



VECTEUR HYDROGÈNE : BONNE OU MAUVAISE
SOLUTION ?

Université negaWatt 2019

Simon Métivier

Usages actuels de l'hydrogène

Secteur industriel	kt/a	TWhPCS	Origine
Raffinage pétrolier	544	21,4	Majoritairement co-produit, mais commence à être déficitaire
Ammoniac et engrais	240	9,5	Vaporéformage du gaz naturel
Industrie chimique	92	3,6	Coproduit/vaporeformage du gaz naturel
Métallurgie	9,2	0,4	Vaporéformage du méthane
Divers (verreries, alimentaire...)	36,8	1,4	Vaporéformage du méthane
	922	36,3	

Source : Afhypac

- **Usage matière**

- Production acier primaire par réduction directe H₂, au lieu de Coke de charbon
 - une solution possible parmi d'autres [1] plusieurs aciéristes se sont engagés sur des démonstrateurs [2]
 - Si 100% acier primaire français en 2050 avec H₂ : besoin de 20 TWhPCS [3]
- Chimie (en particulier C_xH_y)

- **Mobilité H₂**

- **Stockage et transport d'énergie**

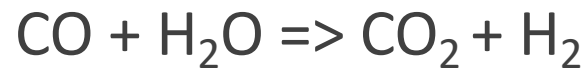
[1] www.ulcos.org

[2] <https://www.ft.com/content/f2b85c0c-ed2f-11e6-ba01-119a44939bb6>

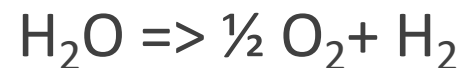
[3] ADEME/GRTgaz/GRDF/Solagro/AEC, « Un mix 100% gaz renouvelable en France en 2050? », 2018

Comment produire l'hydrogène

- Vaporeformage hydrocarbure (méthane en France)



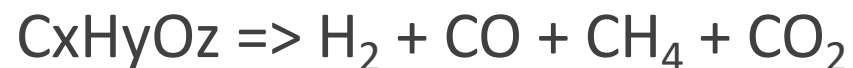
- Electrolyse de l'eau



- Electrolyse de saumure (production de Chlore)



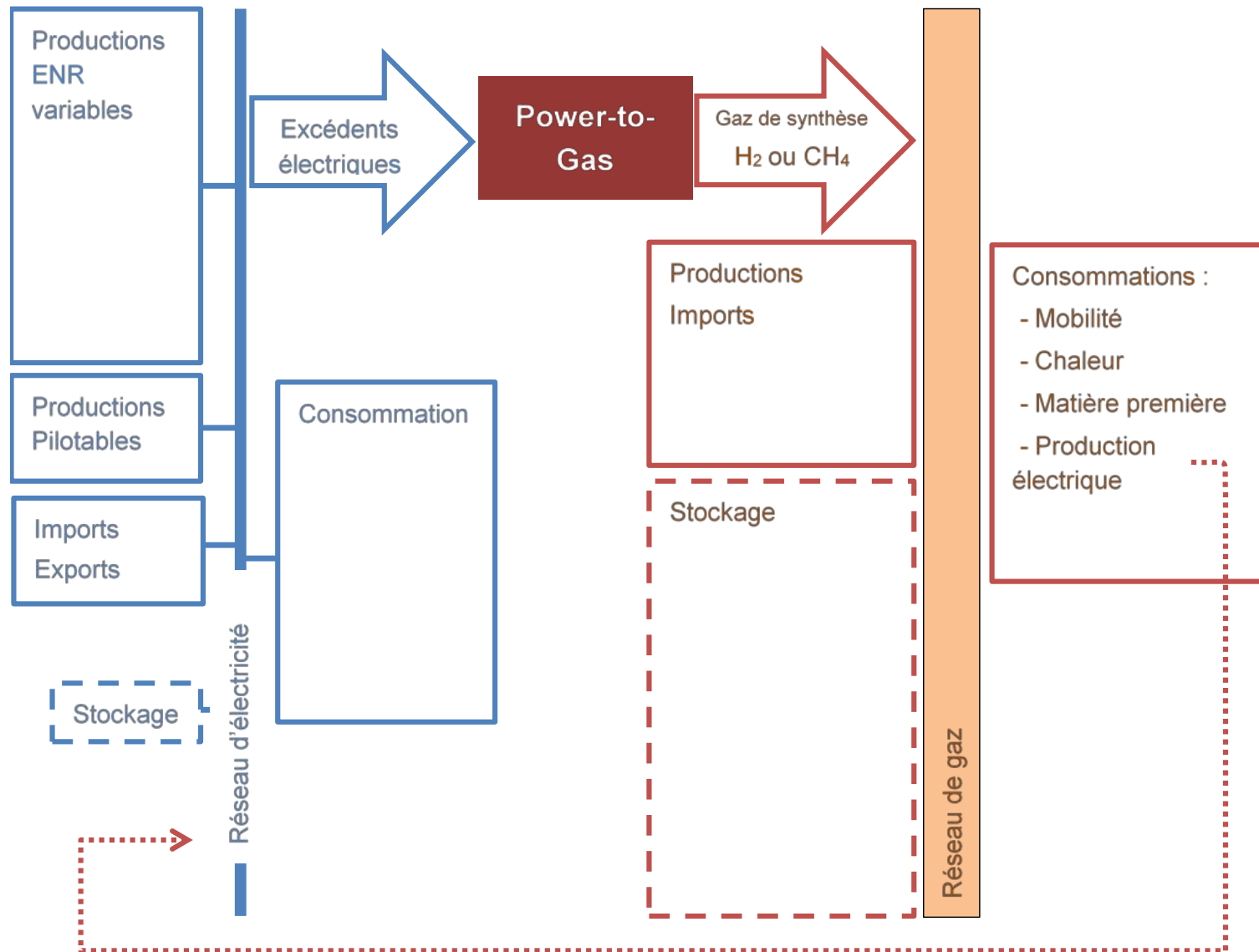
- Pyrogazéification (Charbon, bois...)





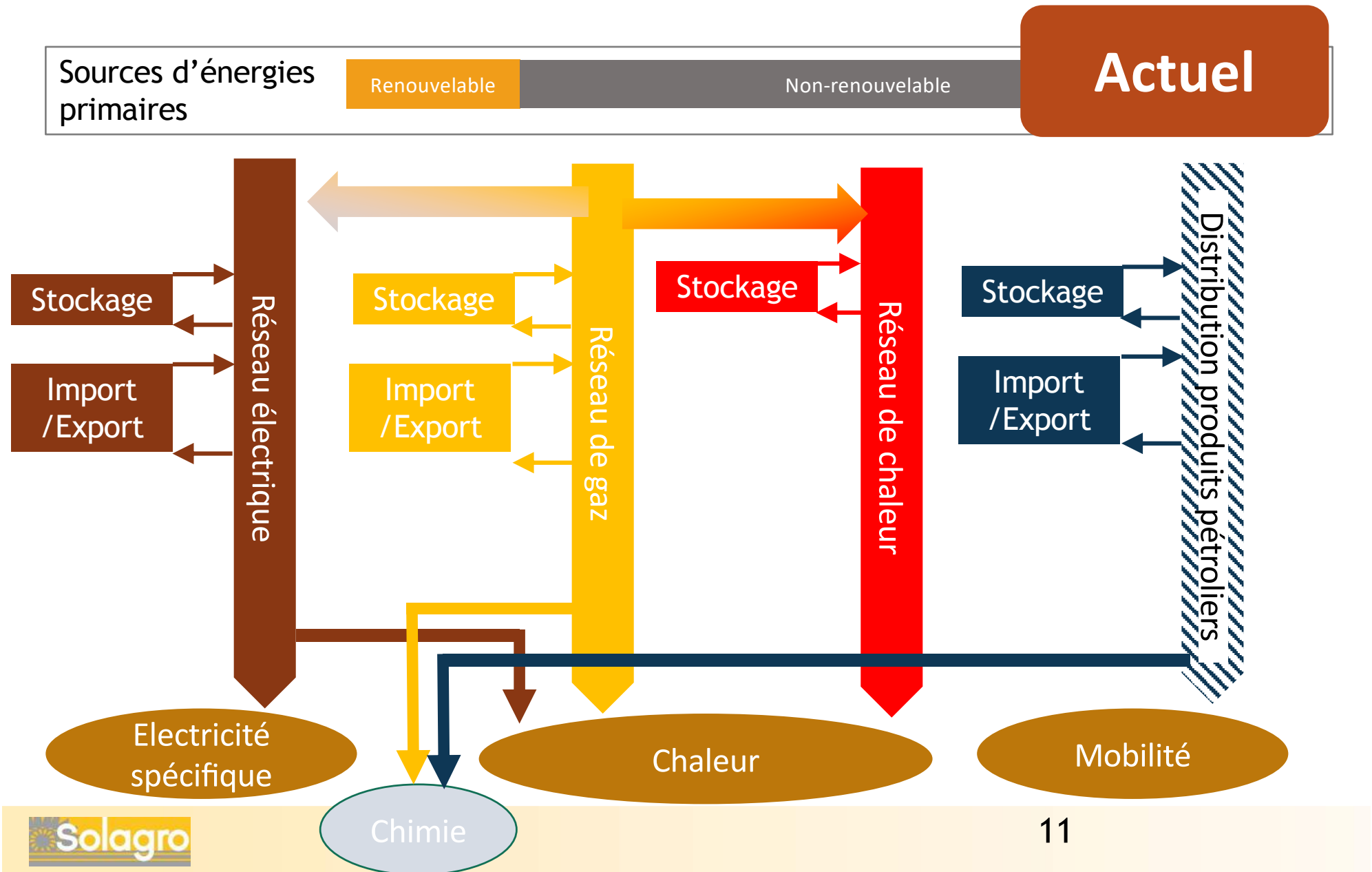
Le power-to-gas

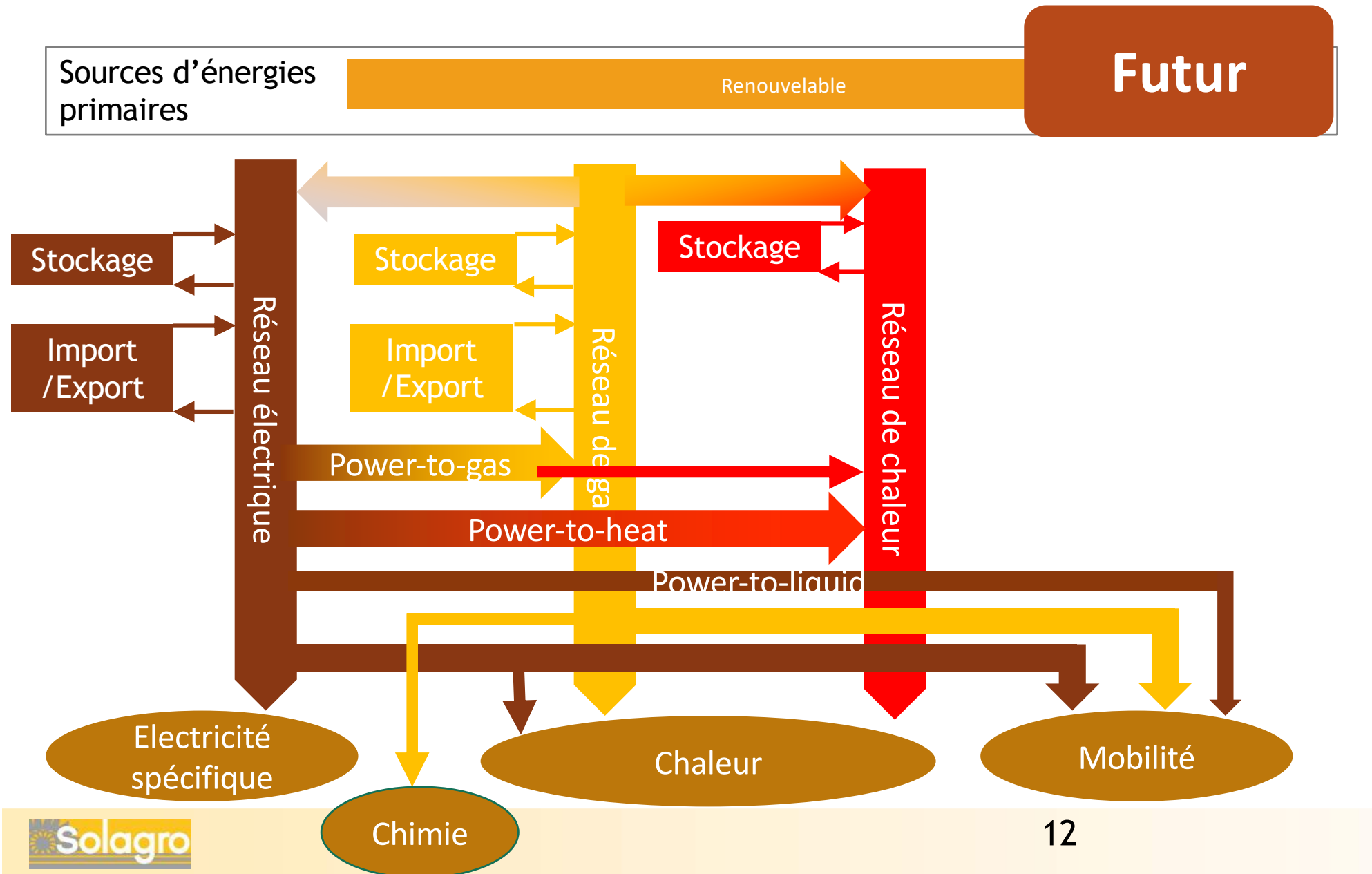
- Système permettant la conversion d'énergie électrique en énergie chimique sous forme gazeuse
- Les gaz produits sont typiquement de l'hydrogène (H_2) voire du méthane (CH_4)
- Ce système permet ainsi de relier le réseau électrique au réseau gazier
- (!) Ce n'est pas une nouvelle source d'énergie primaire !

