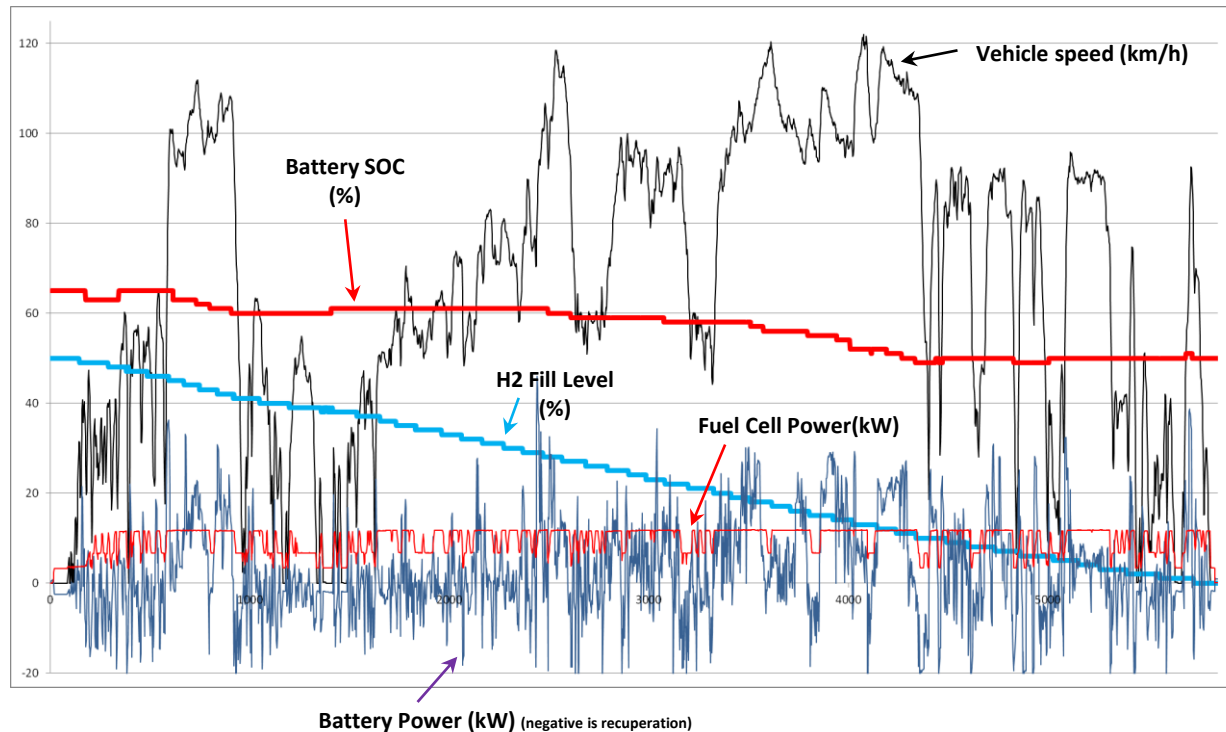




# Effective driving results

Date & Time: Aug 27, 2013, 15:16  
Test Driver: A. Closset  
Distance: 108km

Avg Speed: 66km/h  
H2 used: 49%  
Battery used: 17%



# Maximum range: 425 km

Date & Time: 20 Oct., 2013

Distance: 425km

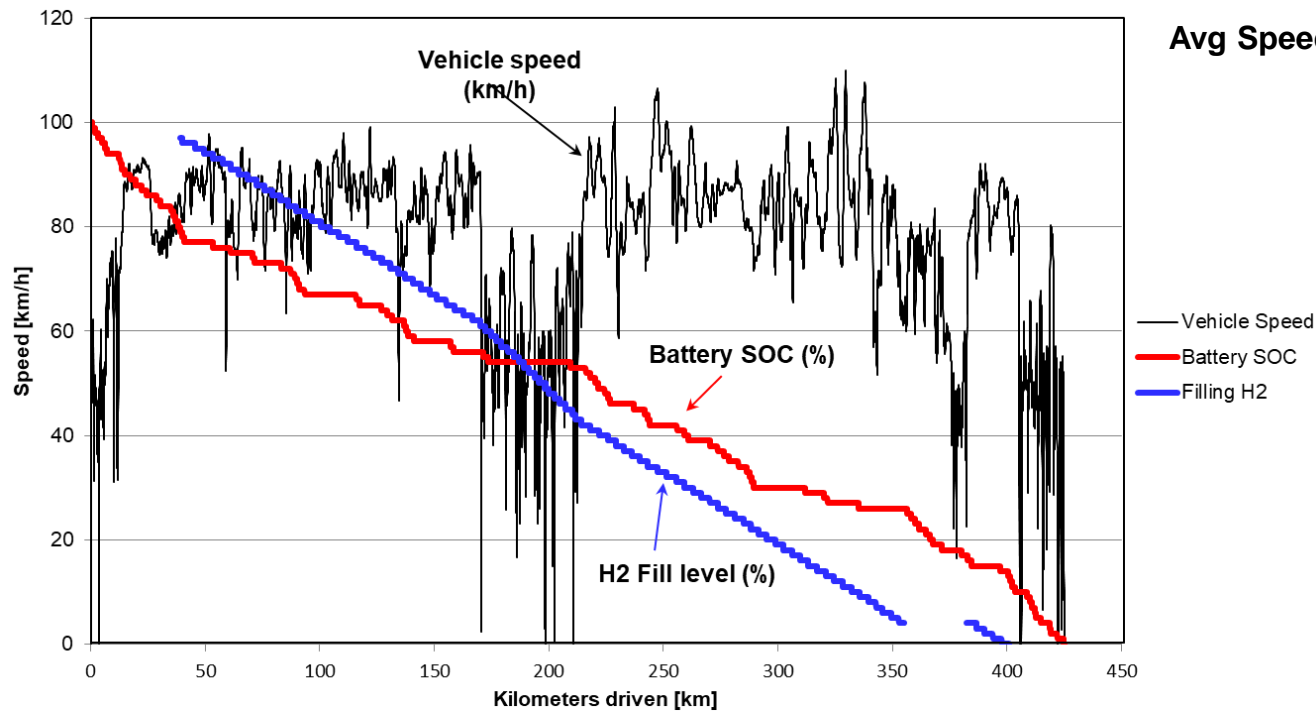
Battery used: 100%

Test Driver: M. Vögeli

Max Speed: 110km/h

Hydrogen used: 97%

Avg Speed: 73km/h





# Statistiques sur 150'000km

Distance	150 000 km
Average speed	57 km/h
Drivetrain consumption	191 Wh/km (= 2L gasoline/100km)
Vehicle ON time	2847 hours
Average power demand	9.4 kW
Battery full cycles	716
Fuel cell ON time	1338 hours (47% of vehicle ON time)
Fuel cell average power	7.1 kW
H <sub>2</sub> total consumption	588 kg
Number of FC starts	4282
Average efficiency H <sub>2</sub> tank to DC bus (including Stack, BoP, Purges, DC/DC)	41 %



OVER 150'000KM, 2/3 OF THE DISTANCE WAS POWERED BY THE BATTERY, 1/3 WAS POWERED BY THE HYDROGEN FUEL CELL.

THE HYBRID BATTERY/FUEL CELL VEHICLE IS A ZERO EMISSION ARCHITECTURE OPTIMIZING THE TCO WHILE ENABLING ULTRAFAST REFUELING TIME.

