



Energies de l'après pétrole en navigation fluviale

le gaz naturel

Pierre-Jean Pompée
VNF – Voies navigables de France

Strasbourg – 21/6/2017

1. Panorama des énergies et des ressources, avantages, bilan

- * Le gaz naturel et l'hydrogène, deux « briques Lego » de l'énergie
- * Panorama des ressources, des produits, et de leur usage à bord
- * Emissions de CO₂ , consommation d'énergie selon le produit et son origine
- * Avantages pour l'environnement et modes de production du gaz naturel

2. Mise en œuvre du gaz naturel à bord

- * Motorisation, réservoirs, autonomie
- * Exemples d'installations
- * Difficultés réglementaires
- * Prix

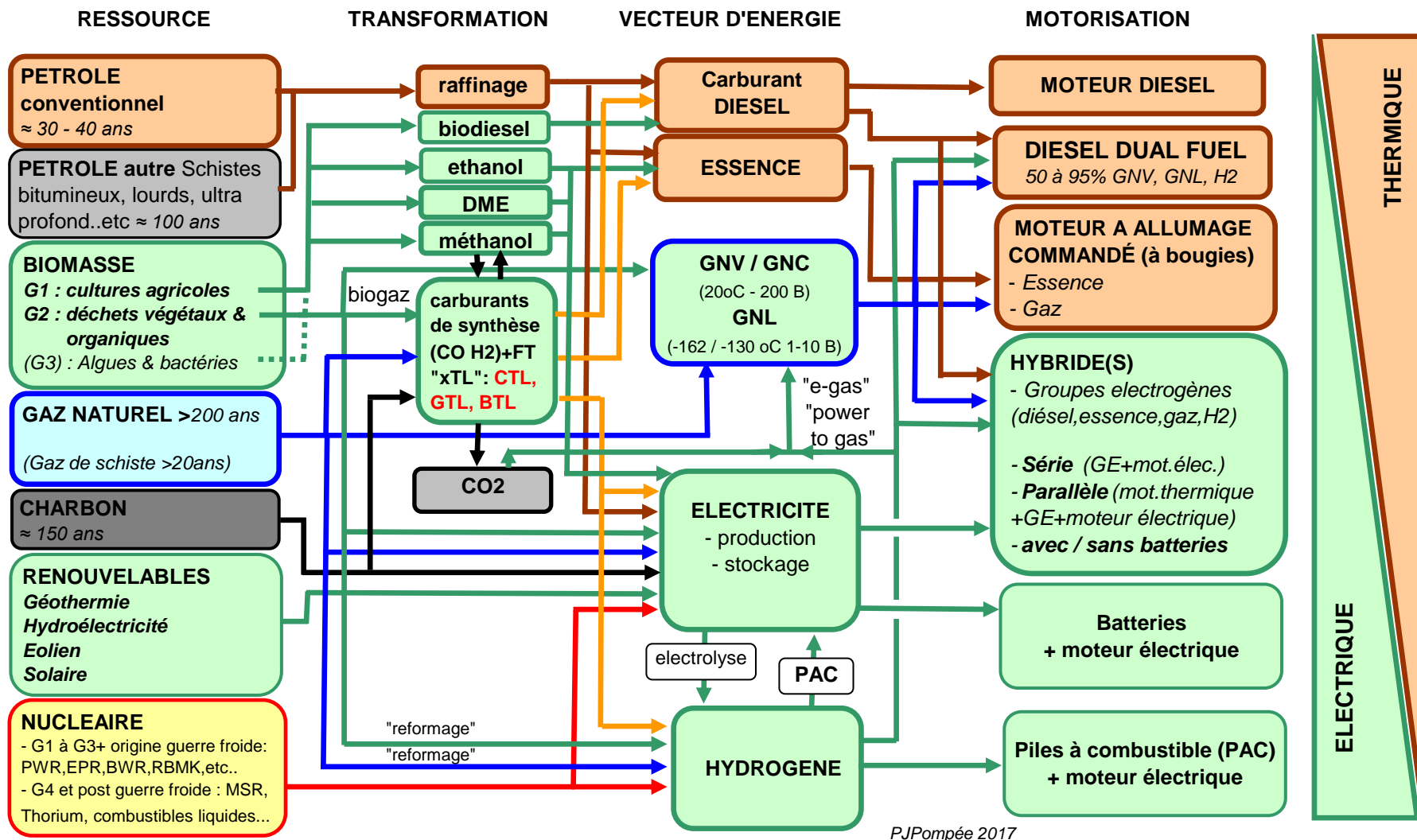
Conclusion

Gaz naturel et hydrogène, « briques Lego » de l'énergie

Chacun :

- peut se produire à partir de l'autre (passerelles entre les 2 filières)
- peut servir à produire de l'électricité, y compris directement (groupe électrogène ou Pile à combustible – après conversion en Hydrogène cad « reformage » pour le gaz naturel),
- Peut être utilisé liquéfié à très basse température, gazeux à température ambiante, ou servir de base à de la chimie de synthèse de carburants liquides remplaçant essence et fuel/gazole,
- peut être produit à partir d'électricité d'origine renouvelable (l'hydrogène par électrolyse, et le gaz naturel « power to gas » ou « e-gas » à partir d'hydrogène renouvelable et de CO₂ capté, pour un bilan CO₂ final en combustion égal ou très proche de zéro),
- peut se produire à partir de biomasse (« biogaz » pour le gaz naturel) avec un bilan de faibles émissions de CO₂ – *mais aussi l'inverse si p.ex. produit à partir du charbon ou en gaz de Schiste*

Sources d'énergie et utilisation à bord



Emission de CO2 et consommation d'énergie

Exemples comparés :

- bateau fluvial 2200 T sur la Seine
21 g CO2/T.km - 252 MJ/1000T.km
- camion de 40T en conditions favorables (hors urbain /périurbain)
95 g CO2/T.km – 1100 MJ/1000T.km
- Voitures particulières Essence
160gCO2/100km – 220 MJ/100 km

Sources:

- Etude ADEME consommation des unités fluviales (2006)
- Information CO2 des prestations de transport (MEDDE 2012)
- Etude « well to wheels » EUCAR/JRC/CONCAWE (2005/2011)

Emissions de CO₂ et consommations d'énergie

GAZ A EFFET DE SERRE « du puits à la roue » (base automobiles)

gCO₂
/T.km
Seine

gCO₂
/T.km
camion

g CO₂
/100 km
automobile

essence
et diesel

ref. gas. 2002

GNV

Bio-diesel

BtL

Ethanol

ENERGIE CONSOMMEE

« du puits à la roue » (base automobiles)



- Gasoline
- Diesel fuel
- ▲ LPG
- ▲ CNG
- ▲ CBG
- ETOH ex SB
- ETOH ex wheat
- ETOH ex cellulose
- ETOH ex sugar cane
- MTBE/ETBE
- Bio-diesel
- Syn-diesel ex NG
- Syn-diesel ex coal
- Syn-diesel ex wood
- DME ex NG
- DME ex coal
- DME ex wood

