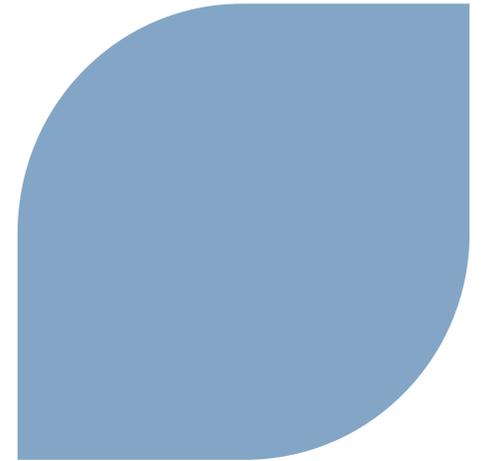


# ELECTROLYSE DE L'EAU



## Une brique technologique au service de la transition énergétique

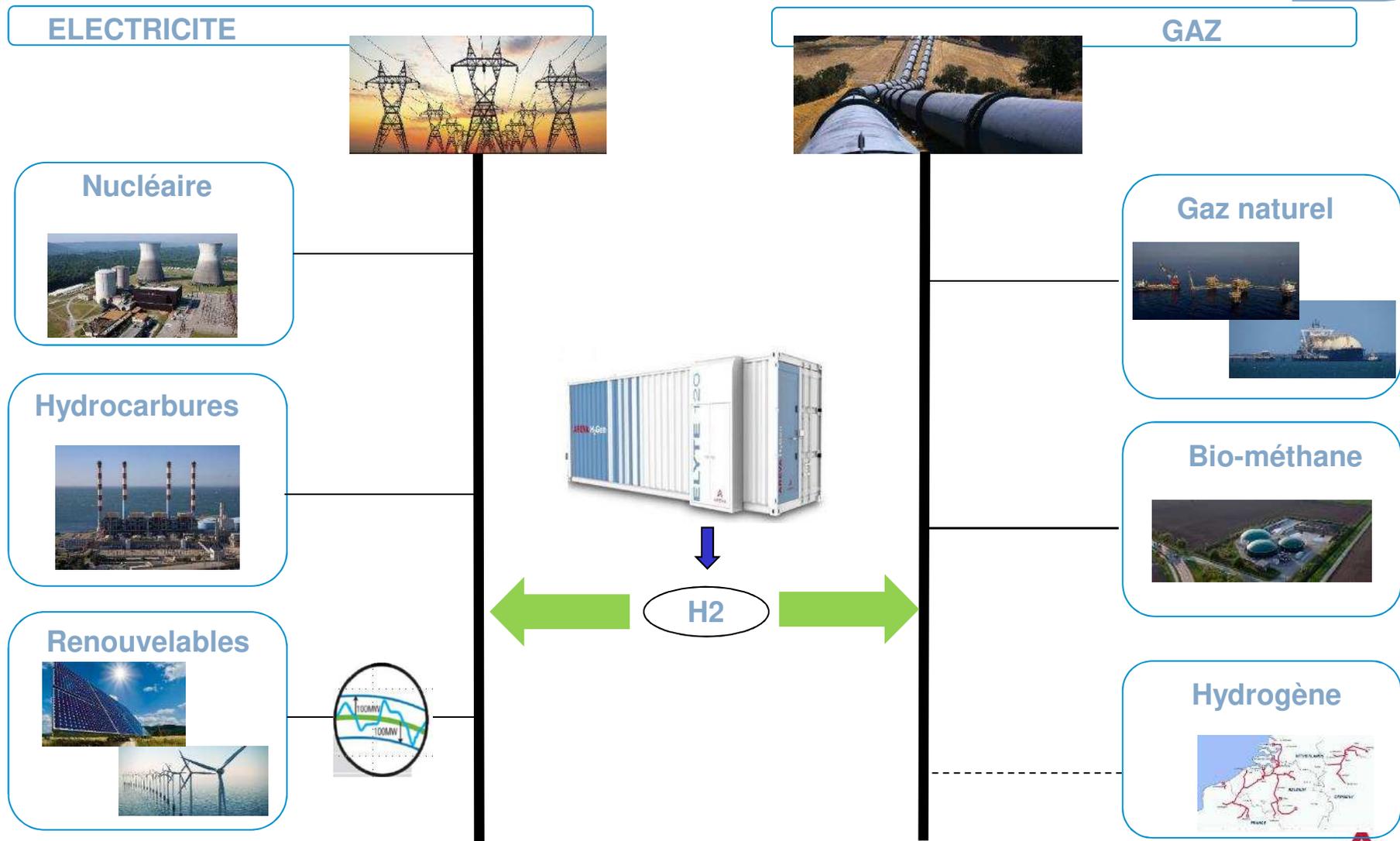
Fabien AUPRÊTRE  
Directeur Technique

SFEN RAL - Lyon  
27/09/2017

**AREVA** H<sub>2</sub>Gen

**A**  
**AREVA**  
forward-looking energy

# H2 : un vecteur de la transition énergétique



ELECTRICITE

GAZ

Nucléaire



Hydrocarbures



Renouvelables



AREVA H<sub>2</sub>Gen



H2

Gaz naturel

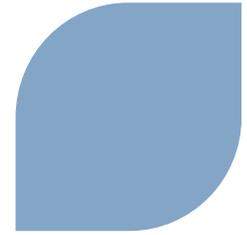


Bio-méthane



Hydrogène



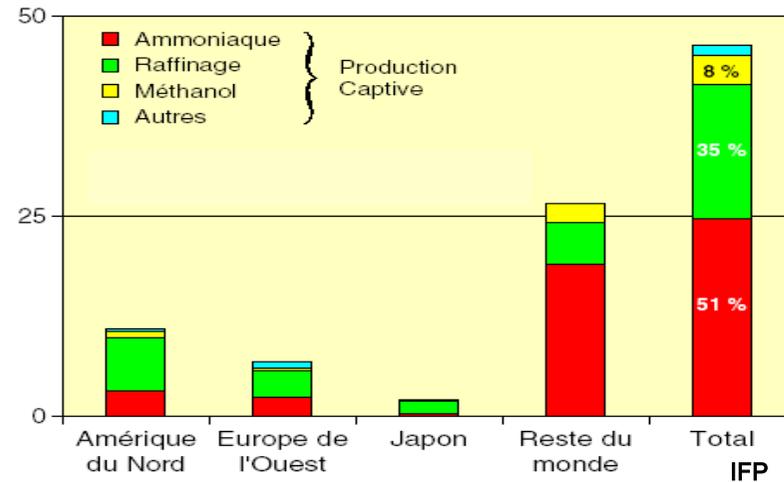


- 1. Hydrogène**
- 2. Electrolyse de l'eau**
- 3. Electrolyseur PEM**
- 4. Applications & Services**
- 5. AREVA H2Gen**

# Les marchés de l'hydrogène

## Production mondiale

- 666 Milliards de m<sup>3</sup> (2008)
- 60 Millions de tonnes/an
- 2% de la consommation énergie mondiale

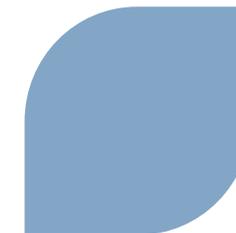


« Pas d'utilisation en énergie »

Pour arriver à un taux de pénétration de 20% en besoins d'énergie, il faudrait produire 12500 Milliards de m<sup>3</sup>/an

AREVA H<sub>2</sub>Gen

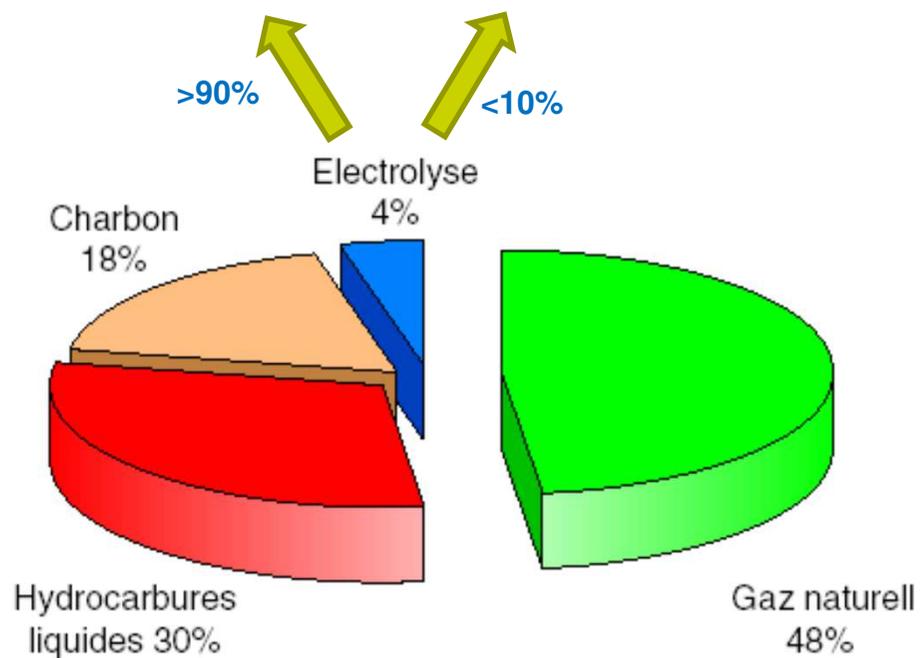
# Comment produire l'hydrogène



Electrolyse Chlore-soude

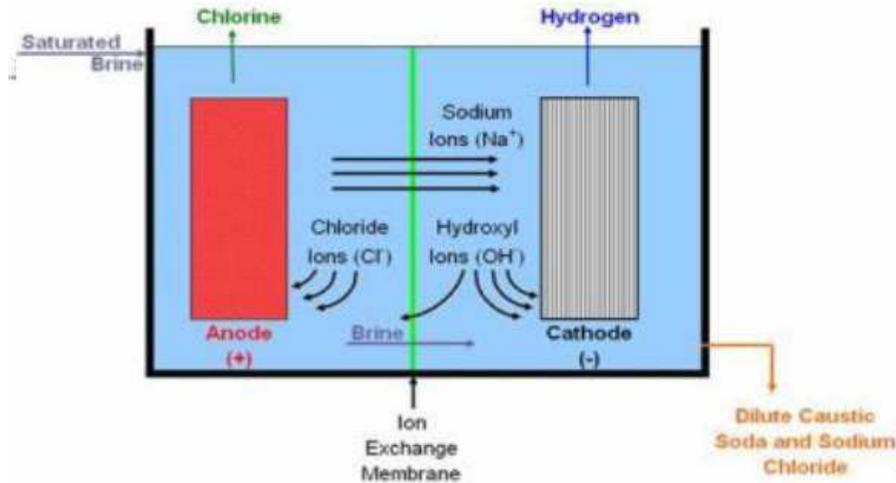
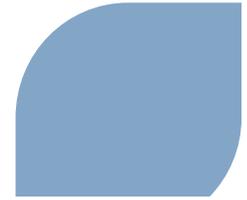


Electrolyse de l'eau



AREVA H<sub>2</sub>Gen

# Electrolyse Chlore-Soude

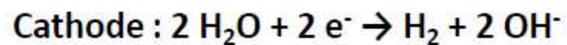
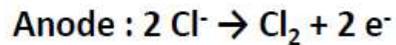


► 3 technologies



Chlor-alkali cell room – Uhde GmbH

## Réactions aux interfaces



## Marchés

- Acide Chlorhydrique
- Désinfectants
- Produit pharmaceutiques
- Herbicides
- Détergents
- Pesticides
- Déodorants
- Plastics

L'Hydrogène est un produit secondaire = « H2 fatal »

Technologie industrielle mature

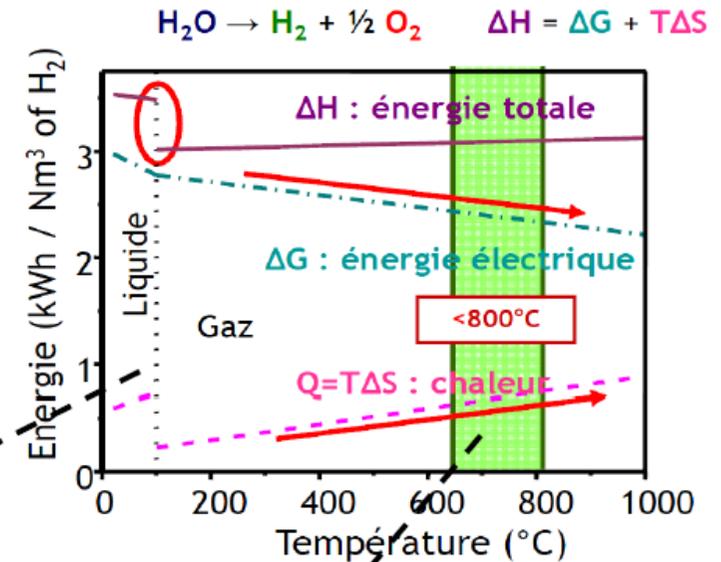
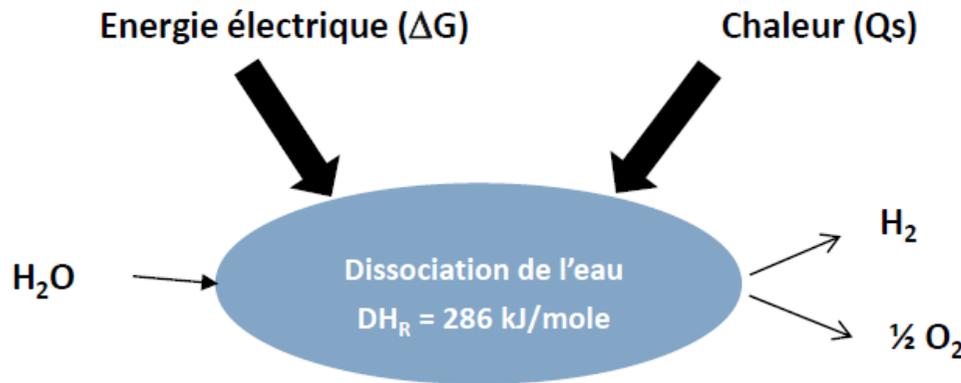
Fonctionnement continu basse pression

AREVA H<sub>2</sub>Gen

## Histoire

- 1789 : invention de l'électrolyse par J.R. Deiman et A. Paets van Troostwijk
- 1800: première électrolyse par courant continu par W. Nicholson & Sir A. Carlisle
- 1834: première utilisation du mot électrolyse par Faraday

# Electrolyse de l'eau Principe



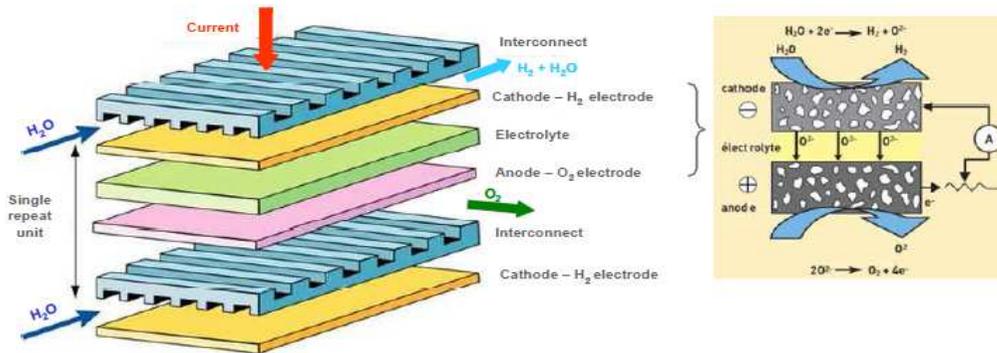
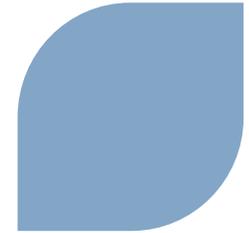
Source: Chase NIST-JANAF Thermochemical Tables (1998) Monograph 9, 1325