# La petite histoire de Swiss Hydrogen...

FOUNDED IN 2008 AS A SUBSIDIARY OF BELENOS / SWATCH GROUP



2011. Belenos presents the first H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> fuel cell car and boat



2013. Belenos develops the H<sub>2</sub>/air fuel cell systems and integrates it into a Fiat 500



SPIN-OFF FROM SWATCH GROUP IN 2015 AND RELOCATION IN FRIBOURG

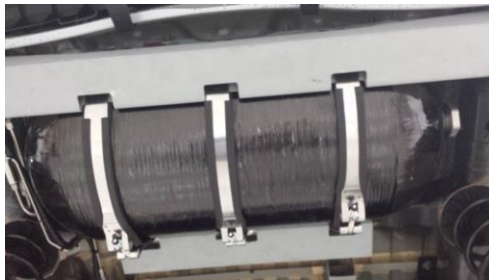


ACQUISITION BY PLASTIC OMNIUM AND INTEGRATION INTO NEW ENERGIES SINCE 2018





# Integration of the 350 bar, 70l, Hydrogen tank

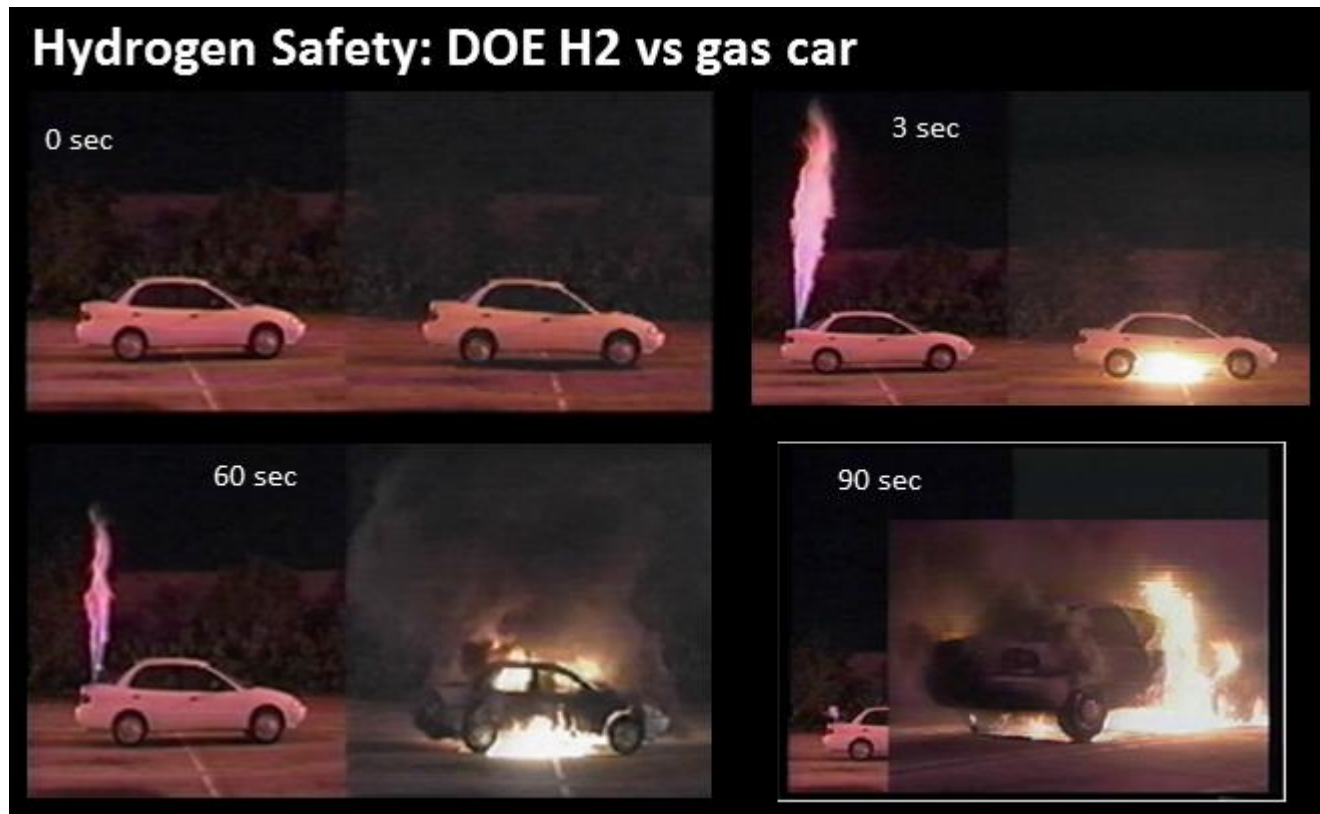