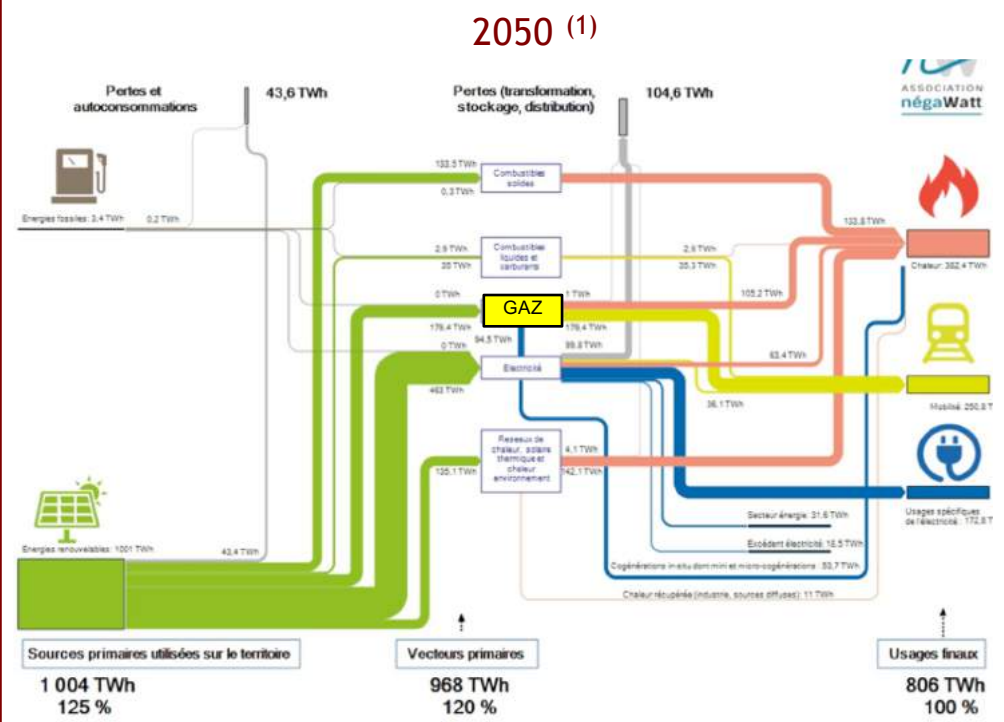
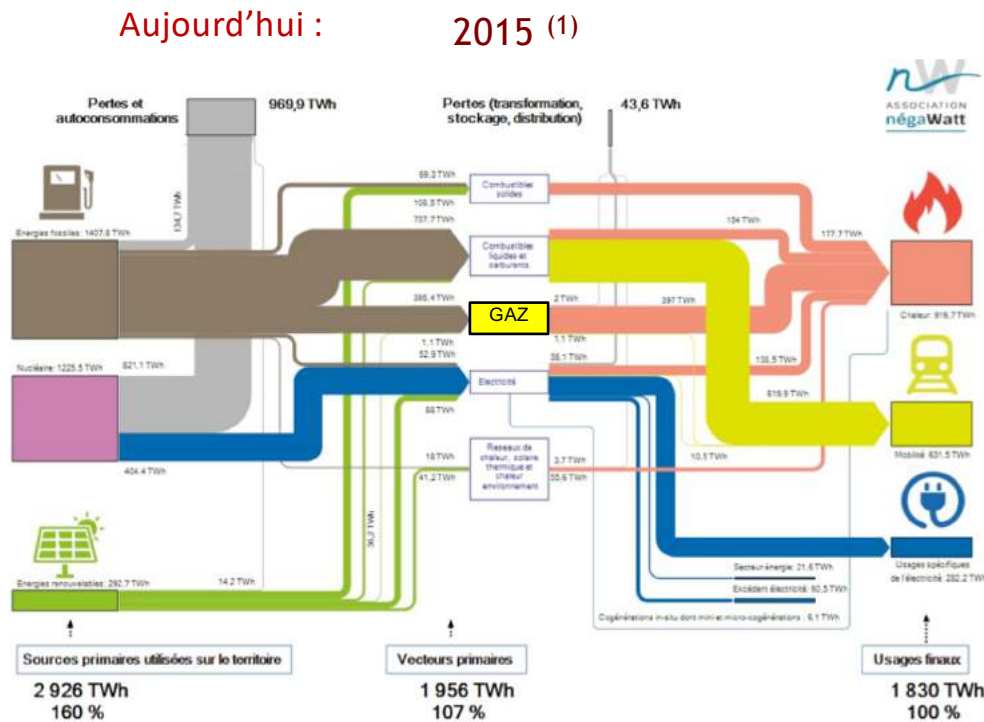


Source : ADEME/GRTgaz/GrDF/E&E consultant/Solagro/Hespul, 2014

Systeme énergétique actuel







Aujourd'hui

- 450-500 TWh
- Source : 100% importé
- Utilisation : 100% chaleur

Demain

- 250-350 TWh
- Source : 100% made in France
- Utilisation :
 - 30⁽²⁾ à 70%⁽¹⁾ Transport
 - 30 à 70% Chaleur

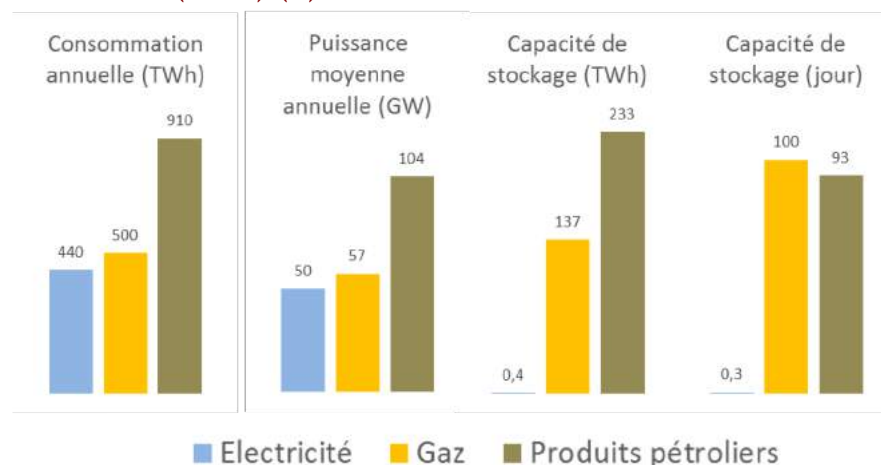
Source :

(1) <https://negawatt.org/scenario/sankeys/2050-simplifie>

(2) Scénario énergie-climat ADEME 2035-2050, 2017, <http://www.ademe.fr/actualisation-scenario-energie-climat-ademe-2035-2050>

- Participer à la régulation du réseaux électrique
- Valorisation d'électricité renouvelable excédentaire pour
 - d'autres usages (Mobilité, Chimie...)
 - à un autre moment (capacité de stockage sur réseau de gaz > 300 fois celle du réseau électrique en France)
 - à un autre lieu (Utilisation du réseau de transport de gaz)

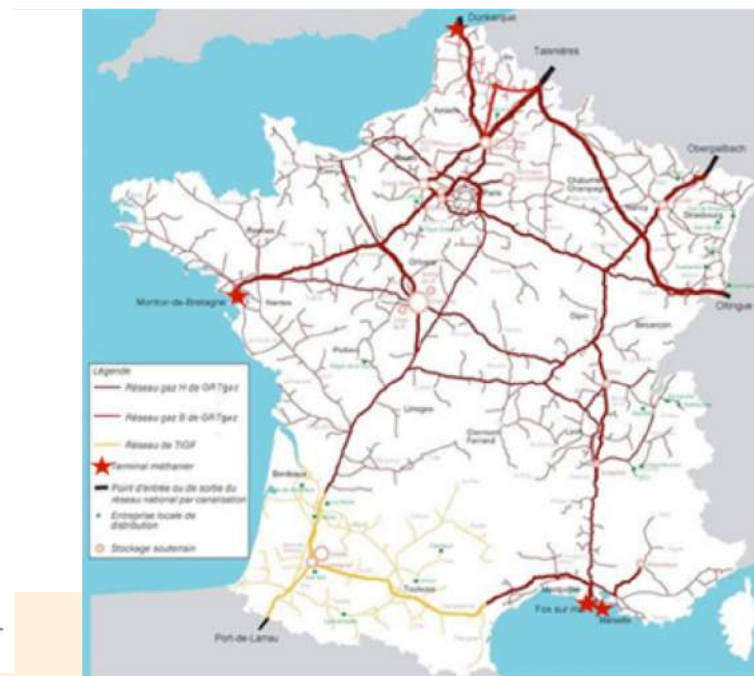
Consommation énergétique et capacité de stockage en France (2012) (1)



Gas transport is the cheapest and most efficient form of energy transport

POWER	GAS
 <ul style="list-style-type: none"> • 260 km • € 600 mln • 1 GW cable capacity • 230€ per kW/100 km 	 <ul style="list-style-type: none"> • 230 km • € 500 mln • 20 GW • 11€ per kW/100 km
 <ul style="list-style-type: none"> • 9€ per kW/100 km 	