Electrolyse Basse Température	Electrolyse Haute Température
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Electrolyse alcaline à électrolyte liquide</li> <li>- Electrolyse acide à électrolyte solide (PEM)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Electrolyse de la vapeur d'eau (EVHT)</li> </ul>

AREVA H<sub>2</sub>Gen



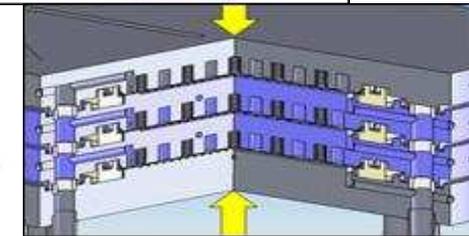
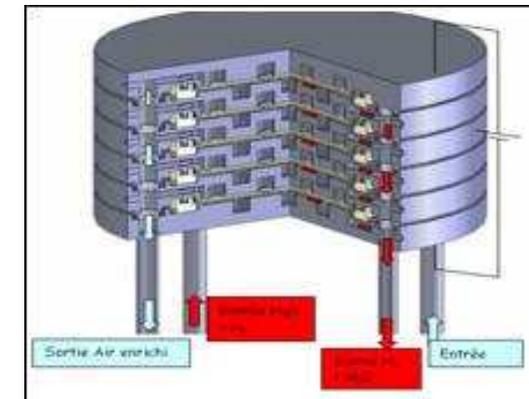
# Electrolyse à la vapeur (HT à électrolyte solide)



SOFC  
Reversibility

	Basse température		Haute température
Electrolyte	KOH	PEM	Céramique
Température de fonctionnement (°C)	70 - 100	60 - 90	600 - 800
Pression (bar)	32	10 - 400	5 - 30
Consommation électrique (kWh/Nm <sup>3</sup> )	4,3 - 4,8	4,3 - 7	3,2

AREVA H<sub>2</sub>Gen

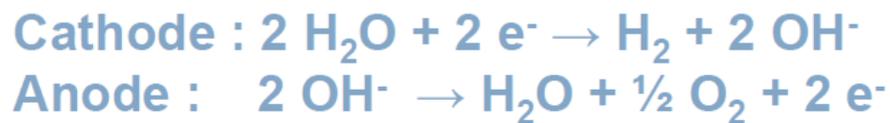
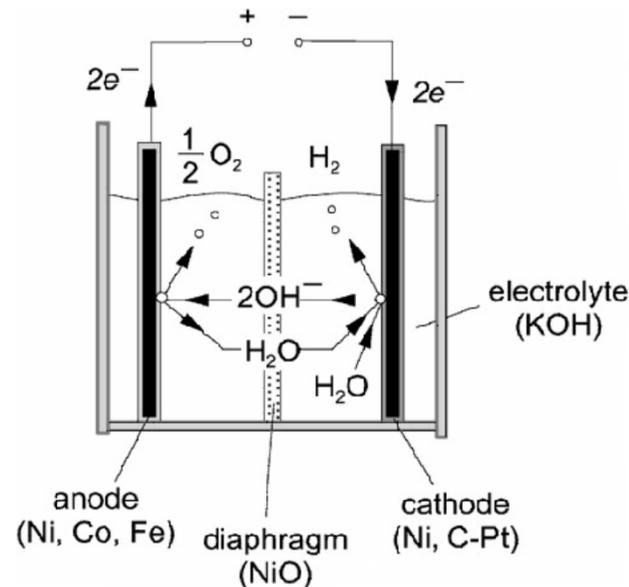
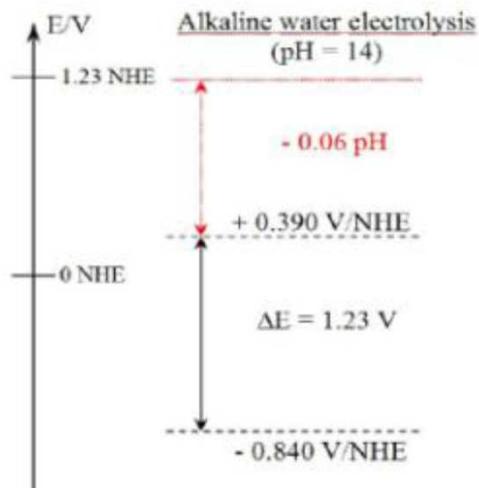
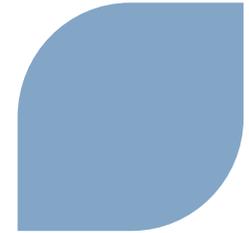


Technologie encore à l'état de développement

## Histoire

- 1900 : premier électrolyseur industriel bipolaire
- 1939: Premier électrolyseur de 10 000 Nm<sup>3</sup>/h
- 1951 : Lurgi présente le premier électrolyseur haute pression (30 bar)

# Electrolyse alcaline (BT à électrolyte liquide)



Electrolyte : 30% KOH liquide

Température de fonctionnement : 60-80°C

Pression de fonctionnement : < 30 bar

Densité de courant: 0,2 – 0,8 A/cm<sup>2</sup>

Conso élec: 4,3 – 6,5 kWh/Nm<sup>3</sup>

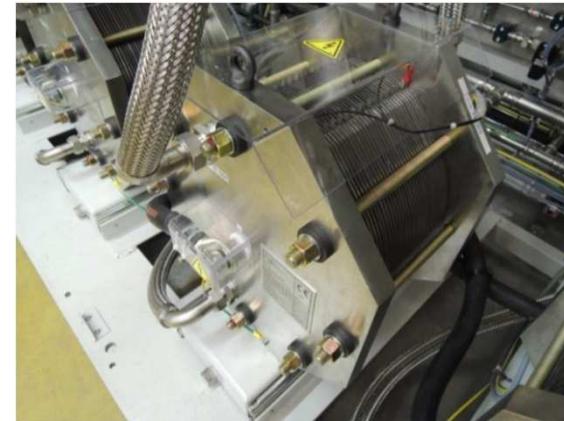
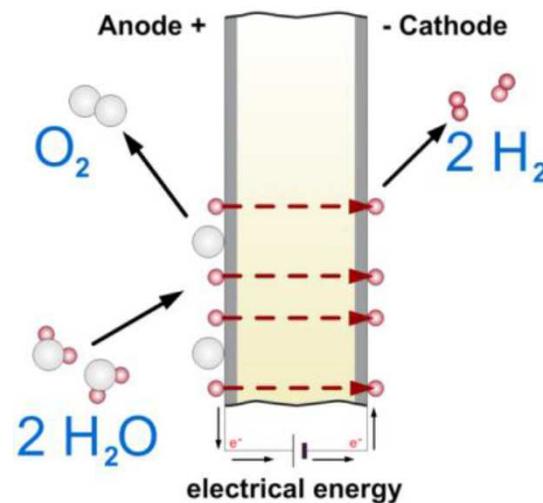
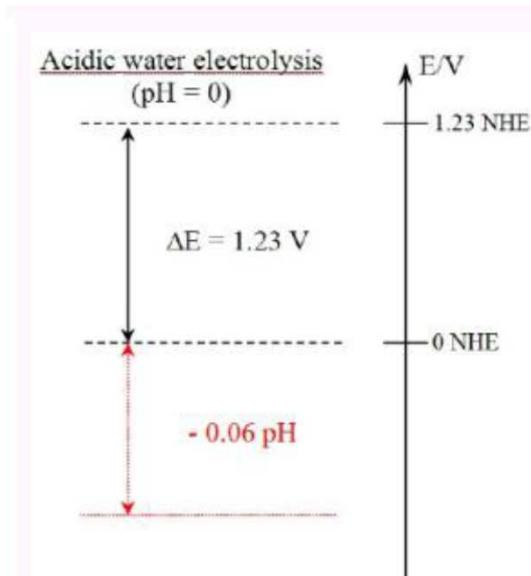
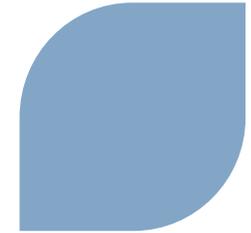
AREVA H<sub>2</sub>Gen

Développement d'une nouvelle technologie à  
électrolyte solide

## Histoire

- 1900 : premier électrolyseur industriel bipolaire
- 1939: Premier électrolyseur de 10 000 Nm<sup>3</sup>/h
- 1951 : Lurgi présente le premier électrolyseur haute pression (30 bar)

# Electrolyse PEM (BT à électrolyte solide)



Electrolyte : polymere

Température de fonctionnement : 60-90°C

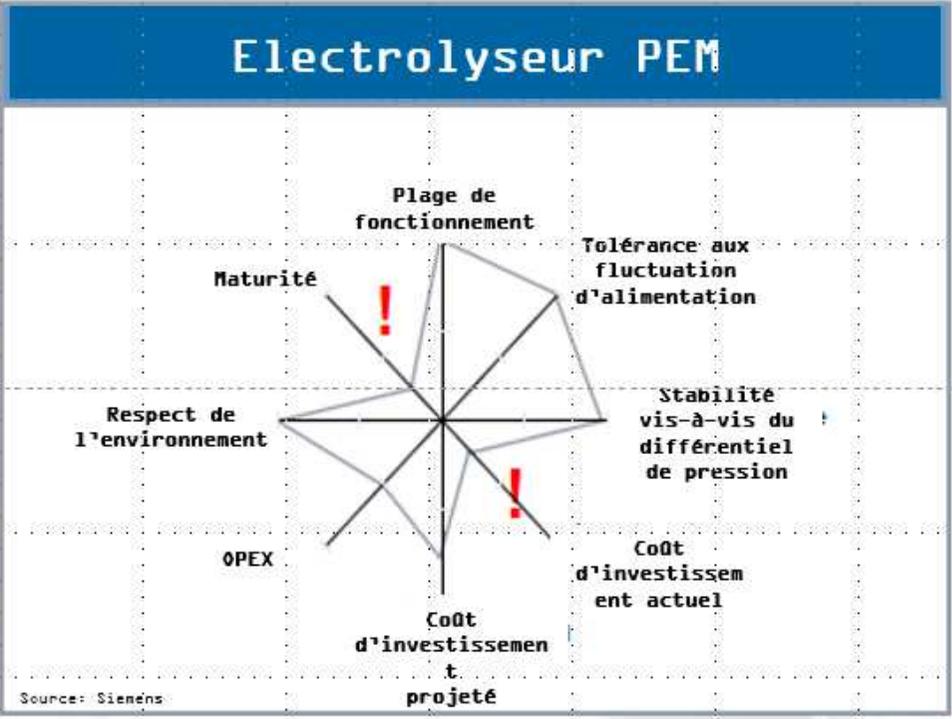
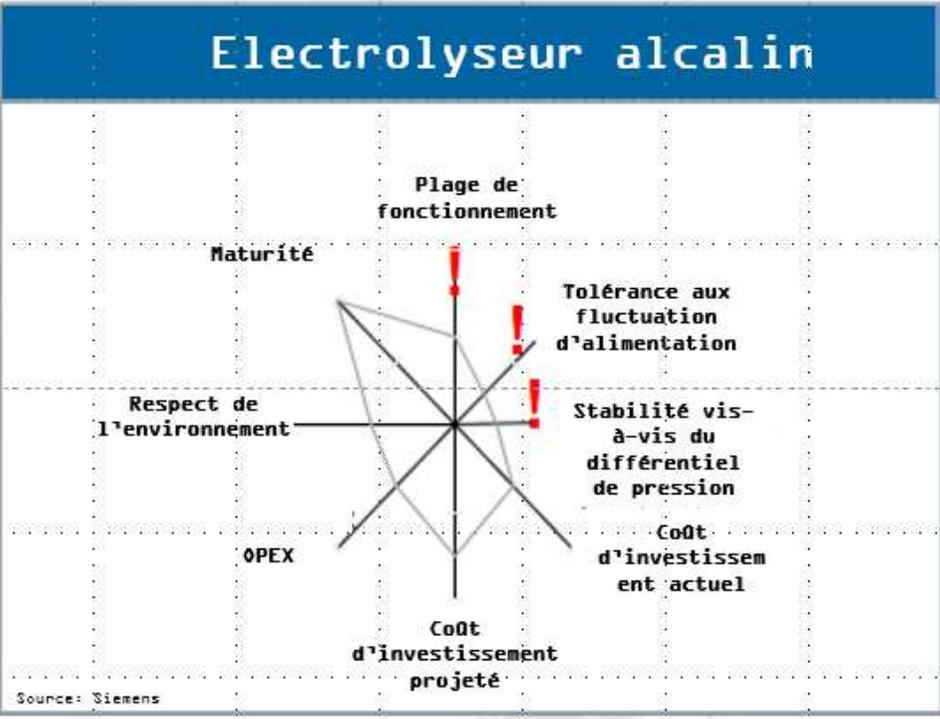
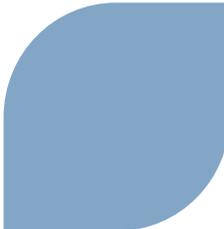
Pression de fonctionnement : 10-200 bar

Densité de courant: 0,8 – 2 (10) A/cm<sup>2</sup>

Conso élec: 4,3 – 6,5 kWh/Nm<sup>3</sup>

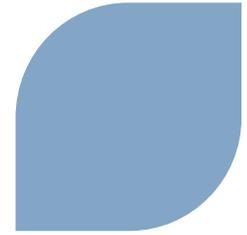
AREVA H<sub>2</sub>Gen

# PEM vs Alcalin

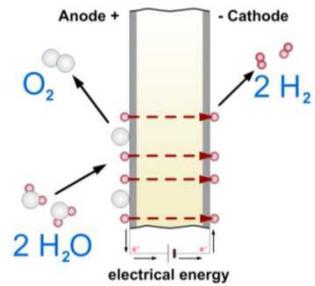


AREVA H<sub>2</sub>Gen

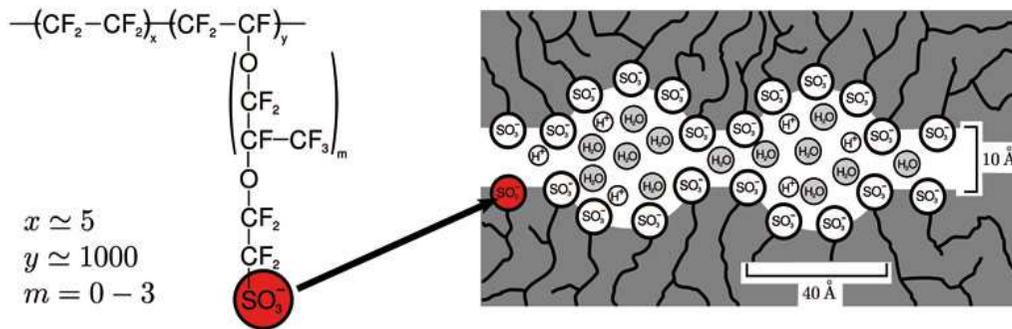




# Electrolyte solide



## Membrane échangeuse de protons



- Diffusion d'eau : flux électro-osmotique
- Diffusion de gaz : cross perméation gazeuse (H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>)