Automobile
MJ/100km

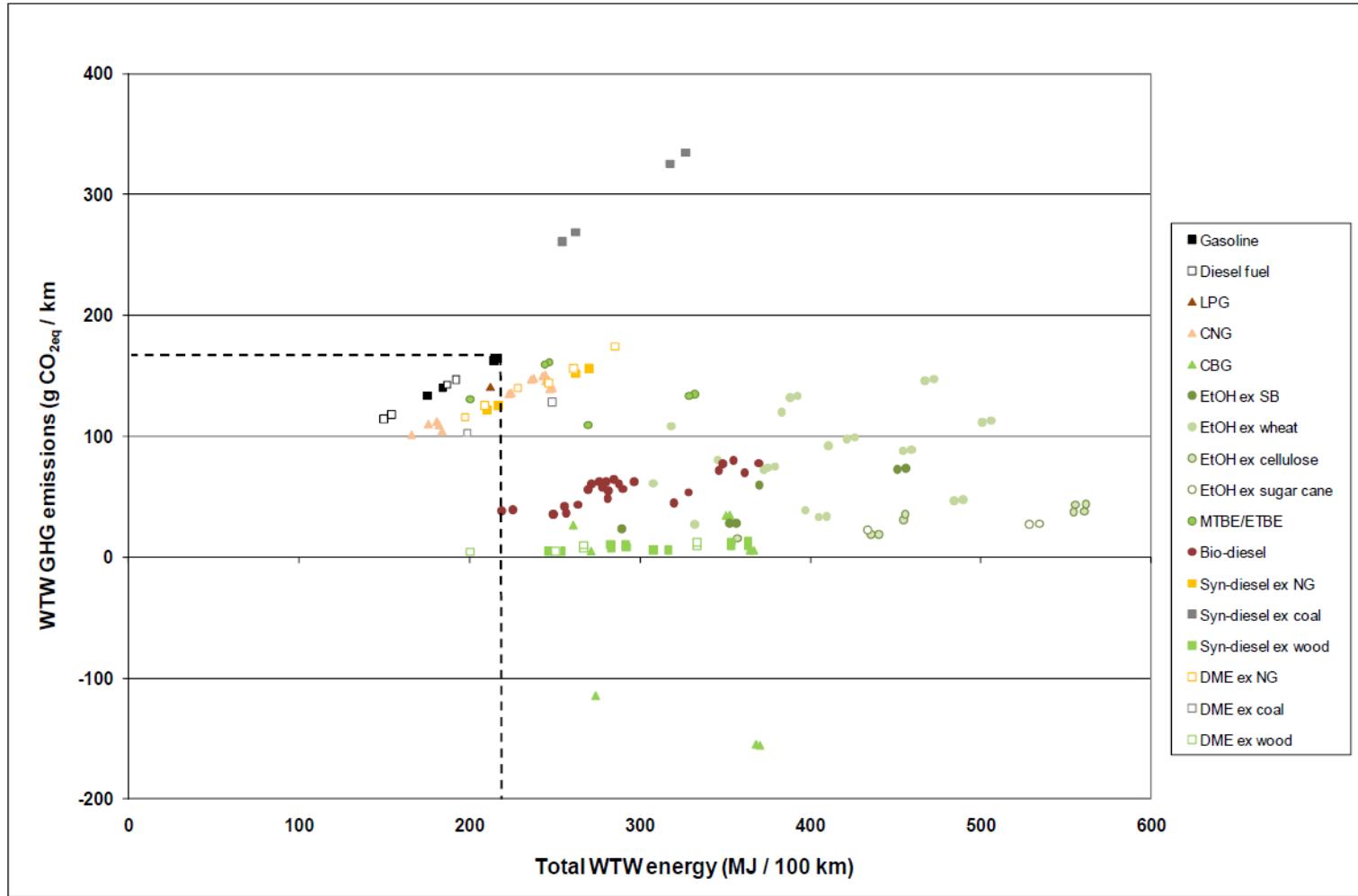
Camion articulé 40 T
MJ/1000T.km (autoroute)

Bateau fluvial ou convoi >2200T
MJ/1000T.km (Seine)

(Diagramme
2005)

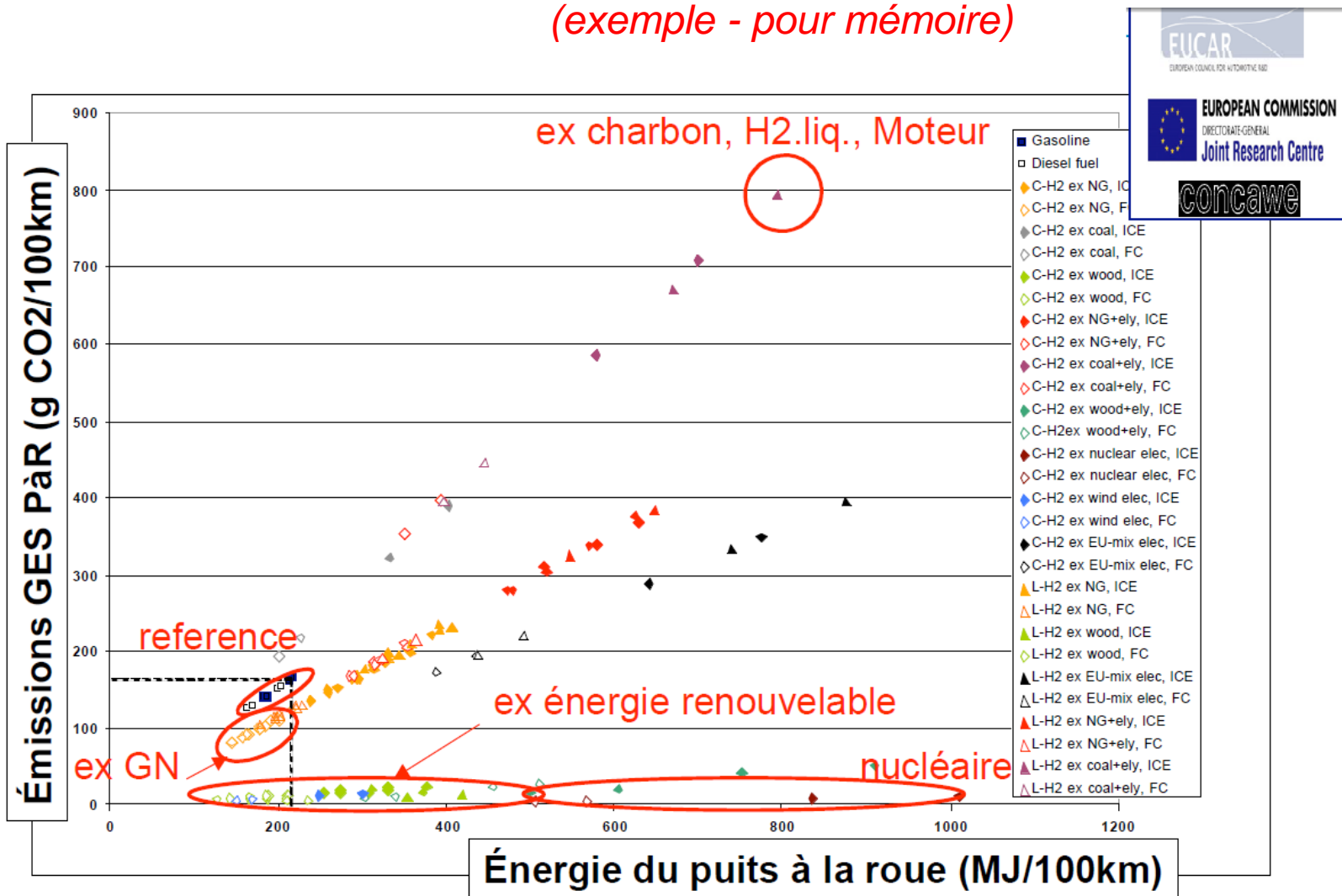
Emissions de CO₂ et consommations d'énergie (suite)

(Pour mémoire le même diagramme presque identique existe en version 2011 pour des véhicules post-2010)



(Diagramme énergie/CO₂ de l'étude « well to wheels » EUCAR/JRC/CONCAWE 2011 pour mémoire)

Bilan CO₂ / énergie de l'hydrogène selon mode de production (exemple - pour mémoire)



(étude « well to wheels » EUCAR/JRC/CONCAWE 2005 pour une automobile)

Quelles énergies pour les transports demain ?