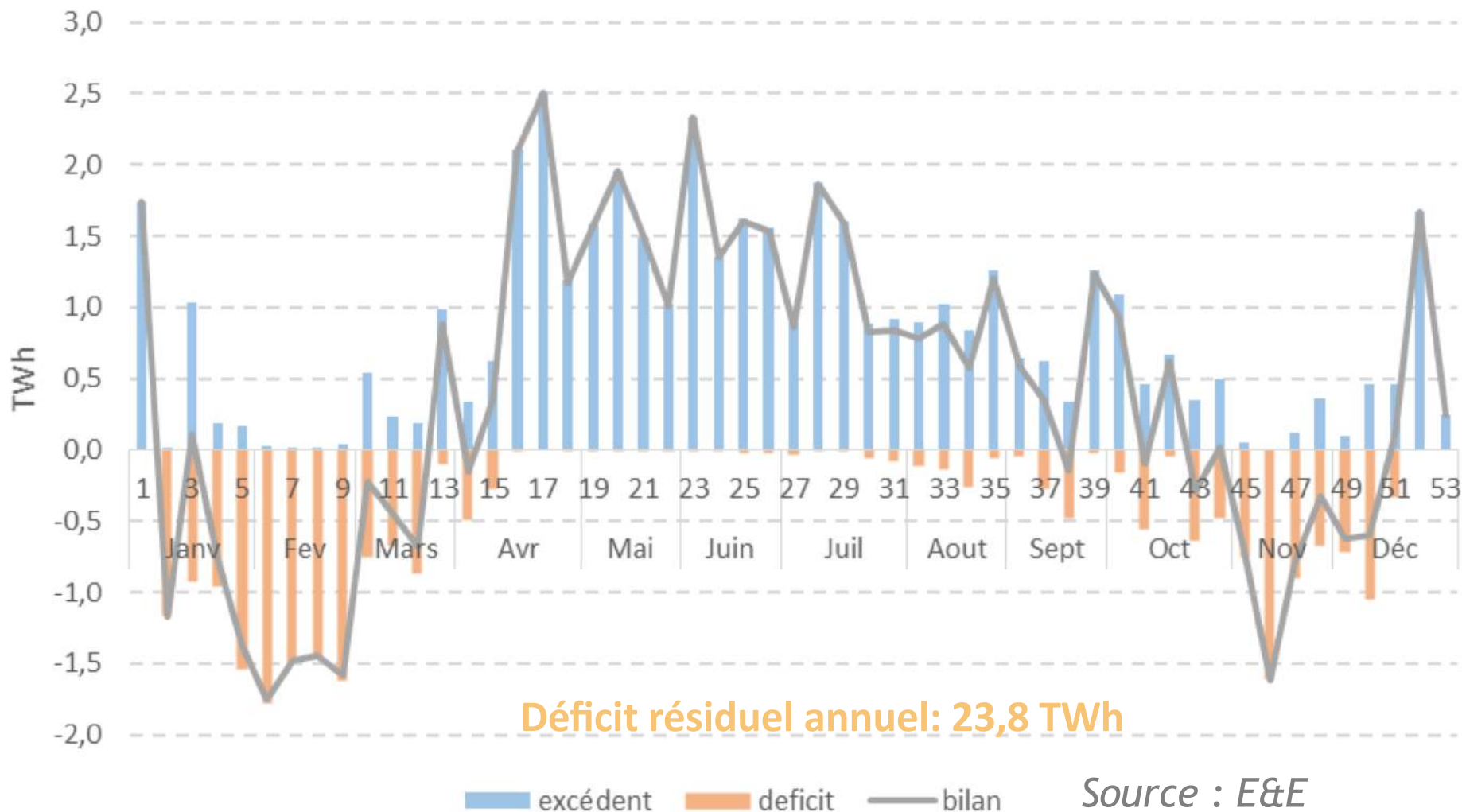
gasurhe



- Forte pénétration de l'éolien et du photovoltaïque => Fortes variabilités de la production => difficultés d'assurer l'adéquation avec la consommation

Solutions	Remarques
Flexibiliser la demande (ex : chauffe-eau, gros électroménager, recharge véhicules électriques...)	Ajustement quelques heures
Imports / Exports	Limité par le fait que les conditions météo /climatiques des pays voisins ne sont pas complètement décalées
Stocker temporairement	Quelques secondes à quelques jours (sauf PtG avec ré-électrification)
Limitation de production (Curtailement)	Pertes de production d'ENR
Convertir vers d'autres vecteurs	Valorise les surplus mais ne participe pas à combler les déficits de production (sauf ré-électrification)

Excédent résiduel annuel : 44,5 TWh



Déficit résiduel annuel: 23,8 TWh

Excédents résiduels = Prod ENRe variables + Nuc mini
 + ENR thermique mini – Demande – Pompage STEP

Source : E&E
 Consultant dans PtG
 ADEME/GrDF/GRTgaz 16)

- Revue de scénarios (24) (ADEME/GRTgaz/GrDF/E&E consultant/Solagro/Hespul, 2014)

Pays	Nom	Auteurs(s)	Année	Champ	Objectif	Hydrogène ou méthane ?	Motivations à terme	Quantification excédents ?
DE	Lehrstudie BMJ	DLR, Fraunhofer IWES, FNE	2011	complet	GES -80 à -95%	H2 et CH4	elec 14% + H2 17% + hydrogène libéré biométhane	Oui, détails
DE	DVGW - PK	DVGW	2013	complet	GES -80%	H2, dabord, CH4 ensuite	Hydrogène (70%) + CH4 (30%)	Oui, détails
DE	F&E	Fraunhofer IEC	2013	complet	GES -80%	CH4 équipement si ambuleux	100% EHR	Oui, détails
DE	FrankfurtWerk2	Fraunhofer IWES, Cobas Energy	2013	elec	100% ENRe	CH4 équipement	-	Oui, détails
DE	VDE	VDE	2012	elec	100% ENRe	Non	-	Non
DE	IRA UmweltBundeskartell	IRA	2013	complet	GES -95%	H2 et CH4	elec 20% + resto E-plant	Oui, détails CH4
DK	DCC Green Energy	Danish Climate Commission	2010	complet	100% ENR	Non	elec 60% + bio (gaz+voies)	Non
DA	DELV 2009	DVE	2009	complet	100% ENR	H2 pas référence à CH4	elec 50% + bio (gaz + H2)	Oui, détails
DK	EIA 2050	Aalborg University et DTU	2009	complet	100% ENR	H2 et discussion CH4	elec 50% + H2 40%	Oui, détails
FR	ADEME - version DESO 2050	ADEME	2013	complet	GES -75%	H2, CH4 possible	Hydrogène (38%) et elec (5%)	Non
FR	HégaliNatl	Association régionNatl	2011	complet	GES 95% - ENR 90%	CH4 + équipement	20% elec, resto biogaz et gaz	Oui
FR	GrDF	GrDF	2013	complet	GES -75%	H2 et discussion CH4	elec 50% + H2 40%	Oui
FR	ANGRE	ANGRE	2013	complet	GES -75%	H2 et CH4	biogaz 73%, elec 14%	Oui
EU	EU Roadmap 2050	E-104, BASF, GARDI, IAS, J	2013	complet	95-100 % ENRe	Non	surfact électrique	Non
EU	ECF Roadmap 2050	Imperial College, KEMA, McP	2012	elec	95% discussion	Pas de choix technique	-	Non
EU	GP Battle of the Grids	EnergyAnalitics	2011	elec	100% ENRe	Non	-	Non
CH	CFEH	Progress AG	2012	complet	GES 100%	Non	elec 30% + bio 30% + gaz 2%	Non
CH	AES	Association des Electriciens	2012	elec	100% ENRe	Non	-	Non
BE	Vers 100% d'ER en Belgique	VITO, ICEDO, BFP	2013	complet	100% ENR	H2 et discussion CH4	pas détaillé	Oui, détails H2
NL	ECN Roadmap NL	ECN	2011	complet	GES -70%	Discussion ouverte	Elec + biomasse (sans détail)	Non
GB	FCB	CAI	2013	complet	100% ENR	CH4	Elec et CH4, pas H2	Oui, détails CH4
RL	STORE	UCC, HSU	2013	elec	80% ENRe	Non	Elec + biomasse (sans détail)	Non
SE	Energy scenario for Sweden	IVL (Swedish Environmental R	2011	complet	100% ENR	Non	-	Non
SCANDINAVIE 2008-2030		Aalborg University	2008	elec	GES -70% 2030	H2	elec + biomasse + alcool	Oui, détails H2

- Déterminants du recours au PtG :

- Recours au PtG si :

- **périmètre large**, scénarios globaux yc secteur du transport
- **des objectifs ambitieux** (100% ENRe, -95%GES...), Power-to-Gas apparait sur long terme, au delà de 2030-2040

- Non-recours ou moindre recours au PtG si fortes ressources en :

- Hydroélectricité (moins de besoin d'équilibrage)
- Biomasse, dans une moindre mesure (Equilibrage réseau électrique + carburant pour transport)

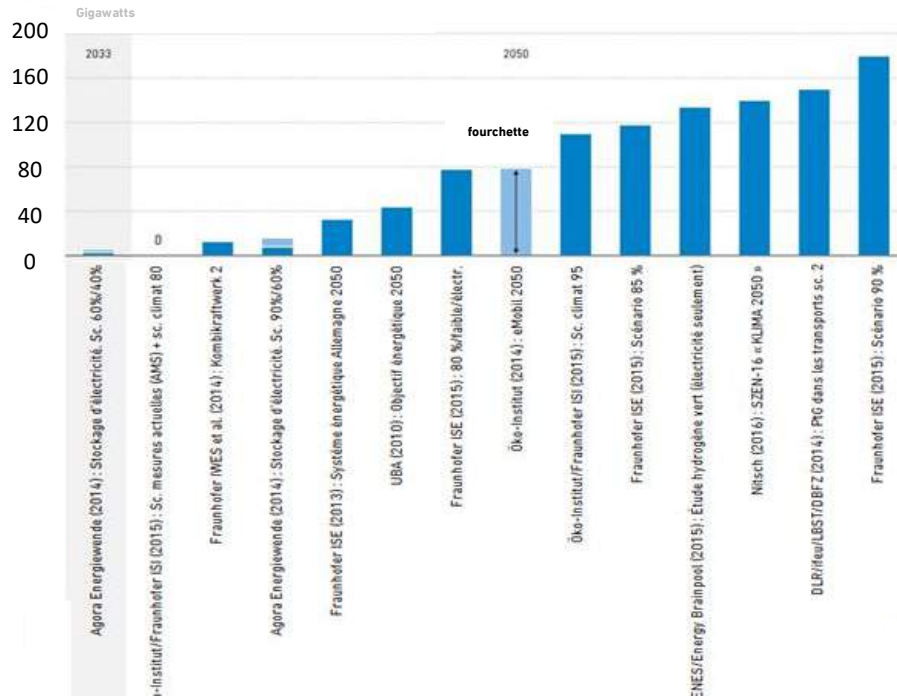
- H₂ ou CH₄ ?

- Pas forcément tranché, rester ouvert aux évolutions technologiques
- Plusieurs choisissent CH₄ uniquement pour éviter saut technologique

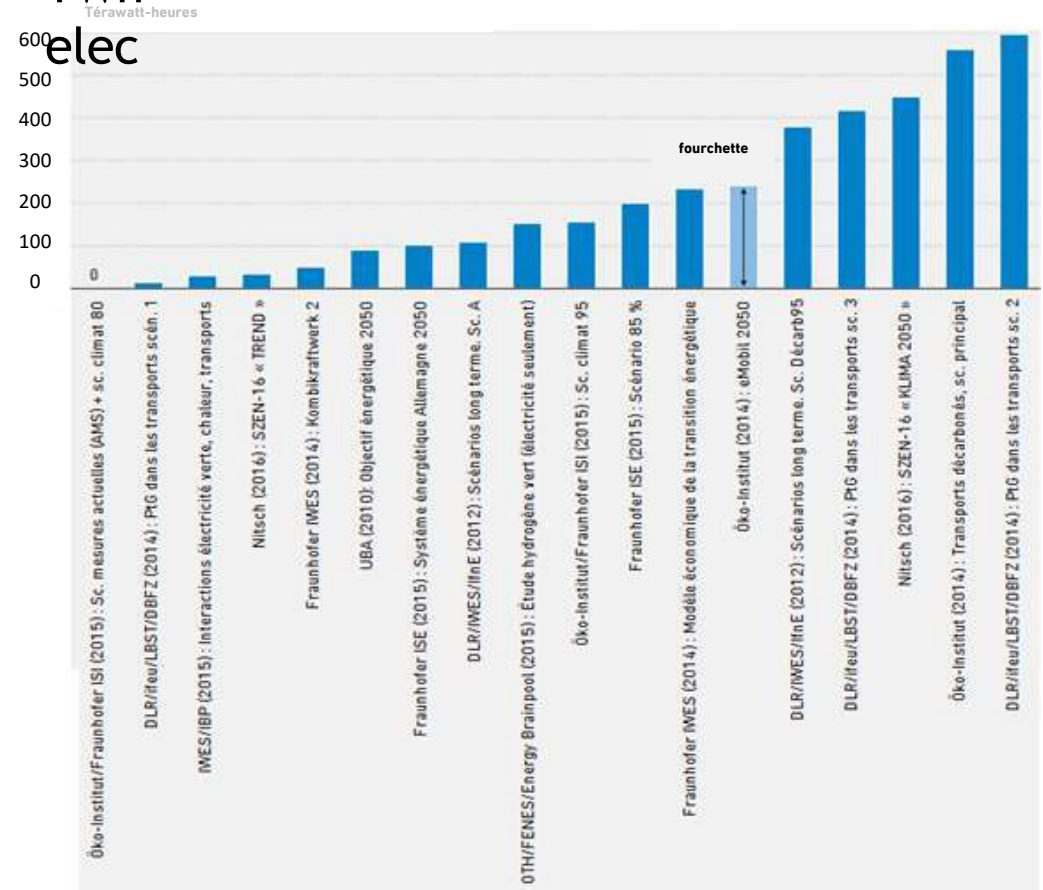
- Méthanation (CH₄) apparait récemment (2009-2011)

Quelle place en Allemagne ?