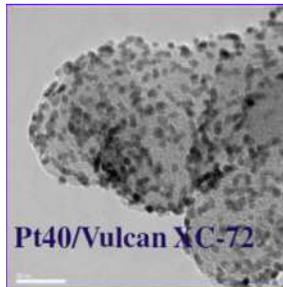
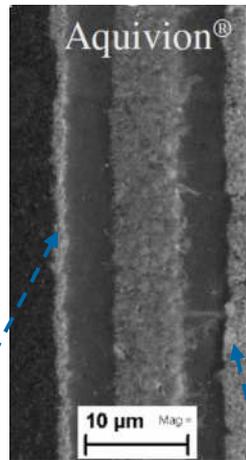
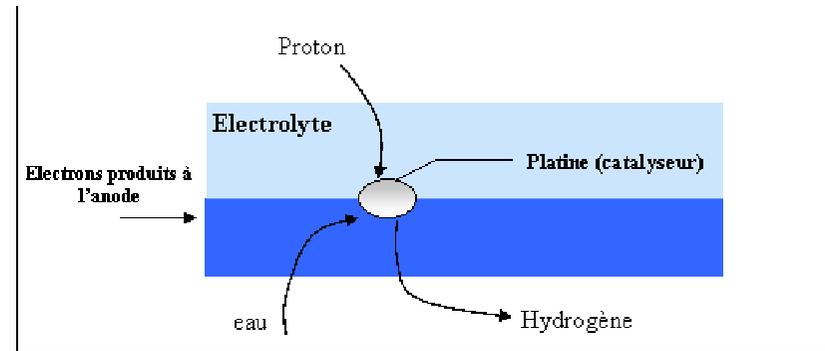
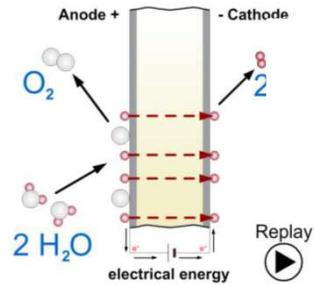
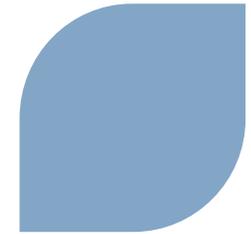


Membrane 80 – 120 microns

AREVA H<sub>2</sub>Gen

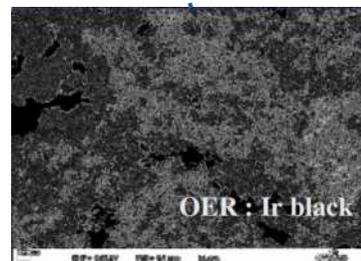
# AME

## Assemblage Membrane Electrode



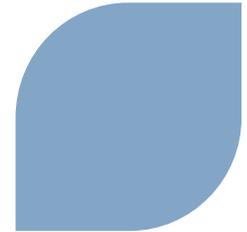
0,1-0,2 mg/cm<sup>2</sup>

AREVA H<sub>2</sub>Gen

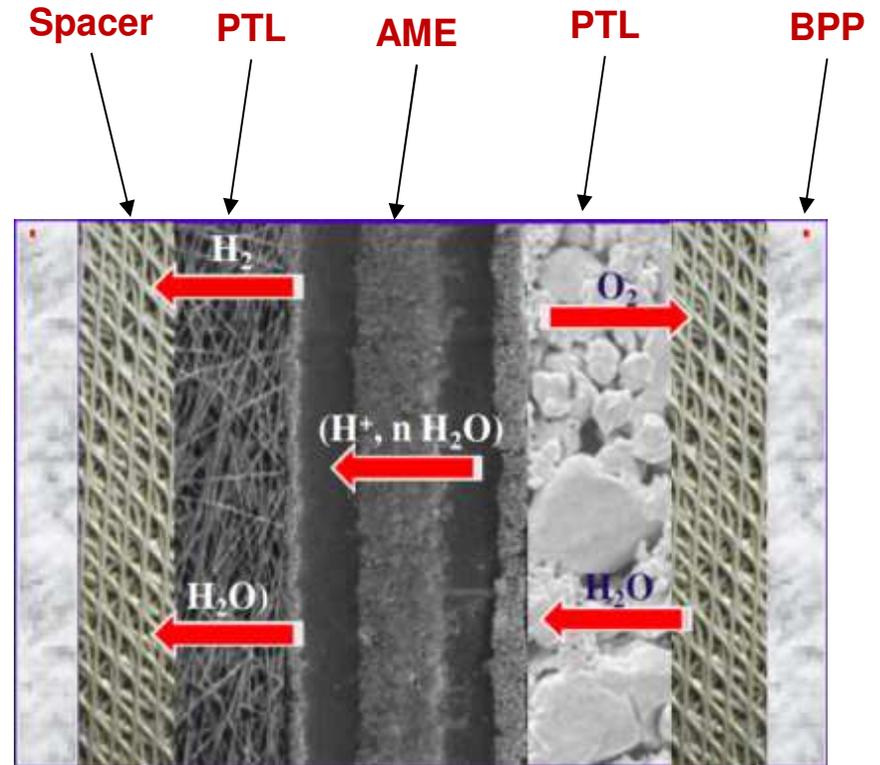
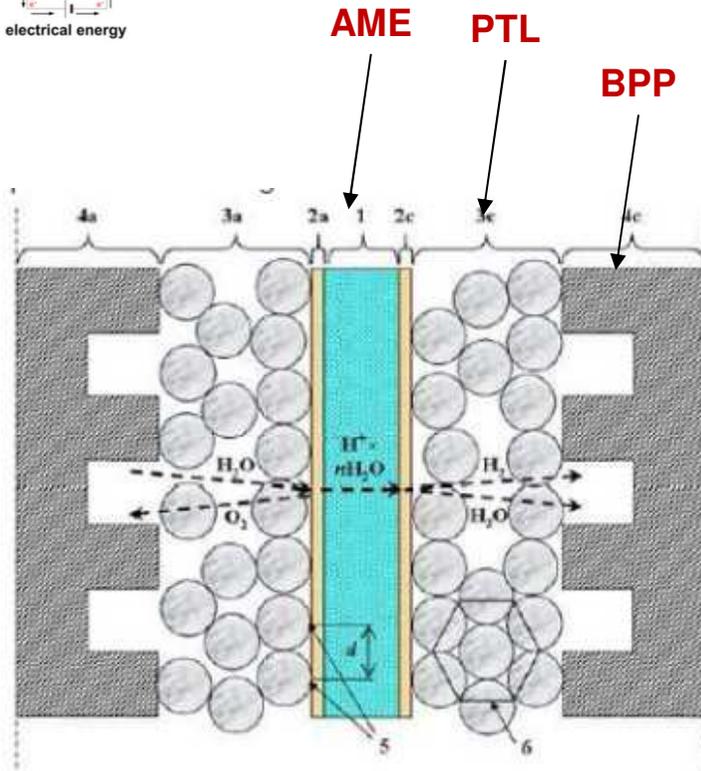
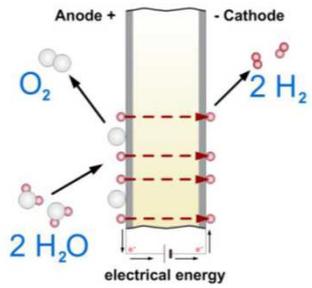


1-2 mg/cm<sup>2</sup>





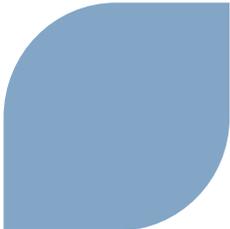
# Cellule



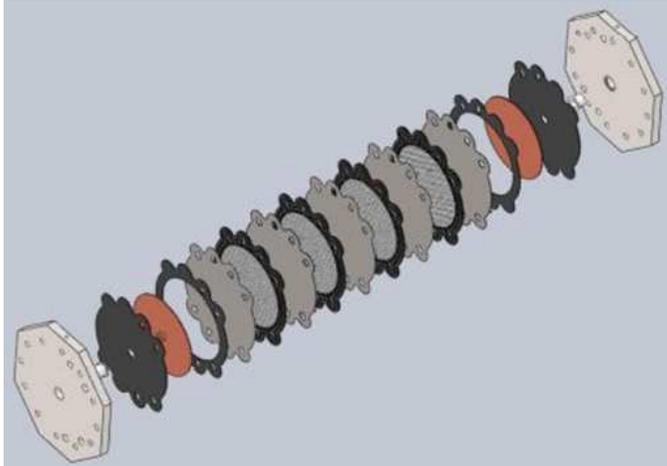
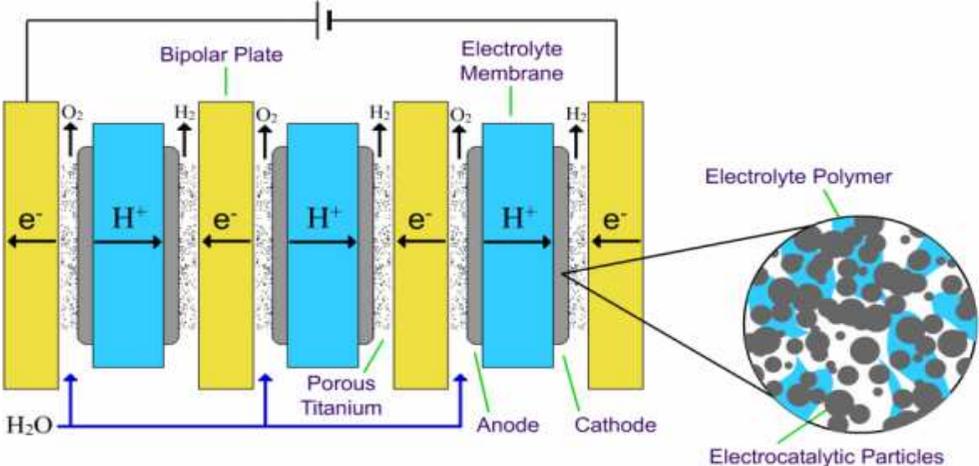
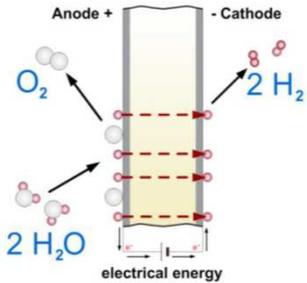
AME: assemblage membrane electrode  
 PTL : porous transport layer  
 Spacer : diffuseur d'eau  
 BPP: plaque bipolaire

Anode: titane  
 Cathode: carbone ou titane

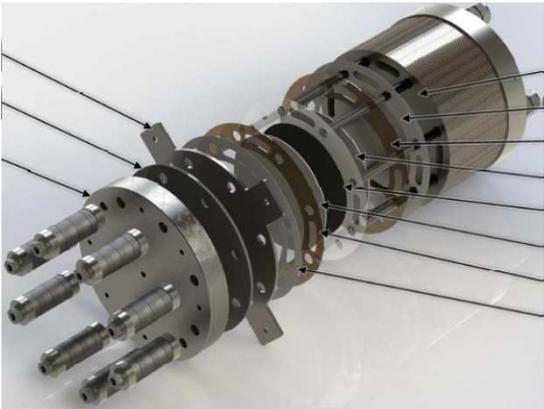
AREVA H<sub>2</sub>Gen



# Stack

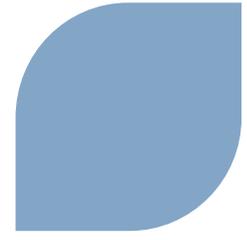


$$D_{H_2} = N * (I / 2,393)$$

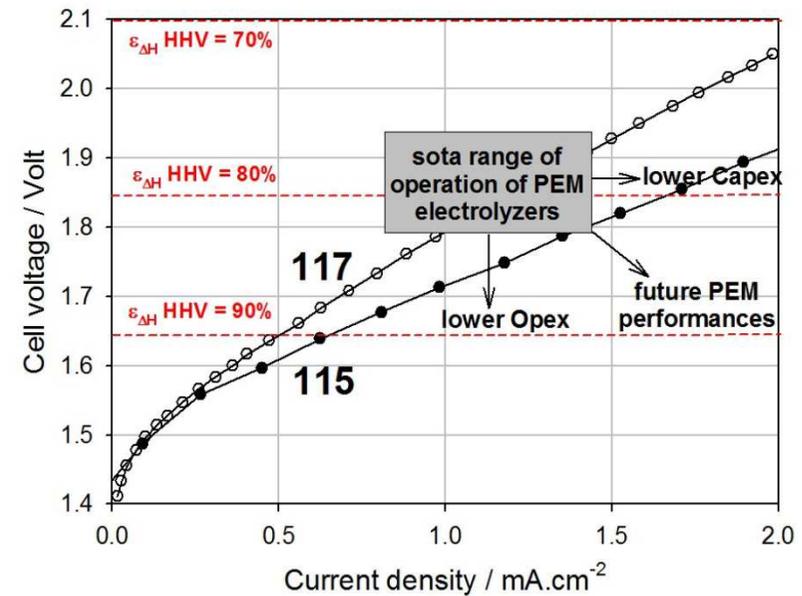
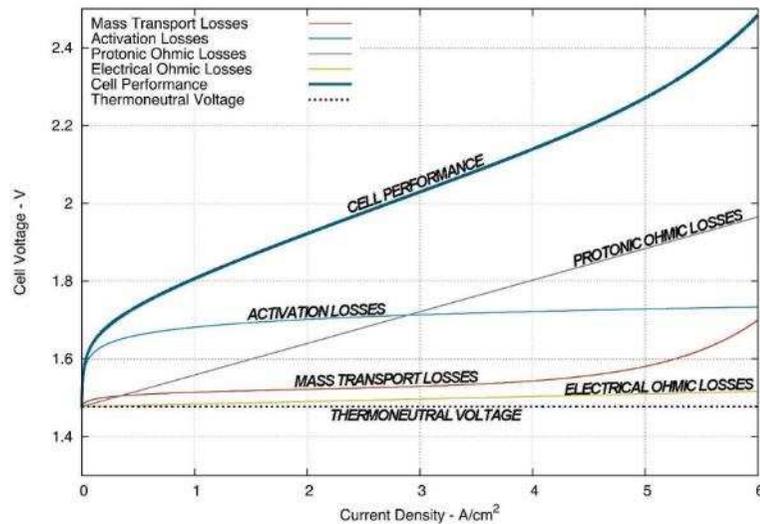
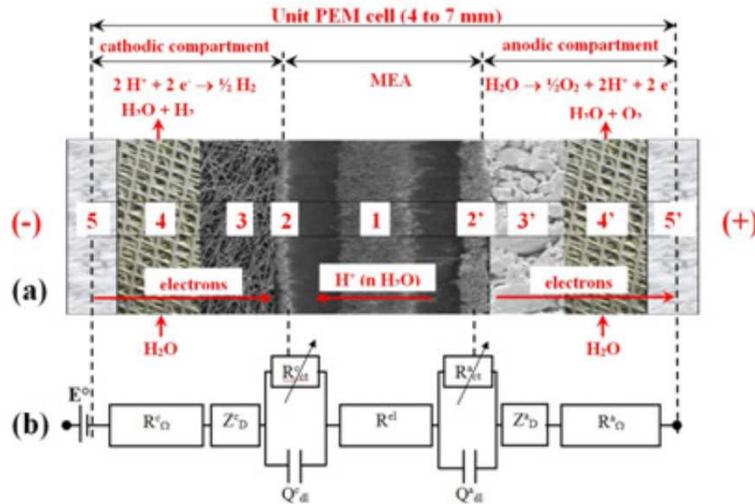
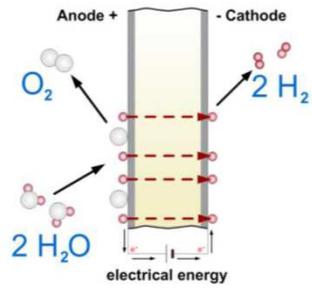


