

«Comment produire l'électricité nécessaire à la décarbonation des transports ?»

18 Novembre 2023

Pierre Gavaille, Aymeric Canton

métropole
GrandNancy



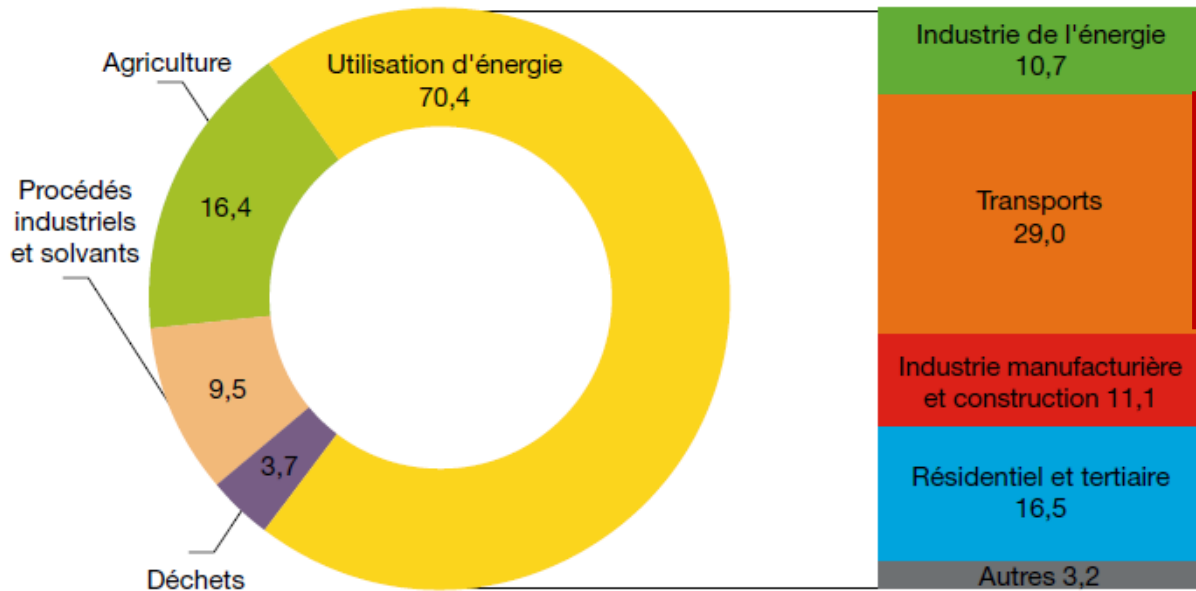


1 ■ Transports, Energie, CO2: quelques repères

Le secteur du transport est un contributeur majeur aux émissions de GES...

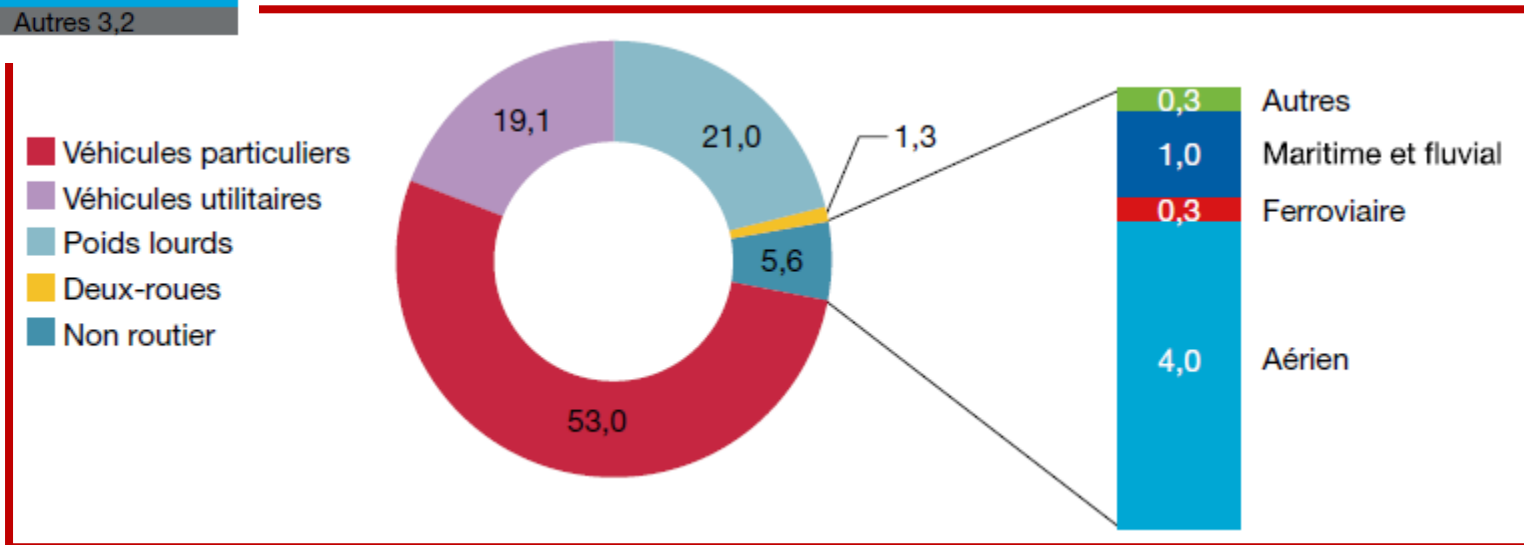


En %



Répartition des émissions de GES en France en 2018 (in %) 445 Mt CO₂éq

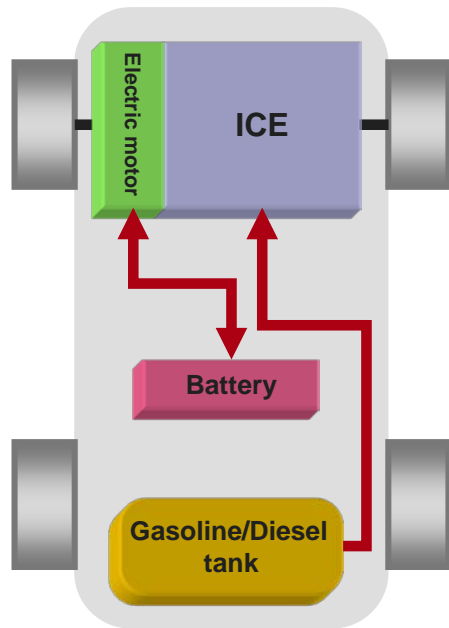
...et contrairement aux autres secteurs, ses émissions sont en croissance



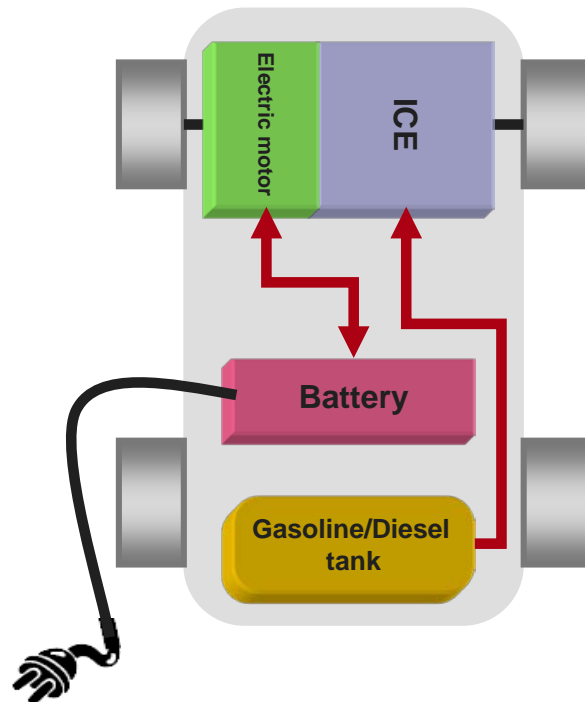
Différentes solutions d'électrification



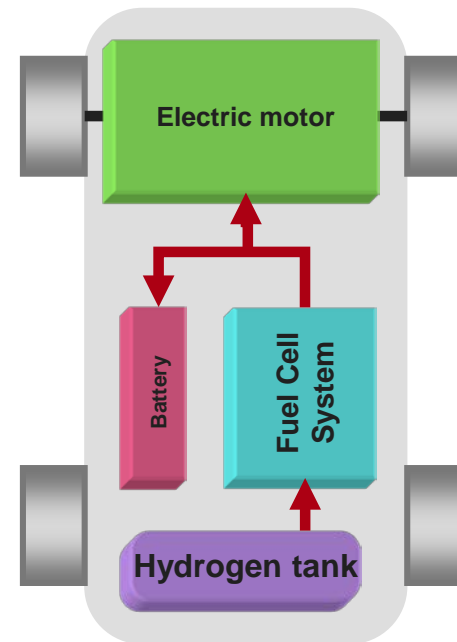
Hybrid Electric Vehicle (HEV)