# 10kW fuel cell system integration into Kangoo ZE





# Un mot sur la sécurité feu

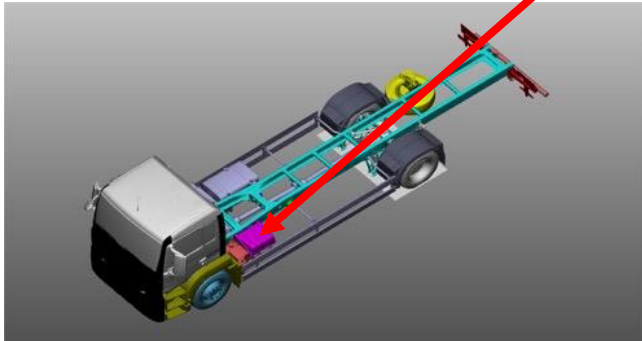
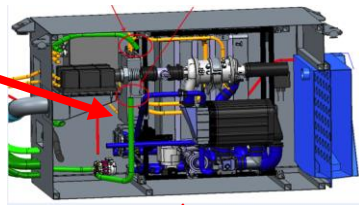
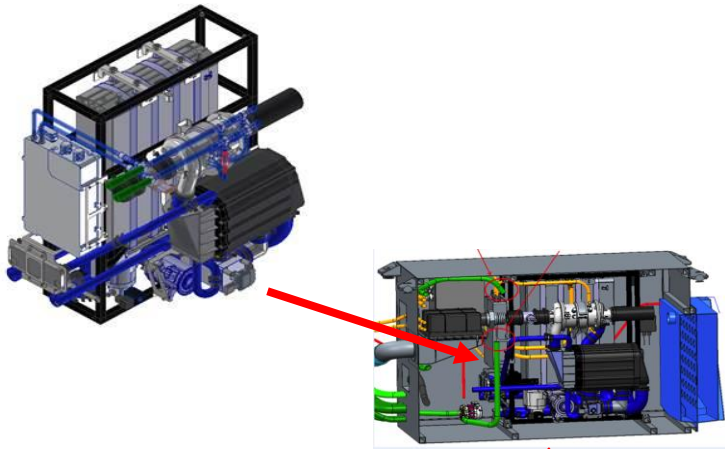


*Comparison of an ignited hydrogen tank release with a small gasoline fuel line leak. 60 seconds after ignition, the H<sub>2</sub> flame has begun to subside, while the gasoline fire is intensifying. After 100 seconds, all of the H<sub>2</sub> was gone and the car's interior was undamaged. The gasoline car continued to burn for several minutes and was completely destroyed.*

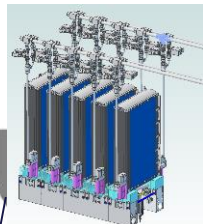
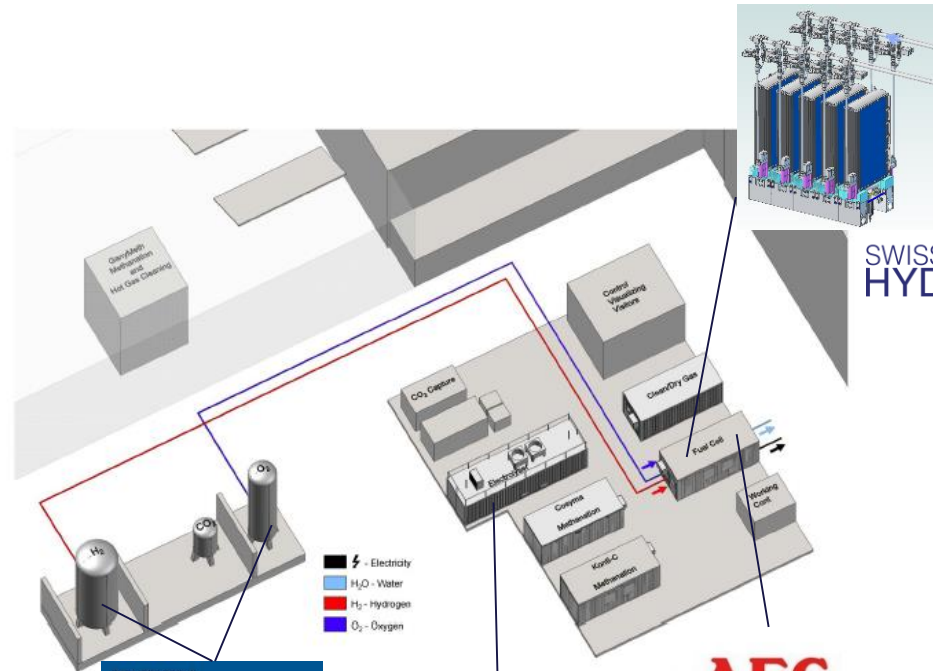
*Ref.:Dr.Swain,University of Miami.*