AREVA H<sub>2</sub>Gen

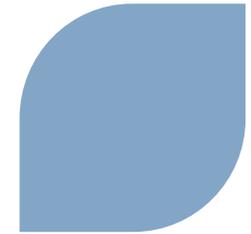




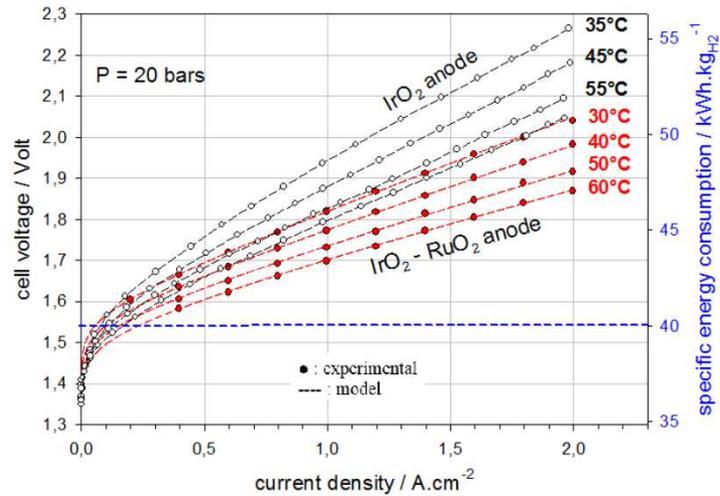
# Caractéristiques électriques



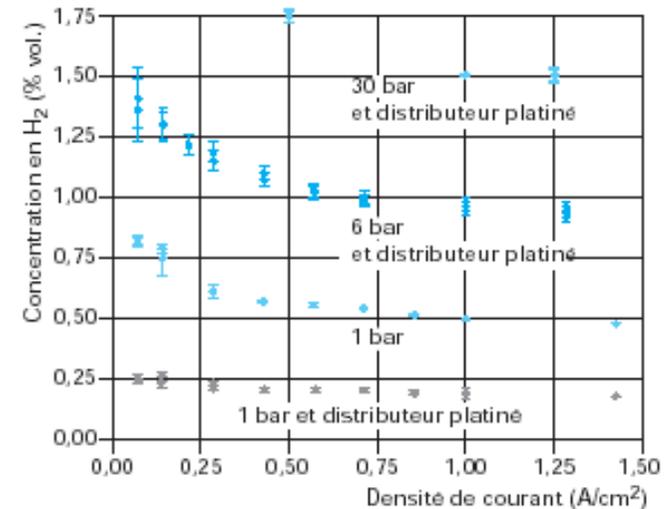
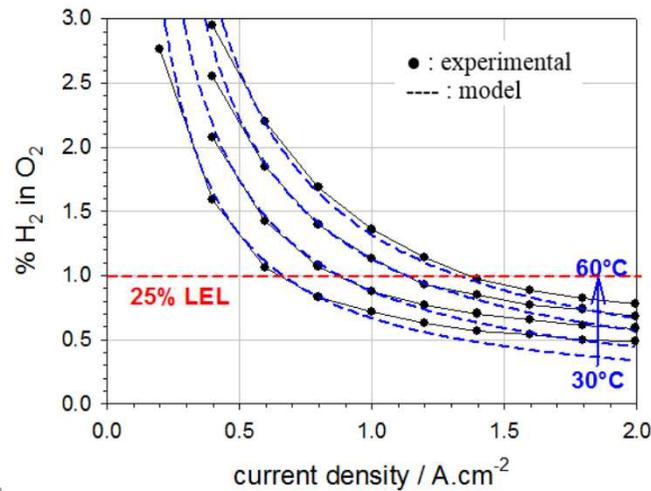
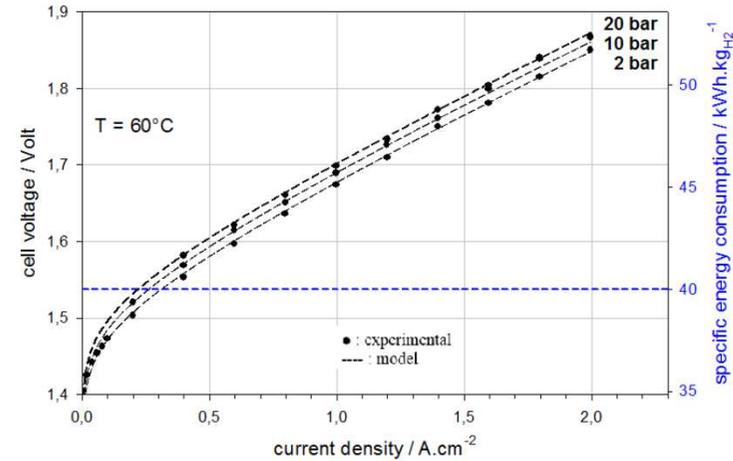
# Influence des paramètres opératoires



Température

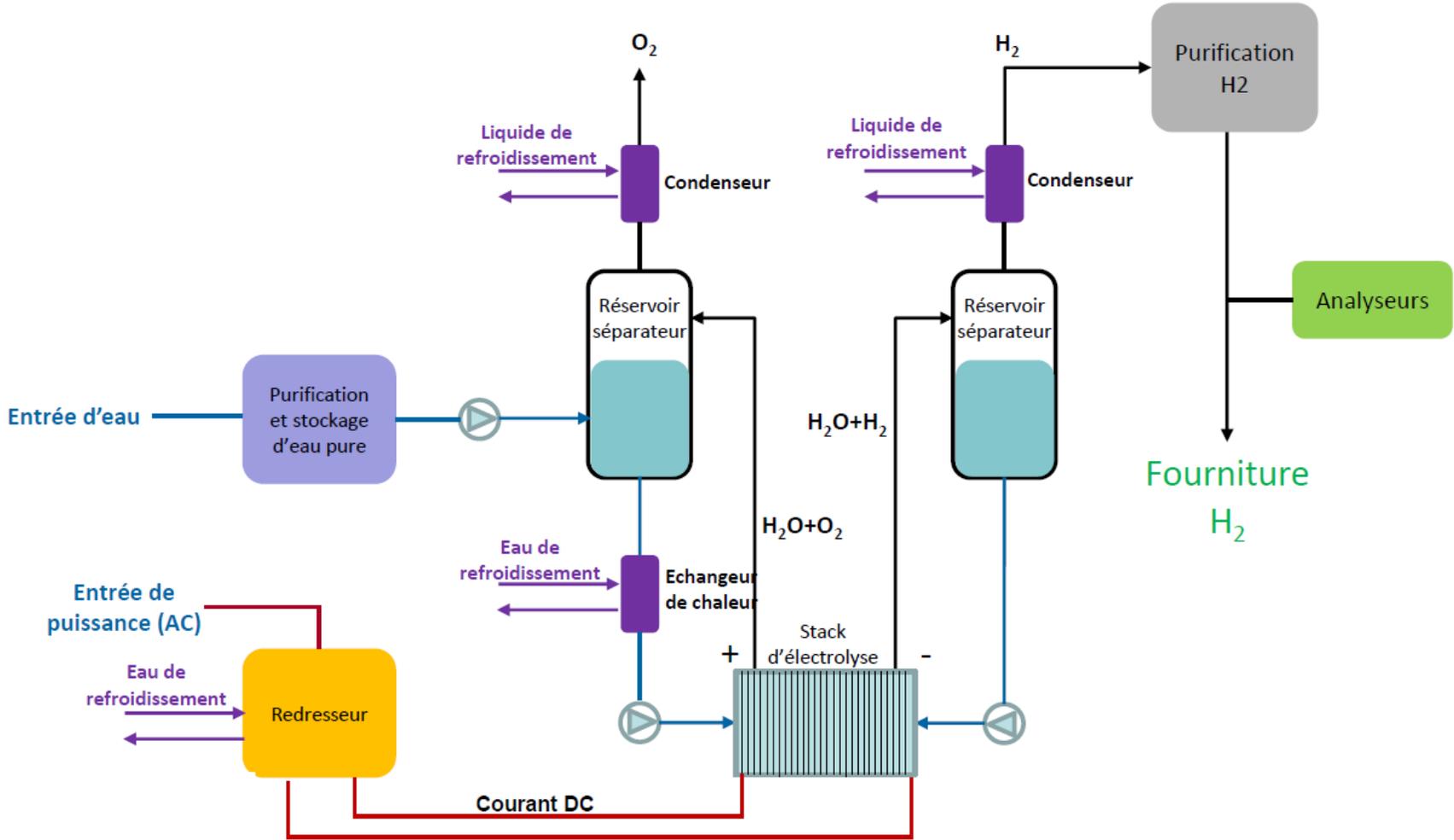


Pression



AREVA  $H_2$

# Electrolyseur



AREVA H<sub>2</sub>Gen



# A quoi ca ressemble?



Electrical cabinet

- HMI : 15' colour touch screen

Rectifiers 210 kVA

Gas Skid

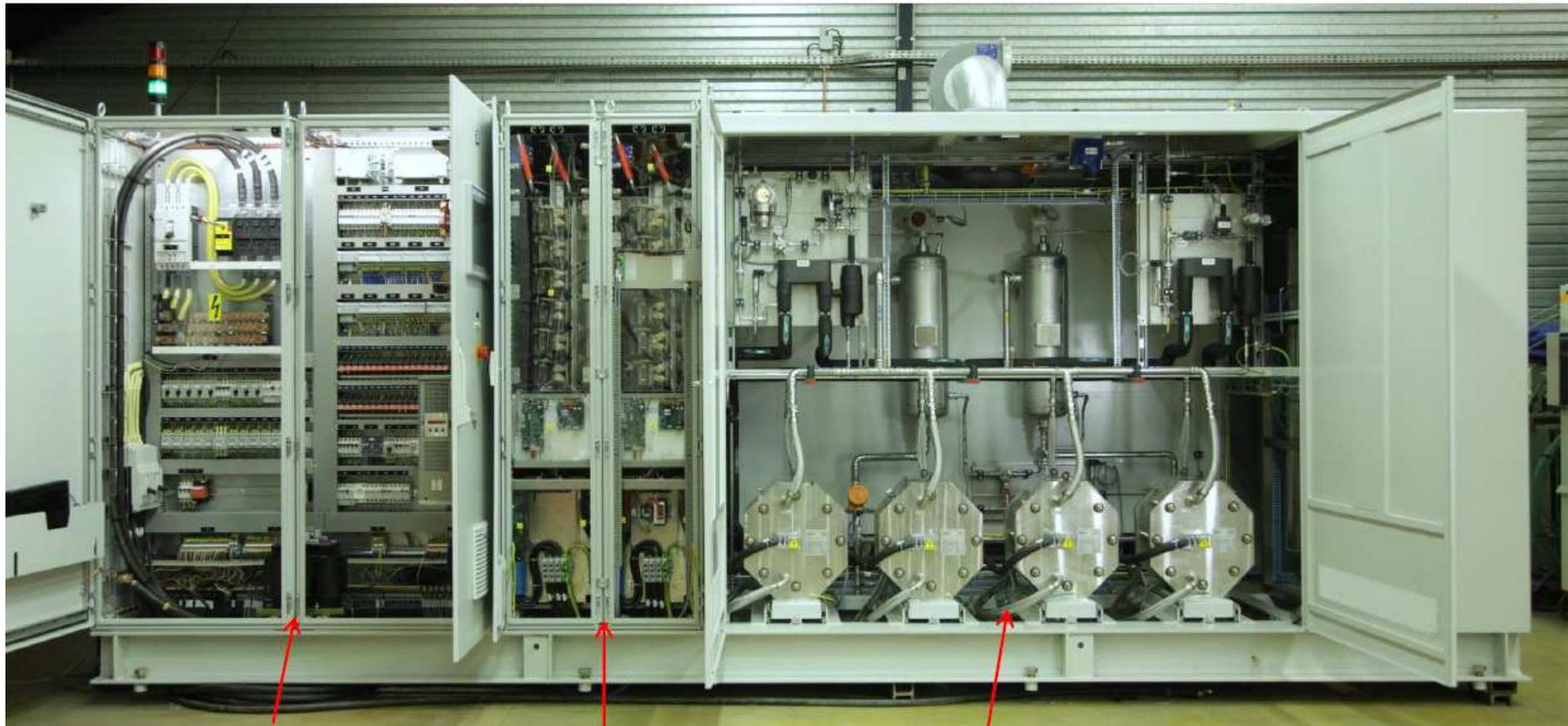
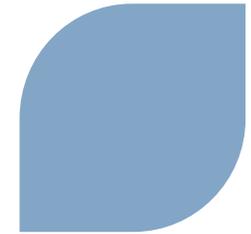
Purification Unit

- H<sub>2</sub> quality : 99,999%

**AREVA** H<sub>2</sub>Gen

**AREVA**  
forward-looking energy

# All in One platform concept (indoor)



## Electrical cabinet

- SIL 1 PLC : Allen Bradley
- UPS : for proper shutdown

## Rectifier

- 2 cabinets
- 95 kW each
- 300A / 350 V

## Gas Skid

- 4 stacks of 8 Nm<sup>3</sup>/h each
- Stacks are CE certified
- 2 separator tanks SS316L CE certified

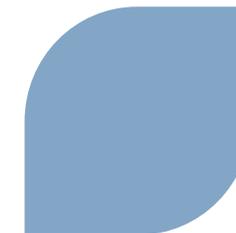
AREVA H<sub>2</sub>Gen

# Système autonome (outdoor)



AREVA

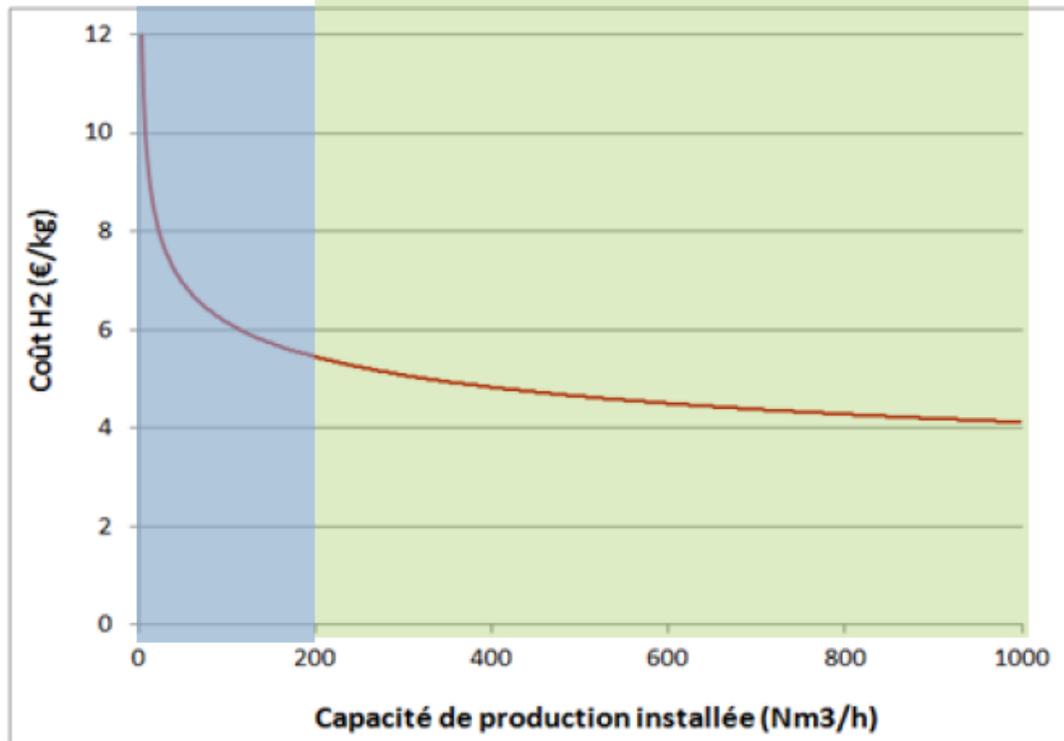
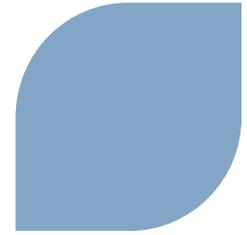
# Caractéristiques techniques