Selon des analystes du monde pétrolier et automobile, l'avenir qui se dessine pour le transport pourrait être :

- Abandon du pétrole au profit du gaz par les compagnies pétrolières, et développement des énergies renouvelables,
- Voitures particulières : Electrique (batteries et hydrogène en réservoir solide à adsorption + PAC),
- Camions et Maritime longue distance : GNL (et aussi Hydrogène pour les camions, soit liquide, soit en réservoir solide à adsorption),
- Transports terrestres à faible autonomie : GNC/GNV, Hydrogène,
- Autres mal adaptés ou inaptes pour les solutions précédentes, particulièrement l'aviation : GTL et BTL (naphta, kérosène, gazole diesel, essence, et même GPL synthétiques).

Les avantages du gaz naturel pour l'environnement

Plus de réserves que pour le pétrole conventionnel (200 à 300 ans contre 30 à 40 ans)

(sans compter le pétrole d'accès difficile : Schistes bitumineux, ultra profond, etc... estimé à 100 ans de réserves avec un très mauvais bilan CO₂ en raison de l'énergie à dépenser pour l'extraire)

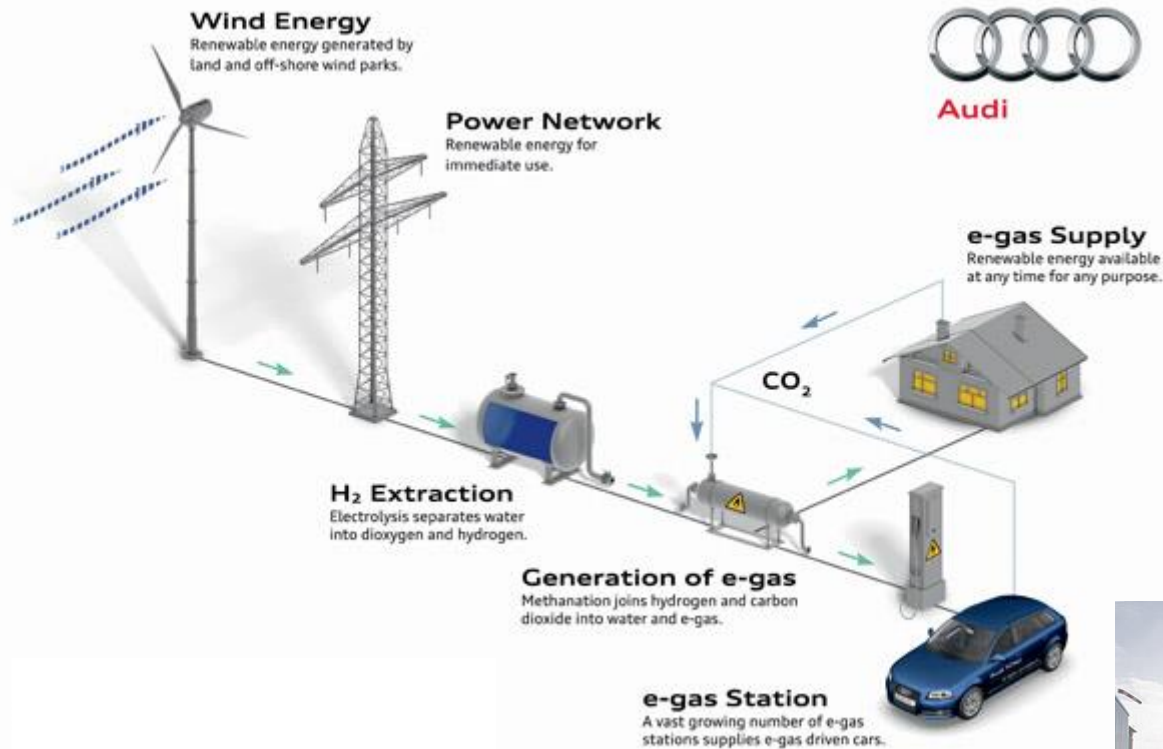
ENERGIE ET CO2 : meilleur bilan CO2 que le pétrole selon l'origine du produit :

- Champs de gaz naturel fossile : bilan CO2 de plus en plus inférieur au diésel d'origine pétrolière à mesure que le pétrole se raréfie
- Biogaz à bilan de CO2 faible (-80 à -90%)
- « e gas » obtenu en « power to gas » à bilan de CO2 nu

POLLUTION ET EMISSIONS : moins d'émissions de polluants par les moteurs :

- Moteurs Diésel dual Fuel : quasi élimination des particules & imbrulés, diminution de 10 à 20% des NOx
- Tous moteurs à allumage commandé : pas d'émission de particules ni d'imbrulés
- Moteurs à allumage commandés traditionnels : moins de Nox (-10 à -20%) car la combustion est moins chaude que pour le diésel
- Moteur à allumage commandé stoechiométrique de dernière génération: pratiquement pas de pollution (ni Nox, ni particules, ni CO, ni imbrulés)
- Reformage/pile à combustible : aucune pollution ni pièce mécanique

gaz naturel à bilan CO₂ nul « power to gas »



le « power to gas » permet de transformer de l'électricité renouvelable et du CO₂ en gaz naturel « e-gas ».

La combustion du « e-gas » depuis le réseau GNV restituera le CO₂ utilisé pour le produire, à bilan CO₂ nul

*L'usine Audi de Werlte (Allemagne) reliée au réseau GNV en Juillet 2015, produit depuis 2012 du gaz naturel « e-gas » à partir de CO₂ et d'énergie renouvelable : **elle peut transformer en gaz naturel 6 MWh d'électricité éolienne en 5 minutes en éliminant en même temps du CO₂***



d'après articles et images : « Moteur Nature » 16/7/2015, 16/12/2012, 2011

Le Biogaz / Biométhane



Le bio gaz peut être produit par méthanation (fermentation)

- *de déchets ménagers et organiques*
- *de déchets forestiers et végétaux*

Son utilisation pour les transports permet de réduire l'empreinte CO2 de plus de 80%-90% par rapport au gaz naturel fossile

Des unités de production sont périodiquement inaugurées (dont une avec l'ADEME en région parisienne en 2016)

Le potentiel de production de biogaz en France pourrait atteindre jusqu'à 60% du gaz naturel utilisé sur le territoire.

<- affiche pédagogique du cycle du biogaz au SITL 2017

Carburants de synthèse « xTL » à partir du gaz et du charbon

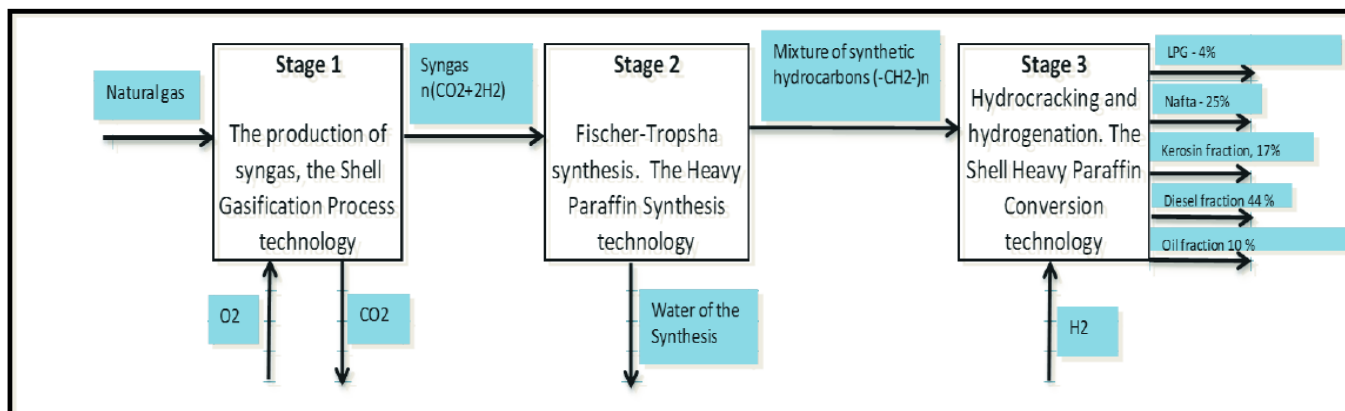
GTL « Gas to liquid », BTL « Biomass to Liquid », CTL « coal to liquid »