# 100 kW Hydrogen Fuel Cell for a 18t delivery truck

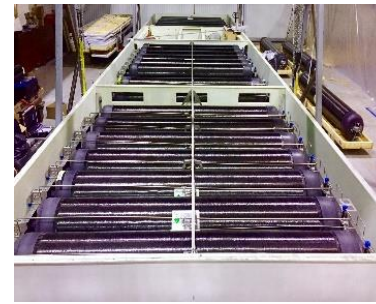
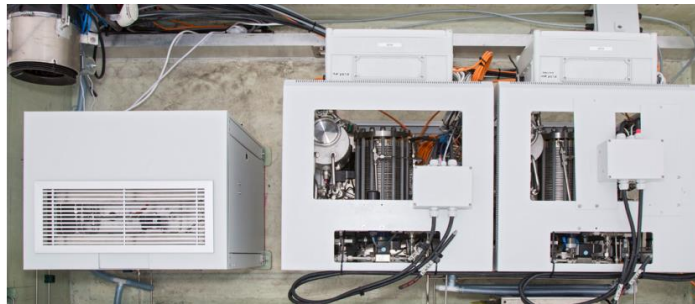
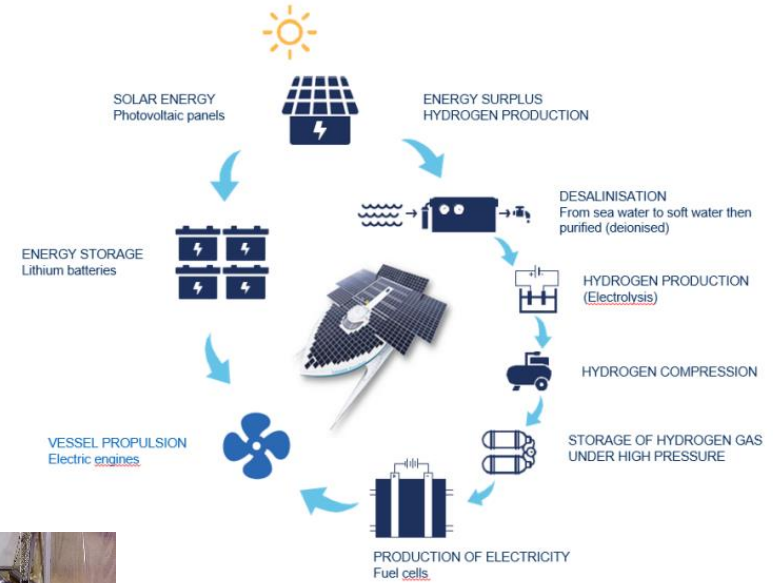


# 300kW stationary fuel cells for Energy storage





# Race for Water: 2 x 30kW fuel cell system + hydrogen production, compression and storage for the solar boat



**20 minutes** Actualités Economie Sports People Hi-tech Lifestyle Musique Cinéma Plus  
Vaud Genève Romandie Suisse Monde Faits divers Insolite Science et nature

Une info à nous transmettre? Une histoire à nous raconter? Ecrivez-nous à [web@zominutes.ch](mailto:web@zominutes.ch)

Réchauffement climatique 28 août 2017 15:56; Act: 28.08.2017 17:01

## La Suisse doit se préparer pour minimiser les risques

*Les effets du réchauffement climatique sont perceptibles en Suisse. La Confédération a lancé des initiatives pour prévenir les catastrophes.*