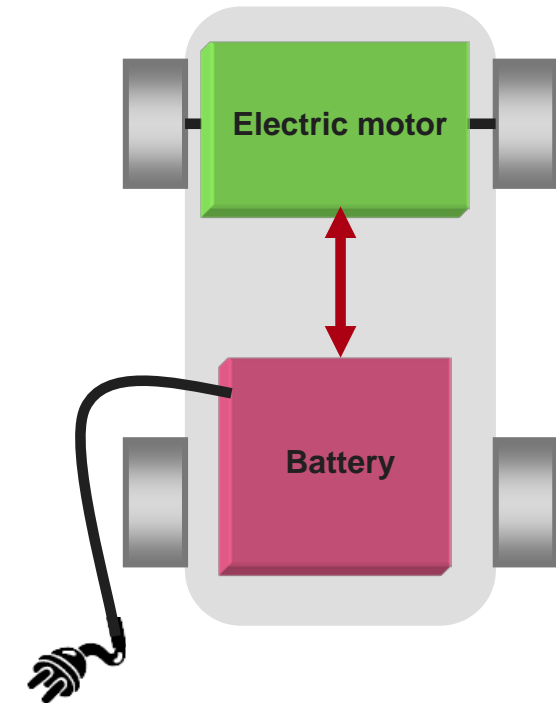
Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)



Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV)

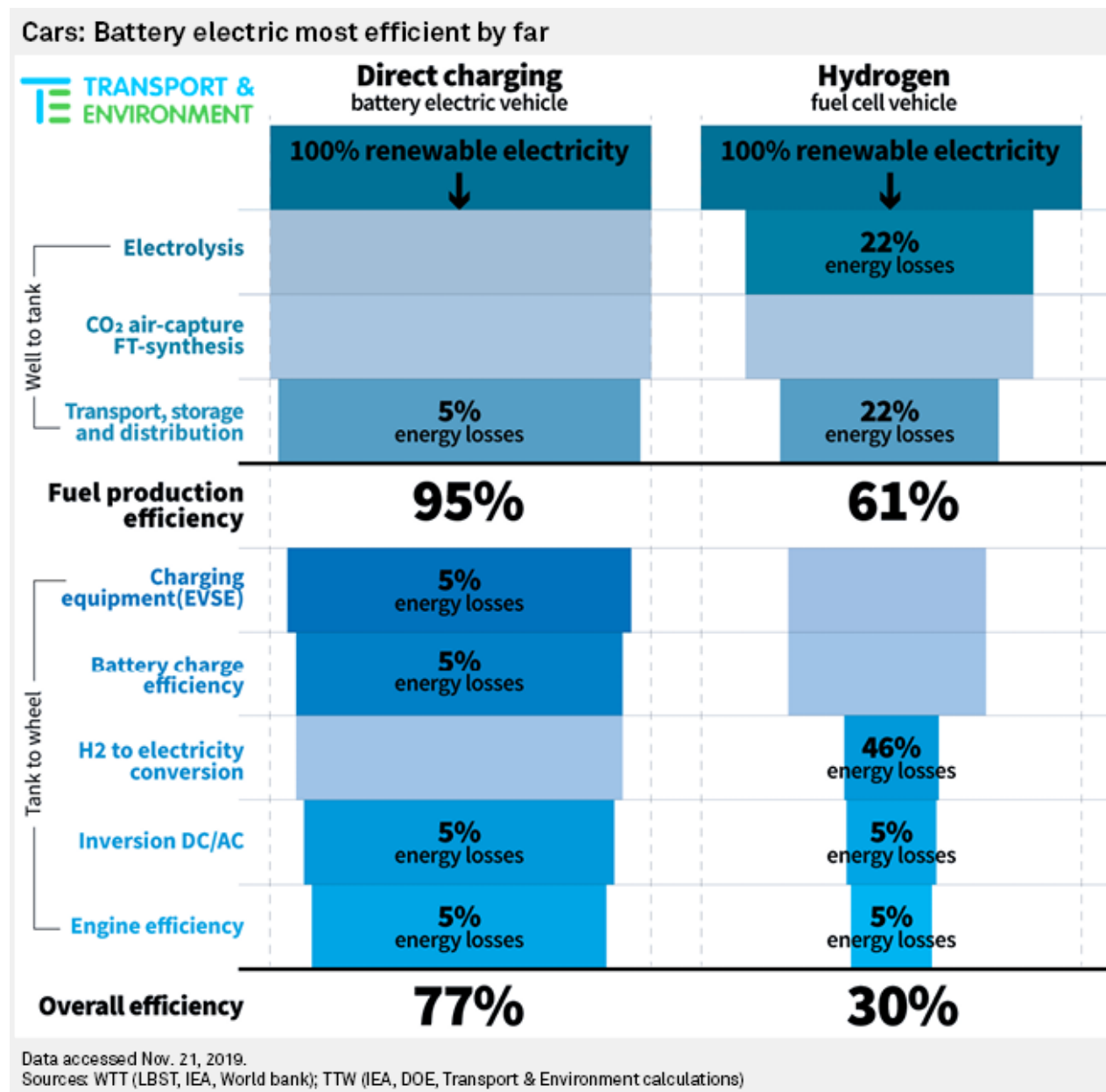


Battery Electric Vehicle (BEV)



Hydrogène VS batterie

Energy balance: grid to wheel efficiency – BEV versus FCEV



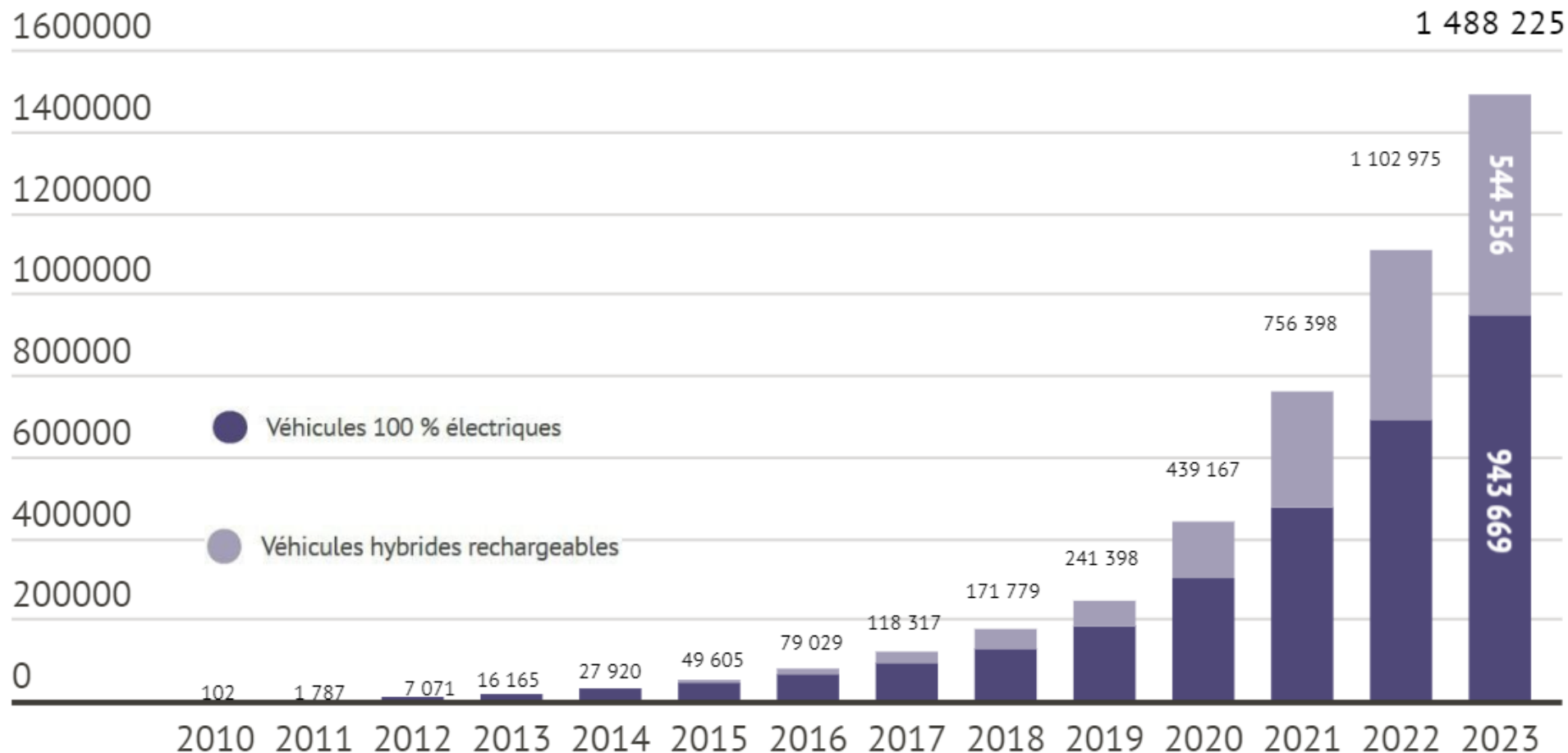
Quelle est la dynamique VE en France ?