- « carburants FT » (p.ex. « FT Diésel ») ou « xTL » produits par la synthèse de Fischer-Tropsch, découverte en 1925 et utilisée en Allemagne puis, depuis les années 50, en Afrique du Sud (Sasol, 150 à 185000 barils/jour).
- Usines de 34000 (Sasol) et 140000 barils/jour au Qatar (Shell), 33000 barils/jour au Nigeria, et 14700 barils/jour en Malaisie + **10 autres projets en : Afrique, USA, ex-URSS**
- **Permettent de remplacer les carburants actuels (Diésel, essence, kérosène d'aviation) sans aucun changement technique des moteurs et réservoirs**, en utilisant le gaz naturel à la place du pétrole comme matière première de départ
- Ces carburants de synthèse étant plus pur, les **moteurs diésel sont un peu moins polluants qu'avec le gazole issu du pétrole pour les NOx et les particules, environ 20%**
- **Le BTL permet d'alimenter les moteurs thermiques à bilan CO₂ proche de zéro**
- **Bilan énergétique et CO₂ des xTL dégradé par rapport au gaz (comprimé ou liquéfié) ou aux carburants issus du raffinage du pétrole, en raison de la dépense d'énergie pour les produire : 44% (GTL), à 67% (BTL), de l'énergie initiale est brûlée dans le processus**

Carburants liquides de synthèse (GTL « gas to liquid », BTL, CTL)

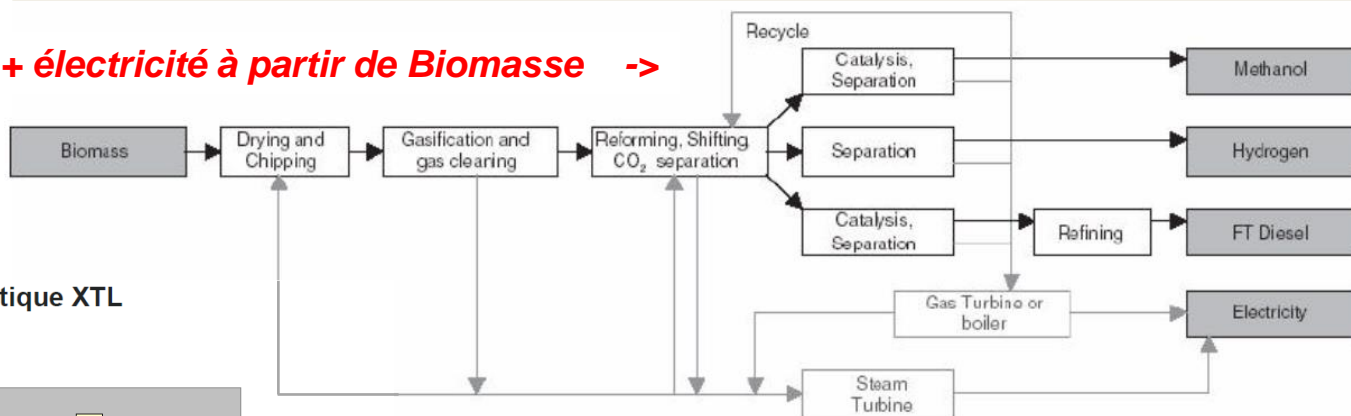
Synthèse de carburants à partir de gaz naturel ->

Usine Shell « Pearl » (Qatar)
140000 barils/jour diesel
(+ 120000 barils autres)
investissement 2 EPR
plus grande au monde
plusieurs autres en projet



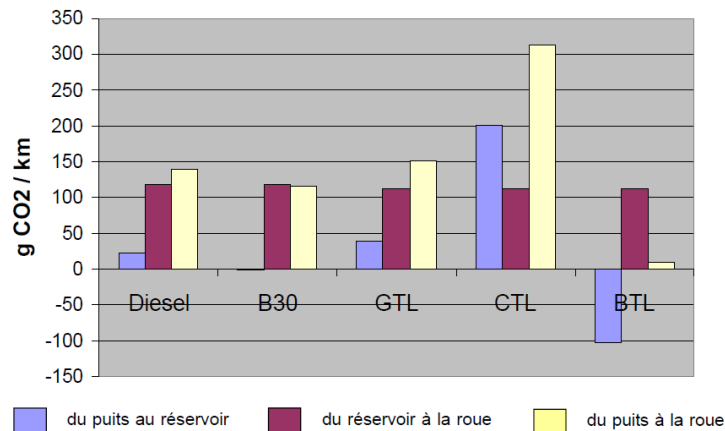
Synthèse carburants + H_2 + électricité à partir de Biomasse ->

Exemple de processus combiné



Diesel, Biodiesel and Diesel synthétique XTL

Megane 1.5 dCI 85



Bilan énergétique ->
 <- Bilan CO_2 des synthèses « to Liquid » :
 gaz (GTL)
 biomasse (BTL)
 charbon (CTL)

	GTL	CTL _{base} Indirect	CTL direct	BTL	BTL Bioéthanol
Rendement % poids (masse produits liquides / masse charge sèche)	60	27	49	16	24
Rendement énergie % (énergie produits liquides / énergie charge sèche)	56	43	65	33	37

1. Panorama des énergies et des ressources, avantages, bilan

- * Le gaz naturel et l'hydrogène, deux « briques Lego » de l'énergie
- * Panorama des ressources, des produits, et de leur usage à bord
- * Emissions de CO₂ , consommation d'énergie selon le produit et son origine
- * Avantages pour l'environnement et modes de production du gaz naturel

2. Mise en œuvre du gaz naturel à bord

- * Motorisation, réservoirs, autonomie
- * Exemples d'installations
- * Difficultés réglementaires
- * Prix

Conclusion

Le gaz naturel non transformé sur un bateau

Stockage à bord :

- **Gazeux (GNC/GNV : citernes ou bonbonnes à 200 bars à température ambiante)**
6 à 10 fois l'encombrement du gazole en pratique (5 fois pour le produit seul)
- **Liquéfié (GNL : citernes cryogéniques -162 à -130 oC pression 1 à 10 bars)**
3 fois, jusque 8 fois en pratique, l'encombrement du gazole (2 fois pour le produit seul)

Consommation à bord :

- **Diésel Dual Fuel**
- **Moteur « à gaz »** (cad « à allumage commandé » comme le moteur « à essence »)
- **Groupe électrogène à gaz naturel alimentant un système hybride (moteur électrique avec ou sans batteries, en parallèle ou non avec un moteur thermique)**
- **Reformage -> Pile à Combustible -> moteur électrique**

Mise en œuvre à bord : motorisation

Installations moteur à bord :

