

# *Enjeux et perspectives des SMRs*

**Pierre Gavaille (CEA)**

**12/06/2023**

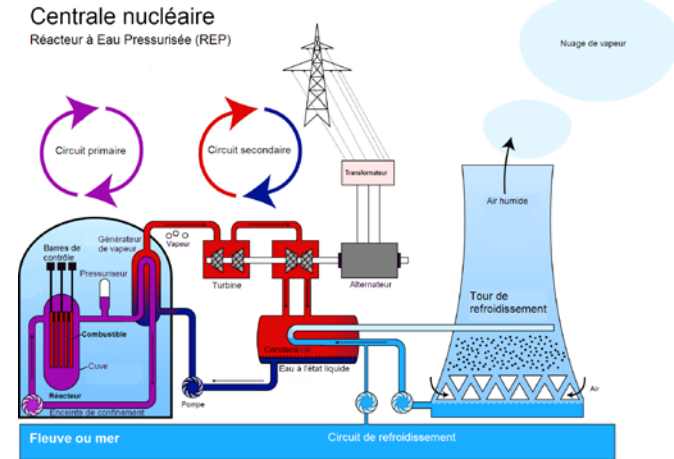


# 1 ■ SMRs: de quoi parle-t-on?

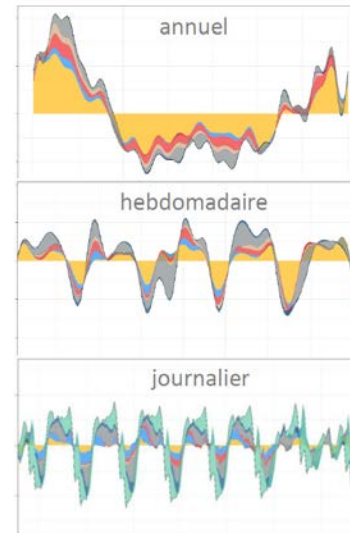
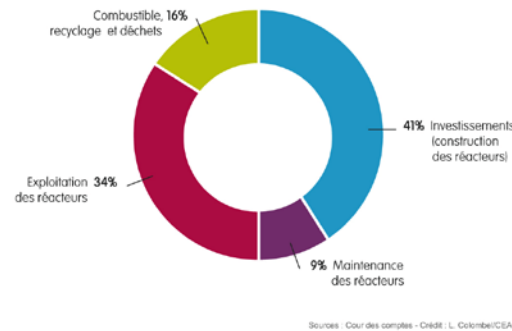


# Quelques rappels sur les réacteurs du parc actuel

- ~440 réacteurs dans le monde, 1 technologie dominante : Réacteurs Eau Pressurisée
- Parc français très homogène, construit par « paliers », avec puissance ↗
- Chantiers lourds, longs, avec coûts de construction importants
- (rappel: coût construction = 40% prix élec nucléaire *actuel*)
- Regroupement de plusieurs « tranches » par site
- ↗ ENRs dans le mix -> besoin de flexibilité accrue des capacités de production

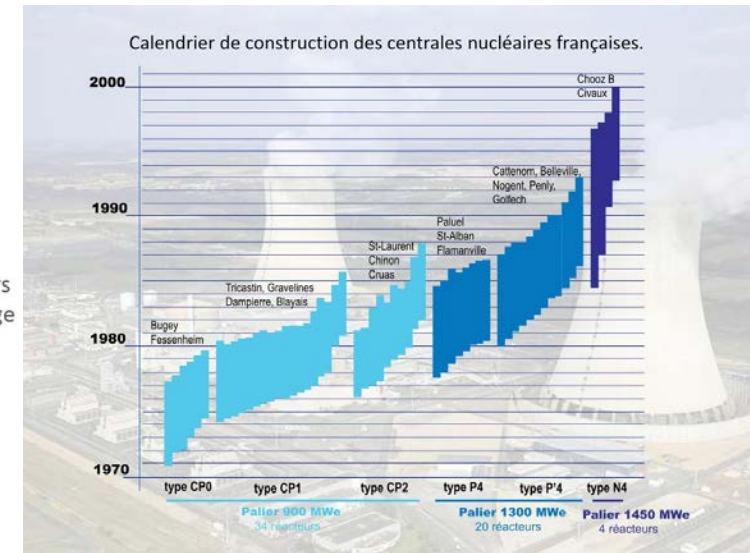


Composition du coût de production du parc nucléaire actuel



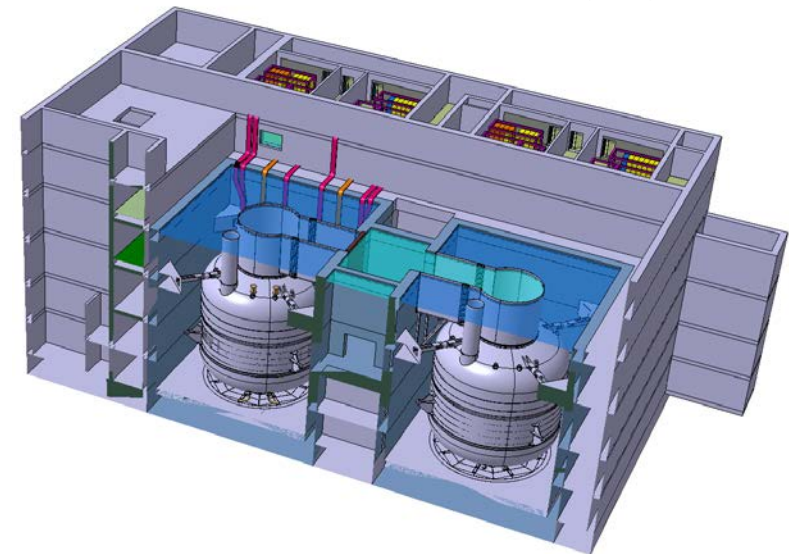
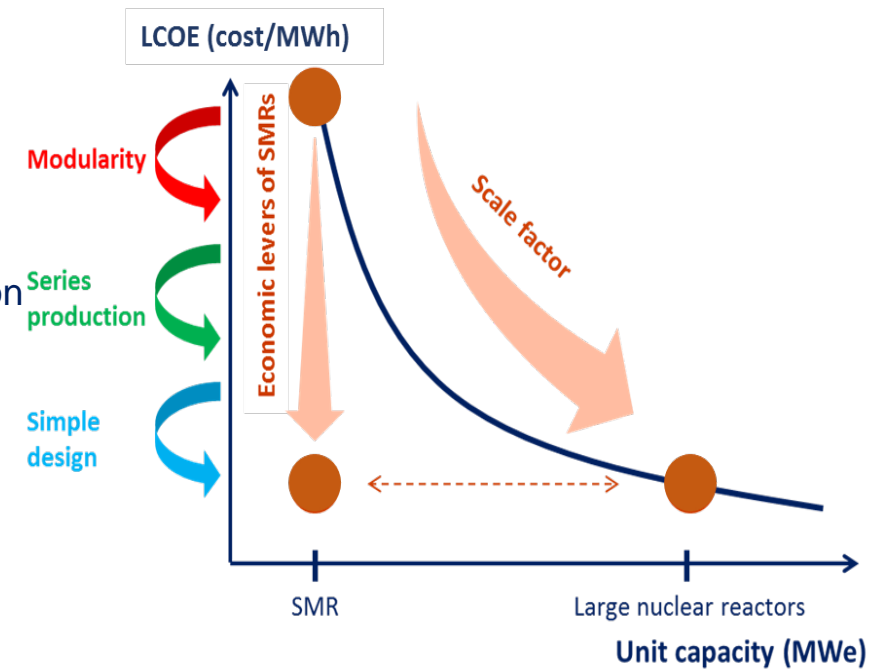
Besoins de flexibilité et leviers actuels