Ventes Jan - oct
2023 (vs 2022)

VP et VUL 100% électrique
253 576 (+49,7%)

VP et VUL hybrides rechargeables
131 674 (+31,5%)

Évolution du parc automobile électrique



Et la mobilité hydrogène en France ?

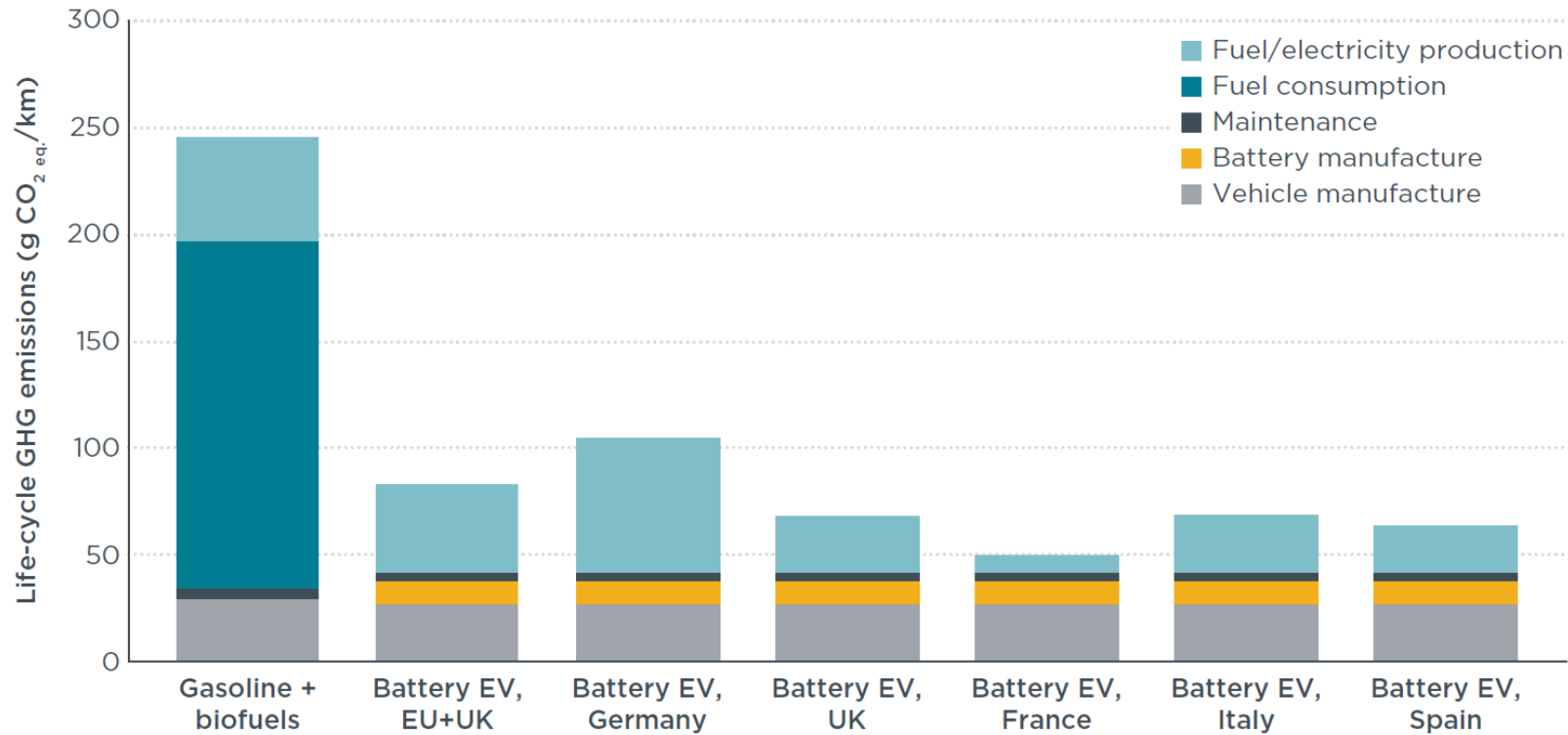
Fin 2022 :

- 550 véhicules légers, 33 bus, 325 chariots élévateurs

Dynamique en 2023 et au-delà ?

- Hormis l'augmentation de la flotte de taxis parisiens (700 fin 2023) et Toyota qui va apporter 500 Mirai pour les jeux olympiques, on constate un tassement des ventes véhicules légers
- Par contre, on perçoit une accélération des projets de déploiement de bus électriques hydrogène, mais une concurrence de plus en plus forte des bus à batterie
- Poursuite du déploiement de bennes à ordures ménagères électriques à hydrogène
- Le développement d'une filière de VUL grâce aux financements européens (IPCEI):
 - 2 usines de fabrication de réservoirs H2 : PlasticOmnium, Forvia
 - 2 usines de fabrication de piles à combustible : Symbio, Inocel
 - 2 constructeurs impliqués : Stellantis (Peugeot, Citroen, Opel), Renault (actionnaire de Hyvia)
- L'offre Poids Lourds se fait attendre...

Impact environnemental



Life-cycle GHG emissions of lower medium segment BEVs registered in Europe in 2021, selon différents mix énergétiques.

https://theicct.org/sites/default/files/publications/Global-LCA-passenger-cars-jul2021_0.pdf

Le véhicule électrique sera toujours moins émetteur de CO2 qu'un véhicule thermique...et c'est encore plus vrai en France

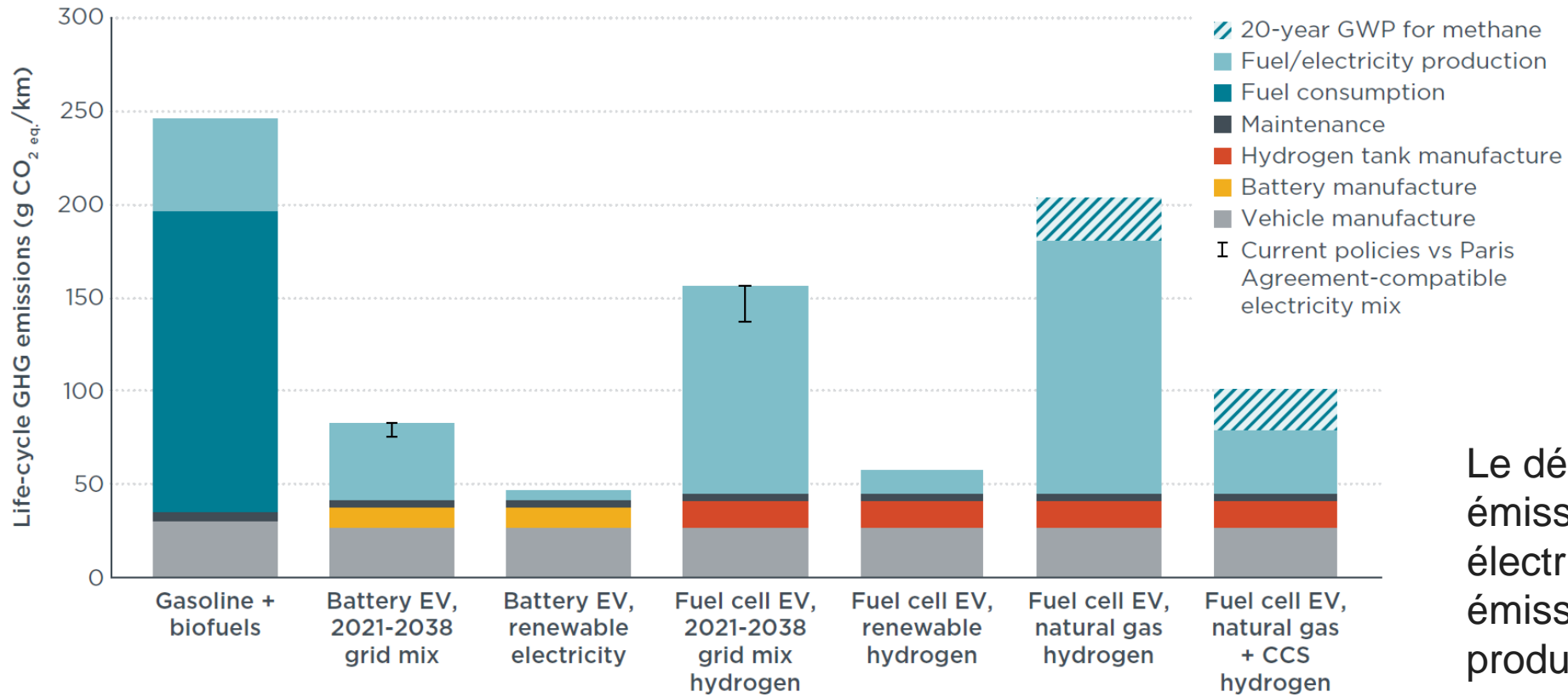
Le déterminant des émissions CO2 du véhicule thermique étant celles lors de son usage : plus on roule, plus on émet;