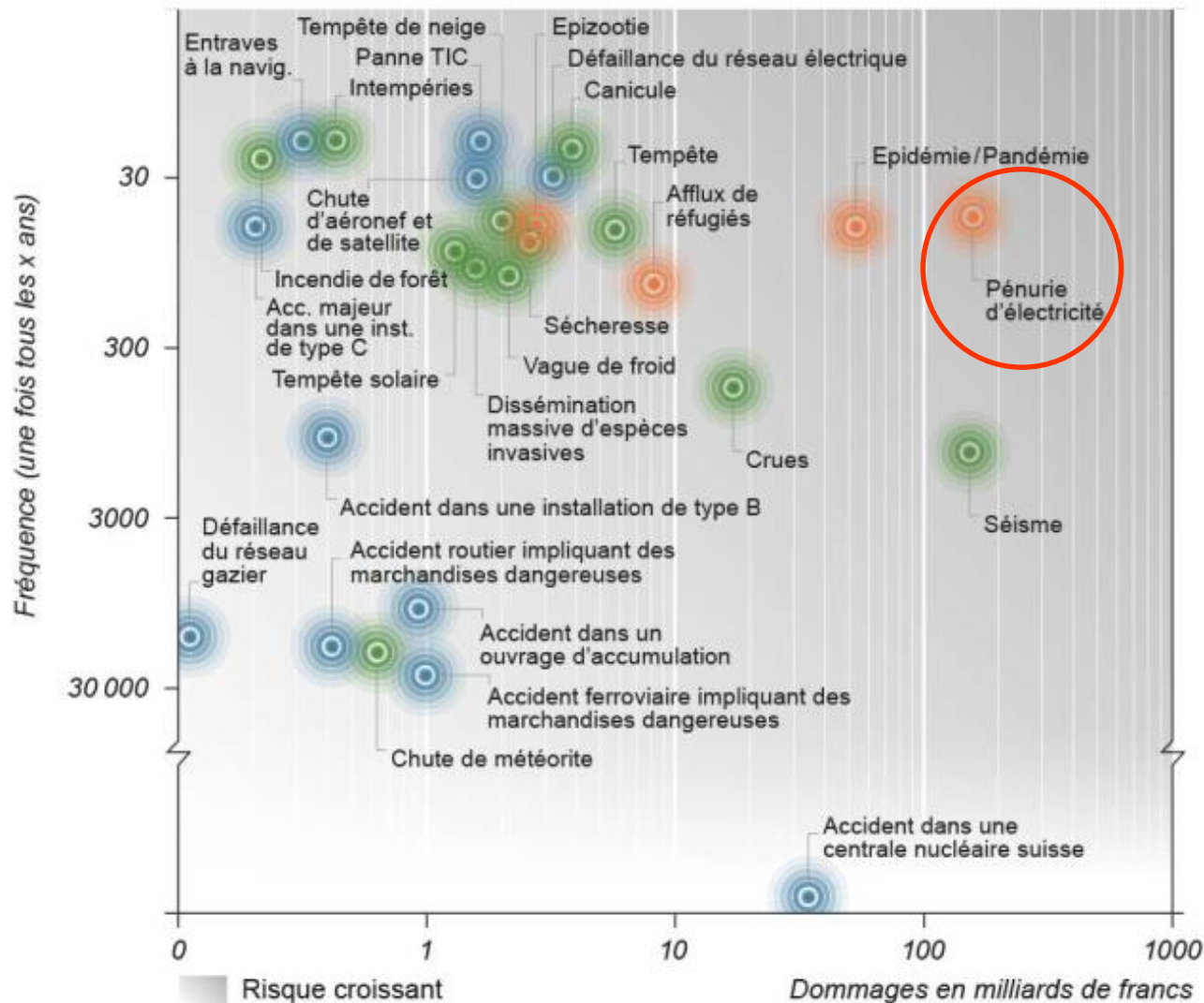


«La Suisse ne doit pas seulement réduire ses émissions de gaz à effet de serre; elle doit se préparer aux changements climatiques afin de minimiser les risques», a déclaré lundi devant la presse Marc Chardonens, directeur de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Car les dégâts vont devenir toujours plus fréquents: fonte des glaciers, flancs de montagne instables, canicules à répétition, pénuries d'eau, etc.



# La pénurie d'électricité est le risque le plus important

Selon le Rapport technique sur la gestion des risques 2015, la pénurie d'électricité représente le risque le plus élevé parmi les douze menaces considérées

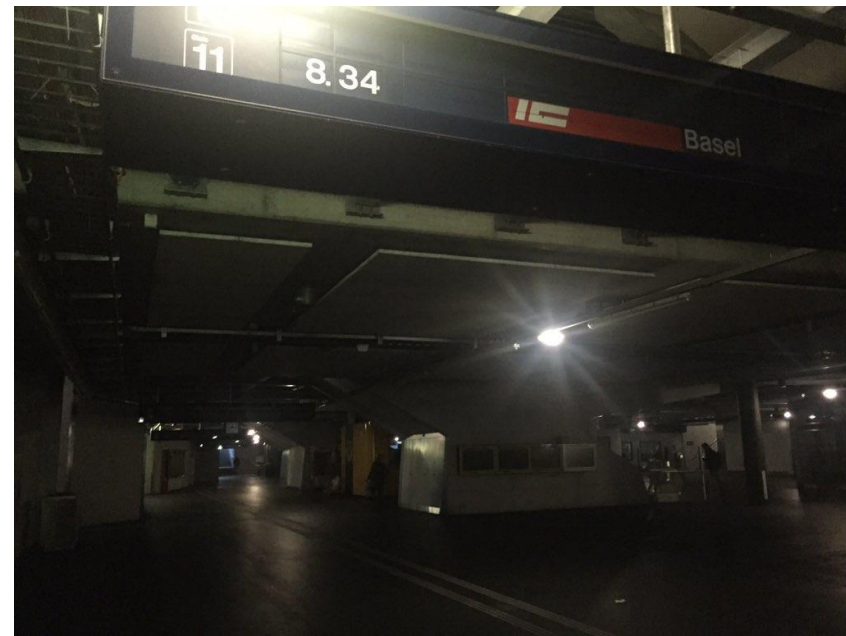




# Les conséquences d'un blackout peuvent être très grave

Une panne d'électricité prolongée coûterait entre 2 et 4 milliards de francs par jour, voire 6 milliards en tenant compte des conséquences immatérielles ou indirectes.