- **Le diésel dual-fuel** l'usage du Fuel/Gazole (FOD, GNR) combiné au gaz permet de remplacer l'étincelle par l'auto-inflammation du carburant liquide et de conserver les moteurs diésel, comme sur les grands méthaniers jusqu'à présent.
- **Le moteur à gaz (à bougies ou allumage commandé)** est adapté dans certains cas particuliers seulement au fluvial : bateau au GNV qui n'effectuera pas de grands trajets, ou bateau adapté au GNL (grand bateau, bateau citerne, grand porte conteneur,...)
- **Le groupe électrogène (GE) à gaz en configuration diésel - électrique ou hybride est une des solutions les plus polyvalentes car elle permet d'utiliser plusieurs énergies et types de moteurs (notamment le gazole non routier sur un long parcours)**
Au prix d'un rendement moins bon qu'un moteur thermique en croisière, mais meilleur en manœuvres, et d'un investissement et encombrement à bord plus important (investissement: ordre de grandeur +50 à +80% et au delà en hybride ou diésel - électrique par rapport à un moteur thermique, masse et encombrement à bord plus élevés).
- **Le Reformeur + PAC** a un rendement proche du GE mais aucune pièce en mouvement, s'utilise avec un moteur électrique et pourrait se développer dans un avenir proche

Mise en œuvre à bord : réservoirs et autonomie

L'autonomie et la taille des réservoirs (avec les conditions d'homologation et la transition depuis le gazole/FOD/GNR), sont le principal point de blocage technique – avec le coût d'investissement - à l'usage des énergies de l'après pétrole

Taille des réservoirs gaz, à loger le plus souvent dans la cale fret :



































- Gazeux (GNC/GNV : citernes ou bonbonnes à 200 bars à température ambiante)
6 à 10 fois l'encombrement du gazole en pratique (5 fois pour le produit seul à énergie identique)
- Liquéfié (GNL : citernes cryogéniques -162 à -130 oC pression 1 à 10 bars)
3 fois, jusque 8 fois en pratique, l'encombrement du gazole (2 fois pour le produit seul à énergie identique)

Taille des réservoirs liquides (FOD/GNR/Gazole), logés dans la place perdue (coqueron AR):

- Freycinet (38,5mx5,05m) : 5000 litres
- DEK et RHK (73mx8,20m et 85mx9,50m) : 10000 litres et +
- Rhénan (90, 110 et 135 m x 11,40m) : 30000 litres et +

Soit une autonomie de 600 à 1900 km selon conditions de navigation

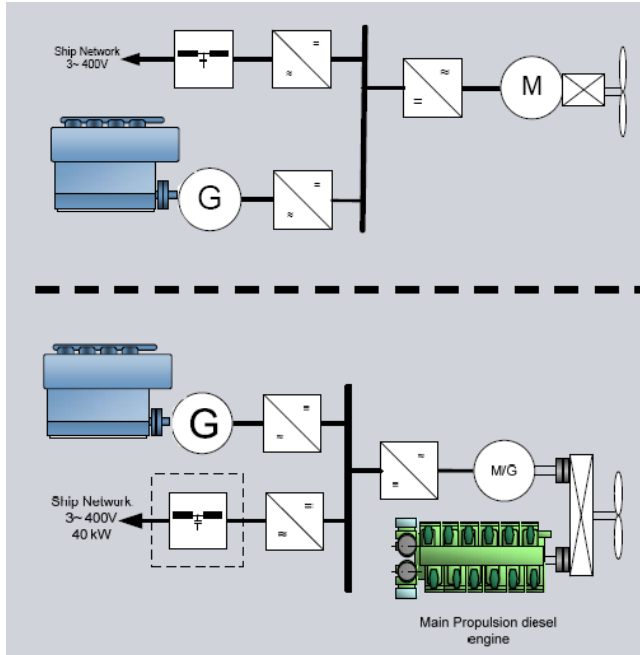
Types de bateaux fluviaux en France

Freycinet ("Péniche") (nombre en 2012: 472F+196E) 38,5 m x 5,05 m - 250 CV 250 T à 360 T (TE 1,80 - 2,50m)	 TE= 2,50m 360 T	 14 X	Classe I (4015 km) TE : 1,80 à 2,20 m TA : 4m
Campinois (nombre en 2012: 256F+94E) 55 à 65 m x 6,05 à 7 m - 550 CV 650T - 750 T (TE 2,50 - 2,60 m)	 60m x 6,60m x 2,60m 655 T  63m x 7m x 2,50m 32 EVP	 26 X  16 X	Classe II (266 km) TE : 2,50 m TA : 4 - 5m
Bateau et convoi "Canal du Nord" 60 m + 30 m x 5,70 m - 550 CV 750 T (TE 2,50 - 2,60 m)	 90m x 5,70m x 2,60m 750T	 30 X	Canal du Nord TE : 2,50 m TA : 4 - 5m
DEK ("Dortmund-Ems Kanaal") (nombre en 2012: 222F+151E) 67-80m x 8,20 m - 800 CV 950 -1100 T (TE 2,50 - 2,90 m)	 73m x 8,2m x 2,90m 1100 T	 44 X	Classe III (568 km) TE : 2,50 m TA : 4 - 5m
RHK ("Rhein-Herne Kanaal") (nombre en 2012: 142F+428E) 80-85m x 9,50 m - 700 à 1000 CV 1350 à 1500 T (TE 2,50 - 2,80 m)	 85m TE= 2,50m 1350 T  85 m TE=2,50m 90 EVP	 54 X  45 X	Classe IV (137 km) TE : 2,50 - 4,50 m TA : 5,20-7m
Rhénan 95-110 m x 11,40 m (nombre en 2012: 213F+456E) 2000T - 2500T - 3000T (110m TE 2,5-3,0-3,40m) 1200 CV - Vrac, Citerne, Conteneurs, Ro-Ro,...	 110 m x 11,40 m x 2 m - 530 voitures  Porte-Conteneurs 110 m x 11,40 m x 3 m - 200 EVP  Tanker 110 m x 11,40 m x 3,50 m - 3000 T - 3500 m3  Ro-Ro 110m x 11,40m x 2,50m - 72 véhicules	 60 X  120 X  100 X  72 X	Classe Va-Vb (247 km) TE : 2,50 - 4,50 m TA : 5,20m (Va) 7,00m (Vb)
Grand Rhénan 135 m x 11,40 m (nombre en 2012: 20F+182E) 2500T - 3000T - 3500T (110m TE 2,5-3,0-3,40m) 1900 CV - Vrac, Citerne, Conteneurs,...	 135 m x 11,40 m x 2 m - 660 voitures  Porte-Conteneurs 135 m x 11,40 m x 3 m - 280 EVP  Tanker 135 m x 11,40 m x 3,50 m - 3500 T - 4100 m3  Vrac 135 m x 11,40 m x 3,50 m - 3500 T	 75 X  140 X  140 X  140 X	Classe Vb et VI (1621 km) TE : 2,50 m - 4,50 m TA: 5,20 m (2 couches) 7,00 m (3 couches) 9,10 m (4 couches)
Convoi poussé 1 à 4 barges EUROPA II 100m-185m x 11,40m 1 à 4 barges de 2000 T à 2750 T chacune 2000 CV (4400T-2B) à 5700 CV (11000T-4B) 2020+2374T barges 76,5m+90m x 11,40m x 2,91m 2750T par Barge 80m x 11,40m x 4,0m	 Convoi 185 m x 11,40 m x 3,0m 2 barges - 4400 T  Convoi 185 m x 11,40 m x 4,0m 4 barges - 11000 T	Il existe des convois porte-conteneurs, Citerne, porte voitures, vrac, etc..  175 X(2B)  440X(4B)	