Le déterminant des émissions CO2 du véhicule électrique étant les émissions de la production électrique servant à faire le plein du véhicule



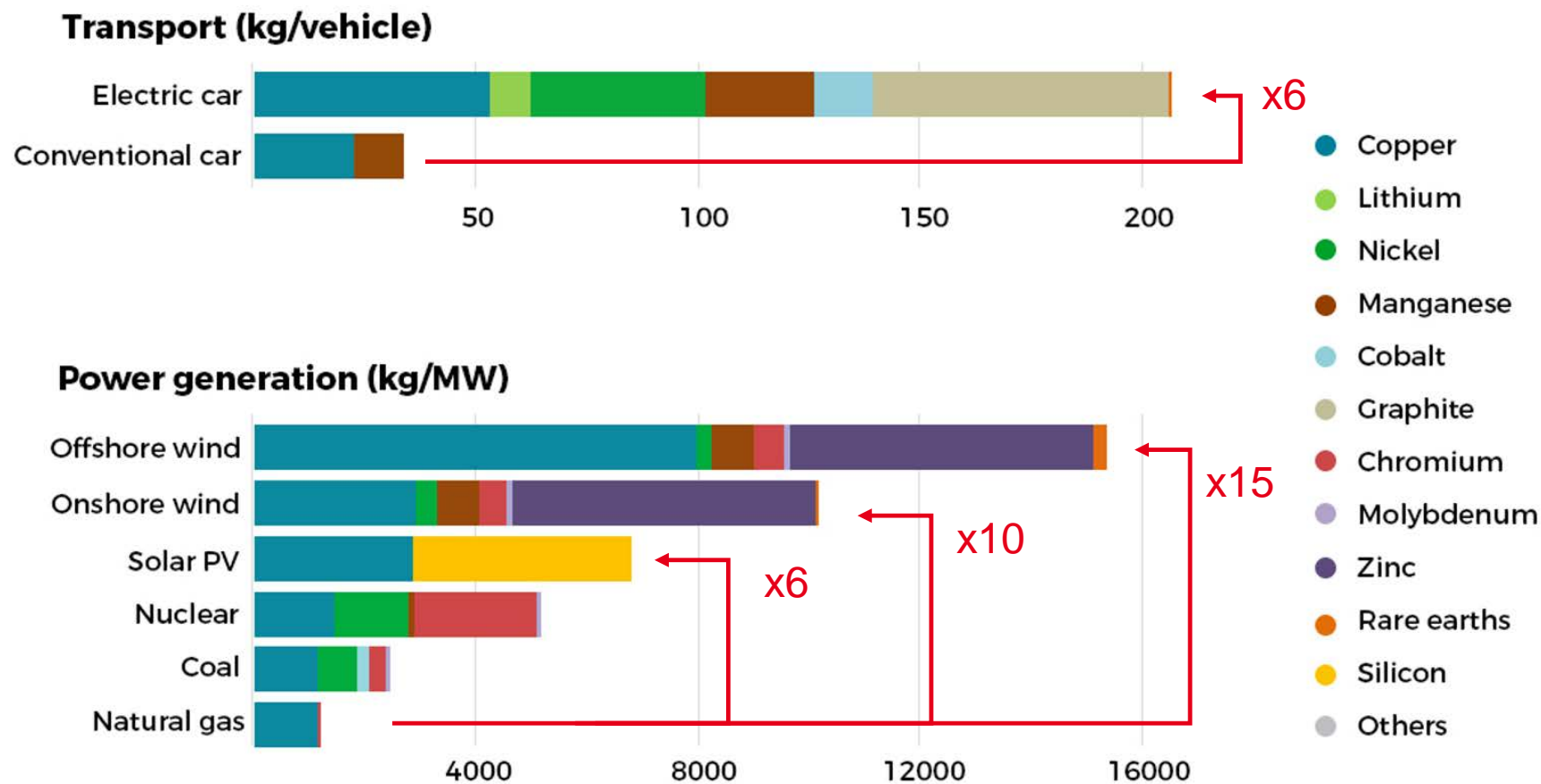
Des progrès à venir :

- Par la décarbonation de la production d'électricité
- Par une fabrication plus vertueuse des batteries en Europe



Le déterminant des émissions CO₂ du véhicule électrique à PAC sont les émissions lors de la production d'hydrogène

La transition énergétique est intensive en matériaux



Minéraux utilisés pour une sélection de technologies de la transition énergétique et d'énergies fossiles (hors acier)

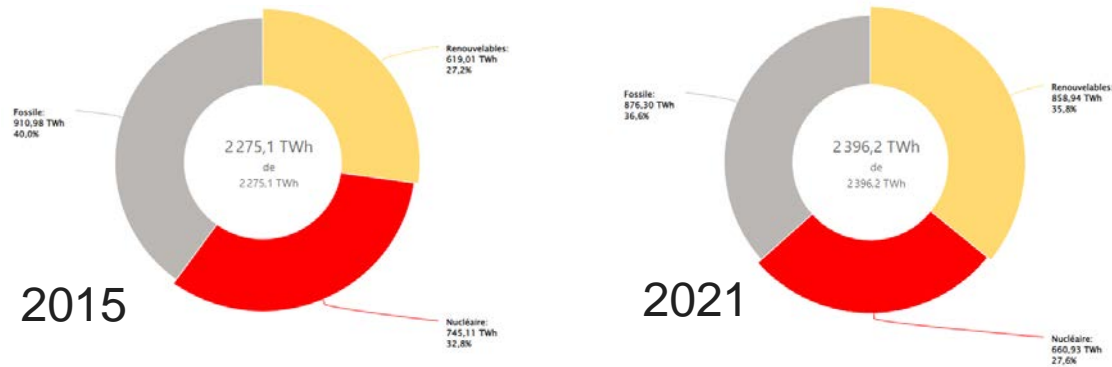
Source : IEA 2021



2 ■ Energie bas carbone pour les transports

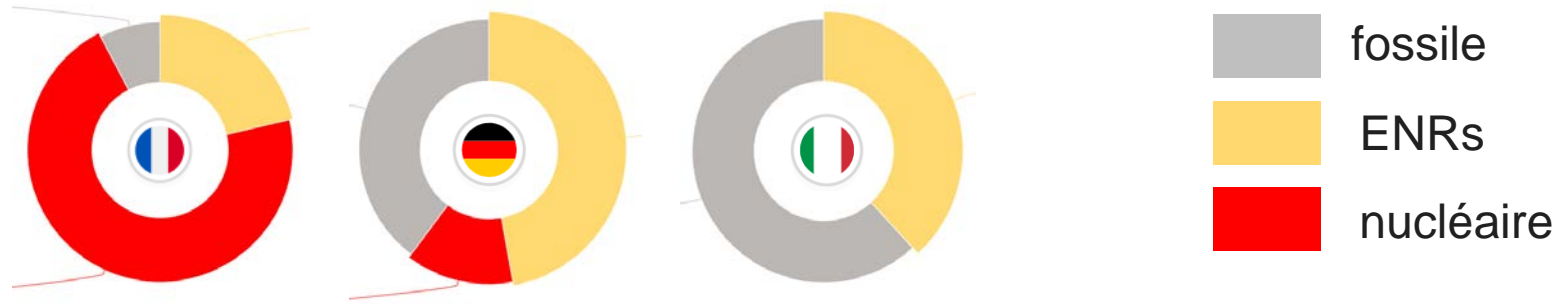
Quelques éléments de contexte sur l'énergie

- « Explosion » des prix de l'électricité en 2021
- Progression des ENRs

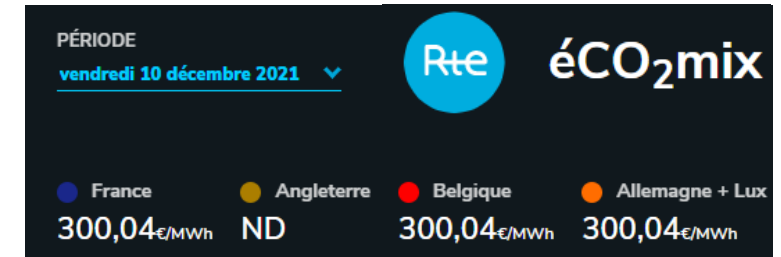
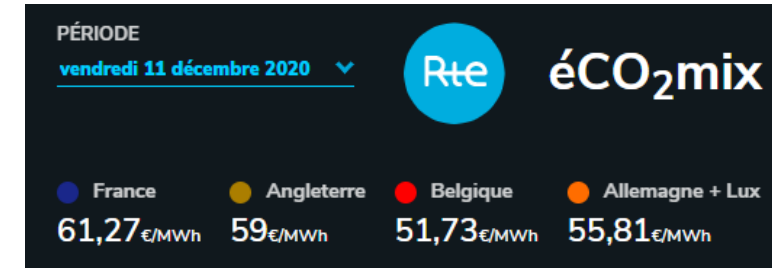