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



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

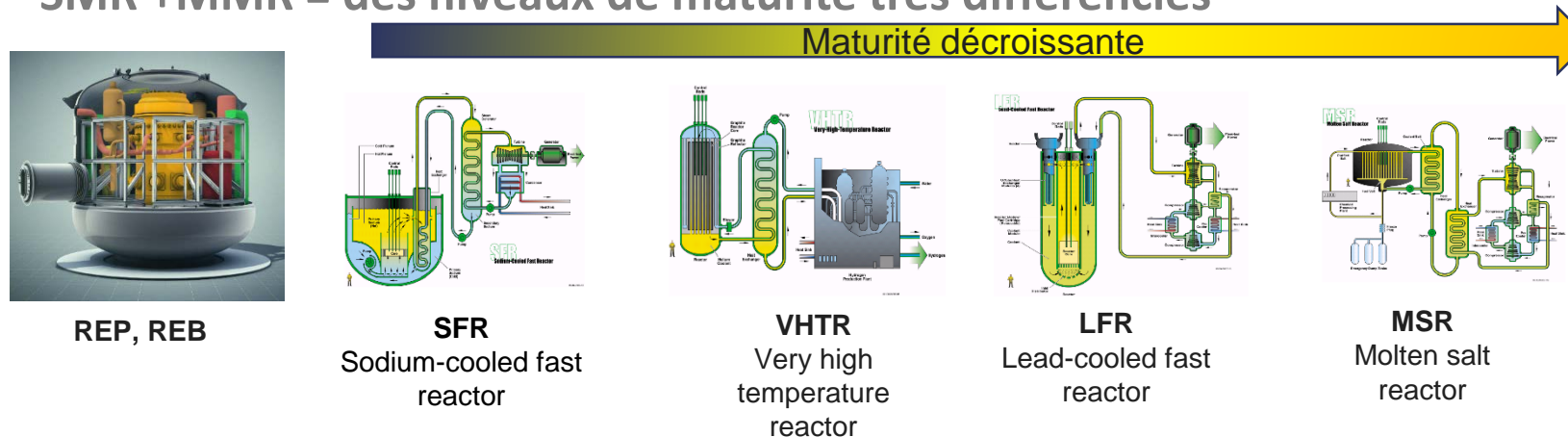
- **Faible puissance permettant une conception simple et sûre**
  - Architecture compacte et simplifiée
  - Absence de contre mesures hors site pour une proximité des réseaux de distribution
- **Un réacteur modulaire, pour une construction plus simple**
  - Modules en nombre limité, (pré)fabriqués et 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



# SMR, AMR, MMR : La famille des xMRs

- **SMR = Small Modular Reactor** : technologie maîtrisée REP/REB - **50 to 300 Mwe**
- **AMR = Advanced Modular Reactor** : même plage de puissance + ruptures technologiques GEN-IV-like >> caloporteur gaz sous pression, métal liquide, combustible de type « sel fondu » ...  
**SMR ≠ AMR** = terminologie d'usage en France et pays anglo-saxons, ce n'est pas un standard
- **MMR = Micro Modular Reactors**
  - ❑ Réacteur de très petite puissance, pour la production électrique ou chaleur : **1 à 20 Mwe**
  - ❑ **Réacteur transportable (+ petits), pilotable à distance, peu ou pas de zone d'exclusion**
  - ❑ Marché : sites industriels, zones isolées/iles, transport maritime
- **Micro-réacteur pour l'espace**
  - ❑ **1 kWe to 1 MWe** : propulsion ou générateurs électrique pour une base vie sur Lune/Mars

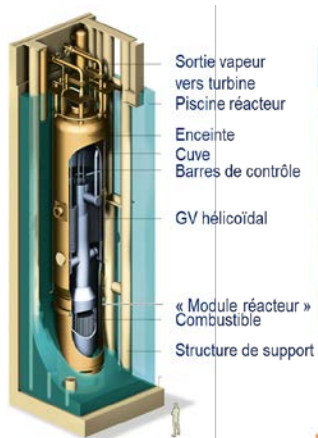
SMR +MMR = des niveaux de maturité très différenciés



# Le contexte international...

Depuis les années 2010, un modèle qui a relancé l'attrait du nucléaire dans les pays Anglo-Saxons

- des montages économiques combinant création de start-up, fonds privés (par ex. Bill Gates) et fonds publics
- 2020 : Pas une semaine sans une annonce internationale relative aux SMRs / AMRs ou aux MMRs !
- **2021-22 : L'actualité reste riche mais la course aux nouveaux SMR s'est tassée. Ce n'est pas le cas dans les MMRs**



NuScale (12x60MWe)  
soutenu par US/DOE

Land Based Water Cooled Reactors				Micro Reactors		Fast Reactors		
CAREM	SMART	RUTA-70	DHR400	IHTR	MMR-5	4S	W-LFR	SSTAR LFR
ACP100	UNITHERM	NuScale	RITM-200	IMSBR	MMR-10	BREST-OD-300	SEALER	URANUS
CAP200	VK-300	mPOWER	NUWARD	eVinci	AURORA	SVBR-100	LFR-AS-200	ARC100
IRIS	KARAT-45	W-SMR	BWRX-300	U-Battery	MoveluX	EM <sup>2</sup>	LFR-TL-X	
DMS	KARAT-100	SMR-160	HAPPY200					
IMR	ELENA	UK-SMR	CANDU SMR					
High Temperature Gas-cooled Reactors				Marine Based Water Cooled Reactors		Molten Salt Reactor		
HTR-PM	MHR-100	XE-100	HTR-30	ACPR50S	VBER-300	IMSR	SSR-WB	CA WB
DPP-200	PBMR-400	A-HTR 100	HTR-10	KLT-40S	ABV-6E	CMSR	SSR-TS	KP-FHR
GT-MHR	HTMR-100	MMR	RDE	RITM-200M	SHELF	THORCON	LFTR REACTOR	MCSFR
MHR-T	SC-HTGR	GTHTR300	StarCore			FUJI ITMSF	MK1 PB-FHR	



# Les USA : une dynamique soutenue par le DOE

## ARDP : Advanced Reactor Demonstration Program (call 2020)

2 projets sélectionnés pour le Demo Program (2 x 80M\$ de dotation DOE) :

- **Xe-100** – X-Energy (High Temp Reactor)
- **Natrium** – Terrapower (Sodium Fast Reactor)