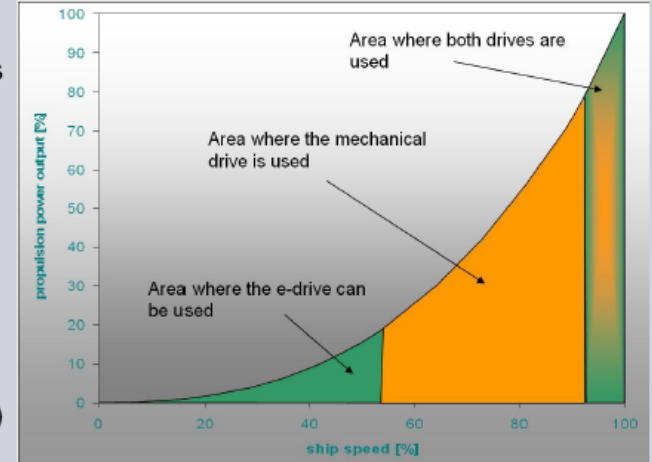
PJPompée - 2014

Note : Les effectifs des 60 bateaux au gabarit atypique « Canal du Nord » sont comptés ici dans les catégories adjacentes

Exemples d'Hybride Série / Hybride Parallèle



- The propulsion power is to satisfy very different operating conditions (e.g. down hill / up hill)
- Big variations in propulsion- and service power demand
- Max. power demands for prop. and service systems are not simultaneous (e.g. loading pumps)
- The max. service power demand does not justify an all electric concept



applies all to Inland Navigation

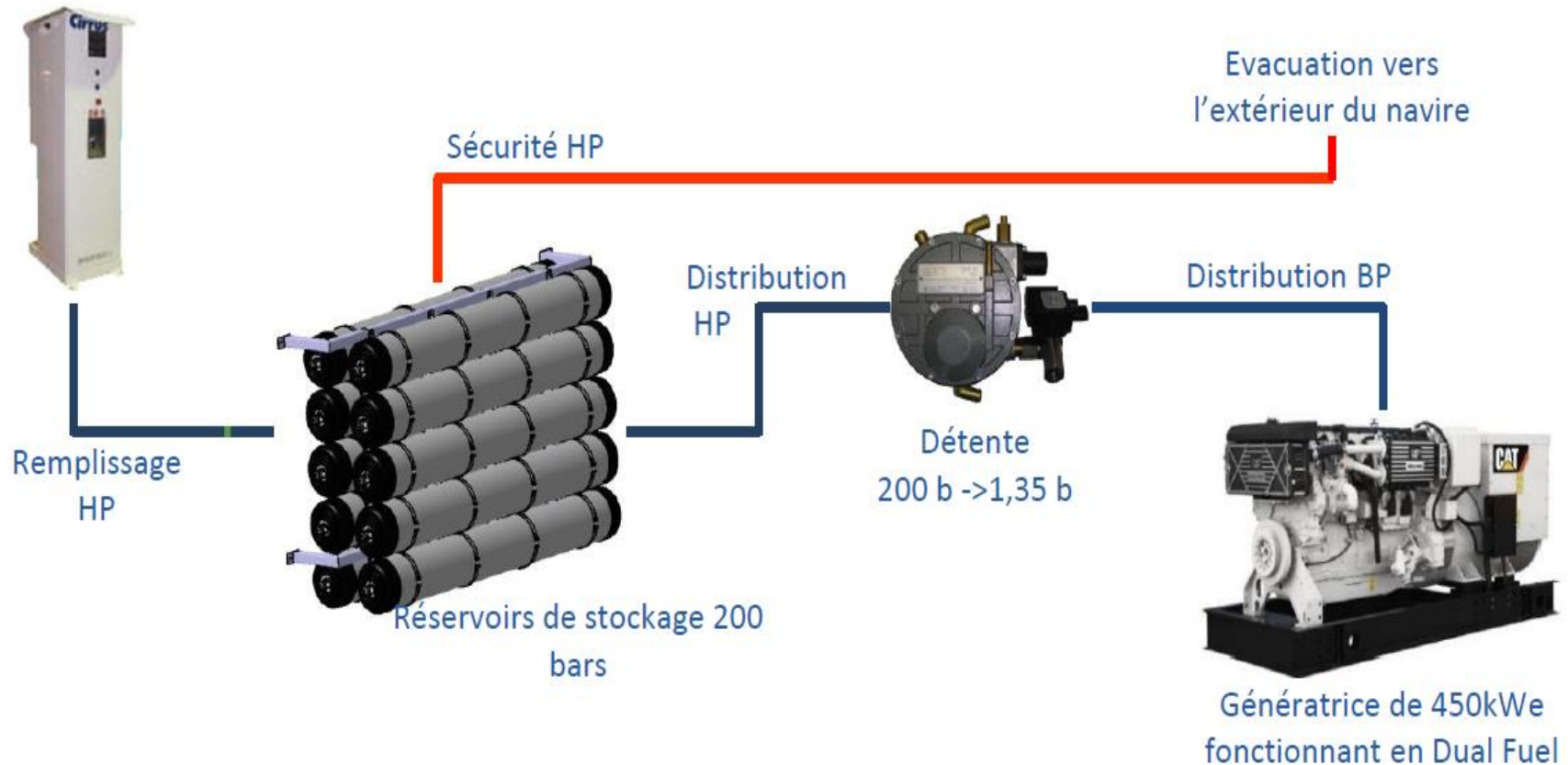
• **en haut : hybride série (cad diésel-électrique+moyen de stockage), le moteur électrique actionne toujours l'hélice**

• **en bas : hybride parallèle, l'hélice est actionnée soit par le moteur électrique, soit par le diésel, soit les deux, selon les cas.**

le moteur électrique a plus de couple, son usage évite un diésel surdimensionné uniquement pour les extrêmes.

(Images Siemens, base Platina)

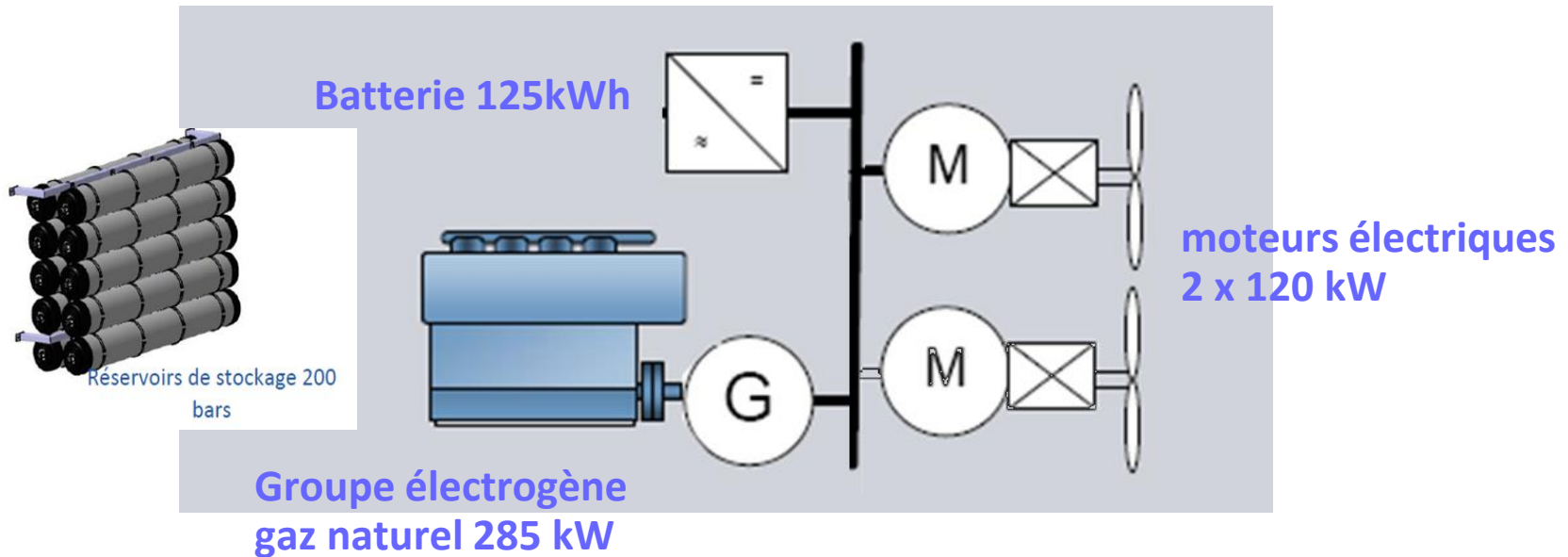
Exemple 1 installation GNV/GNC embarquée diésel - électrique avec groupe électrogène dual fuel+ réservoir FOD