GW elec

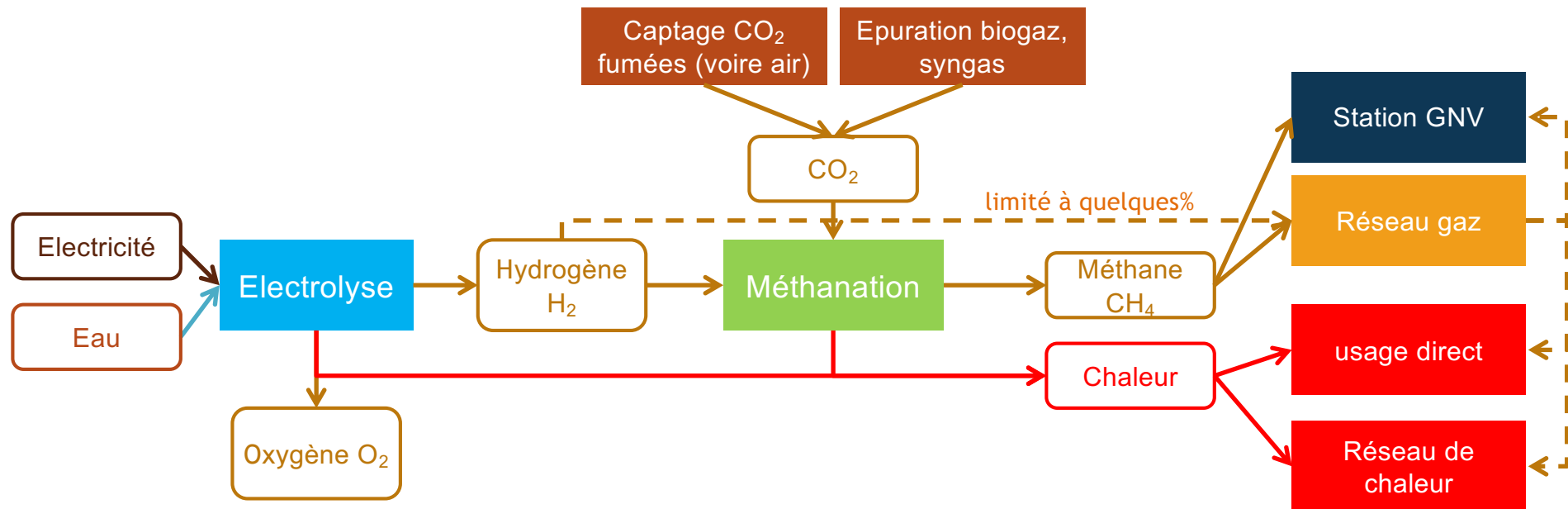


TWh elec



OFATE (French and German Office for Energy Transition) study (11/2016)

Les briques technologiques



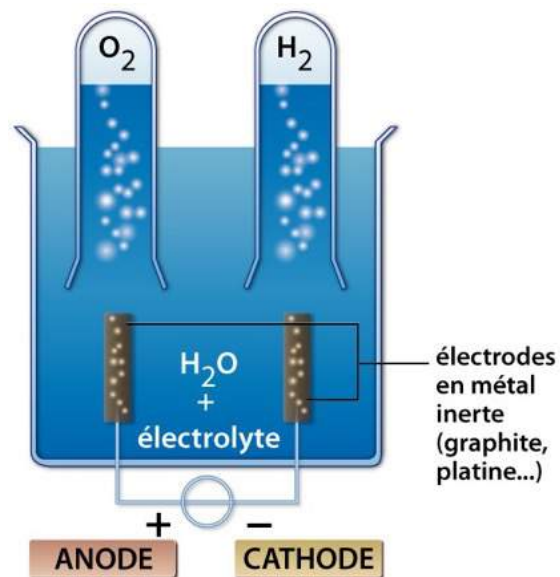
		H ₂	CH ₄
Masse volumique	kg/Nm ³	0,09	0,72
Pouvoir calorifique supérieur	kWhPCS/Nm ³	3,54	11,04
Pouvoir calorifique inférieur	kWhPCS/Nm ³	3	9,94
Limite du domaine de détonabilité	%v	13%-64%	6%-14%
Energie minimale d'inflamation	mJ	0,02	0,29

Electrolyse

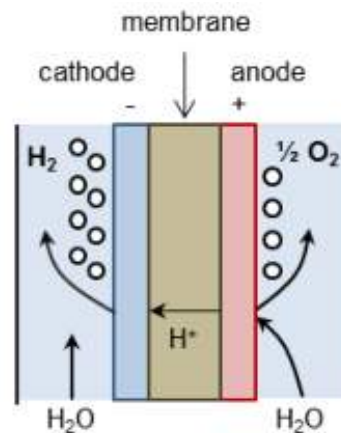
→ Réaction :



Principe



Cellule (ex : PEM)



Empilement de cellules (Stack)



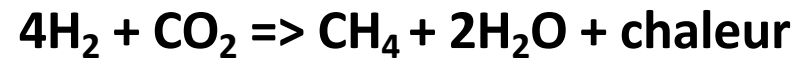
Sources : Larousse, Eifer, etogas

		Alcalin		PEM		SOEC	
		Actuel	2030+	Actuel	2030+	Actuel	2030+
Rendement de conversion Elec -> H ₂ (PCS)	%	70%-75%	79%	70%-78%	84%		100%
Rendement de conversion Elec + Chaleur -> H ₂ (PCS)	%	70%-75%	79%	70%-78%	84%		85%
CAPEX	€/kW	600-1000	400-600	800-1500	700-800		1000
OPEX	%CAPEX/a	5%	5%	5%	5%		3%
Pression de fonctionnement	Bar	15-30	60	60	100		30
Avantages		Technologie mature Prix		Meilleurs rendement Rapidité de réponse Grande plage de fonctionnement Compacité		Rendement élevé	
Inconvénients		Temps de réponse plus lent Utilisation produit corrosif et dangereux (NaOH)		Durée de vie plus limitée (en amélioration) Technologie récente Prix élevé Recours à métaux rares (platine Iridium)		Loin du stade commercial Durée de vie Peu adapté au fonctionnement intermittent	

Sources : Solagro et Etude ADEME/GRDF/GRTGAZ 2014

Méthanation

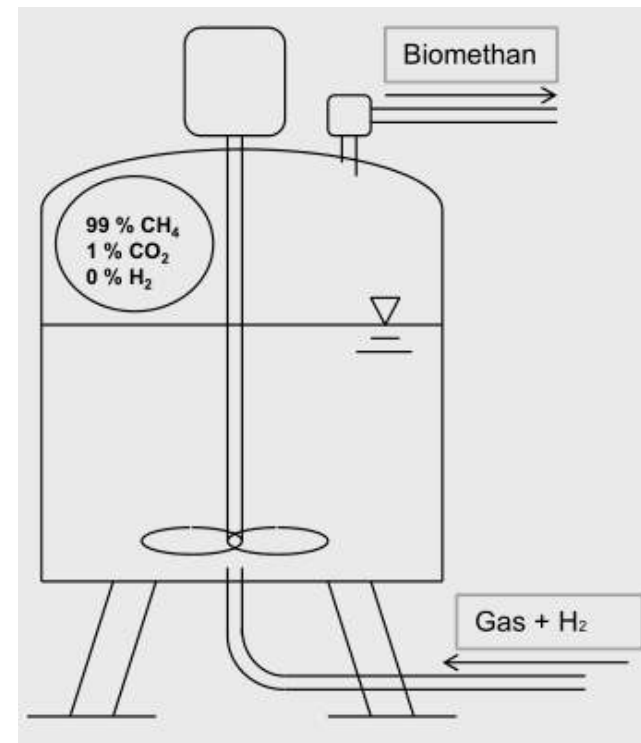
→ Réaction :



Réacteur catalytique



Réacteur biologique



Sources : etogas, Microbenergy

		Catalytique		Biologique	
		Actuel	2030+	Actuel	2030+
Rendement énergétique (gaz synthèse/H2) sur PCS	%	78%	78%	78%	78%
CAPEX	€/kWCH4	1000 - 4000	400-1000	1000 - 2500	400 - 1000
	€/kWe (1)	550 - 2200	220 - 550	550 - 1350	220 - 550
OPEX	%CAPEX/a	3 – 7%	3 – 7%	4 – 9%	4 – 9%
Pression de fonctionnement	Bar	4 - 10		6 - 10	15
Avantages		<ul style="list-style-type: none"> • Technologie basée sur technologie mature de méthanation CO (60 ans) • Récupération de chaleur à haute température 		<ul style="list-style-type: none"> • insensible au trace de soufre • technologie simple • pas de catalyseur • Flexibilité 	
Inconvénients		<ul style="list-style-type: none"> • sensible aux impuretés (H2S<10ppm) • Selon technologie : flexibilité (contrôle température, plage de fonctionnement) 		<ul style="list-style-type: none"> • Chaleur coproduite à faible température • Gestion intrant / sortant (charge organique) 	