+ 5 projets sélectionnés pour le Risk Reduction Program :

Concept	Vendor	Type	Quoi ?	Budget sur 7 ans	DOE Share
Hermes Reduced-Scale Test Reactor	Kairos Power	FHR	Réacteur expérimental	629 M\$	303 M\$
eVinci	Westinghouse	MMR	Qualif matériaux et caloducs	9.3 M\$	7.4 M\$
BANR	BWXT	MMR	Qualification - TRISO	106.6 M\$	85.3 M\$
Holtec-160	Holtec	SMR PWR	Basic design	147.5 M\$	116 M\$
MCRE	Southern/Terrapower	MSR	Réacteur expérimental	113 M\$	90.4 M\$

+ 3 projets sélectionnés pour le ARC-20 (Advanced Reactor Concepts)

Concept			Budget sur 4 ans	DOE share
ARC-100	ARC (Advanced Reactor Concepts)	SFR – 100MWé	34,4 M\$	27,5 M\$
FMR	General Atomics	GFR – 50 MWé	31,1 M\$	24,8 M\$
Modular Integrated HTR	MIT	HTR - MMR	4,9 M\$	3,9 M\$

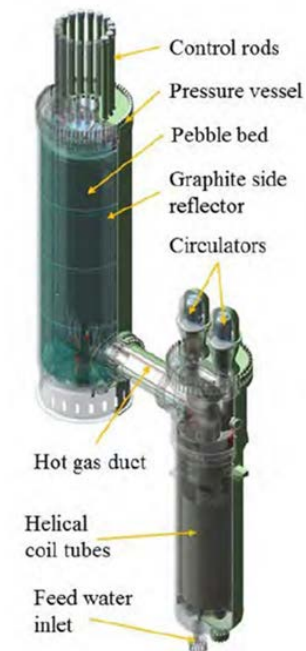
Depuis 2011, le DOE a investi 1,2 G\$ dans les programmes de SMR/AMR (source IFRI)

Cible : remplacement des centrales à charbon (840 TWh, 2020)



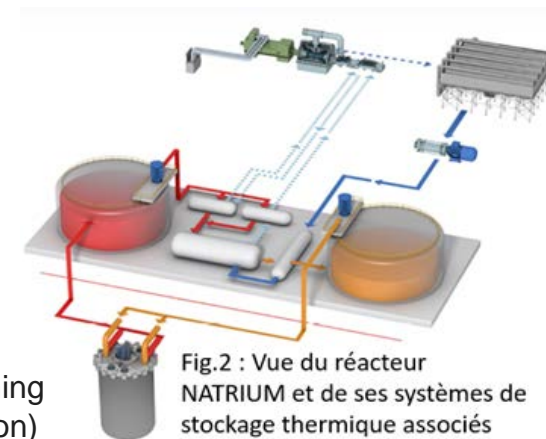
### Xe-100

AMR-gaz  
80 MWe



### Natrium

AMR-sodium  
350 MWe, 500 en pointe



Choix du site : Wyoming  
(ex-centrale à charbon)

Fig.2 : Vue du réacteur Natrium et de ses systèmes de stockage thermique associés

# La Russie

Un projet SMR abouti sur un marché national (site isolé en Sibérie)



AKADEMIK LOMONOSOV  
FNPP

2 x KLT-40S Reactors

Electrical capacity	Up to 77 MW
Thermal capacity	300 MW
Fuel enrichment	< 20%
Fuel cycle	3 years
Design life	40 years
Mobility	towed

**April 2019**  
Comprehensive testing of the FPU was completed

**June 2019**  
Operation license is issued

**December 2019**  
FNPP was connected to the grid

**January 2020**  
FNPP delivered its first 10 mln kWh of electricity to the Chukotka grid

FNPP: optimized mobile solution for coastal areas power supply



2×RITM-200M

OPTIMIZATION RESULTS COMPARED WITH FNPP AKADEMIK LOMONOSOV

- by 28 m – length reduction
- by 5 m – beam reduction
- by 9 000 t – displacement reduction
- 30% – electrical capacity increase

TECHNICAL PARAMETERS

Electrical capacity	100 MW
Fuel cycle	up to 10 years
Design life	60 years
Displacement	12 000 tons
Length	112 m
Beam	25 m
Draught	4.5 m

Electricity Heat Desalination

## BREST-OD-300 (Breakthrough project)

Réacteur électrogène, 300 MWe :

- RNR-plomb
- Combustible **nitruure (U,Pu)N**
- Un démonstrateur technologique du réacteur+cycle du combustible),
- Pas la tête de série d'un concept AMR

Contexte Russe = compétition LFR/SFR existe depuis plus de 30 ans





# La Chine : première réalisation et grandes ambitions

## HTR-PM

- Démo : 2 réacteurs nucléaires  
→ 1 turbine unique de 200 MWe
- HTR - He sous pression
- Combustible à particule - HALEU
- **Divergence le 20/12/2021**



Essais menés à Shidaowan [photo: CNNC]



Site du démonstrateur HTR [photo: CNNC]

## Déploiement industriel en projet

- 6 modules - 650MWe

## ACP100

- SMR de type REP
- 125 MWe
- Changjiam demonstration reactors, construction engagée ...

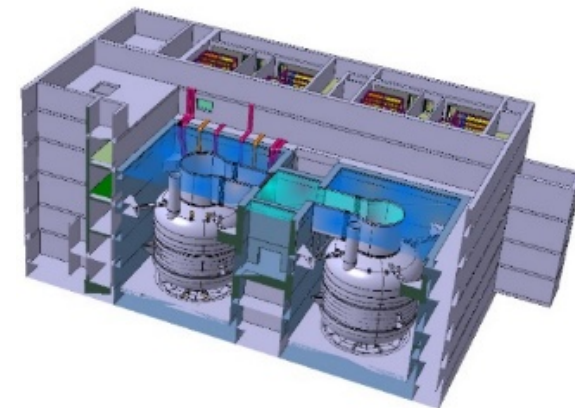
**Chinese SMR containment takes shape**  
28 February 2022 [Share](#)

The lower section of the steel containment shell has been installed for the ACP100 small modular reactor (SMR) demonstration project at the Changjiang nuclear power plant on China's island province of Hainan.

The lower section of the containment building is put in place (Image: CNNC)

Construction of the multi-purpose 125 MWe pressurised water reactor (PWR) - also referred to as the Linglong One - officially started on 13 July 2021 following final approval for its construction being given by China's National Development and Reform Commission in early June.