Installation GNC/GNV Diésel – Electrique avec bonbonnes 200 bar et groupe électrogène Dual Fuel (images société Ariamis) – coût d'homologation supérieur à l'installation.

Exemple 2 installation GNV/GNC embarquée hybride série

Bateau fluvial à usage urbain
envisagé au départ avec réservoirs uniquement GNV



Composants origine R110 + Etude HAZID/HAZAR/HAZOP

Conversion au GNL - automoteur Rhéna

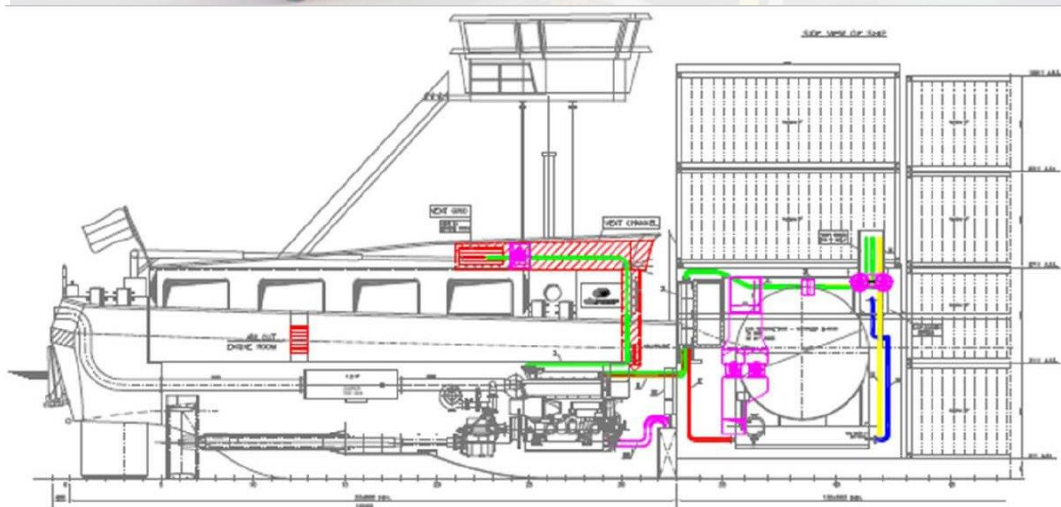
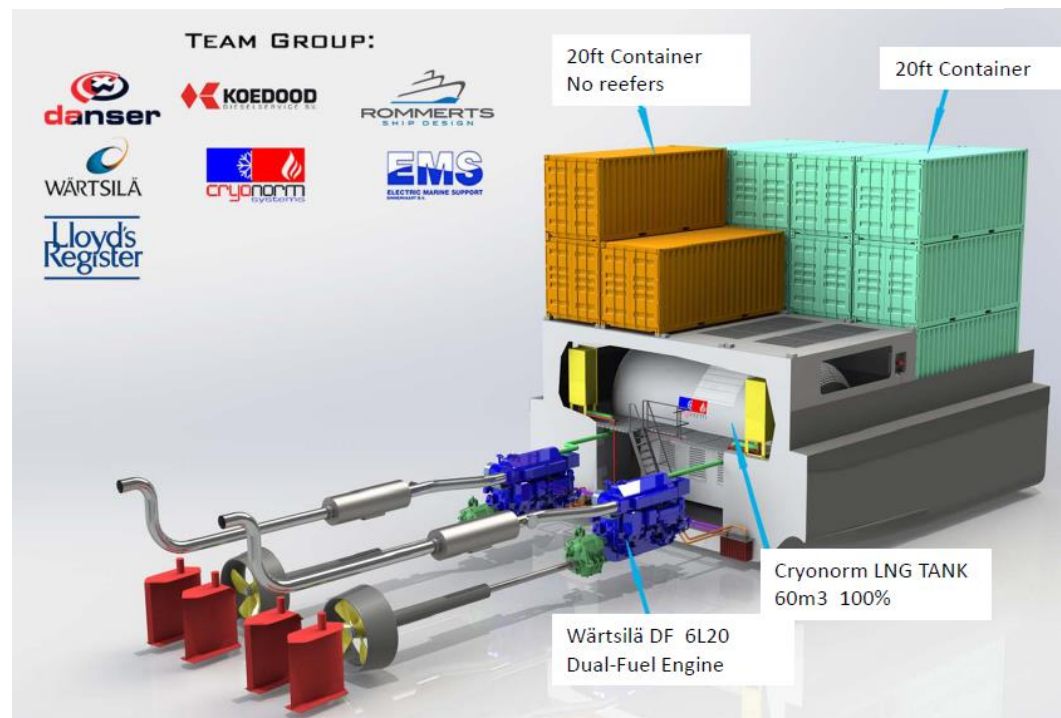
« Eiger –Norwand »

Convoi Rhéna 348 EVP – 5300 T
(90m+87m) x 11,40m x 2,56m

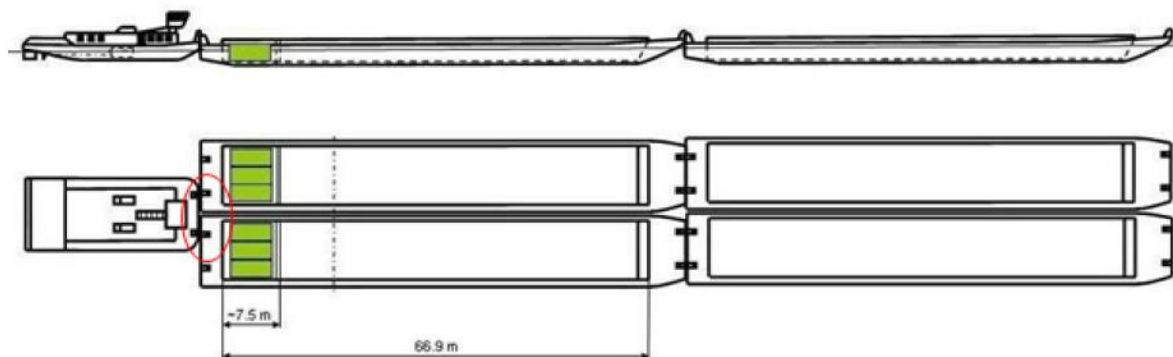
2x900 kW construit en 2000

La cuve « Type C » de 60m³ sous pression de GNL occupe la place de 8 EVP (8x33 m³) et une tranche de coque complète