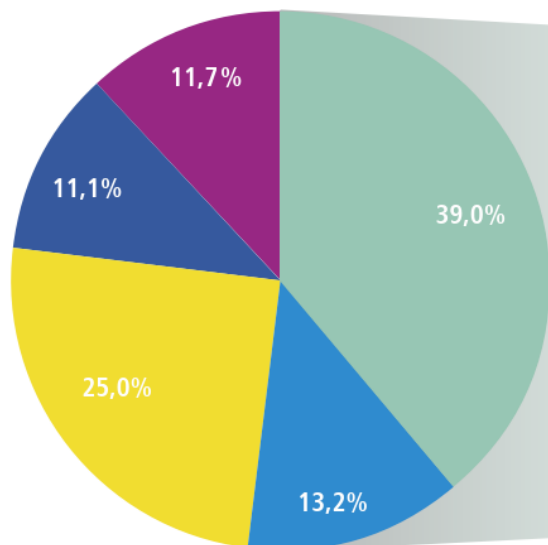
Guy Parmelin évoquait un scénario testé en 2014 lors du 11e Congrès suisse de l'électricité.



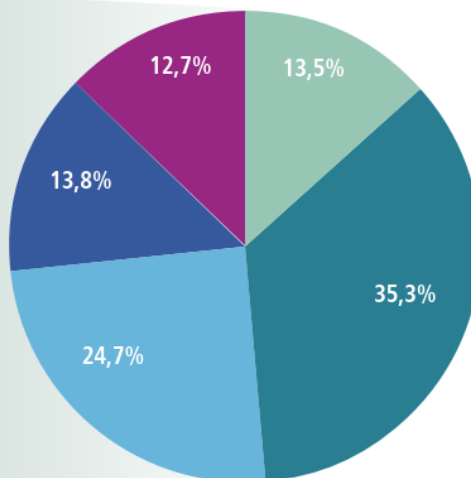
# Situation énergétique en Suisse

**Consommation brute d'énergie 1 103 020 TJ**

y compris 0,5% solde exportateur d'électricité



**Consommation finale 834 210 TJ**



Notre dépendance au pétrole, gaz et uranium nous rend extrêmement fragile avec 75% de l'énergie primaire consommée en Suisse et ~CHF 10 milliards d'achats annuel à l'étranger.

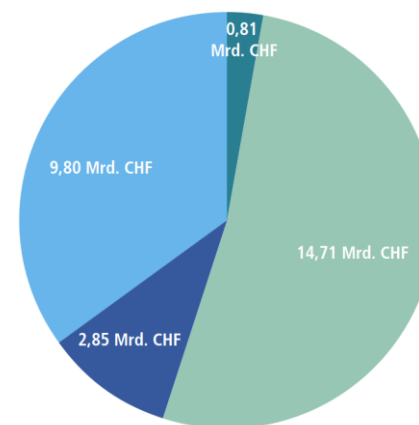
- Erdöl Pétrole
- Rohwasserkraft Forces hydrauliques brutes
- Kernbrennstoffe Combustibles nucléaires
- Gas Gaz
- Rest Reste

BFE, Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2019 (Fig. 6)  
 OFEN, Statistique globale suisse de l'énergie 2019 (fig. 6)

- Erdölbrennstoffe Combustibles pétroliers
- Treibstoffe Carburants
- Elektrizität Electricité

**Dépenses des consommateurs finaux d'énergie 2019**

- Erdölprodukte Produits pétroliers
- Gas Gaz
- Elektrizität Electricité
- Feste Brennstoffe Combustibles solides