(1) Hypothèse rendement électrolyseur : 70%

Sources : Solagro et Etude ADEME/GRDF/GRTGAZ 2014

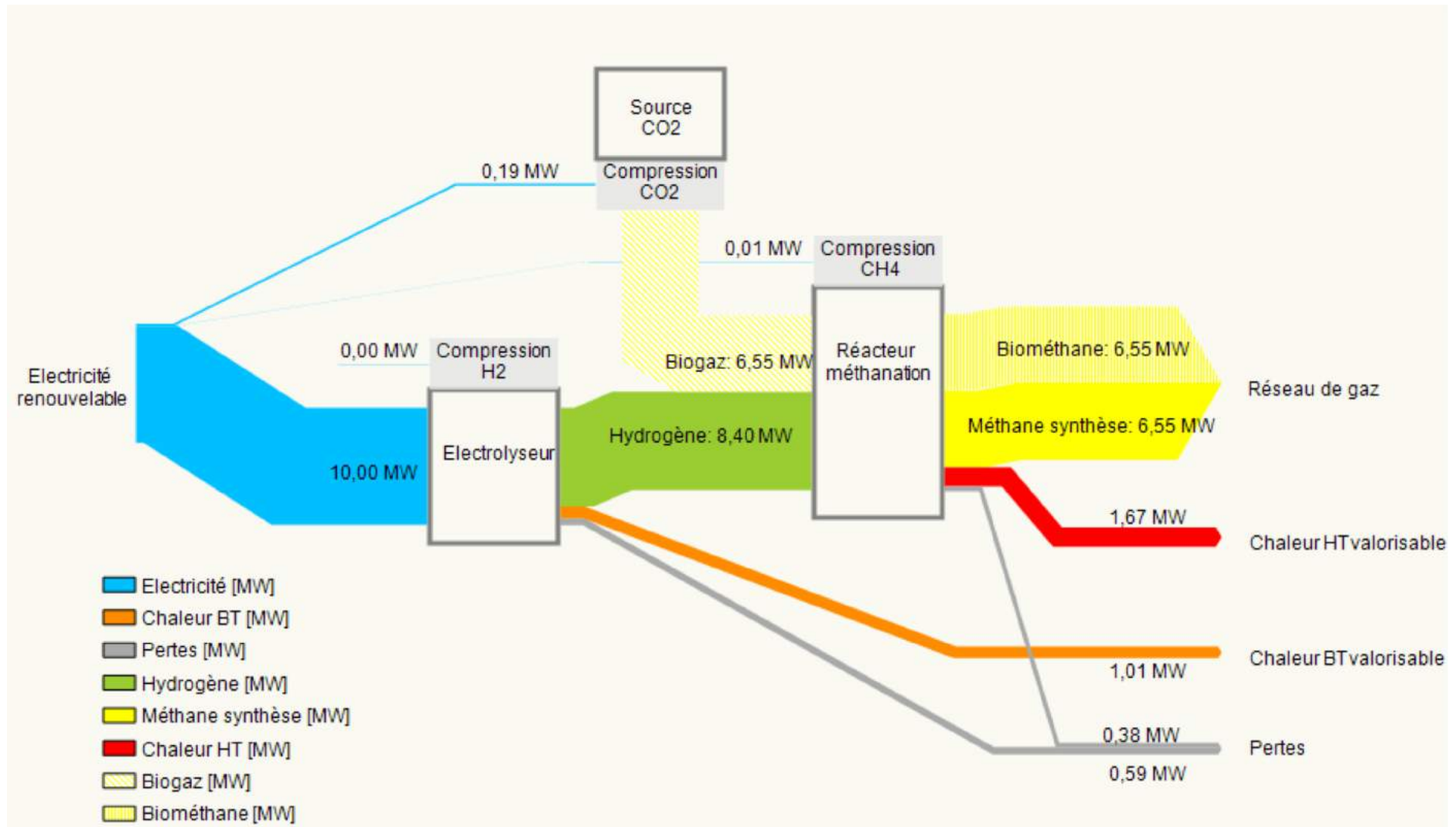
Source de CO2

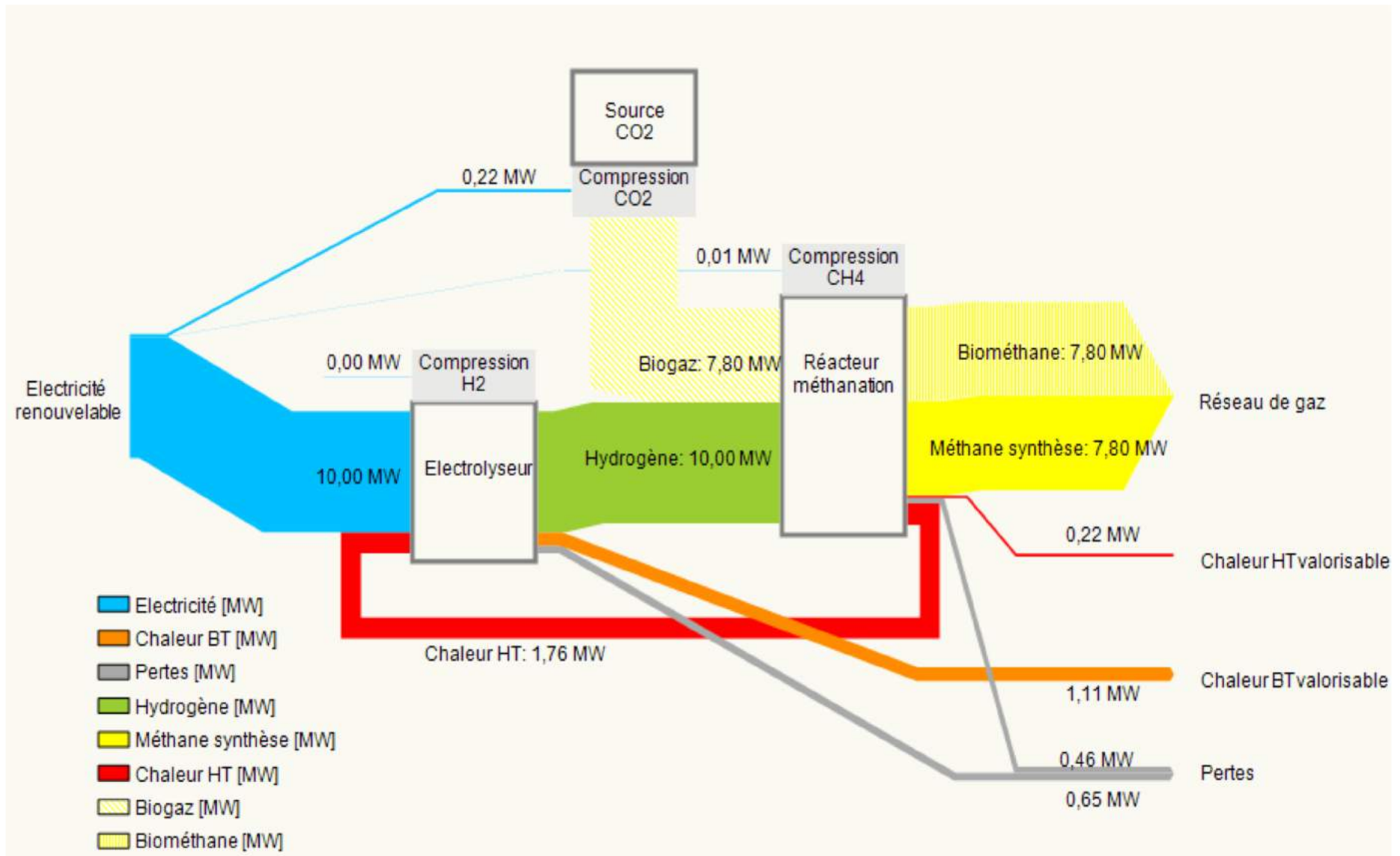
	Avantages	Inconvénients	Coût (€/MWh _{CH4})
Air	Mise en œuvre n'importe où	Très énergivore Très cher	15-20
Combustion (Procédé, Chaufferie)		Energivore Cher	1-10
Combustion (centrale électrique)		Energivore Cher Pas/peu en service lors des excédents d'électricité	
Méthanisation, Gazéification	Nécessite pas de concentration de CO ₂ Renouvelable		0

Source type	Débit de CO ₂ émis (tCO ₂ /h)	Capacité électrolyseur équivalent (MW)
Centrale charbon 600 MW, rendement 35%PCI	585	6000
Centrale CCGT Gaz 400MW , rendement PCI 57%	142	1500
Petite Chaudière procédé ou Chaufferie biomasse 2,5MW, rendement PCI 90%	1,0	10
Méthaniseur, équivalent cogénérateur 0,7 MWe (rend élec 35% PCI)	0,4	4
Cimenterie 2000 t/j clinker	73	800
Haut fourneau 2Mtacier/an	440	4500