... et français: "Réacteurs nucléaires innovants"



**nuward**

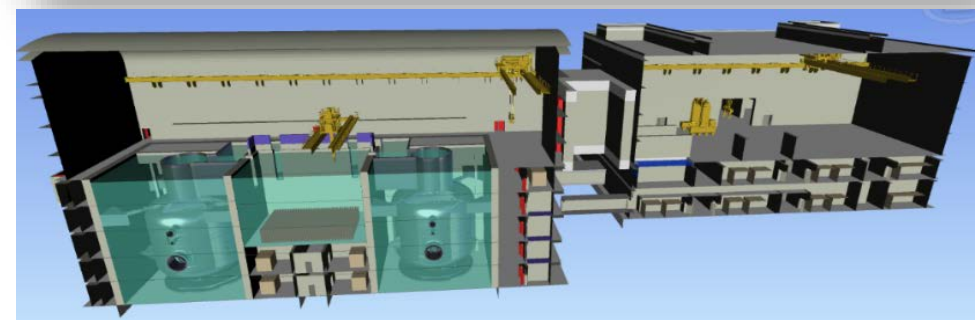
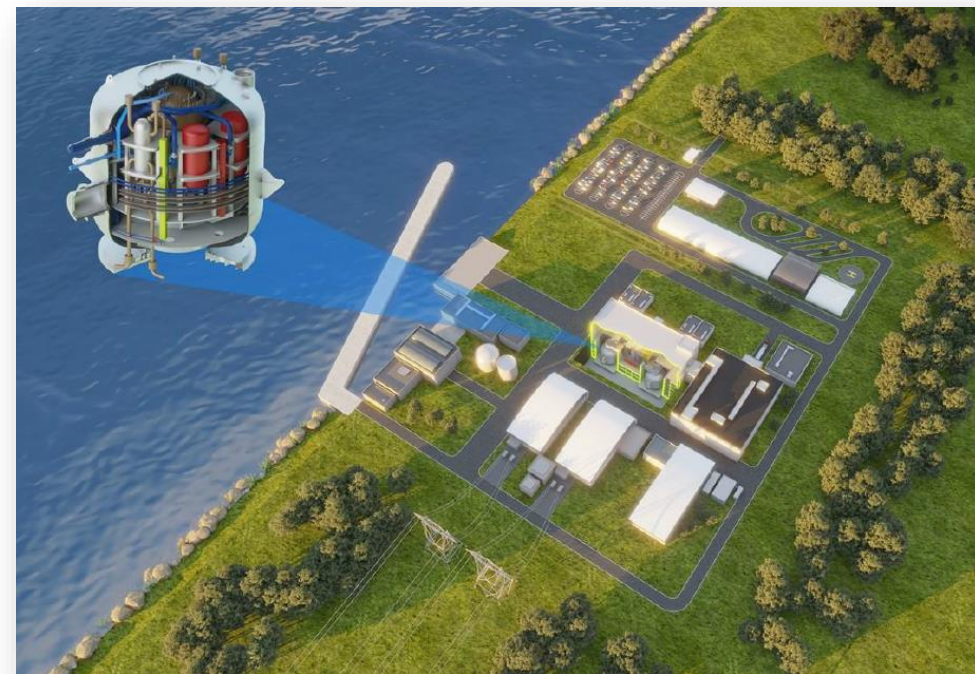
Une initiative dotée de 1 Mds€ sur 10 ans pour développer l'offre française de SMR:

- NUWARD
- **AAP lancé le 2/03/2022** pour créer une dynamique DeepTech nucléaire en France, transition énergétique
  - faire émerger de nouveaux acteurs
  - faire émerger de nouvelles idées (usages, sûreté, matières et déchets)



**CEA dans un rôle d'appui technique et scientifique**

# Nuward: Caractéristiques



## 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, desalement,, capture CO2)
- Durée construction visée 40 mois en série

## Optimized Design

- 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

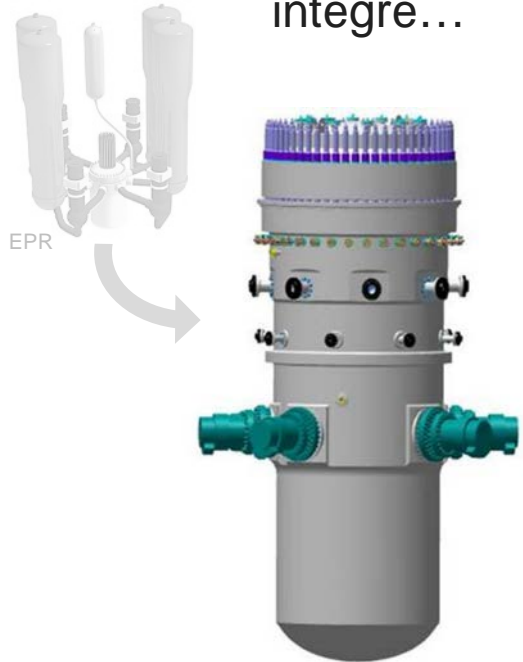


The NUWARD™ Nuclear Island: 2 Units and 1 common pool

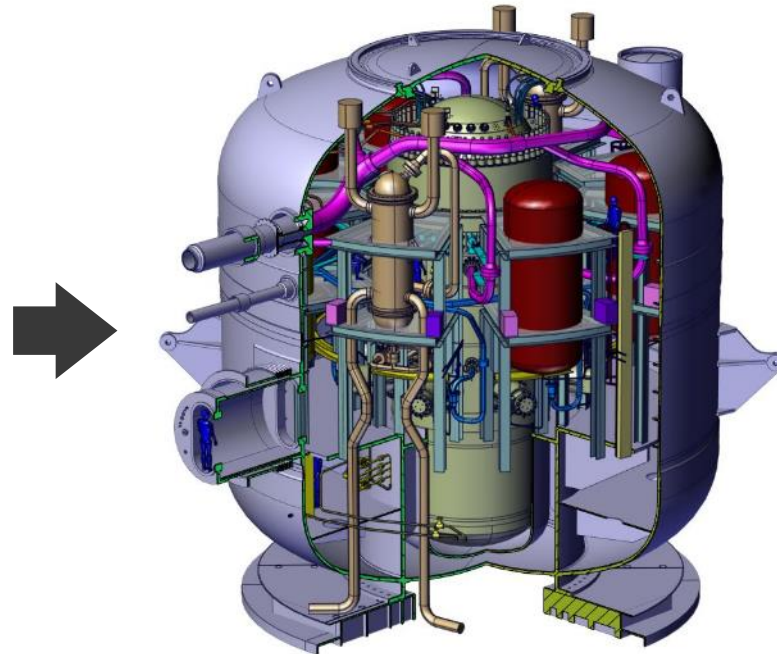


# Le produit NUWARD™

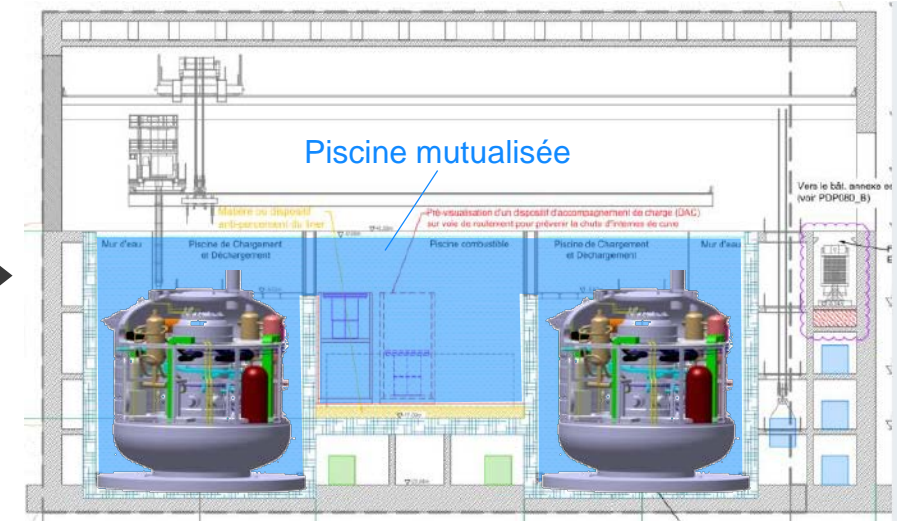
Un réacteur  
intégré...