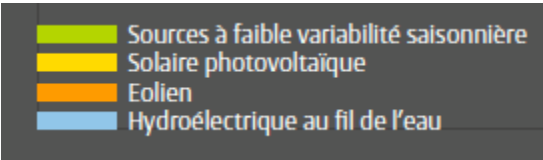
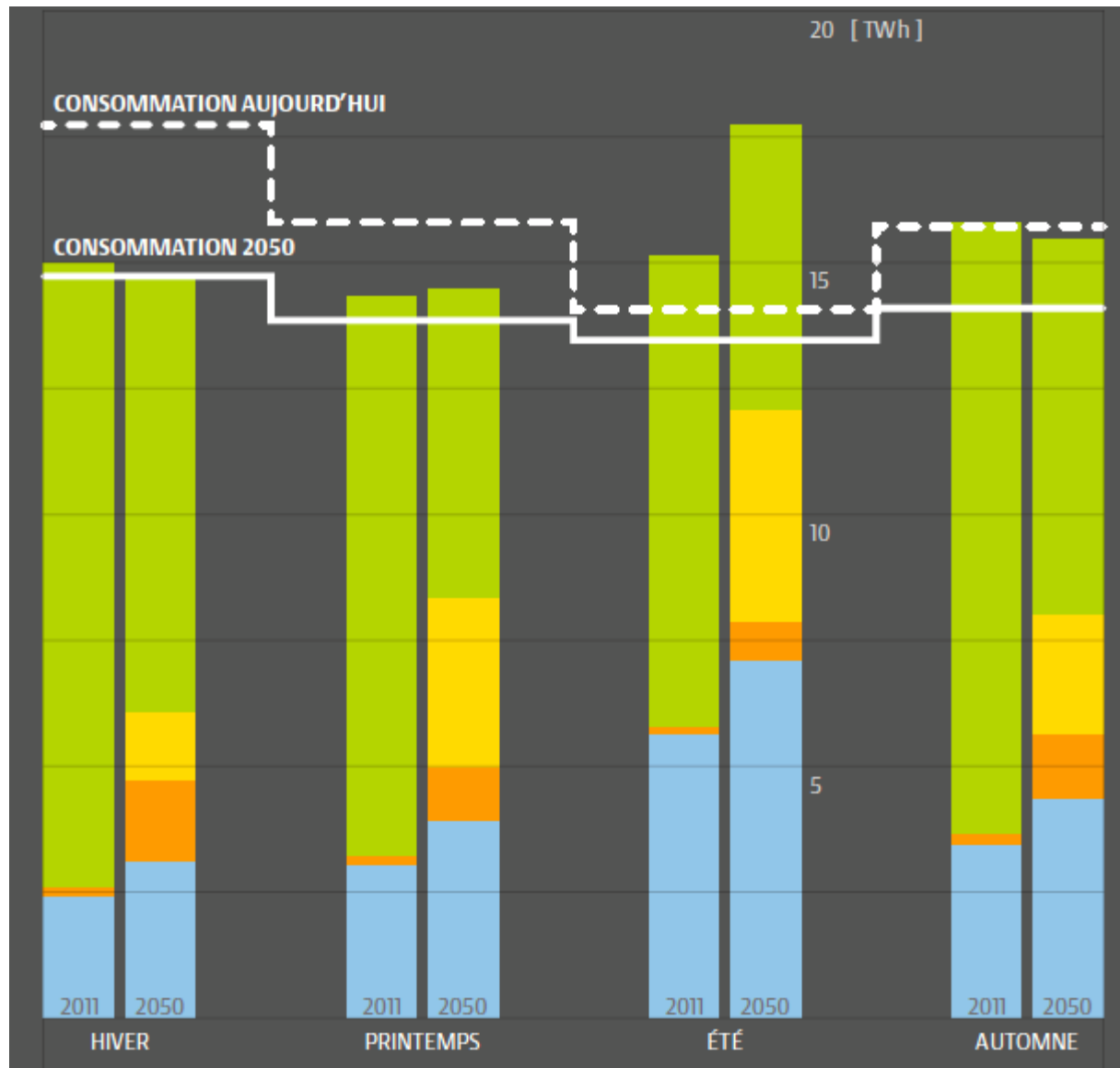


Total: 28,17 Mrd. CHF

Les toits et les façades des maisons suisses pourraient produire 67 TWh d'électricité solaire par an (OFEN, 15.04.2019)

A mettre en relation avec les 80TWh consommés par les véhicules à pétrole en Suisse.

# L'effet saisonnier sur la production électrique en 2050



Source: Les enjeux de la transition énergétique suisse, François Vuille, Daniel Favrat and Suren Erkman, 2015

# L'exemple du projet



La centrale hydroélectrique IBAarau à Aarau vue de face



Electrolyseur



Remorque à hydrogène





# Motivation pour les exploitants des centrales électriques renouvelables

## Coop HRS with H<sub>2</sub> Energy Trailer in the background



Avec 1kg d'hydrogène, une voiture pile à combustible roule + 100km

## H<sub>2</sub> Energy electrolyzer and trailer refilling station



## Coop fuel cell truck by ESORO and Swiss Hydrogen



Un camion consomme environ 8kg d'hydrogène pour 100km





# Livraison des 7 premiers camions



# Consommation d'ici 3 ans



30-50x more hydrogen p.a.

Optimized utilization of infrastructure

Less expensive technology

- 5'000-7'000 kg per truck and year
- Introduction easier
- Less HRS points needed (tours)
- Filling cycles can be steered
- 35 MPa
- Easier to compensate non available filling station
- Educated professional drivers

- 130-170 kg per car and year
- Point-to-point routes need more HRS points
- Filling cycles with peaks
- 70 MPa
- Stable and easy to use technology

**1600 camions Coop ~ 10'000tH<sub>2</sub>/an ~ 700GWh/an**



# Stations H2 existantes et planifiées

Réalisation Hydrospider, 2MW d'électrolyse à Gösgen pour alimenter 8 stations hydrogène.