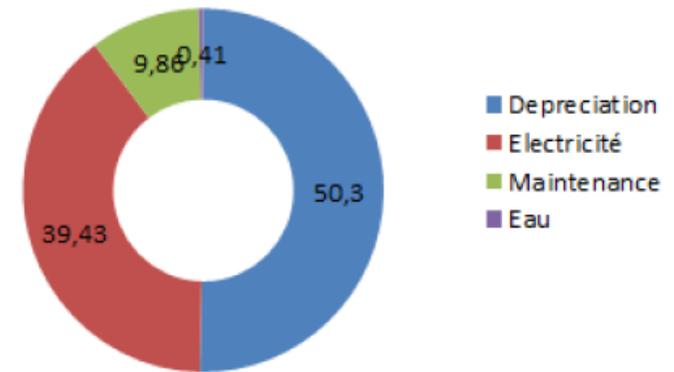
Paramètres		Valeurs	Unités
Débit	H <sub>2</sub>	0,5 - 200	Nm <sup>3</sup> /h
	O <sub>2</sub>	0,25 - 100	
Pression	H <sub>2</sub>	10 – 35 (50-200)	Bar
	O <sub>2</sub>	1 - 30	
Pureté		99,9 – 99,9998	%
Consommation énergétique / stack		4,2 - 5	kWh/Nm <sup>3</sup>
Consommation énergétique / système		5,2 - 7	
Consommation en eau		0,8	L/Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub>
Puissance absorbée / système		3 - 1000	kW
Plage de fonctionnement		0 – 100%	% du nominal
Température de fonctionnement		50-65°C	°C

AREVA H<sub>2</sub>Gen

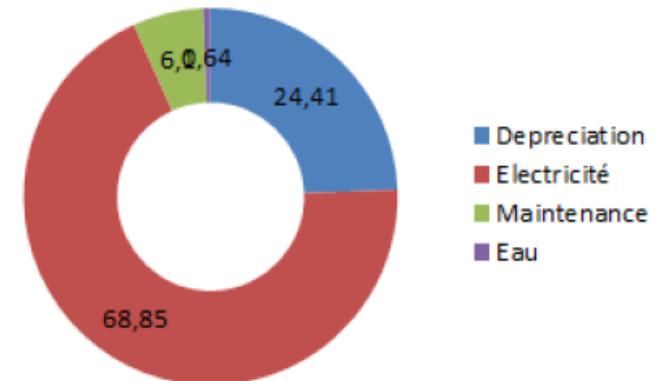
# Coût de l'hydrogène



Prix électricité: 0,07 €/kW  
 Dépréciation: 10 ans  
 Disponibilité: 70%



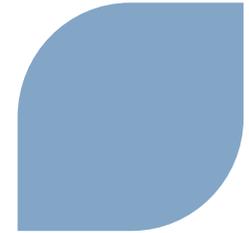
Electrolyseur 20 Nm3/h



Electrolyseur 300 Nm3/h

AREVA H<sub>2</sub>Gen

# Les marchés: hydrogène pour l'industrie



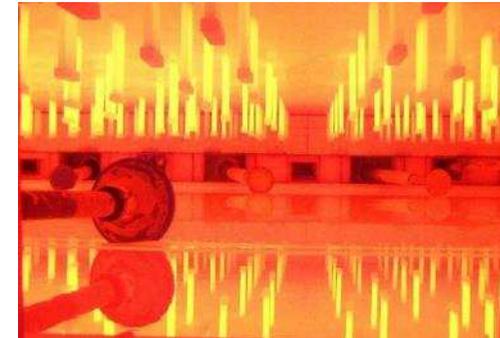
- ▶ An export market in developing countries only



Alternator cooling



Heat treatment



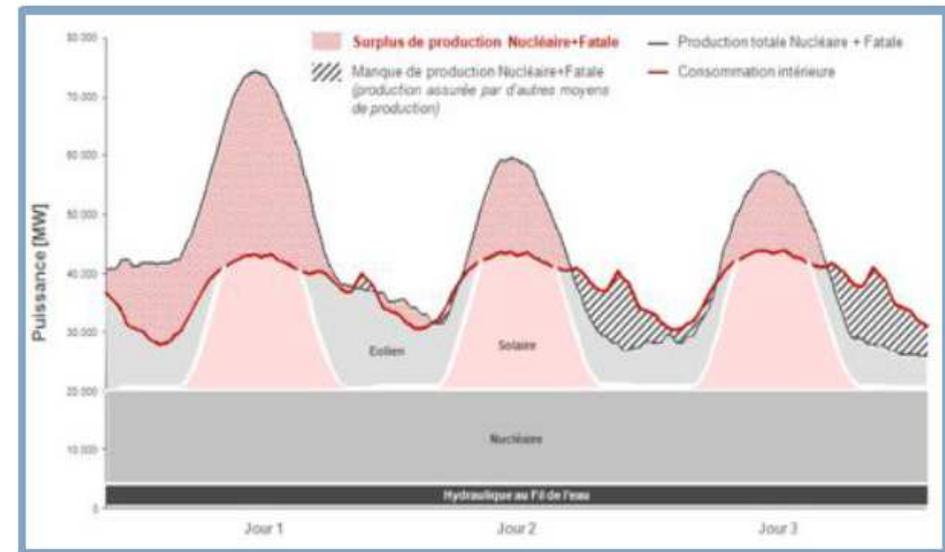
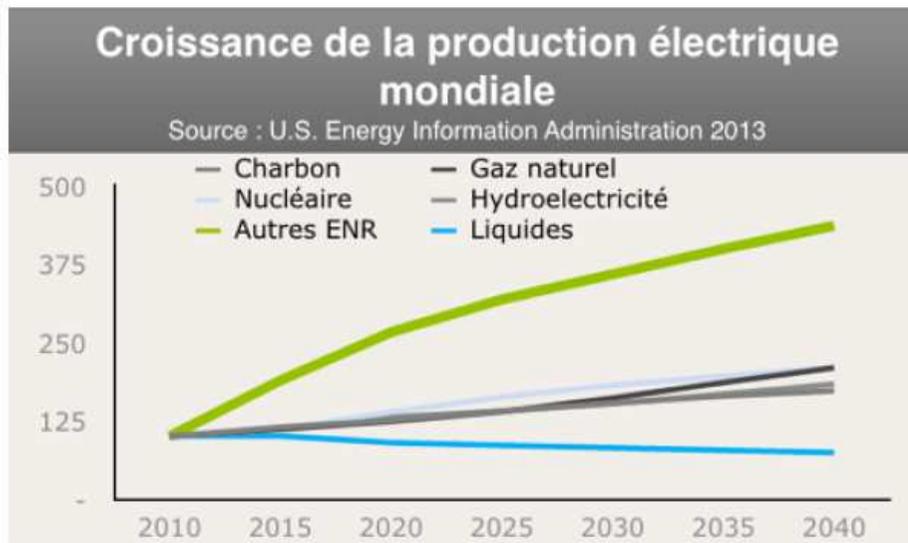
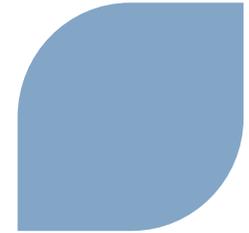
Float glass

- ▶ A sales path through EPC Companies

**Marché mondial de 50-100 M€/an**

AREVA H<sub>2</sub>Gen

# Pourquoi l'électrolyse? Hydrogène pour l'énergie

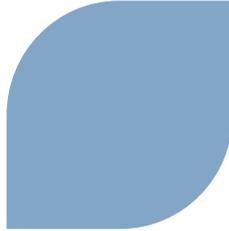


- ▶ **Production irrégulière**
- ▶ **Saturation des réseaux**
- ▶ **Non prédictibles**

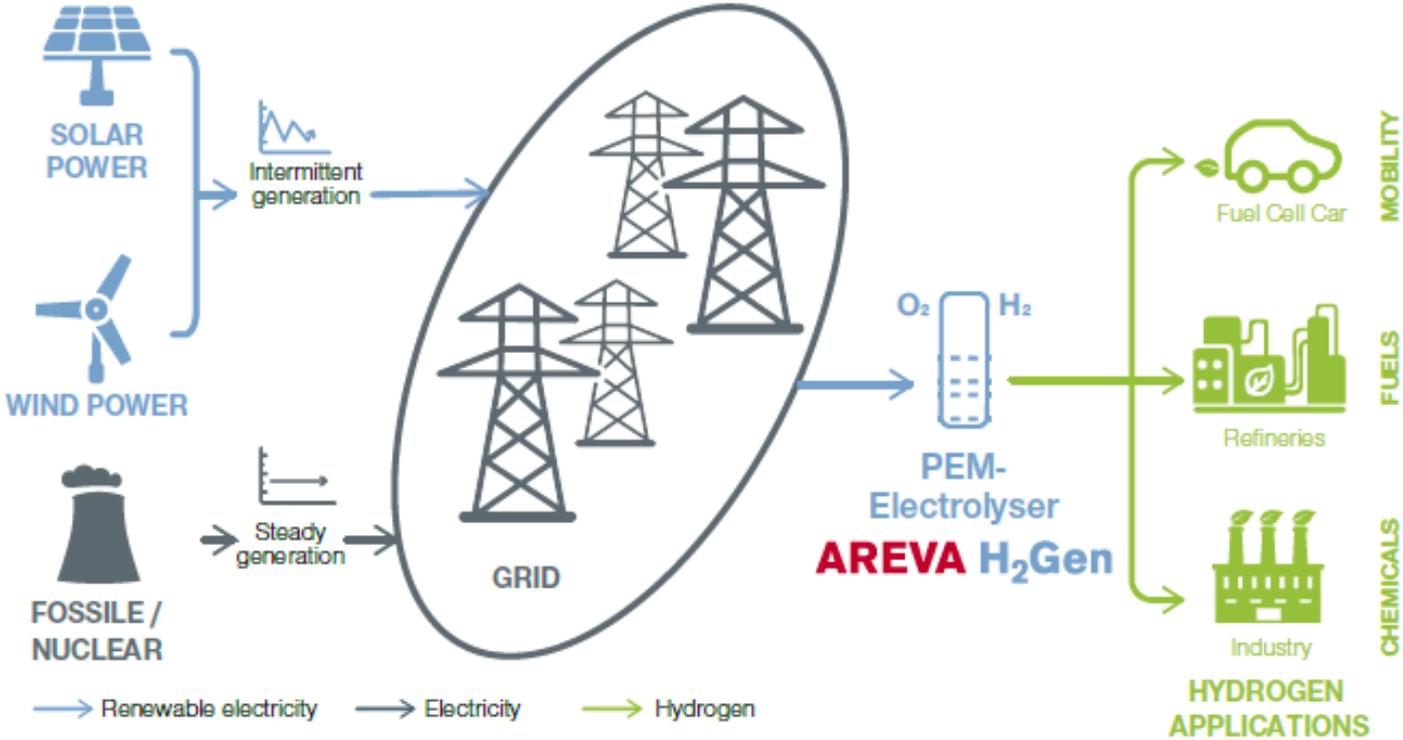
La progression des ENR dans le mix énergétique nécessite de valoriser ces surplus et dépend donc du lissage et du stockage de la production

AREVA H<sub>2</sub>Gen

# Electrolyse est une brique de la solution!



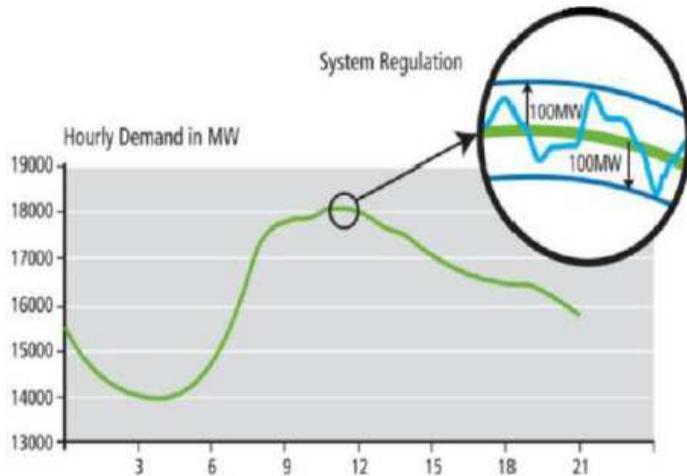
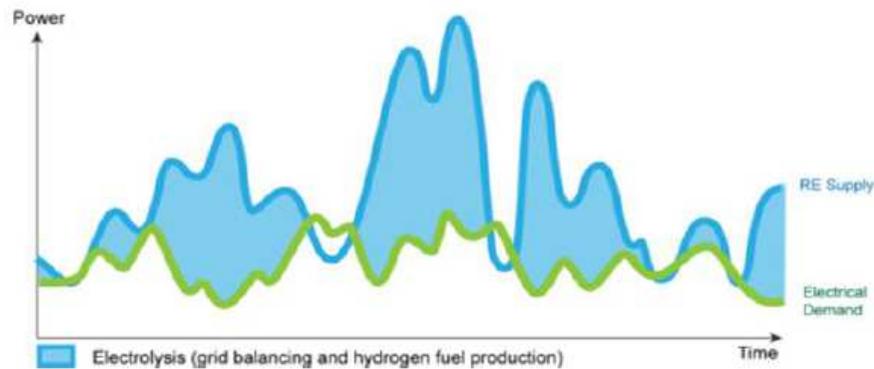
HYDROGEN DELIVERS THE ENERGY TRANSITION:



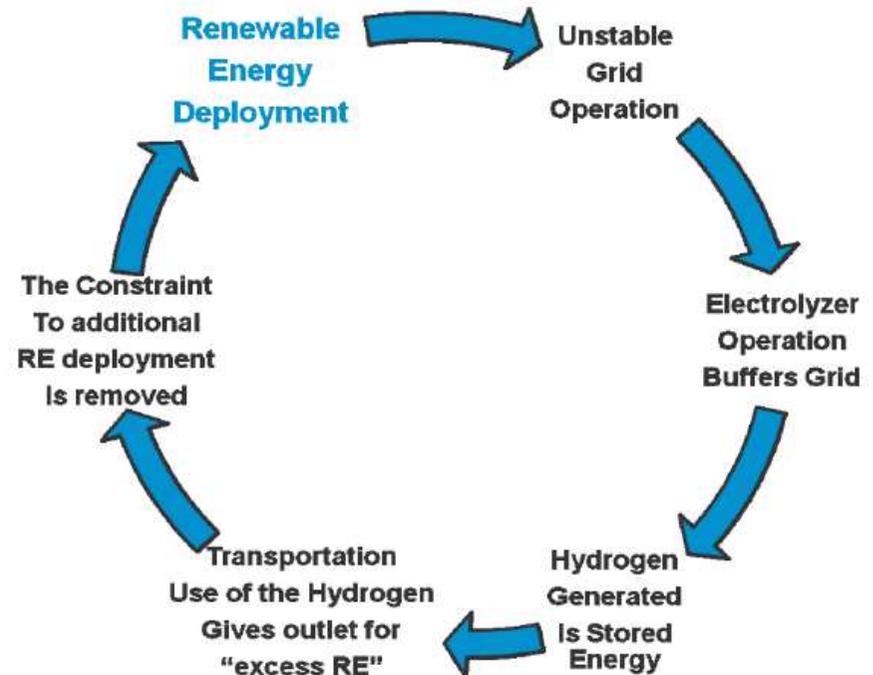
AREVA H<sub>2</sub>Gen

# Un service dynamique

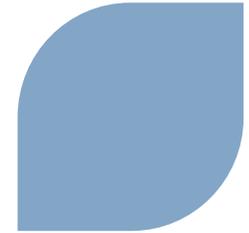
Mettre en place une « charge dynamique » en adéquation avec la production pour réguler le réseau