Prod Electricité Europe (Energy-Charts.info)

- Des situations différentes en Europe



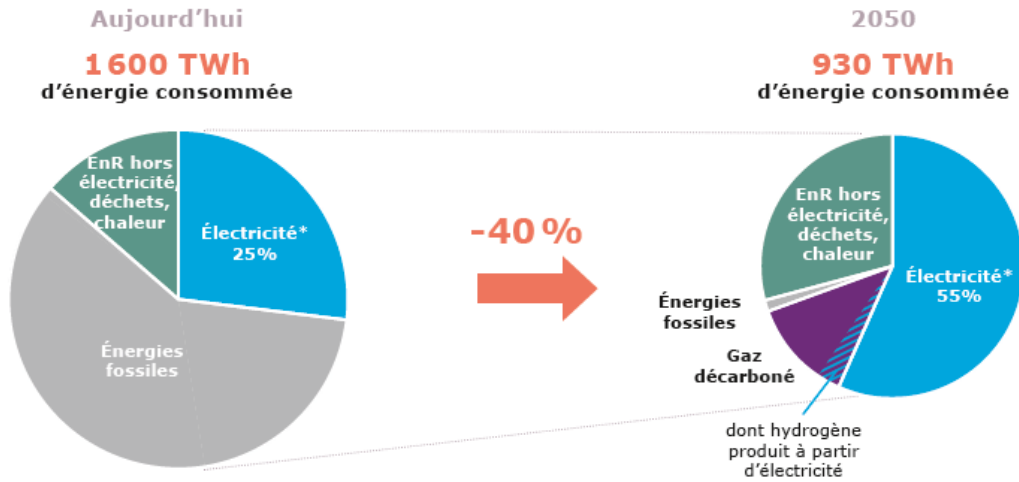
Prod Electricité par pays en 2021 (Energy-Charts.info)



Quels scénarii énergétiques pour la France?



Rapport RTE « Futurs Energétiques 2050 »



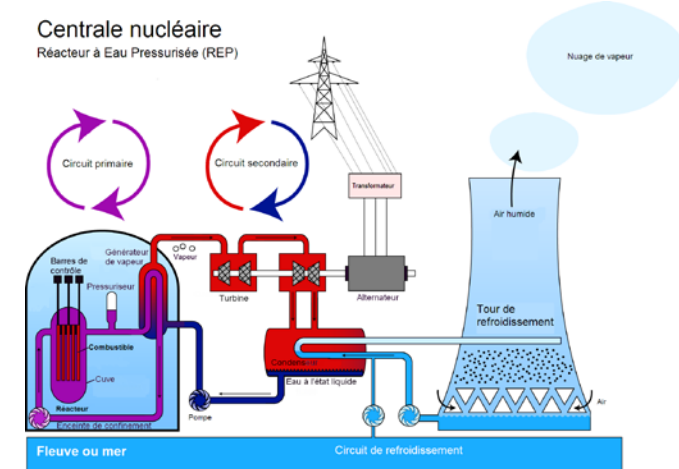
Hypothèses fortes en termes d'évolution (SNBC)

	NARRATIF	RÉPARTITION DE LA PRODUCTION EN 2050	CAPACITÉS INSTALLÉES EN 2050 (EN GW)*				
			Solaire	Éolien terrestre	Éolien en mer	Nucléaire historique	Nouveau nucléaire
MO 100% EnR en 2050	Sortie du nucléaire en 2050 : le déclassement des réacteurs nucléaires existants est accéléré, tandis que les rythmes de développement du photovoltaïque, de l'éolien et des énergies marines sont poussés à leur maximum.		~ 208 GW (soit x21)	~ 74 GW (soit x4)	~ 62 GW	/	/
N03 EnR + nouveau nucléaire 3	Le mix de production repose à part égale entre les énergies renouvelables et le nucléaire à l'horizon 2050. Cela implique d'exploiter le plus longtemps possible le parc nucléaire existant, et de développer de manière volontariste et diversifié le nouveau nucléaire (EPR 2 + SMR)		~ 70 GW (soit x7)	~ 43 GW (soit x2,5)	~ 22 GW	24 GW	~ 27 GW (soit ~14 EPR + quelques SMR)

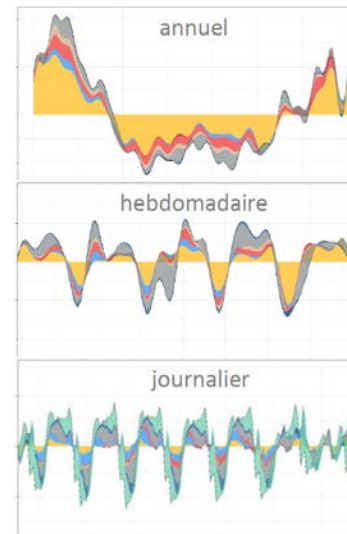
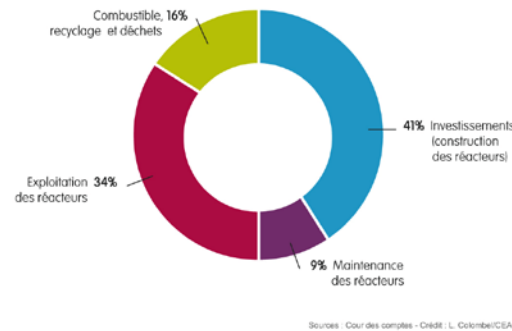
Différents types de mix énergétiques étudiés

Quelques rappels sur le nucléaire actuel

- ~440 réacteurs dans le monde, 1 technologie dominante : Réacteurs Eau Pressurisée
- Parc français très homogène, construit par « paliers », avec puissance ↗
- Des réacteurs plus gros = des chantiers plus longs, plus complexes
- Rappel: coût construction = 40% prix élec nucléaire *actuel*
- Regroupement de plusieurs « tranches » par site car choix limité (refroidissement)
- ↗ ENRs dans le mix -> besoin de flexibilité accrue des capacités de production