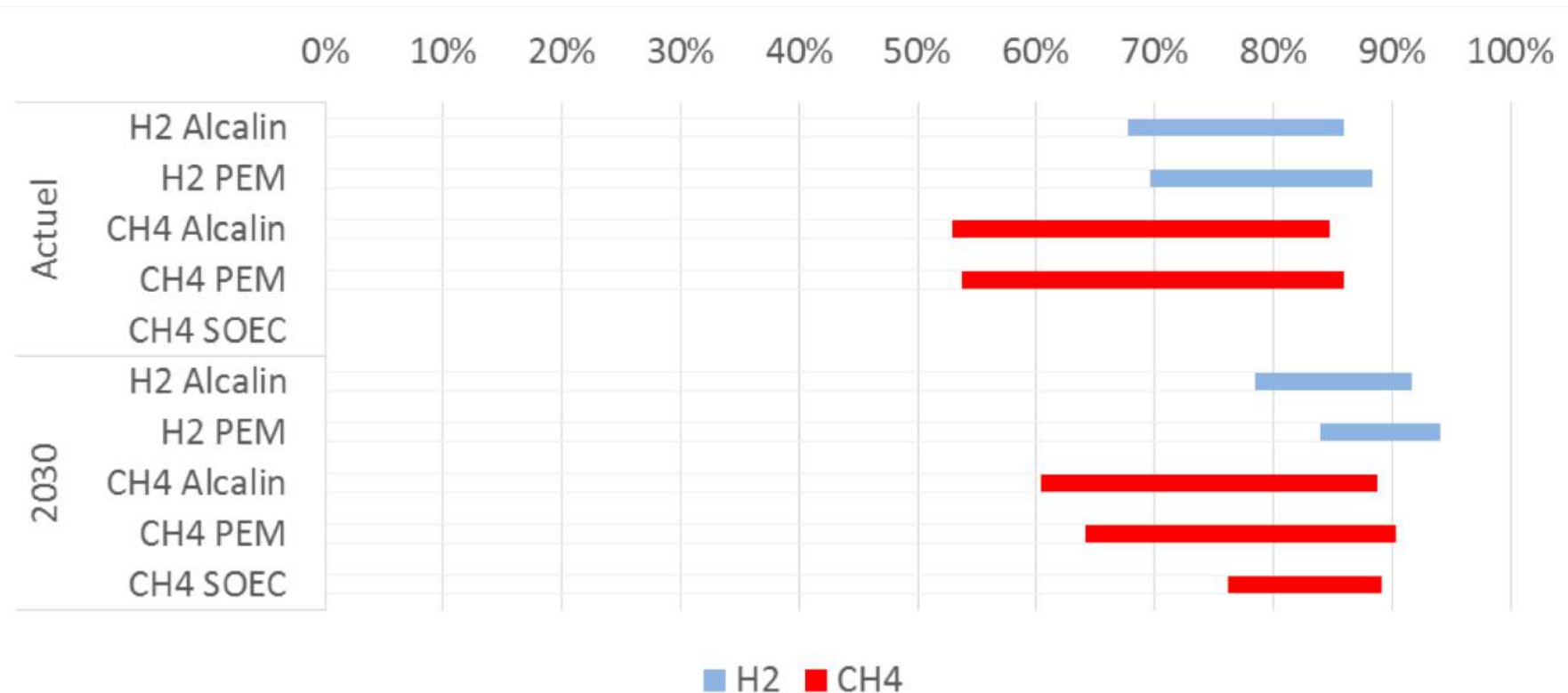
Source : ADEME/GRDF/GRTGAZ 2014

Assemblage





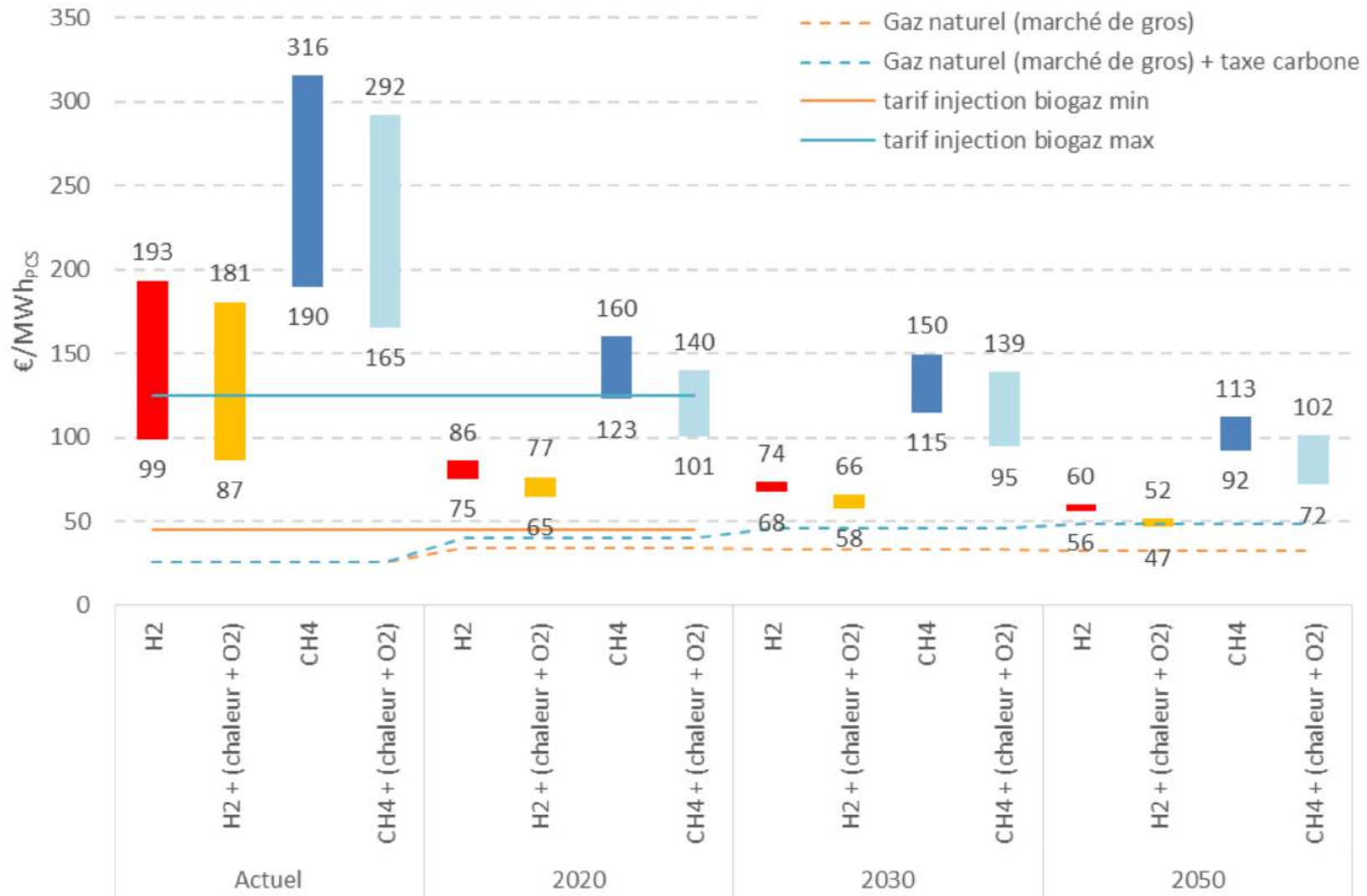
Rendement de conversion



- Le bas de la fourchette prend en compte uniquement en sortie l'énergie (PCS) du gaz de synthèse
- Le haut de la fourchette prend en compte l'énergie du gaz + la chaleur valorisable

Source : PtG
ADEME/GrDF/G
RTgaz)

Aucun coût d'utilisation du réseau n'est pris en compte



Mobilité

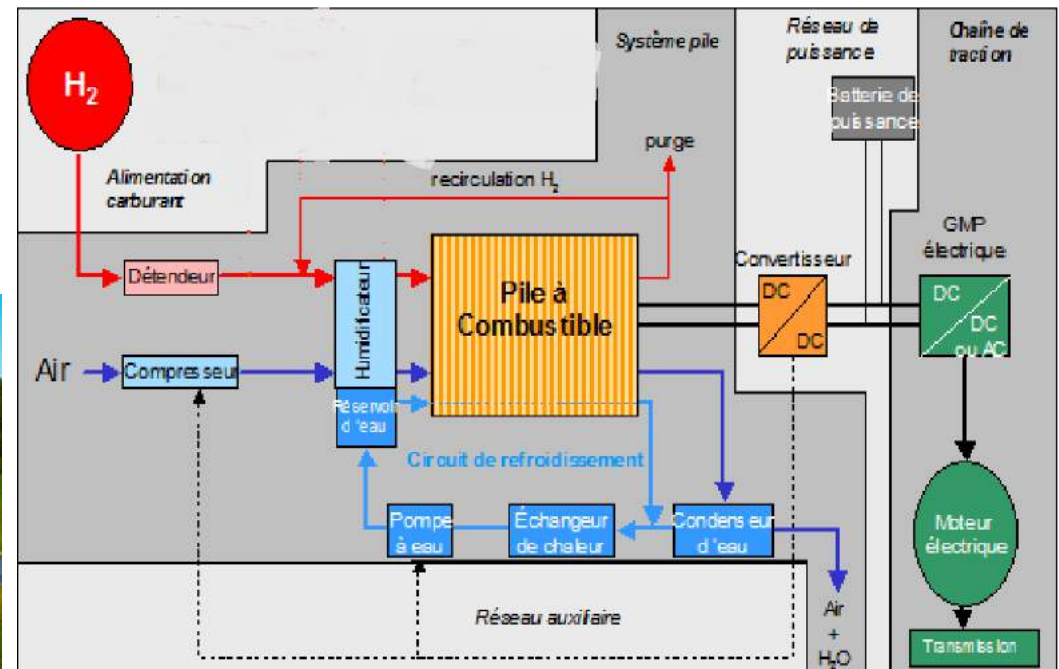
- Véhicule avec moteur électrique
- Avec une pile à combustible
- Stockage H₂ comprimé entre 350 à 700 bar
- Une batterie (en particulier pour pointes de puissance et récupération d'énergie au freinage)



Toyota Mirai



Renault Kangoo ZE H2 de Symbio



- **Comme le véhicule électrique** (électricité renouvelable) :
 - Pas d'émissions de CO₂, CO, NOx...
 - Faible émissions de particules : pas de particules dans les gaz échappements (seulement eau et air/azote), mais il reste les émissions de particules liées à l'usure des pneus et des freins
 - Faible bruit
- **Intérêt par rapport au simple véhicule électrique** :
 - Autonomie
 - Rapidité de recharge



- Infrastructure de distribution coûteuse et/ou pas compatibles avec les besoins de flexibilité inter-saisonnier du système électrique

	Production décentralisée	Production centralisée
Description	stations équipées d'électrolyseurs, de compresseurs et de stockages 500 à 700 bars	Unités d'électrolyse centralisée avec réseau de distribution et stockages centralisés
Avantage	Limite la création de nouvelles infrastructures	Peu offrir une flexibilité inter-saisonnaire
Inconvénient	Ajoute une consommation électrique journalière, avec faible flexibilité pour réseau électrique	Coût important (réseau, stockage souterrain)

[1] B.Multon <https://github.com/VGuichon/Hackathon-CampOSV-mars-2018/blob/master/B%20Multon%20Conf%202015-3-2018%20CampOSV.pdf>

- **Maturité**
 - Pré-séries industrielles
 - fin 2017, moins de 10 000 voitures dans le monde [1]
 - Premiers bus en France 2019
- **Coût actuellement élevé des solutions de mobilité (actuellement entre 50 et 100% plus chère que solution thermique en coût total de possession) [2],[3]**
- **Gestion du risque H₂**
- **Performance énergétique faible comparée au véhicule électrique batterie**
- **Ressources matières : Platine pour pile à combustible, potentiellement critique [4]**

[1] B.Multon <https://github.com/VGuichon/Hackathon-CampOSV-mars-2018/blob/master/B%20Multon%20Conf%202015-3-2018%20CampOSV.pdf>

[2] Expérimentation Hyway 2014-2017 - <https://www.tenerrdis.fr/fr/projets/hyway/?cn-reloaded=1>

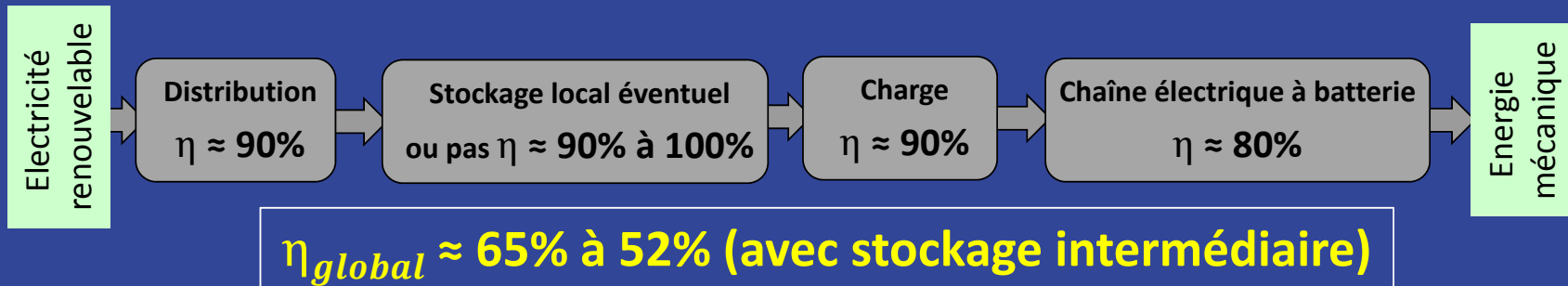
[3] Element Energy, Afhyac, Mobilité Hydrogène France - L'opportunité bus électriques à hydrogène - 2018

[4] BRGM, Fiche de synthèse sur la criticité des métaux - Le platine, 2 novembre 2017

Véhicules électriques : à batterie (BEV) ou à pile à combustible (FCEV) ?

Alimentation en électricité renouvelable à faibles impacts

1- BEV (Battery Electric Vehicles)

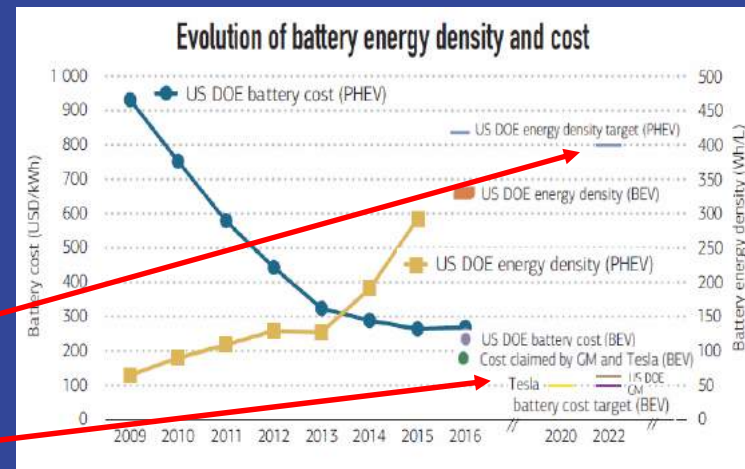


En France : **part énergie** environ **2 €/km**

Batterie (pour 400 km) : 40 à 50 kWh
8 à 10 k€ et 270 à 330 kg

Evolutions (lithium-ion)
(densité et prix) de 2009 à 2016:

Vers 200 Wh/kg et 400 Wh/L
et 100 \$/kWh

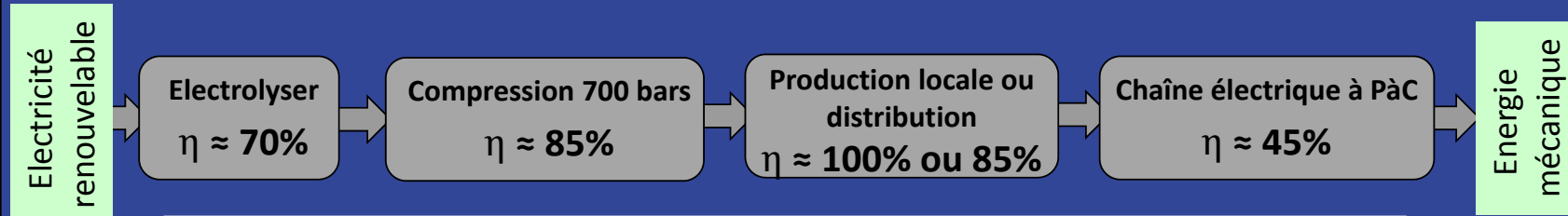


Source : Global EV Outlook 2017, IEA (june 2017)

Source : Bernard Multon <https://github.com/VGuichon/Hackathon-CampOSV-mars-2018/blob/master/B%20Multon%20Conf%2015-3-2018%20CampOSV.pdf>

Véhicules électriques : à batterie ou à pile à combustible ?