...dans une enceinte métallique  
immergée dans un bassin d'eau



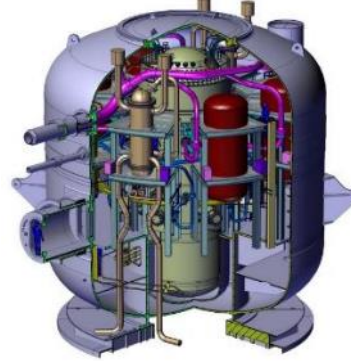
... installé dans un îlot nucléaire  
comprenant 2 réacteurs de 170MWe  
et une piscine d'entreposage



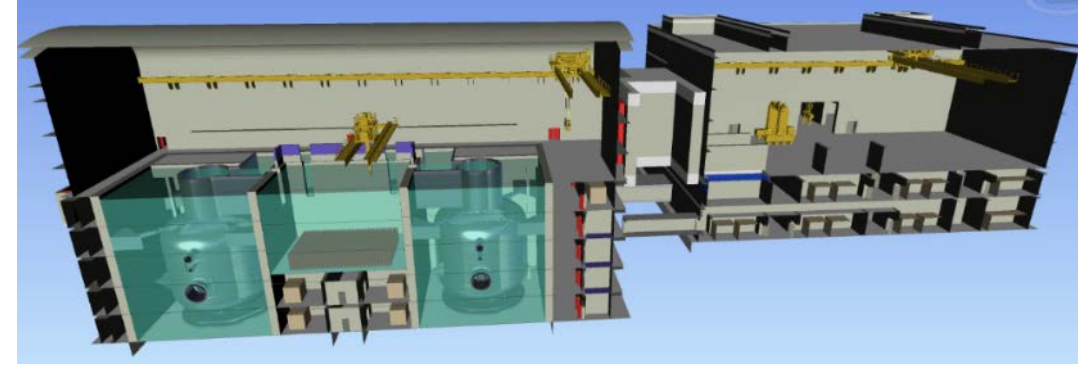
Une centrale de **340 MWe** comprenant **2 réacteurs intégrés**



# Rappel des fondamentaux de conception



La chaudière intégrée de NUWARD™



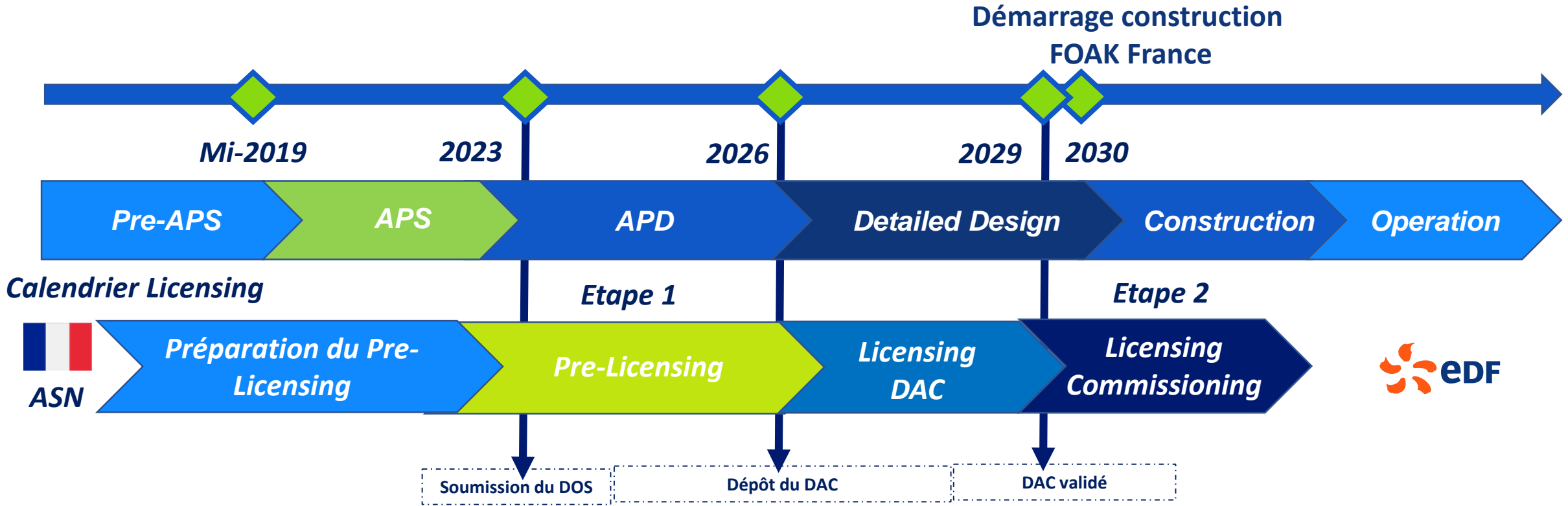
L'Îlot Nucléaire de NUWARD™ (2 réacteurs et une piscine dans un bâtiment)

## Fondamentaux de la conception des SMR (modèle économique)

### Déclinaison au concept NUWARD™

	<b>Robustesse en matière de sûreté et maîtrise de l'impact environnemental</b>	<b>Simplicité</b> moins de structures systèmes et composants	<b>Time to market</b> réduction du lead time
Une chaudière de 540 MWth intégrée	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Une enceinte métallique immergée	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Des systèmes passifs	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Un cœur sans bore	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Une source froide principale de sûreté autonome	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Un îlot nucléaire semi-enterré	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Une conception et construction modulaires		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Des structures et composants standardisés		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