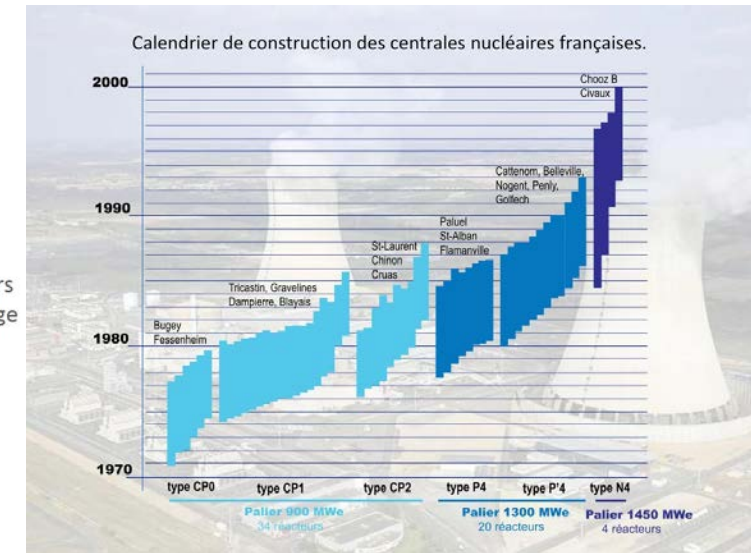


Composition du coût de production du parc nucléaire actuel



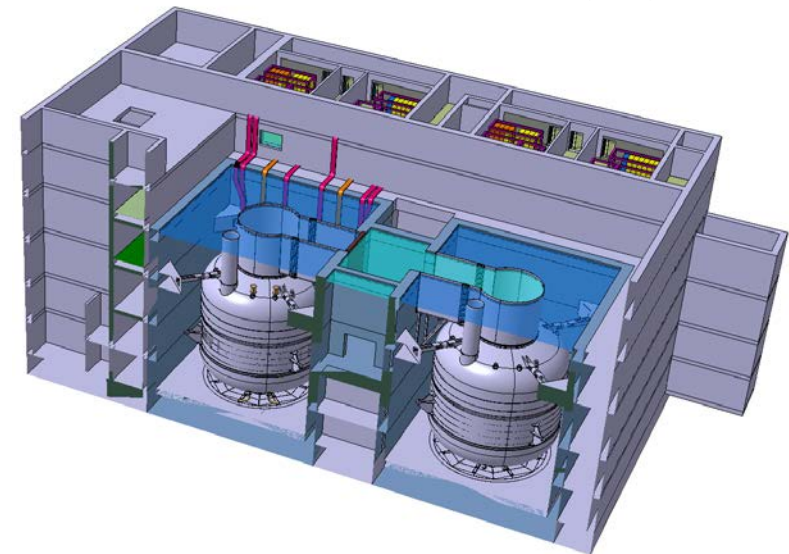
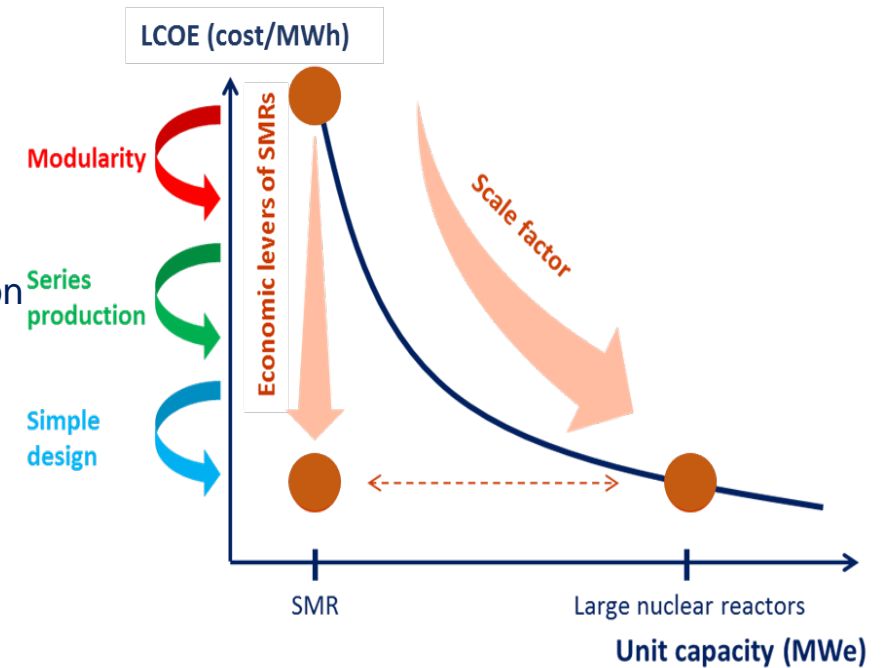
Besoins de flexibilité et leviers actuels

- Oil
- Coal
- Gas
- Hydro
- Nuclear
- Interconnectors
- Pumped storage
- DSM



Les Small Modular Reactors – Petits réacteurs modulaires / quels avantages ?

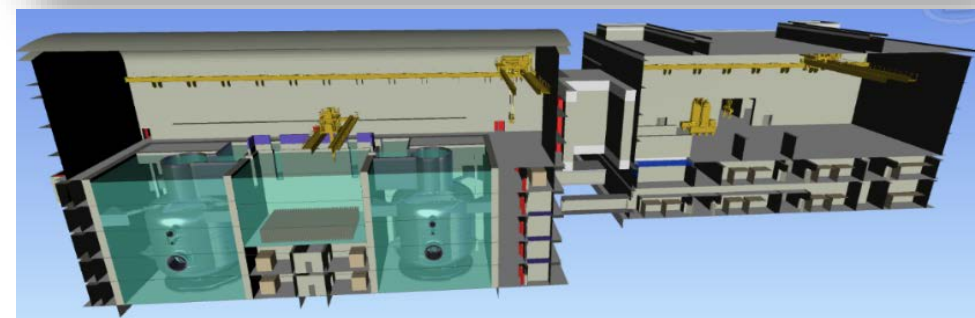
- **Faible puissance permettant une conception simple et sûre**
 - Architecture compacte et simplifiée
 - Absence de contre mesures hors site pour une proximité des réseaux de distribution
- **Un réacteur modulaire, pour une construction plus simple**
 - Modules en nombre limité, (pré)fabriqués et testés en usines spécialisées
 - Réduction des contraintes de construction
 - Réduction de la durée de construction sur site
- **Pour une production nucléaire nécessitant de moindres investissements**
 - Investissement plus facile pour un réacteur, frais financiers réduits
 - la production des premiers réacteurs finance la construction des suivants
 - Production « continue » des installations avec plusieurs modules (arrêts réacteurs)
- **Pour une intégration dans les réseaux et un multi-usage**
 - Du réacteur isolé à la centrale multi réacteur
 - Production flexible d'électricité adaptée à l'émergence des ENR
 - Autres usages : vecteur H2, dessalement, chaleur urbaine, chaleur industrielle



Nuward: un projet de SMR Français



framatome TRACTEBEL
ENGIE



Cible Commerciale

- Adapté à l'export (cible 300-400MWe: centrales fossiles), standard sûreté Gen3+
- Flexibilité d'implantation accrue (15ha) / réacteurs de grande puissance
- Cogeneration prévue dès le design (H2, chaleur urbaine, dessalement, capture CO2)
- Durée construction visée 40 mois en série

Conception Optimisée

- Puissance nominale: 340 MWe (2 chaudières de 170MWe)
- Conception intégrée avec gestion en eau claire
- Sûreté Passive: 3j de délai de grâce minimum
- Enceinte immergée en piscine, Construction semi-enterrée
- Conception et construction modulaire

Partenariats Industriels

- Filière nucléaire française: EdF, CEA, TA, Naval Group, Framatome
- Partenaires européens: Tractebel
- Contrats études / fournitures: ANSALDO

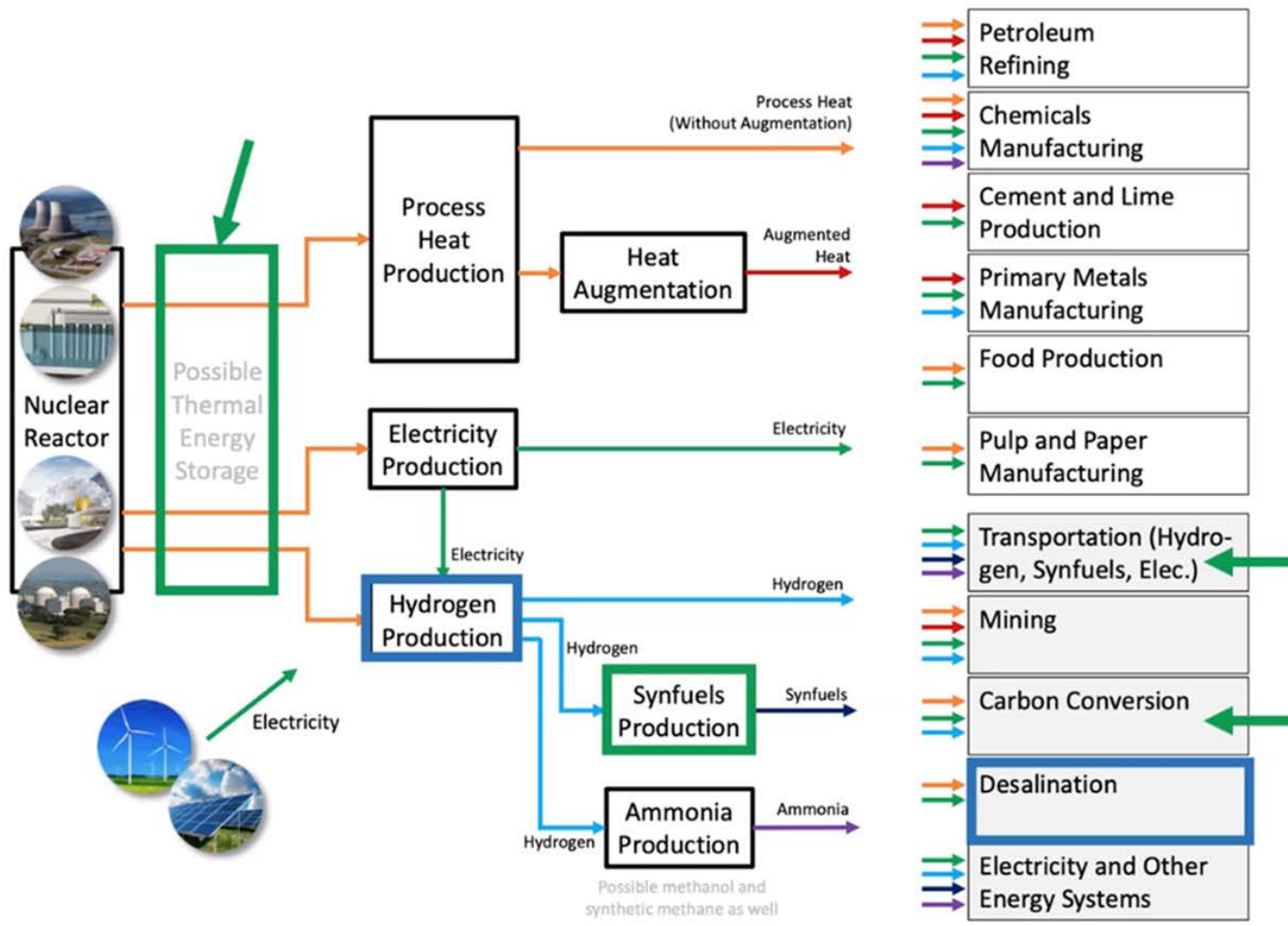
TRACTEBEL
ENGIE

ansaldo | energia

The NUWARD™ Nuclear Island: 2 Units and 1 common pool



Utiliser le nucléaire décarboner en profondeur l'industrie



IES involve

- Thermal, electrical, and process intermediates integration
- More complex systems than co-generation, poly-generation, or combined heat and power
- May exploit the economics of grid-coordinated energy systems
- May provide grid services through demand response (import or export)