AREVA H<sub>2</sub>Gen

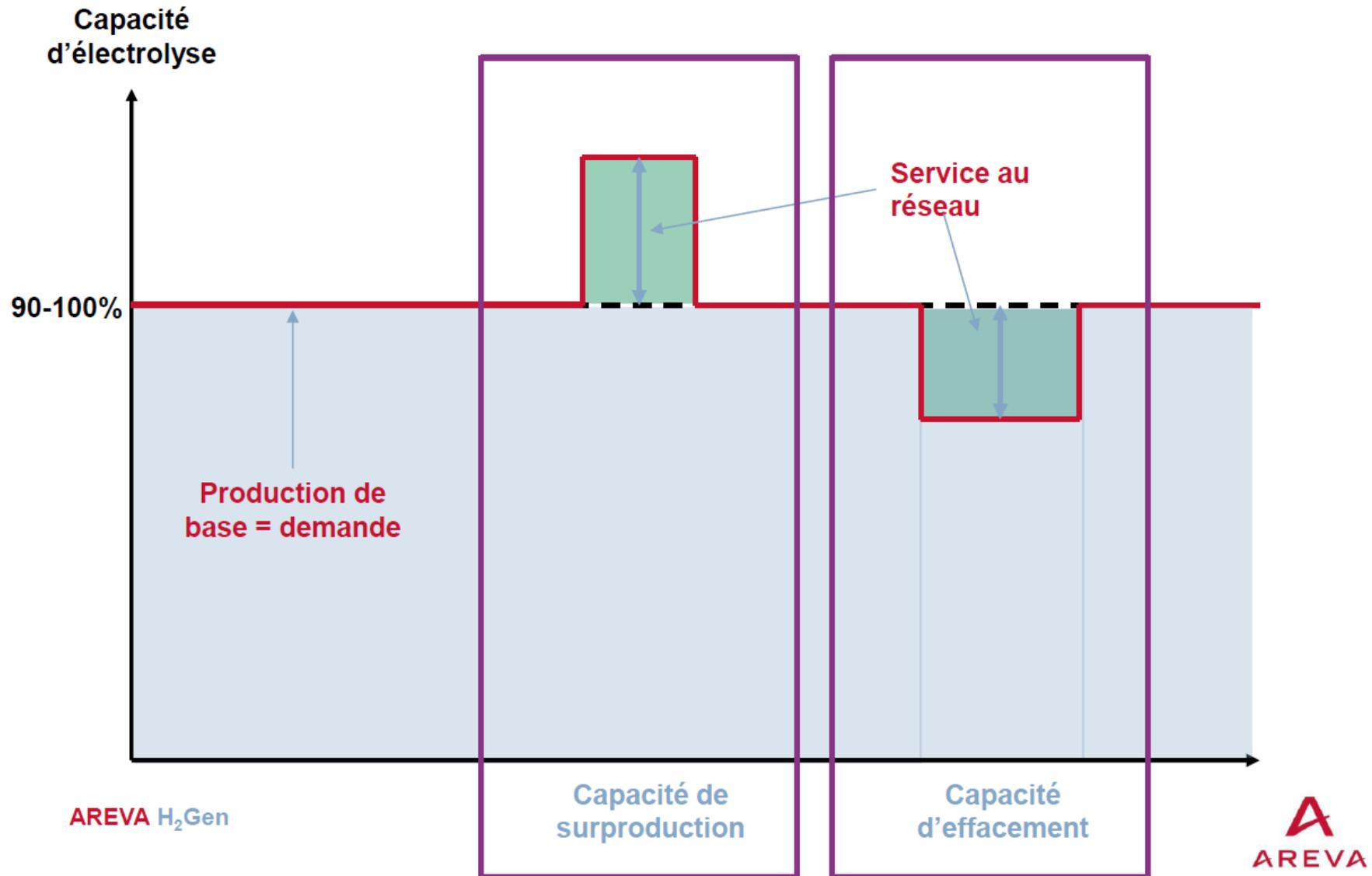
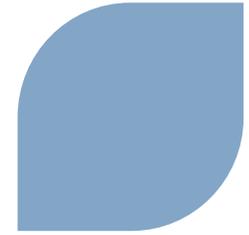


# Mécanisme de réserve

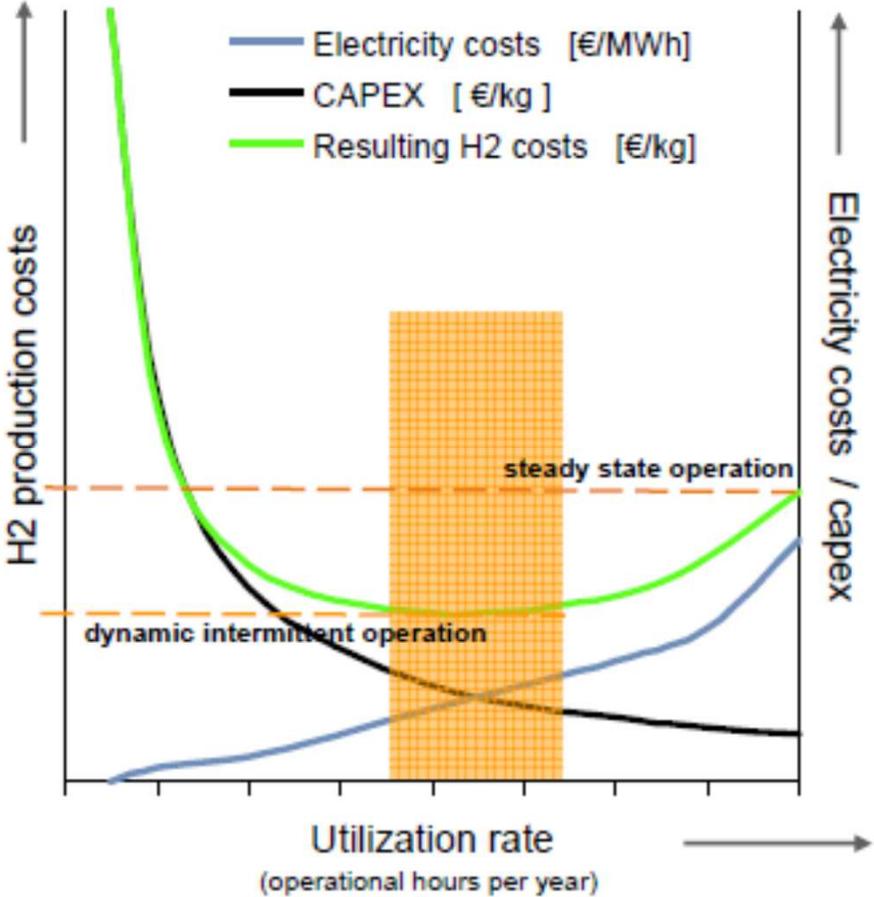
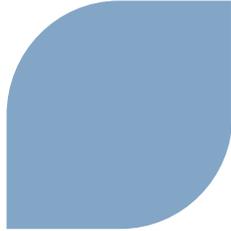


		Capacité	Sens	Rapidité	Durée
Allemagne	Primaire	1 MW	POS et NEG	50% -> 15 s 100% -> 30 s	15 minutes
	Secondaire	5 MW	POS et NEG	100% -> 5 min	illimité
	Tertiaire	5 MW	POS et NEG	100% -> 15 min	illimité
France	Primaire	1 MW	POS et NEG	50% -> 15 s 100% -> 30 s	15 minutes
	Secondaire	1 MW	POS et NEG	100% -> 133 s	illimité
	Tertiaire	10 MW	FR, CR, IL : POS AM : POS et NEG	FR : 100% -> 13 min CR : 100% -> 30 min AM,IL : 100% -> 2 h	illimité
Angleterre	BM	1 MW	POS et NEG	100% -> 5 min	1-1,5 h
	STOR-C	3 MW	NEG	100 % -> 15 min	2 h
	STOR-F	3 MW	NEG	100 % -> 15 min	2 h
	STOR-PF	3 MW	NEG	100 % -> 15 min	2 h
	EO STOR		NEG	100 % -> <20 min	2 h
	Fast reserve	50 MW	NEG	100 % -> 2 min	15 min
	DSBR		NEG		2-4 h
	Dynamic FFR	10 MW	POS et NEG	100 % -> < 10 s	30 min
	MFR	1 MW	POS et NEG	100 % -> < 10 s	30 min
	EFR	1 MW	POS et NEG	100 % -> < 1 s	15 min
	Static FFR	10 MW	NEG	100 % -> 30 s	30 min
	FCDM	3 MW	NEG	100 % -> 2 s	> 30 min
	DTU	1 MW	POS	Flexible	flexible

# Des modes opérationnels spécifiques



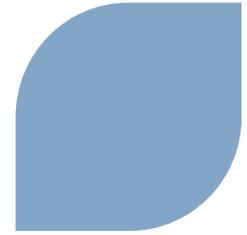
# Des business model à explorer



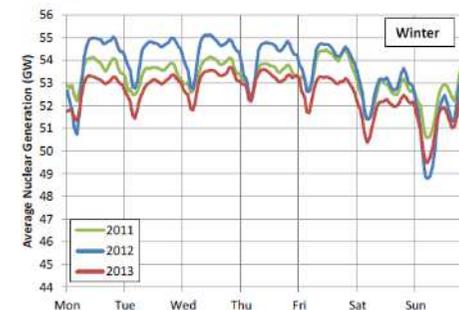
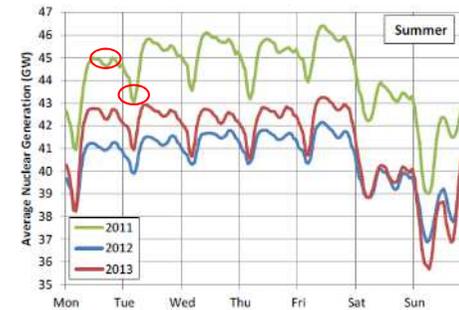
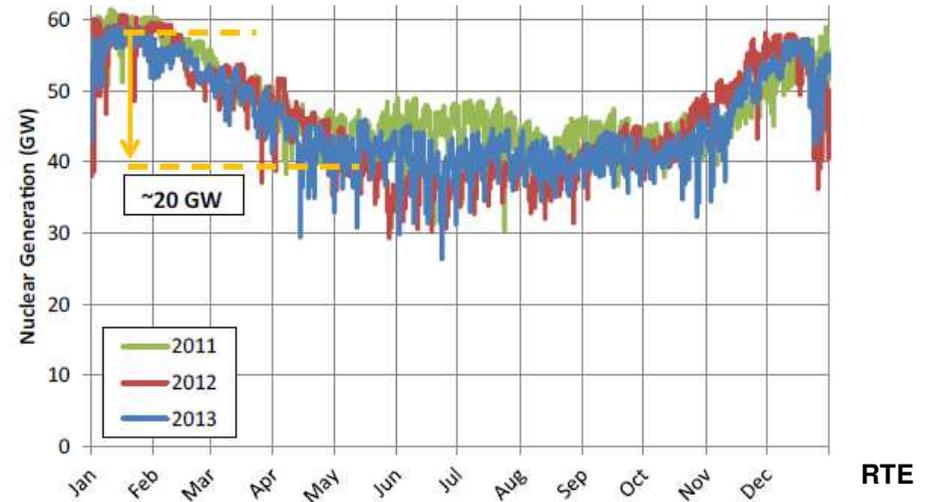
AREVA H<sub>2</sub>Gen



# Et le nucléaire?



- ▶ 2011-2013: 408,4 TWh/an produit = 74% de la capacité théorique (553,5 TWh/an) → 145 TWh/an disponible théoriquement
- ▶ Facteur de disponibilité en 2014: entre 50,3 et 99,7%
- ▶ Facteur de 91% → **100 TWh/an** disponible pour la production d'hydrogène
  
- ▶ 2 creux de production en semaine: 3 GW
  - ◆ 0,5 GW tot le matin
  - ◆ 1-2 GW dans la nuit
- ▶ Week-end: -7 GW



AREVA H<sub>2</sub>Gen

# Et le nucléaire?

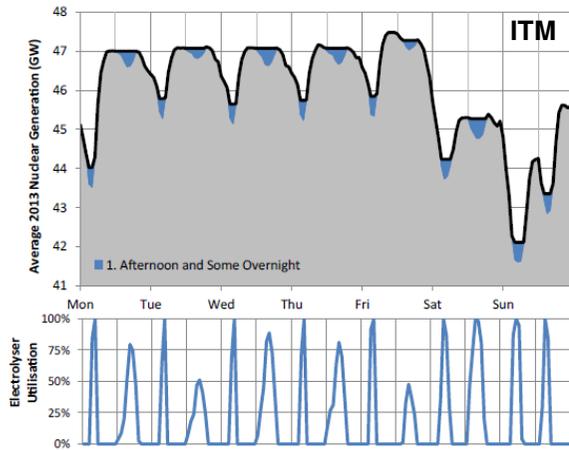
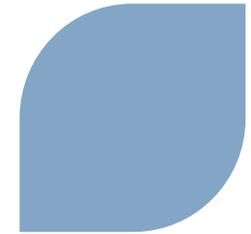


Fig. 6 – Average weekly profile of nuclear production and electrolyser utilisation for 0.5 GW of electrolysis.

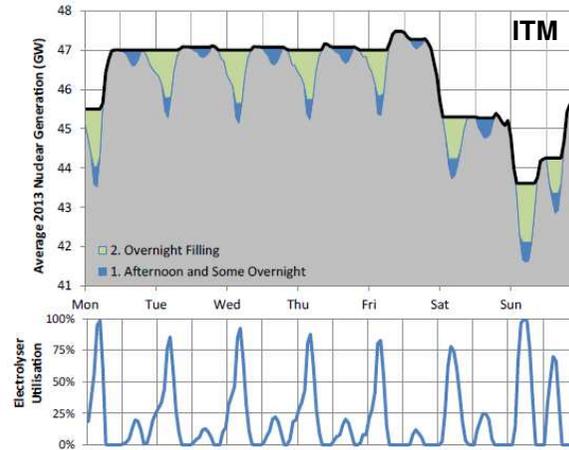


Fig. 7 – Average weekly profile of nuclear production and electrolyser utilisation for 2.0 GW of electrolysis.

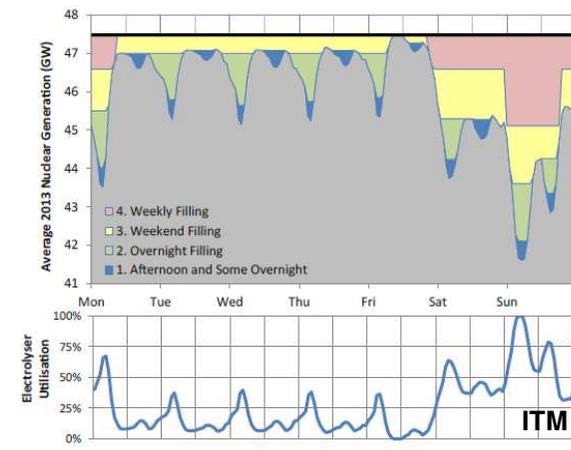


Fig. 9 – Average weekly profile of nuclear production and electrolyser utilisation for 6.0 GW of electrolysis.