**Hydrospider - Tankstelle** ★

**i** Diese Karte wurde von einem Nutzer erstellt. Weitere Informationen zum Erstellen eigener Karten.

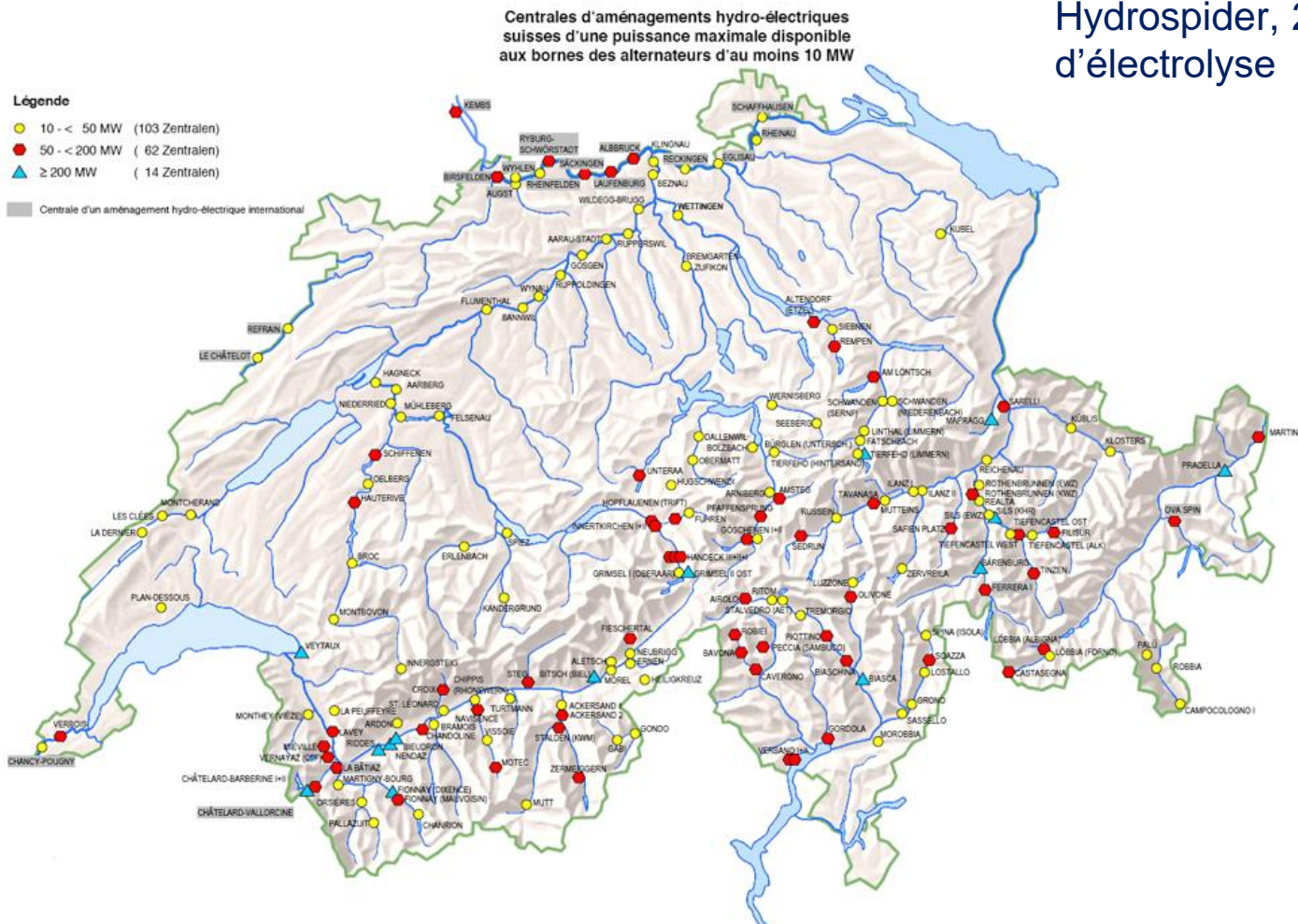
© 2020 GeoBasis-DE/BKG (©2009), Google [Nutzungsbedingungen](#) 50 km



# Vision stratégique pour la Suisse

Connecter un électrolyseur sur chaque ouvrage hydraulique en Suisse  
(186 centrales hydraulique de plus de 10MW)

Exemple: Gösgen  
Hydrospider, 2MW  
d'électrolyse



# Logistics & distribution companies are pushing for hydrogen mobility (350 bar refueling)

amazon

Walmart

IKEA

P&G

Coca-Cola

Carrefour

coop

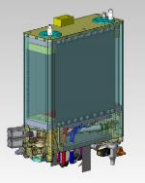
colruyt

ASKO

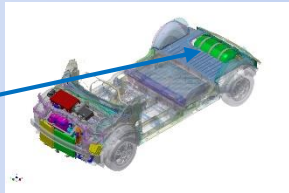


# PEM Fuel Cells and 350bar hydrogen storage – Application by system size

10kW+  
FC SYSTEM



~2kg  
H2 storage



Small delivery vans

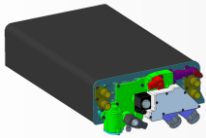


Forklifts

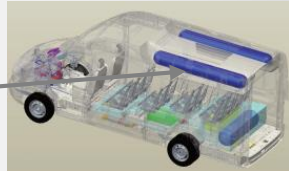


Market potential  
>2025:  
>10'000 units

30kW+  
FC SYSTEM



8 -15kg  
H2 storage



Delivery vans

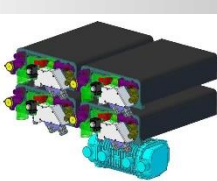


Refuse trucks

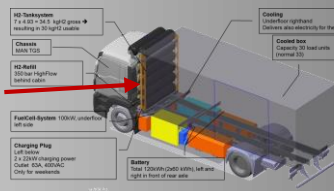


Market potential  
>2025:  
>10'000 units

100kW+  
FC SYSTEM



30kg+  
H2 storage



Delivery trucks



Public transport



Market potential  
>2025:  
>5'000 units



# La solution en cas de blackout

Les 20 tonnes d'hydrogène seraient disponibles par jour pour les sites critiques = 300MWh par jour que l'on peut acheminer là où il y a le besoin.





# Bénéfices d'un déploiement national de l'hydrogène

- ✓ Intégration massive du photovoltaïque sans «curtailment»
- ✓ La Suisse produit son propre carburant, inépuisable et indépendant de l'étranger
- ✓ Forte réduction des émissions de CO<sub>2</sub>
- ✓ Meilleure résilience face une grave pénurie d'électricité
- ✓ Création de places de travail en Suisse sur une technologie stratégique



**Merci pour votre attention!**