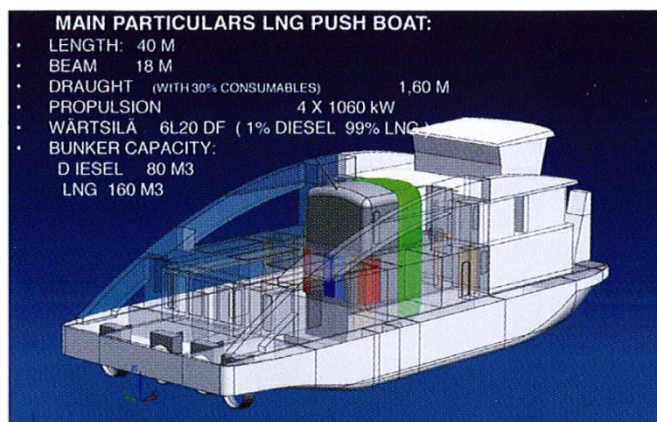
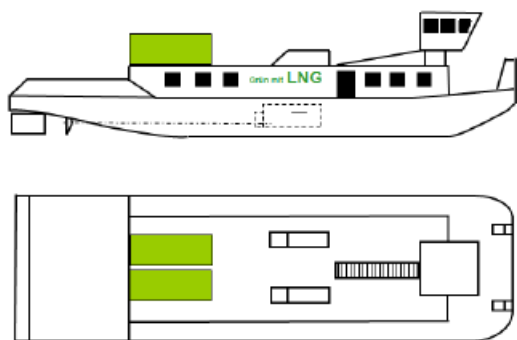
Contre 33m³ pour l'ancien réservoir GNR/FOD intégré à l'espace perdu du coqueron arrière



Mise en œuvre sur convoi poussé fluvial (exemples envisagés pour le Danube)



Citernes sur les barges :
limite la flexibilité et la
capacité de transport,
danger éventuel en cas
de fausse manœuvre
durant la manutention,
barges spécifiques



Citerne sur pousseur
ou intégrée pour les
constructions neuves
conçues « autour »
de leur citerne GNL

(images PRO DANUBE)

Difficultés réglementaires pour le GNC/GNV

Absence de règlement GNV/GNC fluvial, Inadaptation du règlement GNL au GNV/GNC

- Il existe un règlement GNV/GNC routier (R110 poids lourds, avec une banque d'organes homologués utilisables a priori en fluvial), mais pas de règlement GNV/GNC fluvial
- Il existe un règlement GNL fluvial : NR 529 issu du maritime plus complément NR 217
- Imposer le règlement GNL à une installation GNV/GNC, qui n'a aucun rapport le GNL, est pénalisant au point de condamner la solution GNC/GNV, et techniquement absurde, mais *c'est ce qui a été fait parfois, pouvant entraîner l'abandon d'un projet.*

Etudes HAZID/HAZAR/HAZOP en l'absence de règlement GNV/GNC

HAZID = Hazard identification, HAZAR = Hazardous area, HAZOP = Hazardous opération

Ce type d'étude, standard dans l'industrie pétrolière, permet l'**homologation d'une installation au cas par cas** mais elle est couteuse, au moins **50000€ par bateau** (soit pour un petit bateau, plusieurs fois le prix, par exemple, du moteur)

PRIX DE REVIENT en utilisation courante

Prix de détail :

GNV/GNC : Valeur estimée annoncée pour **Paris (Grenelle)** par **GRDF** en **Juin 2017**, pour un système de livraison GNV en grande quantité crée et amorti pour les camions, et doté d'une sortie pour les bateaux, et à 200 bars compression comprise, autour de :

- **Gaz naturel :** 0,38-0,4 €/kg soit $\approx 27,8$ €/MWh **-20% du diésel FOD/GNR à 0,35€/litre**
- **Biogaz :** 0,48-0,5 €/kg soit $\approx 36,0$ €/MWh **+ identique au diésel FOD/GNR (*)**

Jusqu'à 0,7 à 1,04 €/kg pour d'autres prix de détail (+33% à +107% FOD/GNR)(*)

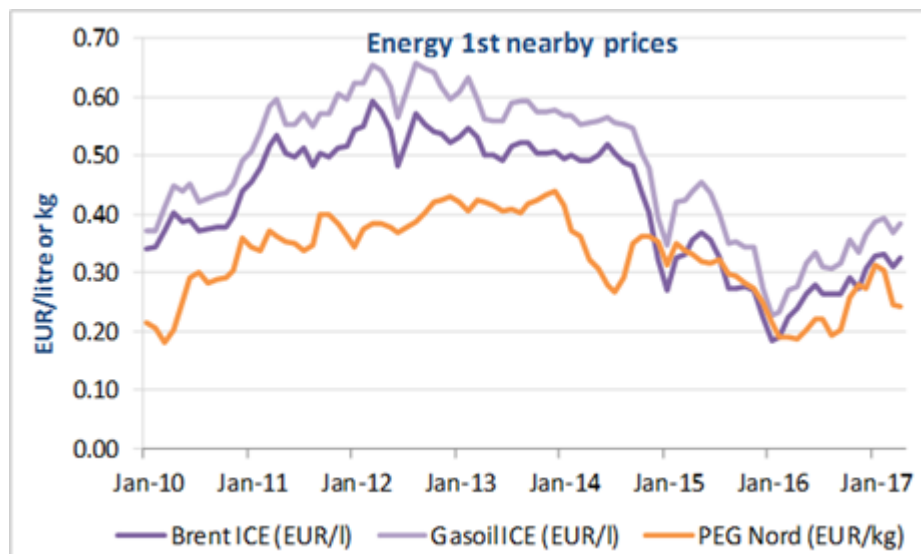
GNL : En 2012 -30% par rapport au FOD/GNR.

Avec la baisse du prix du pétrole qui pourrait être durablement bas (jusque 2025 ?),
de l'ordre de -10% seulement début 2016.

GTL : estimation à +28% par rapport au FOD
(début 2017, à confirmer)

(*)

FOD/GNR : 42700 kJ/kg ou 11,86 kWh/kg et 0,84 kg/litre
Gaz naturel: 95% CH₄ 48456 kJ/kg ou 13,46 kWh/kg
et 0,78 kg/Nm³ à 0 °C 1 bar



Prix comparés depuis 2010 : gaz naturel (ajouter 8 c€ à la courbe orange +10% frais de compresseur) et gazole détaxé

CONCLUSION

- ⇒ Les carburants de synthèse permettent de ne rien changer à bord tout en améliorant sensiblement (env. 20%) les émissions de polluants (Nox, PM, HC), mais ils sont plus cher que le gazole/FOD et sont bien moins avantageux que les formes gazeuses (GNV) ou liquéfiée (GNL) en termes de bilan CO₂.
- ⇒ L'utilisation de GNV est intéressante pour l'environnement (particules, certains moteurs sans pollution, bon bilan CO₂), surtout avec du biogaz qui annule quasiment le bilan CO₂, et en théorie modérément onéreuse en investissement. Mais l'autonomie est limitée (5 à 10 fois la place du Gazole) et l'absence de règlement compatible avec les composants R110 oblige à une homologation à prix prohibitif, ou à respecter le règlement GNL NR529 & 217 (inadapté+couteux).
- ⇒ L'utilisation du GNL, issu des techniques maritimes, est réservée aux grands et très grands bateaux, porte conteneurs, et citerne, avec des investissements élevés (ordre de grandeur 2 M€ pour un Rhénan), et des contraintes à bord importantes (3 à 8 fois celui du FOD/GNR, très basses températures – 162 °C)
- ⇒ Le prix du gaz naturel est compétitif par rapport au FOD/GNR lorsque le mode de distribution est adapté, mais un prix du pétrole bas pourrait en limiter l'intérêt purement économique, y compris en bi-carburant (diésel électrique + GE et son coût).

Merci de votre attention

Pierre-jean.pompee@vnf.fr

06 81 84 95 93