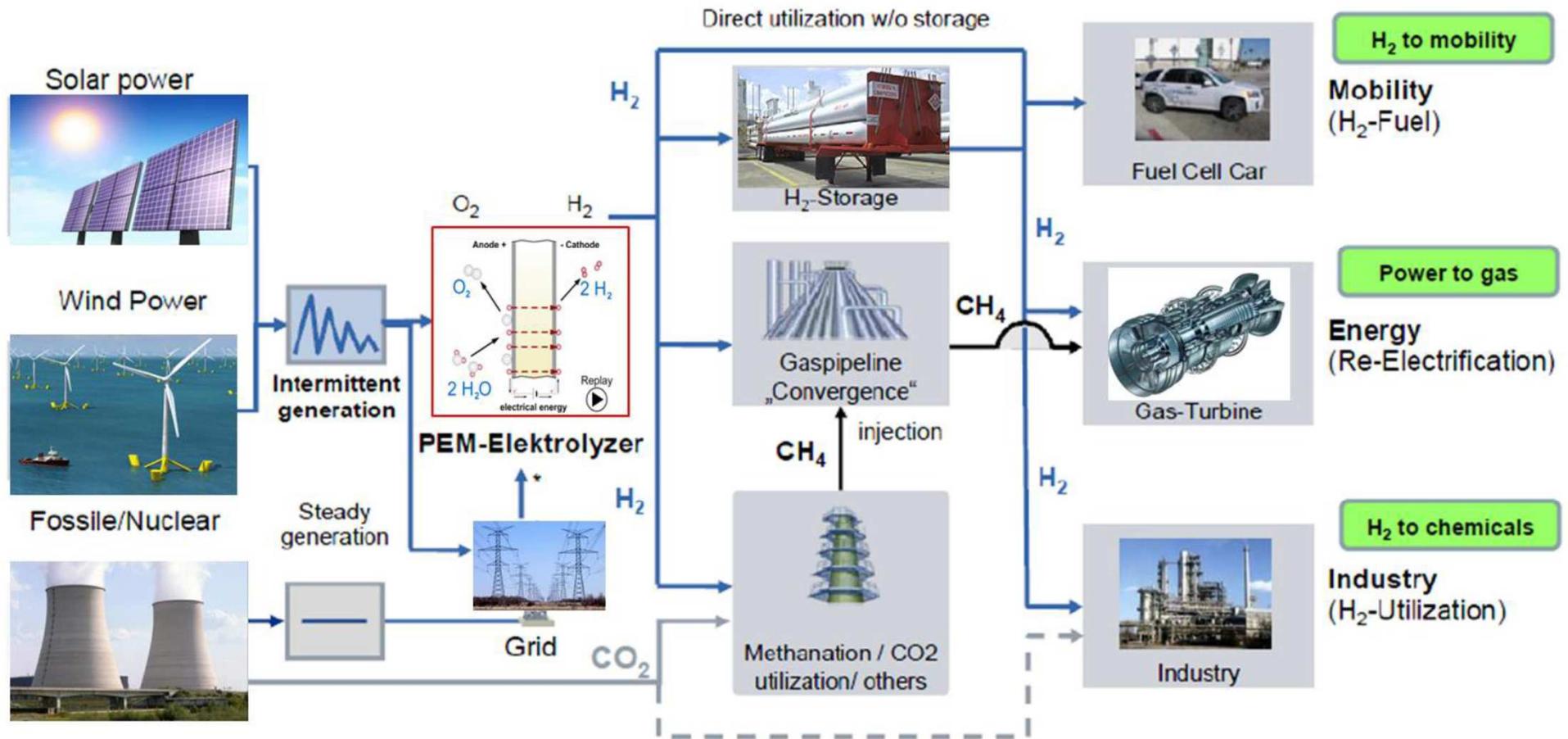
Table 1 – Performance summary for various installed electrolyser capacities for the average weekly nuclear load profile.				
Installed electrolysis capacity (GW)	Electrolyser energy utilisation (%)	Electrolyser run time (h p.a.)	Degree of 'Valley filling'	Hydrogen production (kilo-tonnes H <sub>2</sub> p.a.)
0.5	20	3180	Afternoon and some overnight smoothing of nuclear load profile	16
2.0	21	5944	Overnight smoothing of nuclear load profile	67
3.5	31	8551	Steady nuclear load profile on weekdays	170
6.0	26	8701	Steady nuclear load profile all week	247

AREVA H<sub>2</sub>Gen

ITM



# De multiples voies de valorisation



AREVA H<sub>2</sub>Gen



# Pour la mobilité...

- ▶ Permet le développement de moyens de transport électrifié « Zéro émissions »

- ◆ Chariots élévateurs



- ◆ Flottes de bus



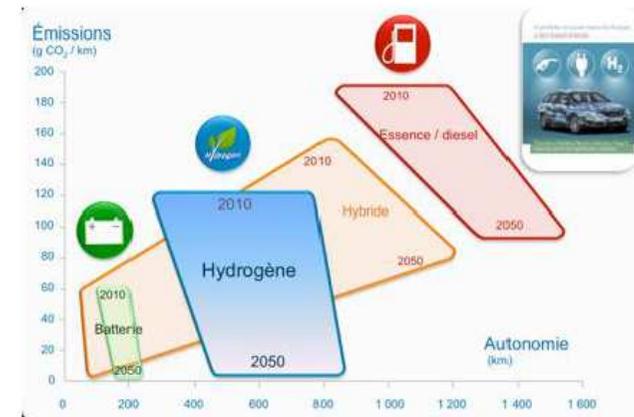
- ◆ Flottes captives



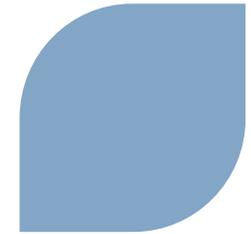
- ◆ Grand public



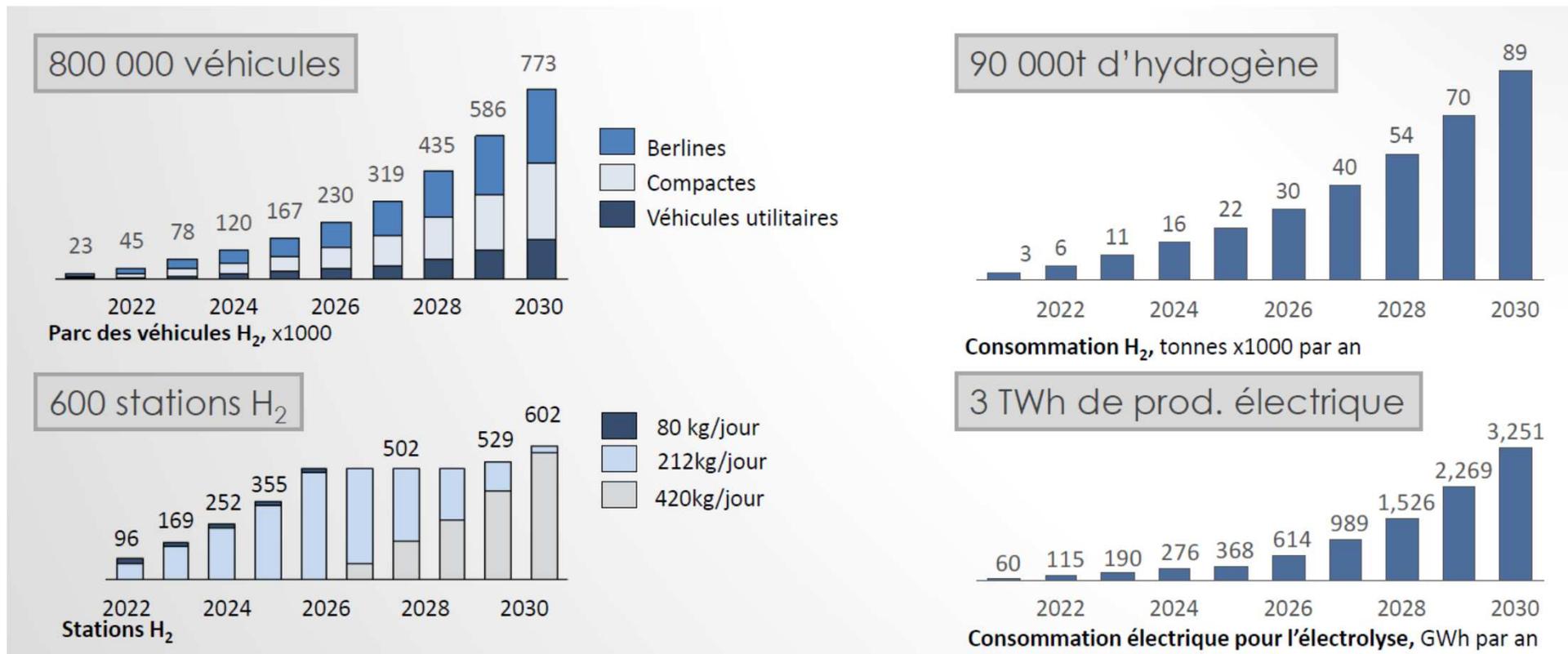
AREVA H<sub>2</sub>Gen



# ... avec des perspectives importantes



## Travaux de l'étude H2 Mobilité France

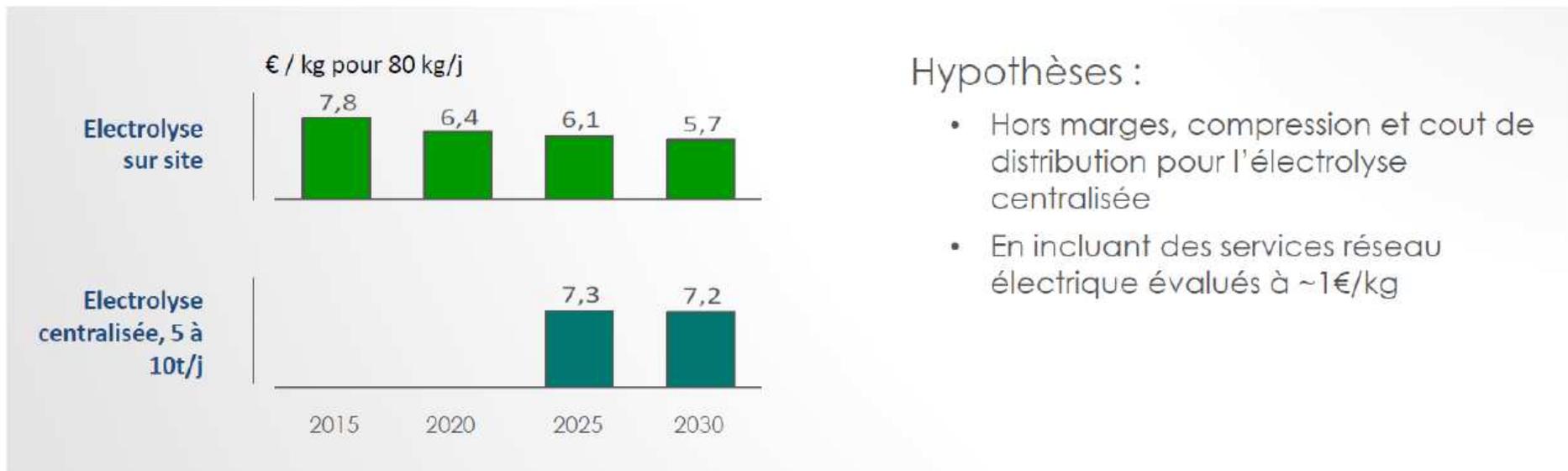


AREVA H<sub>2</sub>Gen



## ... et un prix compétitif

LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE PAR ÉLECTROLYSE DEVIENT COMPÉTITIVE DÈS QUE LA STATION EST À PLUS DE 150KM ENVIRON D'UN SITE DE PRODUCTION INDUSTRIELLE



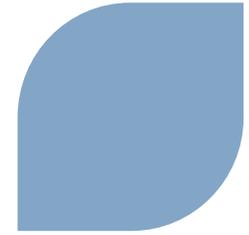
### Hypothèses :

- Hors marges, compression et cout de distribution pour l'électrolyse centralisée
- En incluant des services réseau électrique évalués à ~1€/kg

AREVA H<sub>2</sub>Gen

**AREVA**  
forward-looking energy

# AREVA H<sub>2</sub>Gen company overview



## ► Issue du rapprochement en 2014 de :

◆ L'ancienne division électrolyse d'Areva



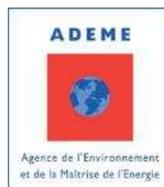
◆ Avec la start-up industrielle



, filiale de



## ► Avec le soutien financier de l'Etat

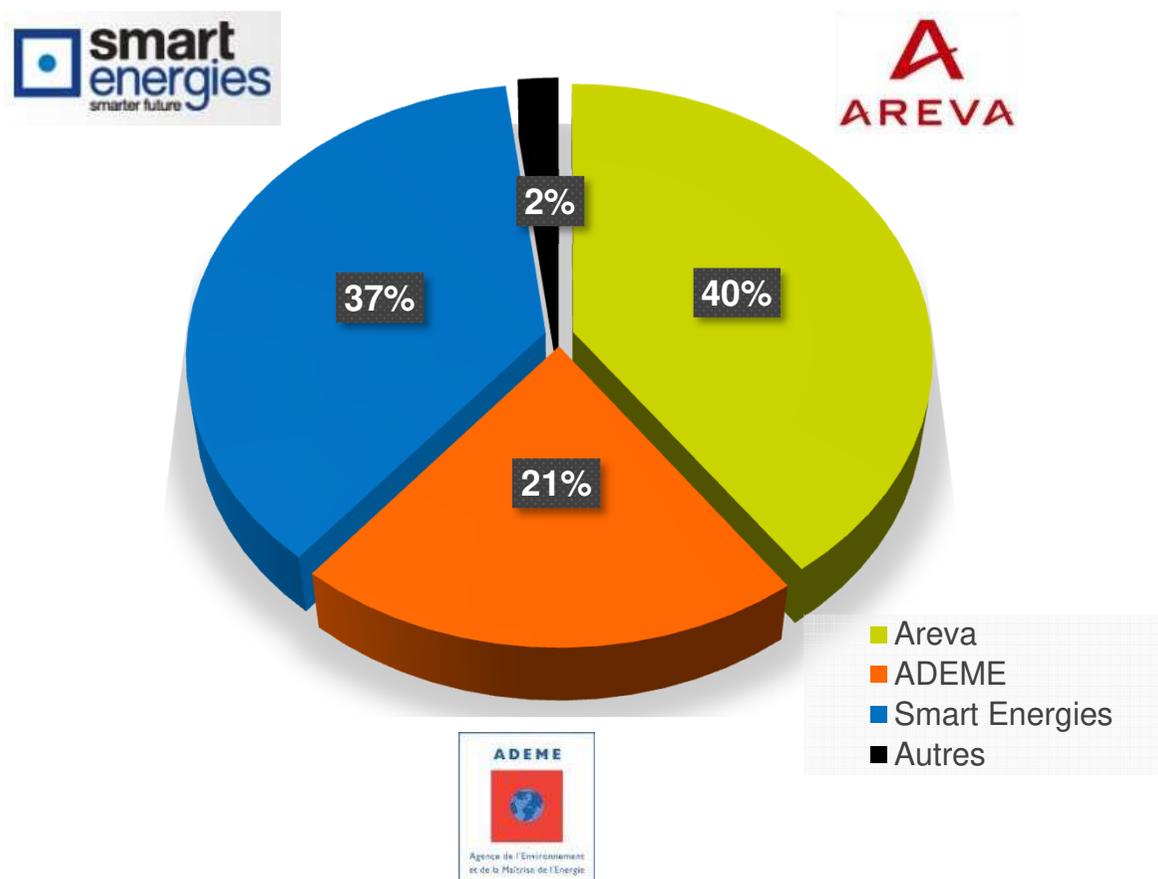


Plus de 25 ans d'expérience cumulée dans la technologie PEM

AREVA H<sub>2</sub>Gen

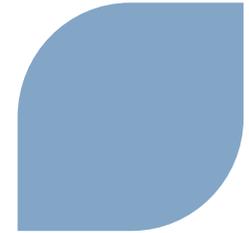
# Structure du capital

► 3 actionnaires principaux :