2- FCEV (Fuel Cell Electric Vehicles)



$\eta_{global} \approx 23\% \text{ à } 27\%$ (production centralisée ou locale)

=> consommation 2 à 3 fois plus élevée que celle d'un BEV

En France : **part énergie** environ 5 à 10 €/km => 2,5 à 5 fois plus cher

Autonomie et performances massiques peu supérieures à celles des BEV :

Mirai : pile (230 kg) + réservoir H2 (92 kg) + batterie NiMH (30 kg)

=> **350 kg pour 5kg d'H2 (500 km)**



Toyota Mirai



Tesla Motors

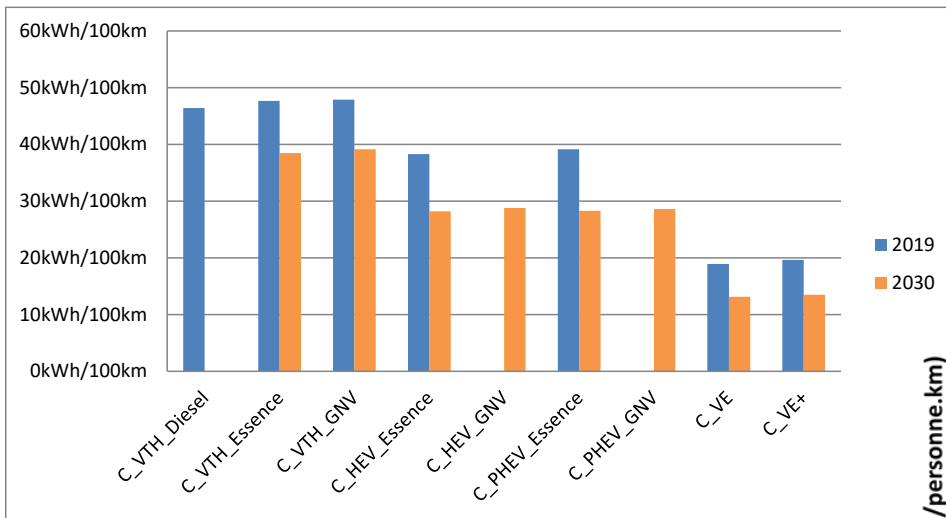
Tesla S : batterie 75 kWh **540 kg (485 km)**

- **Par rapport au gaz naturel ou méthane :**
 - Une propension à fuir plus importante : la molécule d'hydrogène est de petite taille et de faible viscosité, ce qui facilite les fuites ;
 - Une probabilité d'inflammation plus élevée :
 - énergie minimale d'inflammation faible (15 fois plus faible que gaz naturel), qui peut être apportée par une flamme ou une étincelle
 - Domaine inflammable dans l'air ambiant est de 4 à 75%v;
 - Une probabilité d'explosion à l'air libre plus faible compte tenu d'une forte diffusivité qui réduit le risque de formation d'un nuage explosif en milieu non confiné ;
 - Une combustion plus rapide, favorisant le phénomène de déflagration ;
 - Une flamme peu visible et peu radiative.

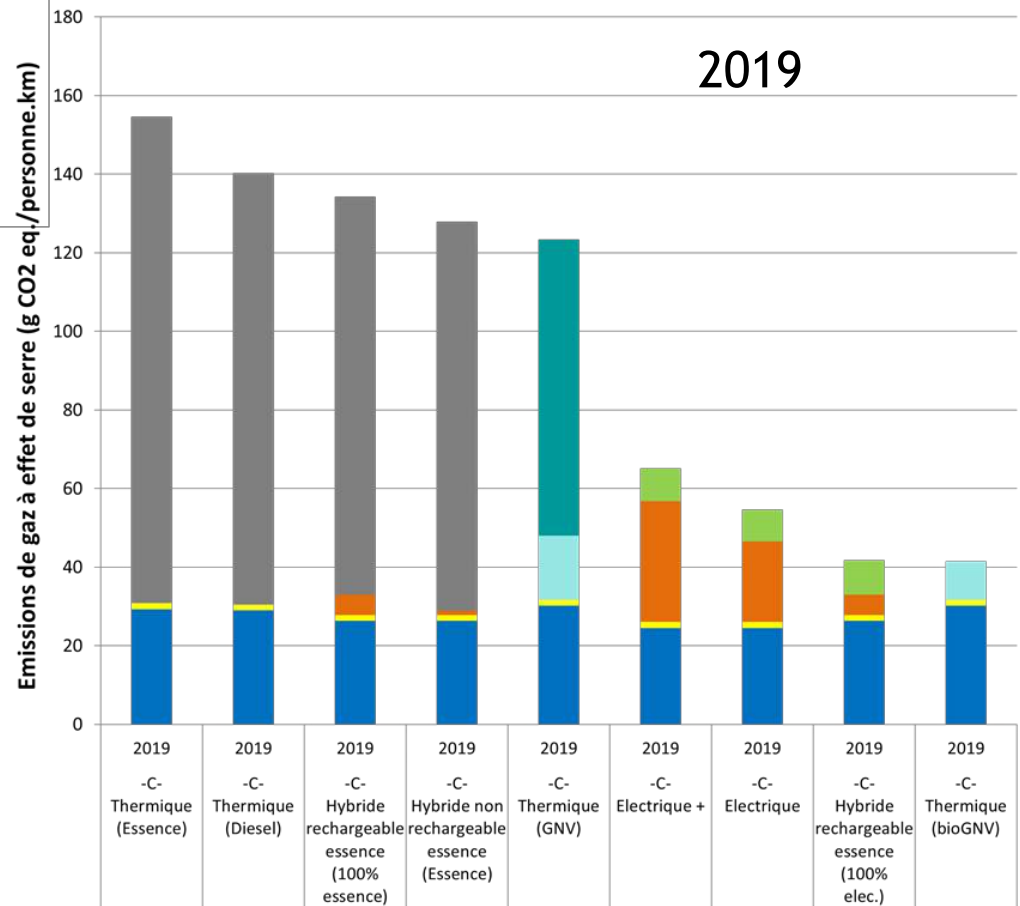
Sources : ADEME, « L'hydrogène dans la transition énergétique », 2018
Bricault&all, « L'hydrogène décarboné », ed Lavoisier, 2019

- Electricité (batterie) réservée aux petits véhicules urbains (quasi zéro émission)
- BioGNV pour les poids lourds et la longue distance
 - Technologie mature (Millions de véhicules en service)
 - Faible NOx, Particules quasi nulles
 - Bon bilan GES (BioGNV)
 - Déploiement des Infrastructure d'avitaillement
- Hybridation possible

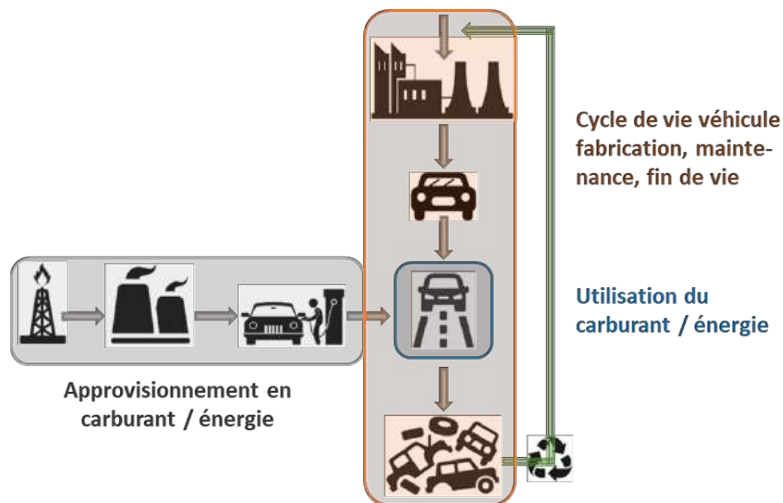
- Usages actuels (sauf pétrochimie et raffinage, moins d'engrais de synthèse)
- Nouvel usage matière : production d'acier primaire décarboné
- H₂ Vecteur énergétique final : Faible
 - Mobilité H₂ limité
 - Pas/peu d'infrastructure de distribution et stockage (pourrait accéder aux infra méthane, mais probablement moins de 20%, en mélange avec CH₄)
- Vecteur énergétique intermédiaire pour production CH₄
 - Flexibilité système électrique
 - Gaz renouvelable compatible avec :
 - Infrastructure gazière actuelle
 - Mobilité longue distance (Moteur GNV)
- Moyen de production : Vaporéformage => Electrolyse



Consommation (kWh/100 km)

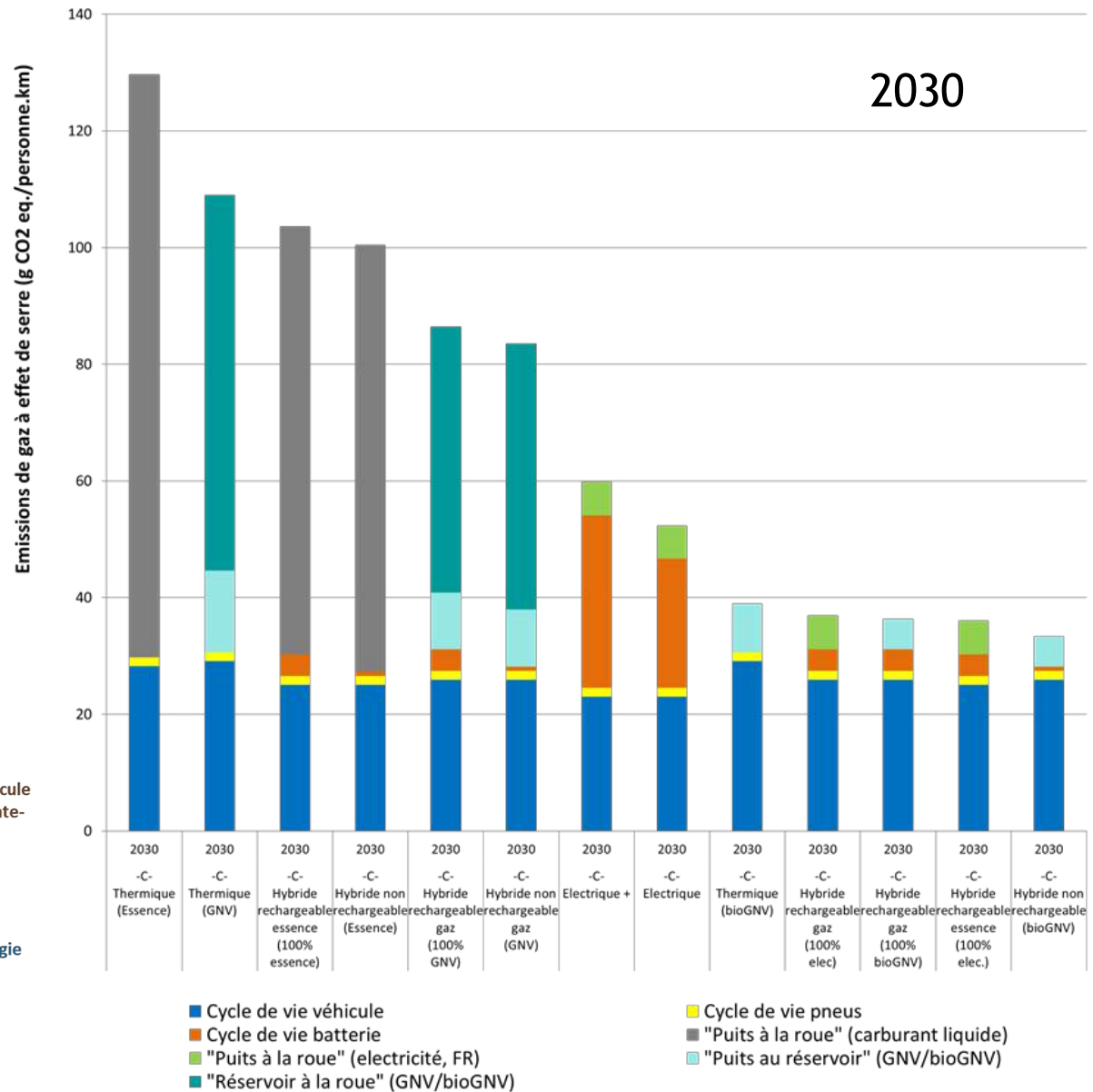
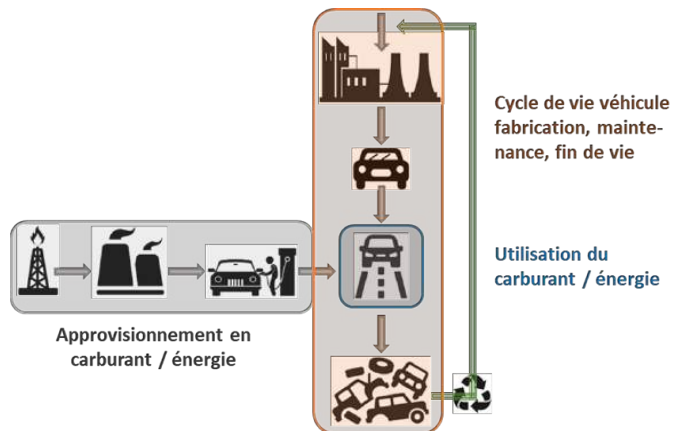