Reactor sizes and temperatures align with the needs of each application

Source: INL, National Reactor Innovation Center (NRIC) Integrated Energy Systems Demonstration Pre-Conceptual Designs, INL EXT-21-61413, Rev. 1, April 2021



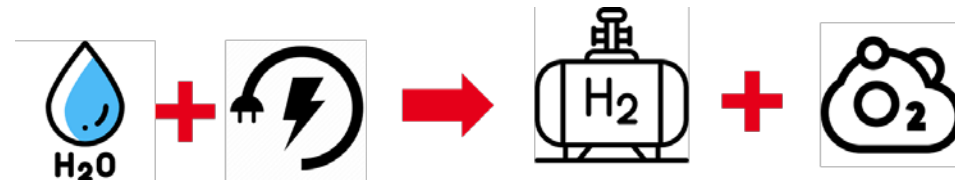
Projection à 2050 ? un doublement de la production nucléaire ? **(IEA, Net Zero by 2050)**

- Pour une large part, des REP Gen III pour la production électrique
- Pour une certaine part (à définir) : Advanced nuclear reactors e.g. SMR or AMR or MMR

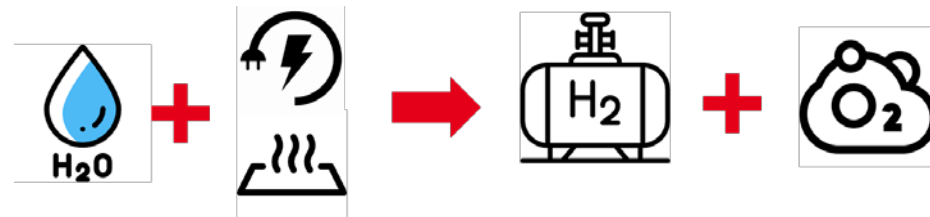
Produire H2 à partir d'énergie bas C

Electrolyse basse T° qui utilise de l'Electricité

- 2 technologies: **Alkaline** et **PEM**



Electrolyse haute T° (EHT) qui utilise **Chaleur** et **Electricité**



- **Efficacité supérieure** (besoin de moins d'électricité)
- **Fonctionne à 600-800°C...** mais besoin surtout de chaleur à **100°C** (formation vapeur)
- **Procédé Exothermique:** la chaleur excédentaire chauffe la vapeur (100°C -> 700°C)

➔ On peut alimenter le procédé avec de la chaleur à 150°C et de l'électricité

Produire de l'hydrogène bas carbone

Couplage de 2 briques techno développées au CEA :

- SMR & système de conversion d'énergie
- Electrolyseur à Haute Température (GENVIA)

Enjeux Associés:

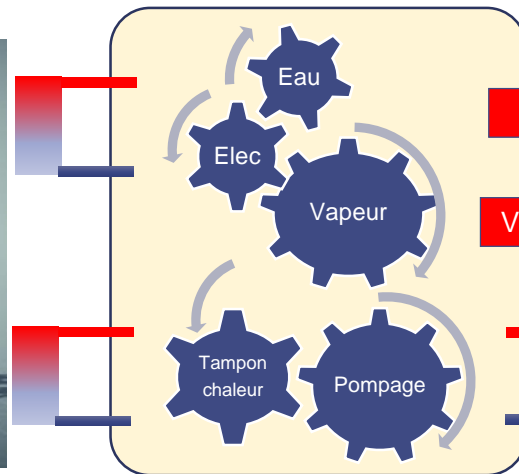
- Développement technologie EHT
- Optimisation du couplage énergétique



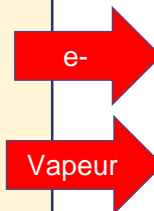
- Energie massive décarbonée
- Pilotable
- Cogénération : rendement maximisé



~500MWth
(170MWe)



Brique technologique
de couplage



GENVIA



~100t / j



~20 000 pleins / j

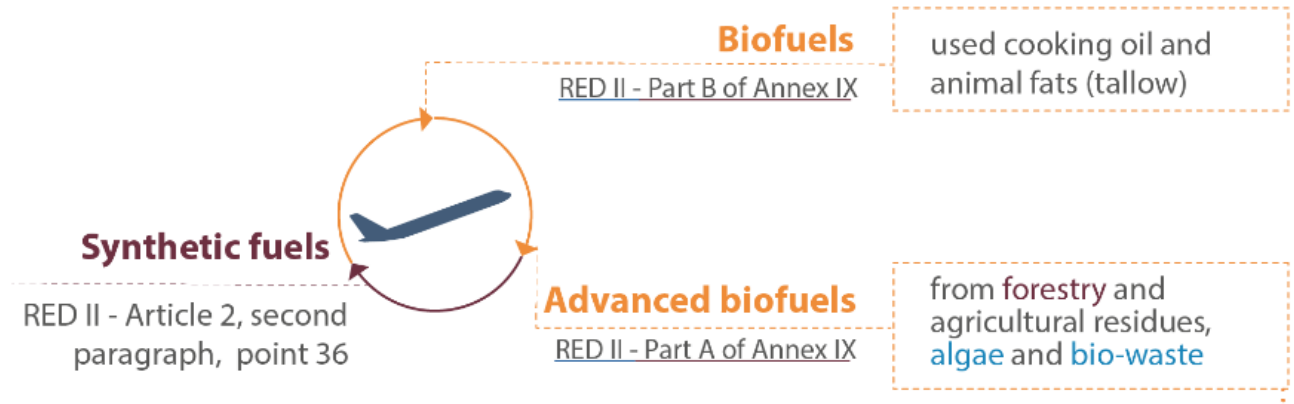
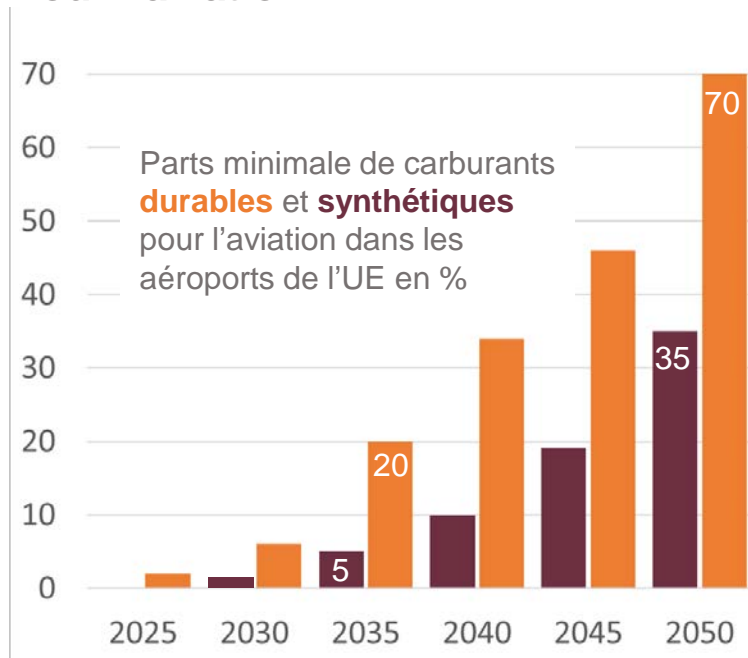


~1200 pleins / j

Réduction des émissions de gaz à effet de serre en Europe pour le transport aérien et maritime

➤ La réglementation « Fit-for-55 » impose une trajectoire de réduction des émissions

➤ Pour l'aviation:

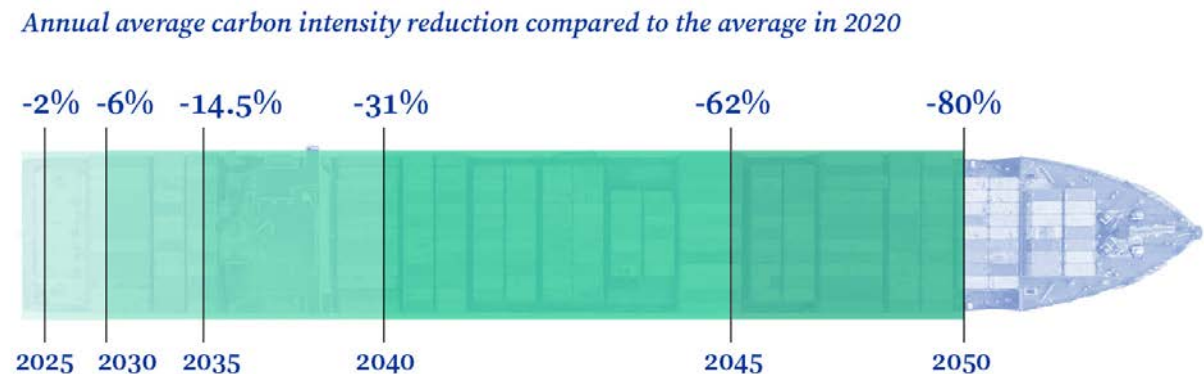


Source: Sustainable aviation fuels, EPRS, March 2022.