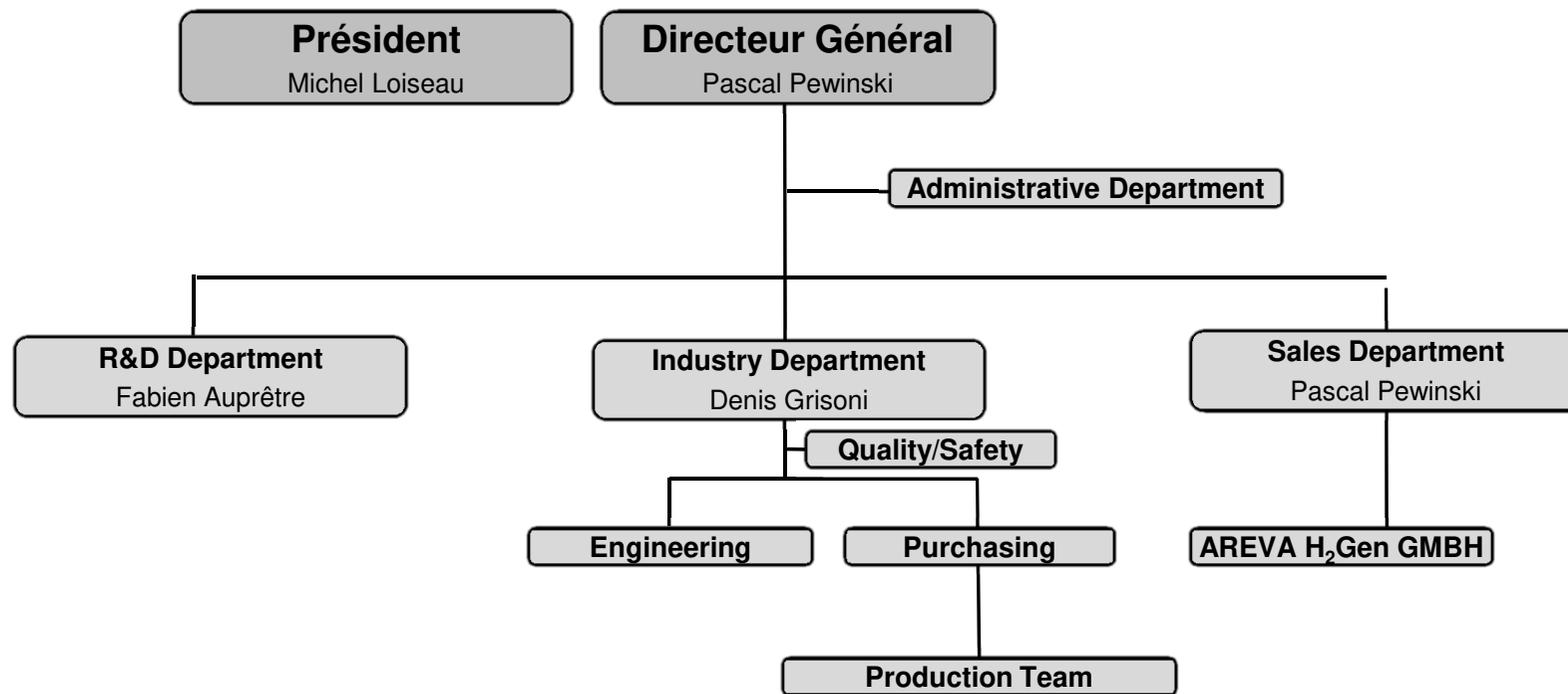


AREVA H<sub>2</sub>Gen

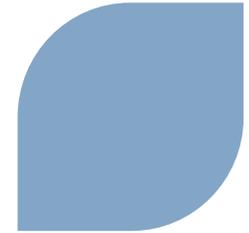
# Organisation



## ► Une équipe de 22 personnes



# Localisation



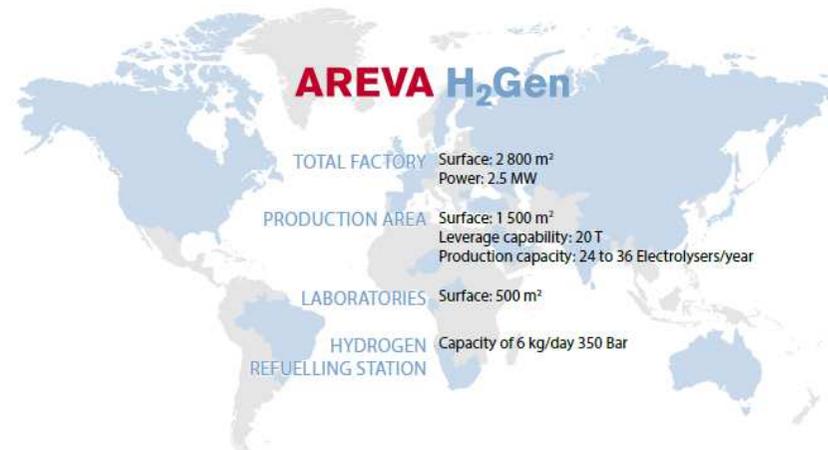
## ▶ Région parisienne

- ◆ Siège social: 20 rue Quentin Bauchard 75008 PARIS
- ◆ Activité: 8 avenue du Parana 91940 LES ULIS

## ▶ Une filiale : **AREVA H2Gen** GmbH (Carsten Krause)

## ▶ Un réseau mondial de partenaires et une filiale en Allemagne

- ◆ UK
- ◆ Chine
- ◆ Egypte
- ◆ Inde
- ◆ Corée
- ◆ Viet nam
- ◆ Turquie
- ◆ ...

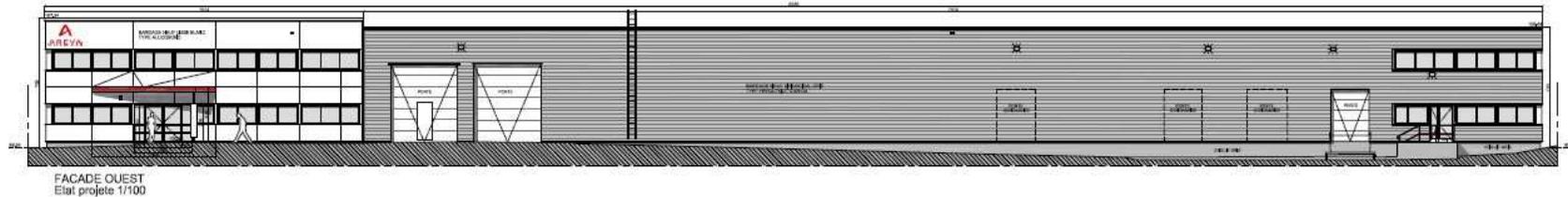


AREVA H<sub>2</sub>Gen



# Usine de production

## ► Site d'activité de 2500 m<sup>2</sup>



### Bureaux:

- 600 m<sup>2</sup>

### Production :

- 1 500 m<sup>2</sup>
- 2,5MW élec disponibles
- Capacité levage 20 T

### Laboratoire :

- 500 m<sup>2</sup>
- 10 banc d'essais
- Test de machines commerciales jusqu'à 1MW unitaire

**3 MEUR CAPEX en 2015 - 2016**



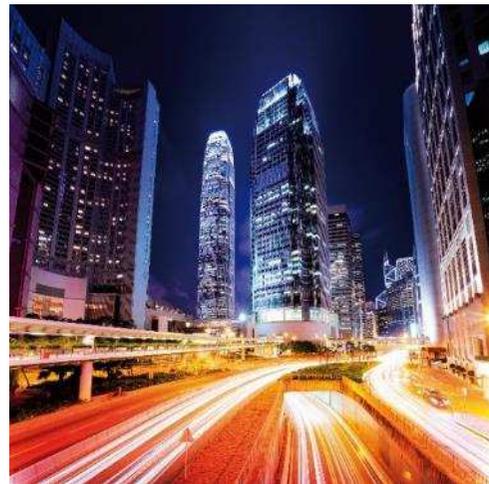
AREVA H<sub>2</sub>Gen

# Ligne de produits

► Une offre commerciale de 5 à 120 Nm<sup>3</sup>/h à 15 Bar et jusqu'à 240 Nm<sup>3</sup>/h à 35 Bar

► Des solutions sur mesure pour des projets MW :

- ◆ Services au réseau
- ◆ Hydrogène renouvelable pour la pétrochimie



AREVA H<sub>2</sub>Gen

**PEM ELECTROLYSERS** AREVA H<sub>2</sub>Gen  
Today's flexible, cost-effective technology

A multi-use clean and safe on-site hydrogen generation

**STANDARD SUPPLY TECHNICAL SPECIFICATIONS**

Parameter	Value	Unit
Rated power	15 to 120	kW (kW)
Hydrogen	0.0001 to 0.0002	kg/h

**PRODUCT LINE SPECIFICATIONS**

Line	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Power (kW)	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
Hydrogen (kg/h)	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009	0.0010

**ADVANTAGES**

- Environmentally friendly, 100% clean hydrogen
- Highly flexible, 100% clean hydrogen
- Highly efficient, 100% clean hydrogen
- Highly reliable, 100% clean hydrogen

AREVA H<sub>2</sub>Gen OFFERS A WIDE SELECTION OF OPTIONAL COMPONENTS TO MEET CUSTOMER SPECIFIC REQUIREMENTS

AREVA H<sub>2</sub>Gen  
www.aveva.com/h2gen  
Tel: +33 21 81 81 81 81

# Principales références



Air Products : IOCL H<sub>2</sub> refueling station



MYRTE Platform : AREVA Greenergy Box demonstration project

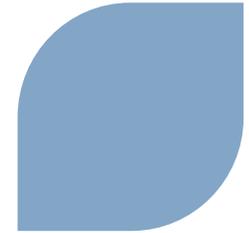


Giza North Project Egypt – SUEZ : an indoor generator



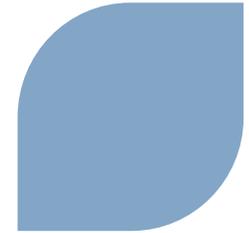
AREVA H<sub>2</sub>Gen

# Implication forte

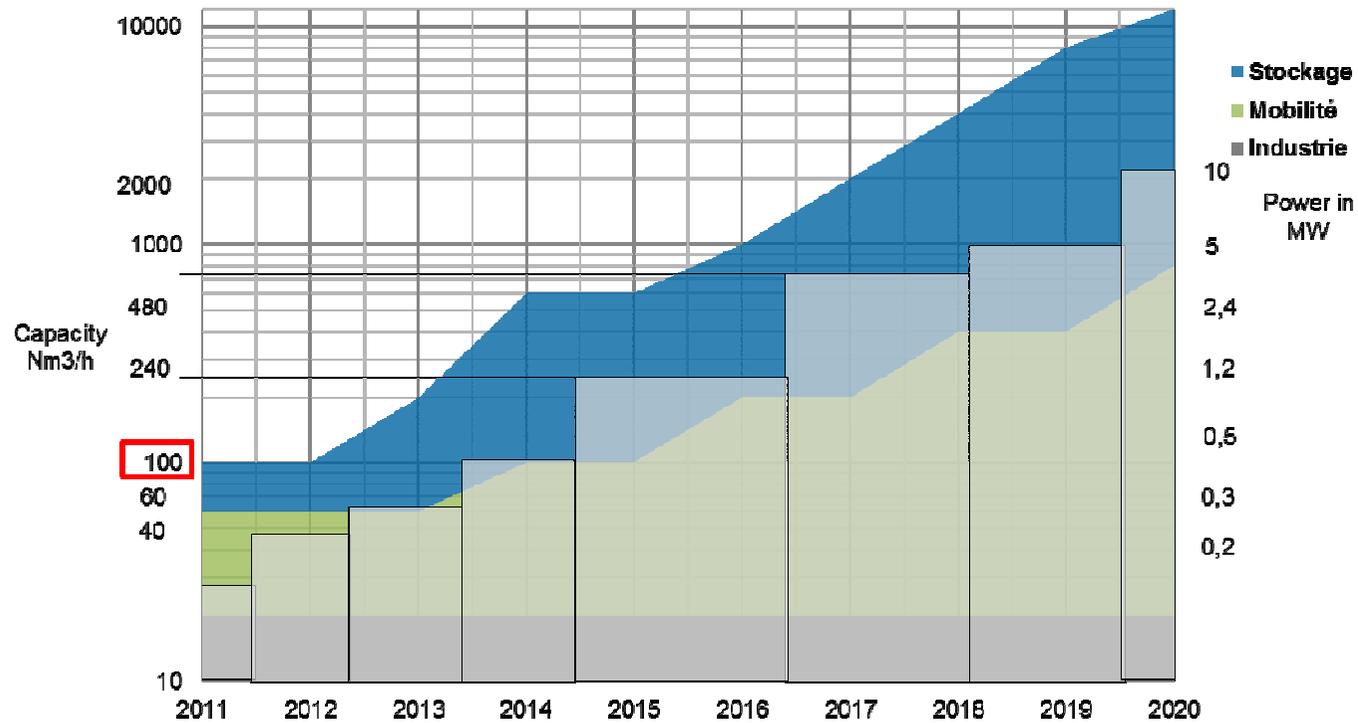


- ▶ **FCH-JU / HYDROGEN EUROPE**
- ▶ **Projets de R&D**
- ▶ **Démonstration de Power to Gas:**
  - ◆ GRHYD – Dunkerque (ENGIE)
  - ◆ METHYCENTRE – Céré la Ronde (Storengy)
- ▶ **Démonstration Mobilité:**
  - ◆ H2ME 1 – Station 140 kg/jour - Rodez
  - ◆ H2ME 2 – Station 40 kg/j - Nantes
- ▶ **Actions de standardisation:**
  - ◆ ISO TC 197 – Norme 22734 Electrolyse
  - ◆ CEN TC 6
  - ◆ CEN/CENELEC SFEM WG

# Roadmap de développement



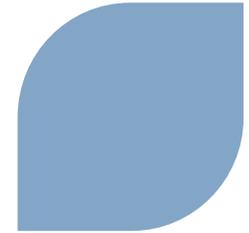
Electrolyser capacity evolution to address the market needs



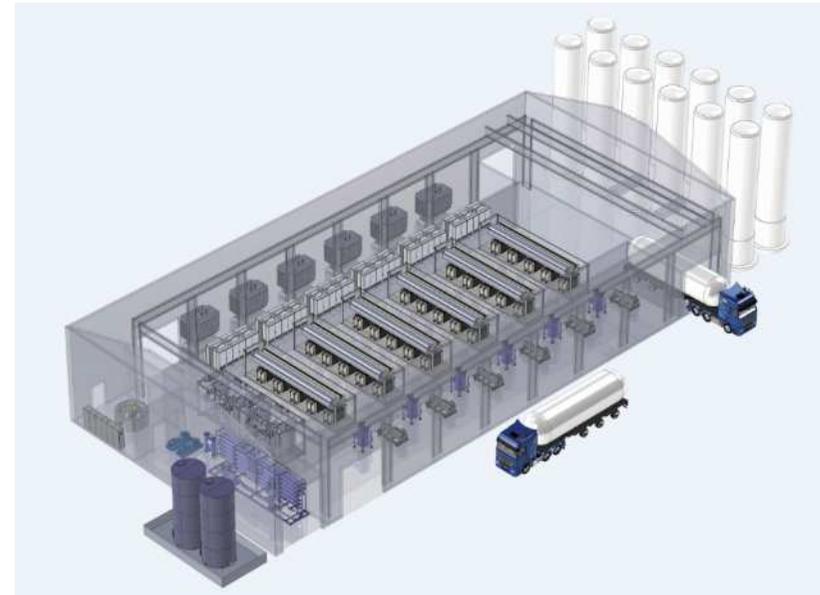
Stack capacity (Nm3/h nominal)	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	5	10	15	25	50-60	200-300	200-300	200-300	200-300	400-500

AREVA H<sub>2</sub>Gen

# Nos challenges d'aujourd'hui et de demain



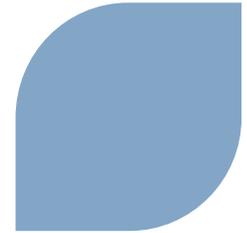
- ▶ Forte capacité
- ▶ Large plage de fonctionnement : 0 - 200 %
- ▶ Fort rendement
- ▶ Faible temps de réponse
- ▶ Fiabilité vis-à-vis de la fluctuation d'alimentation
- ▶ Production sous pression pour certaines applications nécessitant du stockage ou du transport



Usine 60 MW AREVA H2GEN

AREVA H<sub>2</sub>Gen

# Merci pour votre attention!



**Dr. Fabien AUPRÊTRE**  
CTO

**AREVA H<sub>2</sub>Gen**  
8 avenue du Parana  
F-91940 Les Ulis– France  
Mob: +33 6 30 75 42 68 – Tel: +33 1 81 87 12 60  
[fabien.aupretre@arevah2gen.com](mailto:fabien.aupretre@arevah2gen.com)  
[www.arevah2gen.com](http://www.arevah2gen.com)

**AREVA H<sub>2</sub>Gen**