Emissions ACV (cycle de vie du véhicule + carburant (puit à la roue))



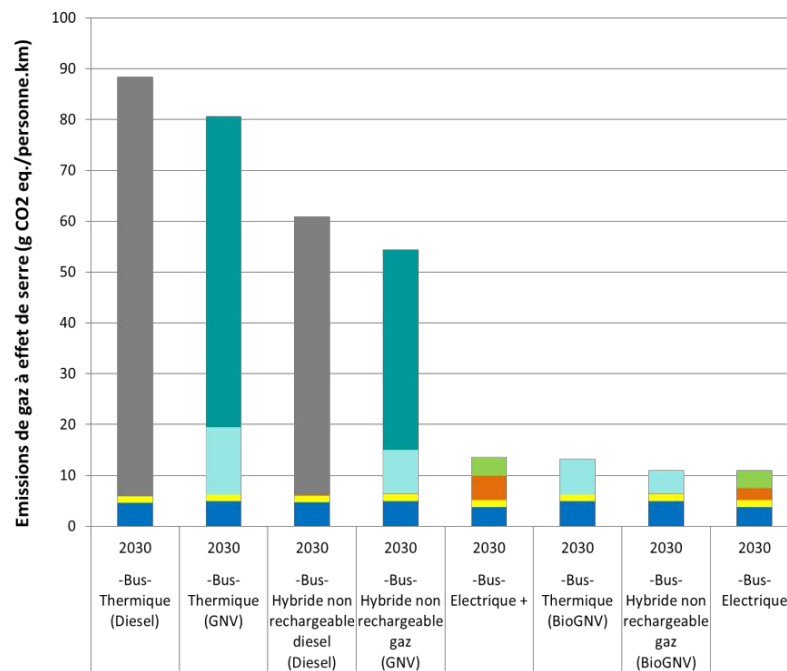
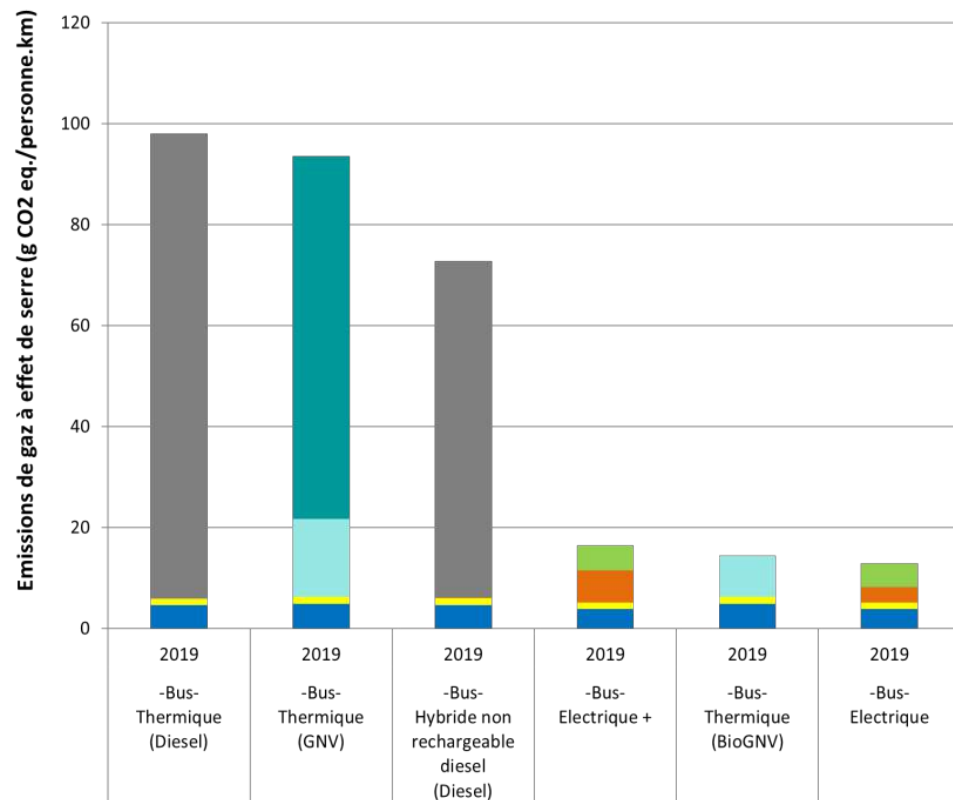
- Cycle de vie véhicule
- Cycle de vie pneus
- Cycle de vie batterie
- "Puits à la roue" (carburant liquide)
- "Puits à la roue" (électricité, FR)
- "Puits au réservoir" (GNV/bioGNV)

Emissions ACV (cycle de vie du véhicule + carburant (puit à la roue))



2019

2030



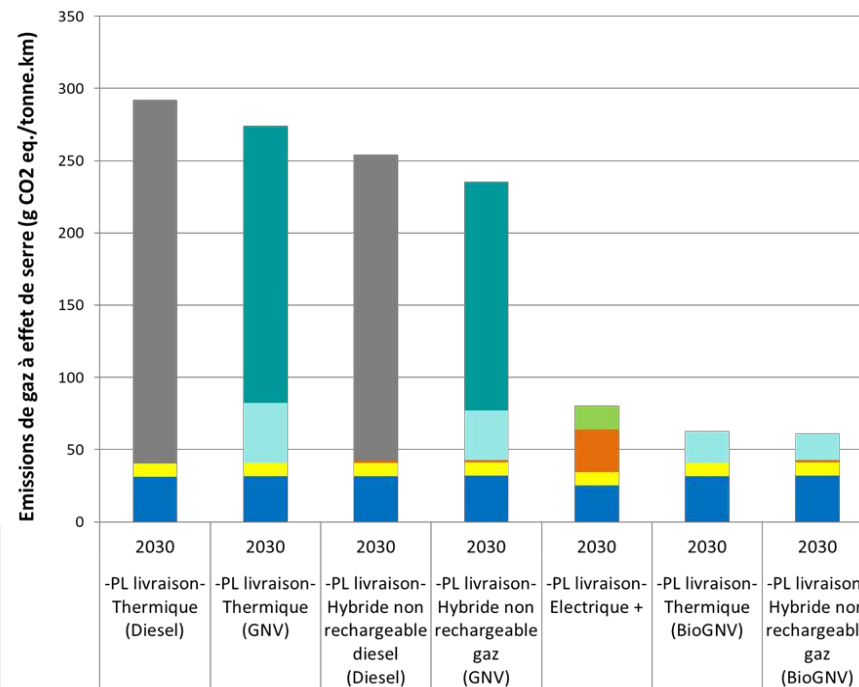
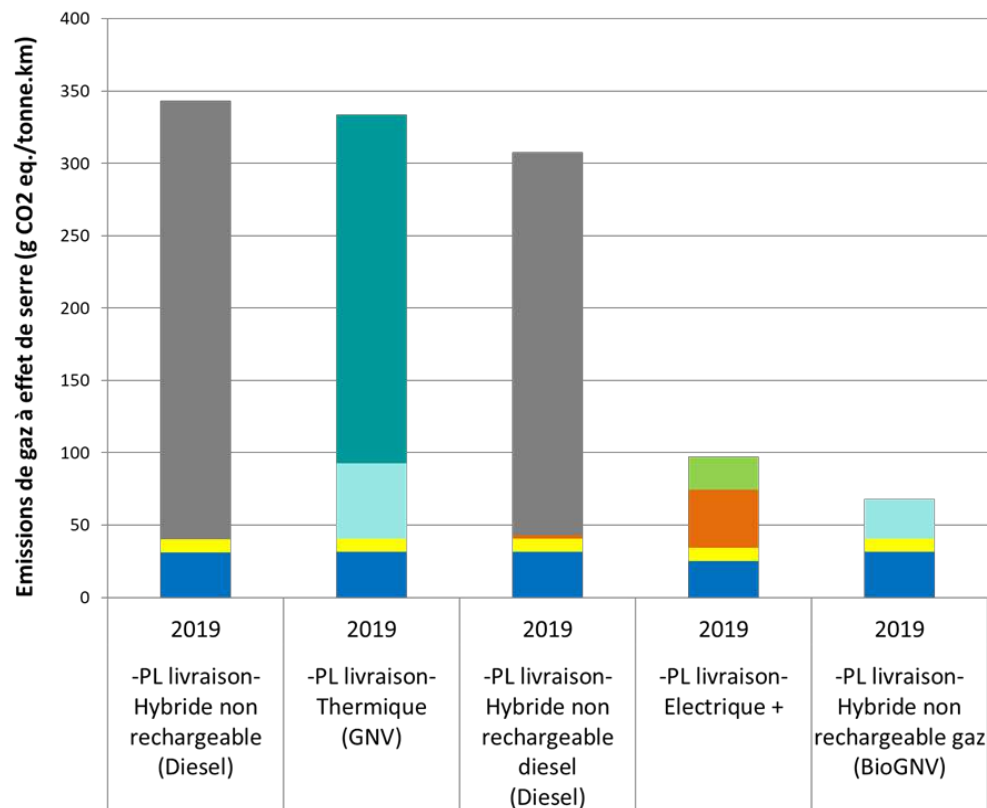
- Cycle de vie véhicule
- Cycle de vie pneus
- "Puits à la roue" (carburant liquide)
- "Puits à la roue" (electricité, FR)
- "Puits au réservoir" (GNV/bioGNV)
- "Réservoir à la roue" (GNV/bioGNV)

- Cycle de vie véhicule
- Cycle de vie batterie
- "Puits à la roue" (carburant liquide)
- "Puits à la roue" (electricité, FR)
- "Puits au réservoir" (GNV/bioGNV)
- "Réservoir à la roue" (GNV/bioGNV)
- Cycle de vie pneus
- "Puits à la roue" (GNV/bioGNV)

Impacte potentiels sur le changement climatique pour les bus - Horizon temporel

2019

2030



- Cycle de vie véhicule
- Cycle de vie batterie
- "Puits à la roue" (electricité, FR)
- "Réservoir à la roue" (GNV/bioGNV)
- Cycle de vie pneus
- "Puits à la roue" (carburant liquide)
- "Puits au réservoir" (GNV/bioGNV)

- Cycle de vie véhicule
- Cycle de vie batterie
- "Puits à la roue" (electricité, FR)
- "Réservoir à la roue" (GNV/bioGNV)
- Cycle de vie pneus
- "Puits à la roue" (carburant liquide)
- "Puits au réservoir" (GNV/bioGNV)