# Calendrier NUWARD™



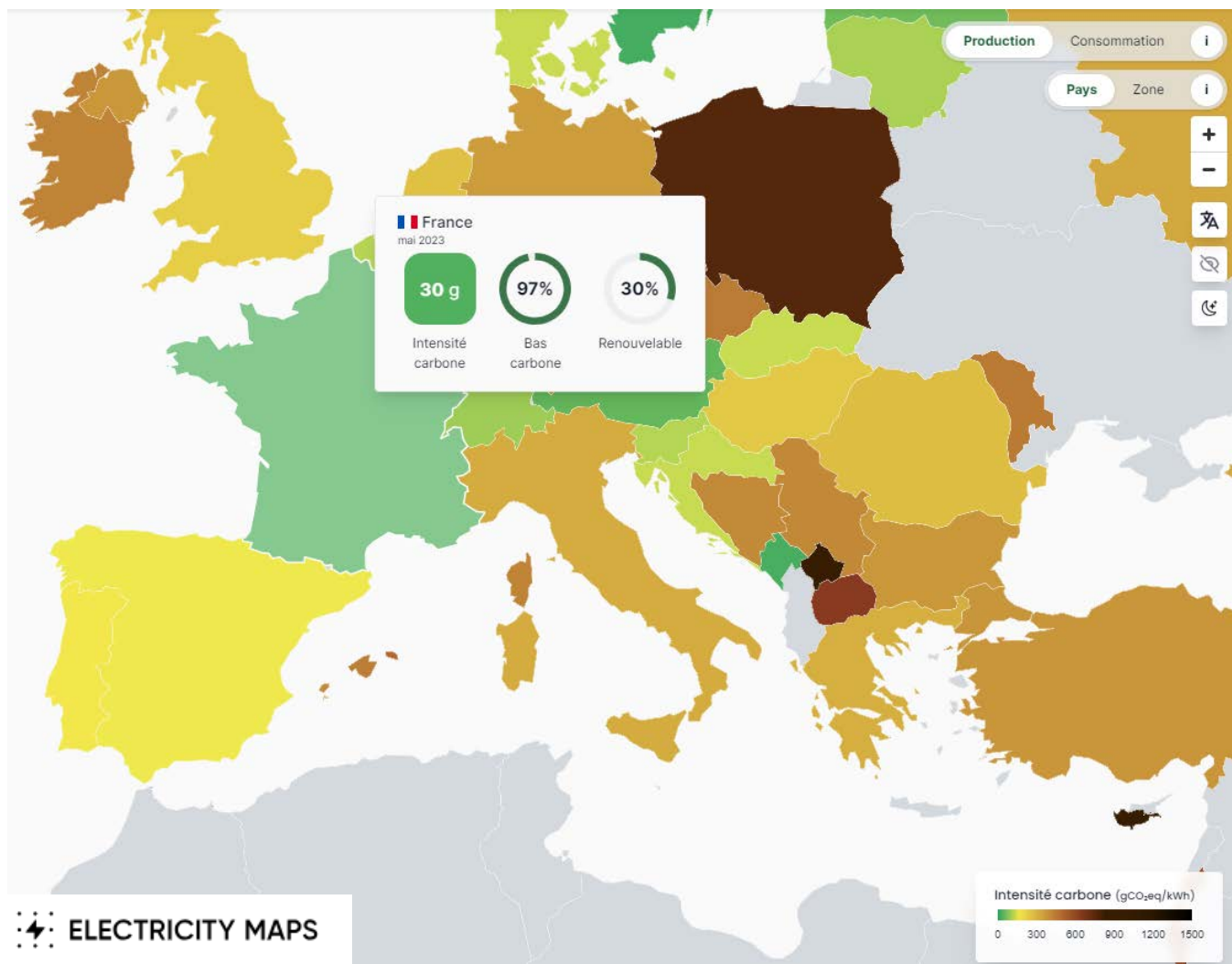
## Joint Early Review (JER)



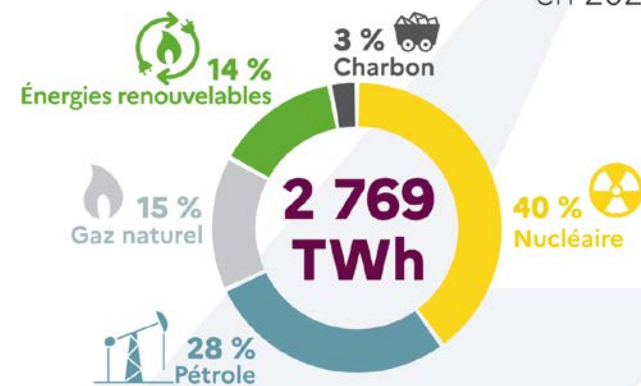


# 2 ■ Nouveaux usages

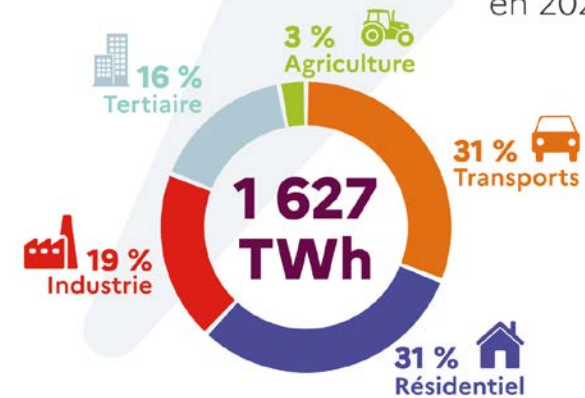
# Mix Énergétique Français actuel et futur