➤ Pour le transport maritime:

The FuelEU maritime regulation will oblige vessels above 5000 gross tonnes calling at European ports (with exceptions such as fishing ships):

→ to reduce the greenhouse gas intensity of the energy used on board as follows



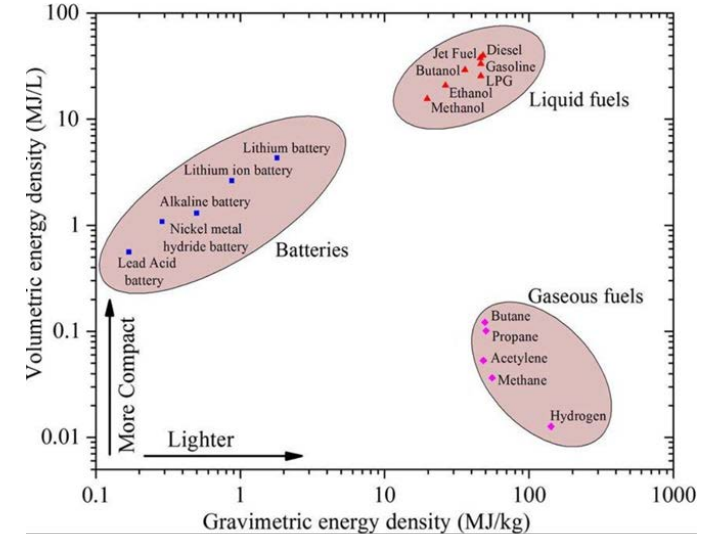
Au-delà de l'électricité: du neutron à la molécule

■ Combiner la production H₂ avec la capture CO₂ pour produire:

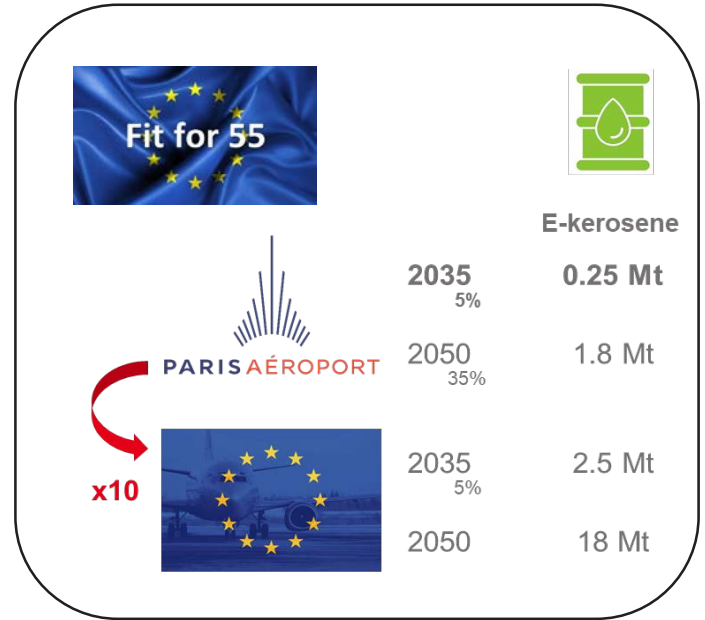
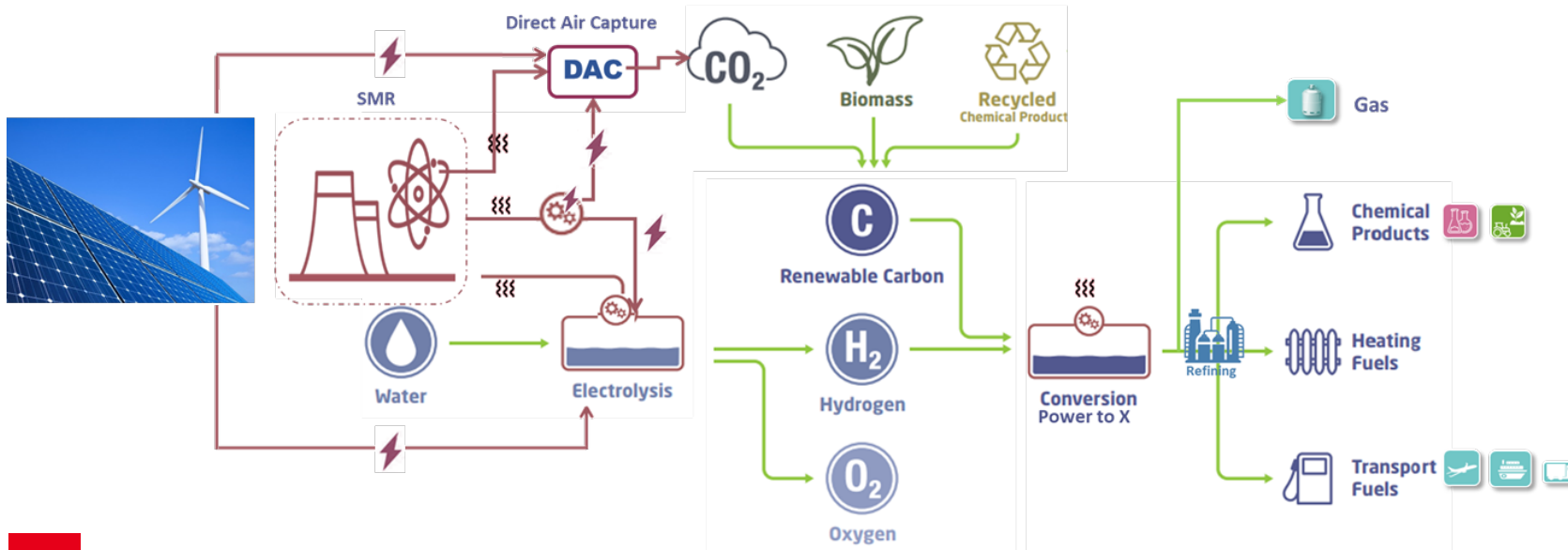
- Méthane / Methanol
- Ammoniaque
- Carburants de Synthèse



- Remplacement énergies fossiles
- Simplification de la chaîne logistique
- Indépendance sur l'approvisionnement

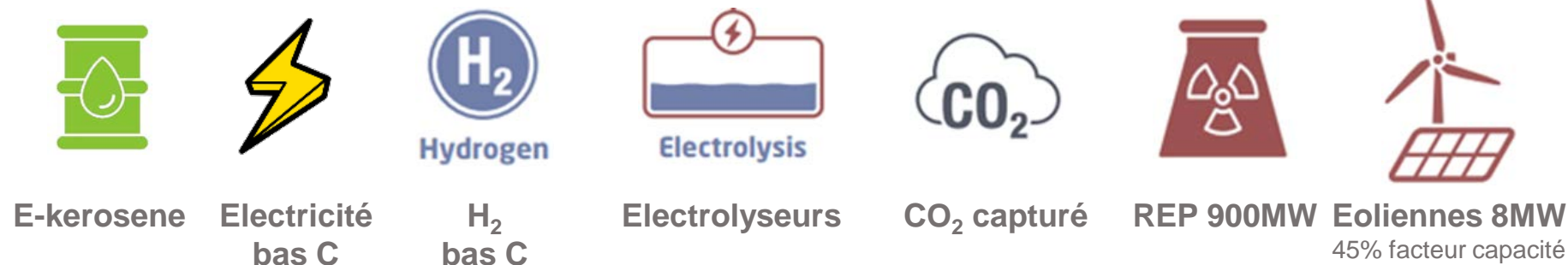



Rappel des densités de puissance / vecteur



Des quantités très importantes d'énergie à mobiliser pour produire des e-fuels...

➤ Le besoin **minimum** annuel en électricité bas C est immense pour les carburants synthétiques



		E-kerosene	Electricité bas C	H ₂ bas C	Electrolyseurs	CO ₂ capturé	REP 900MW	Eoliennes 8MW <small>45% facteur capacité</small>
	2035 <small>5%</small>	0.25 Mt	9.3 TWh	180 kt	1.1 GW	1.3 Mt	1.5	300
	2050 <small>35%</small>	1.8 Mt	65 TWh	1.3 Mt	8.0 GW	8.8 Mt	11	2100
	2035 <small>5%</small>	2.5 Mt	93 TWh	1.8 Mt	11 GW	13 Mt	15	3000
	2050 <small>35%</small>	18 Mt	650 TWh	13 Mt	80 GW	88 Mt	110	21000

x10 (on EU flag) x7 (on Eoliennes 2050)



Merci pour votre
attention

Pierre Gavoille, Aymeric Canton

pierre.gavoille@cea.fr ; aymeric.canton@cea.fr