## Consommation d'énergie primaire en 2021

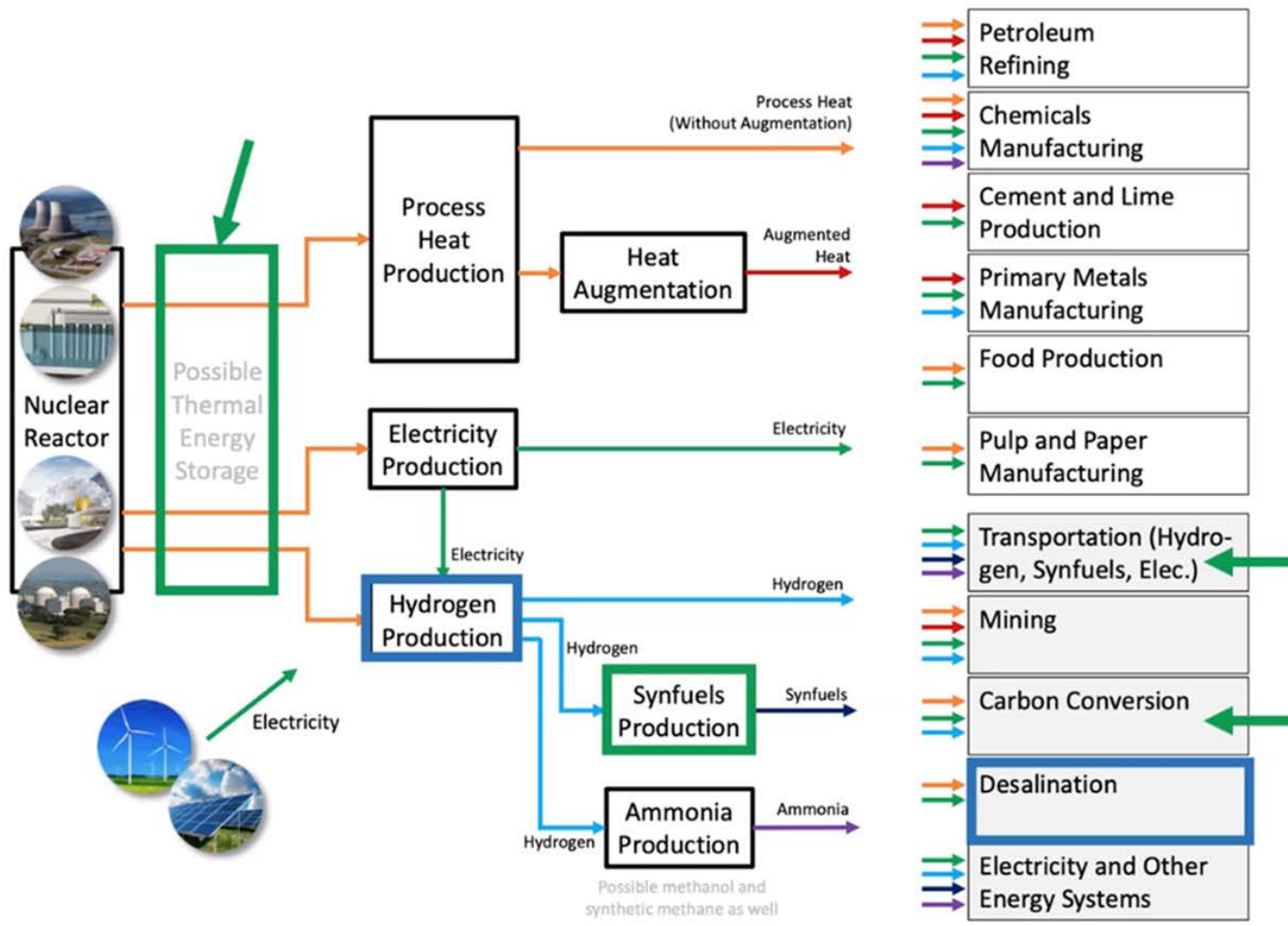


## Consommation finale énergétique en 2021





# 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

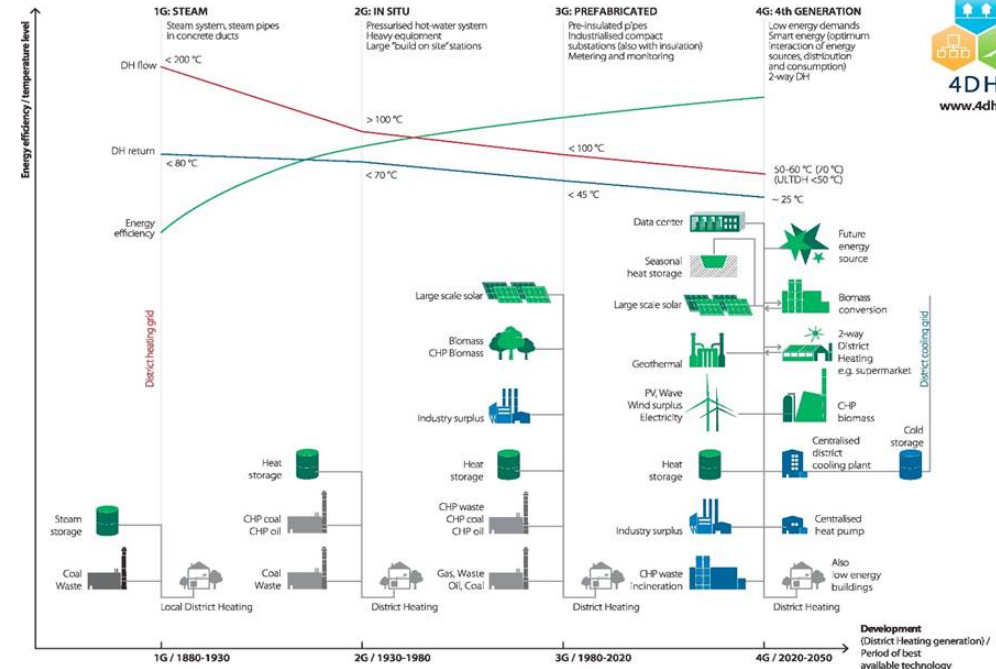
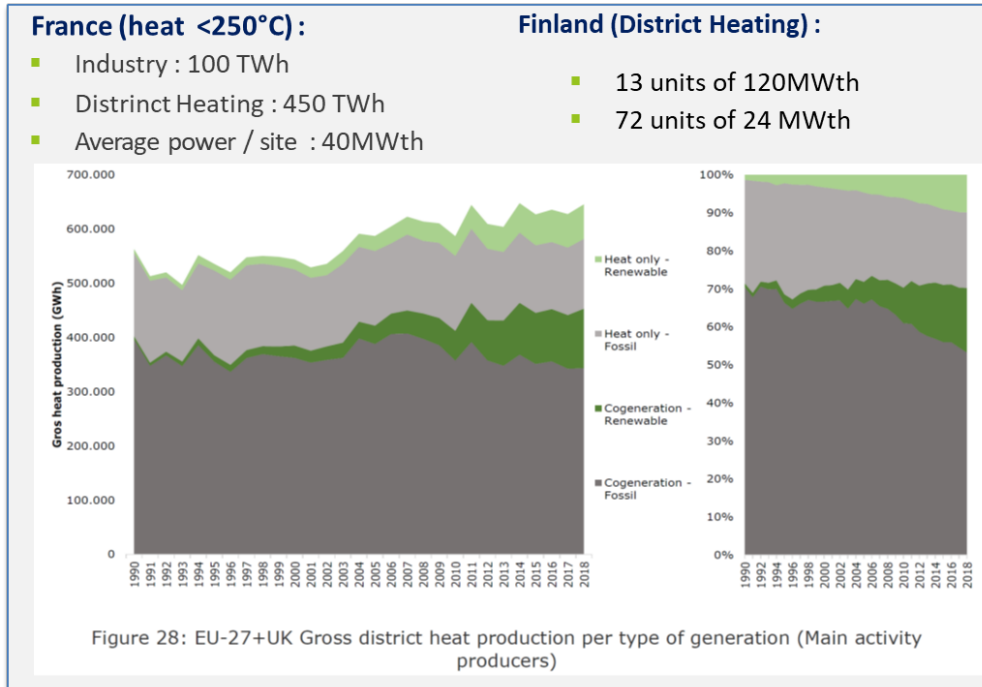
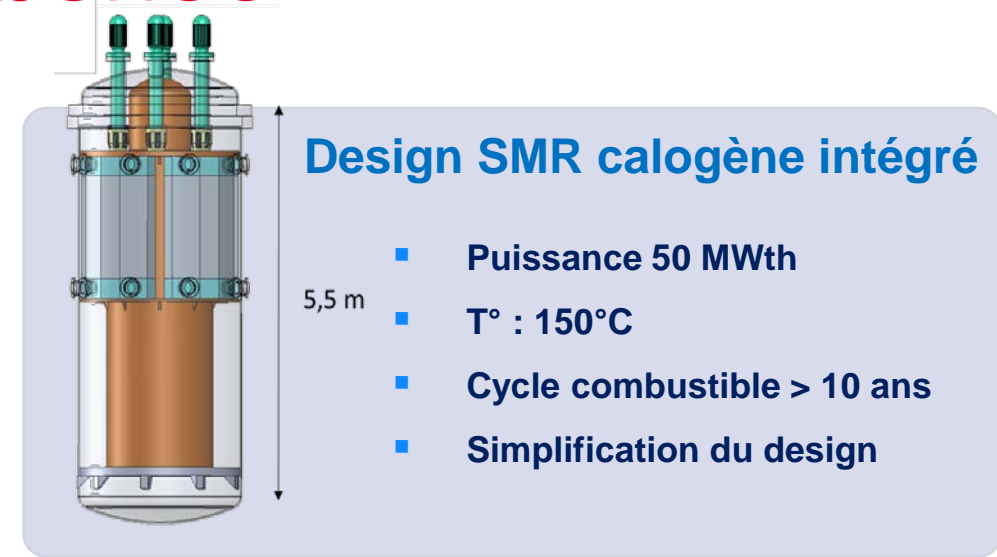
# Produire de la chaleur décarbonée

## Analyse du marché de la chaleur :

- Un enjeu majeur de la décarbonation
- Chaleur urbaine : 300 TWh principalement issue de carburants fossiles (EU+UK – 2016)

## Au CEA, étude d'un concept de SMR calogène

- Concept REP basse pression optimisé pour la fourniture de chaleur industrielle basse T° et chaleur urbaine



# 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:

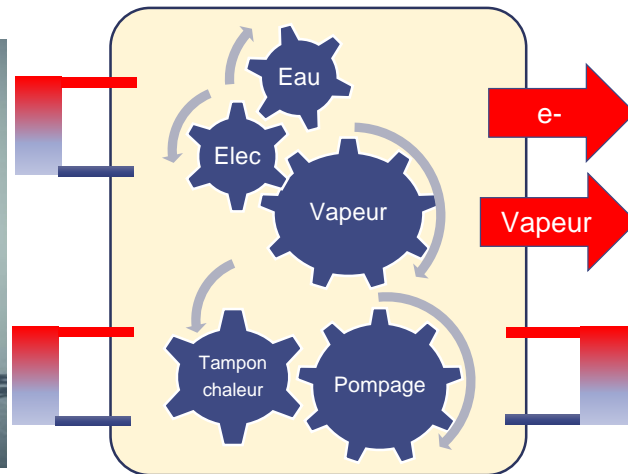
- Développement technologie EHT
- Optimisation du couplage énergétique



- Energie massive décarbonée
- Pilotable
- Cogénération : rendement maximisé



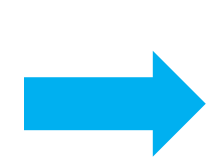
~500MWth  
(170MWe)



Brique technologique  
de couplage



GENVIA



~100t / j



~20 000 pleins / j

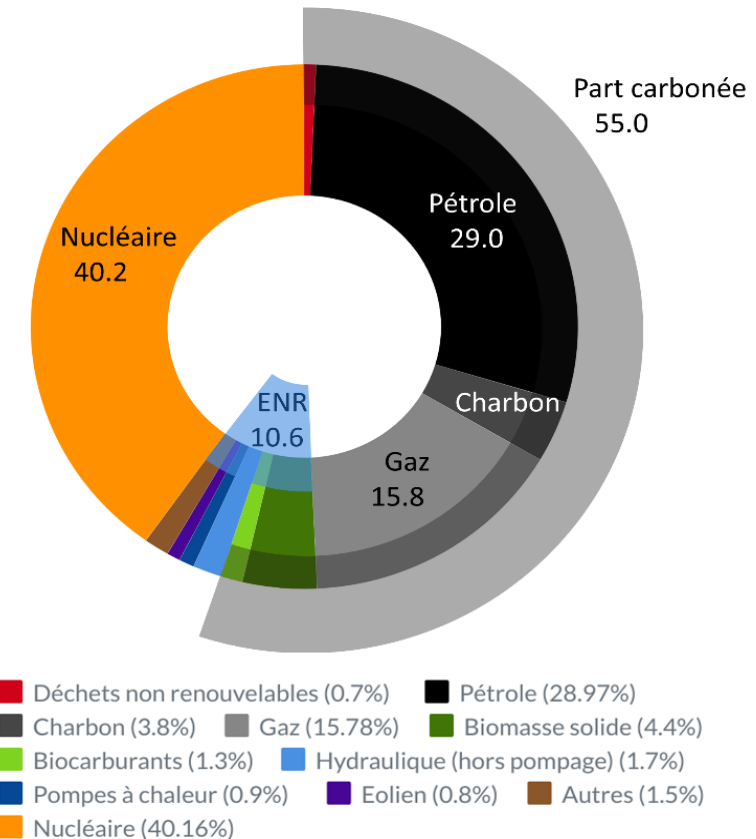


~1200 pleins / j

# Difficile parfois de faire sans produits fossiles...

## Quel est la place des énergies fossiles dans le système énergétique Français?

- La consommation d'énergie primaire en France (2900 TWh) repose à 40% sur l'énergie nucléaire (pour la production électrique) et à **55% sur les énergies fossiles...**
- Un tiers (1/3) des usages des énergies fossiles ne peuvent être remplacés par des alternatives bas carbone telles que l'électrification, H<sub>2</sub> ou des technologies de batteries.
- **50 Mtoe de produits carbonés devront être produits à partir d'énergies bas carbone et de sources de C** pour répondre aux usages suivants:
  - Carburants liquides pour les transports longue distance
  - Production de matériaux (acier, fonte)
  - Production de produits chimiques (plastiques, engrais, solvants, etc,)

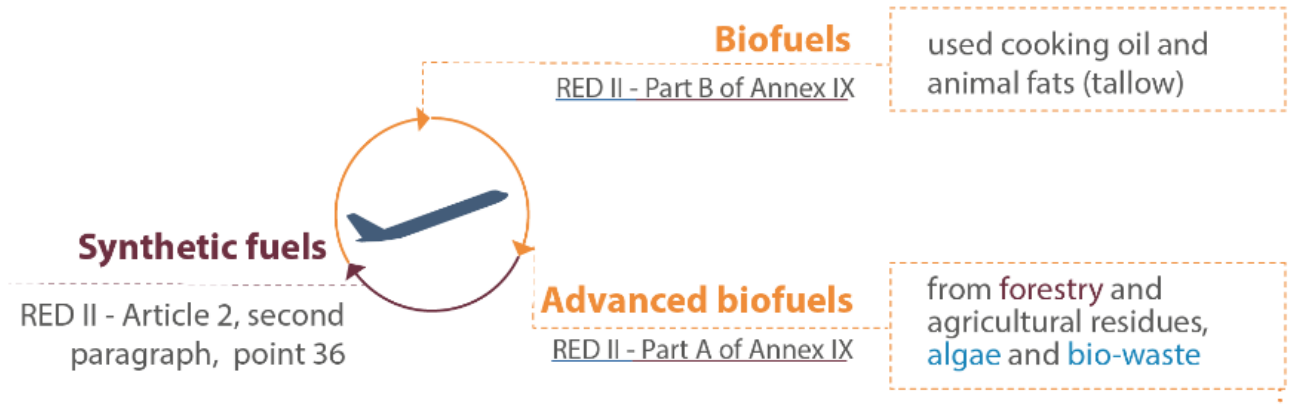
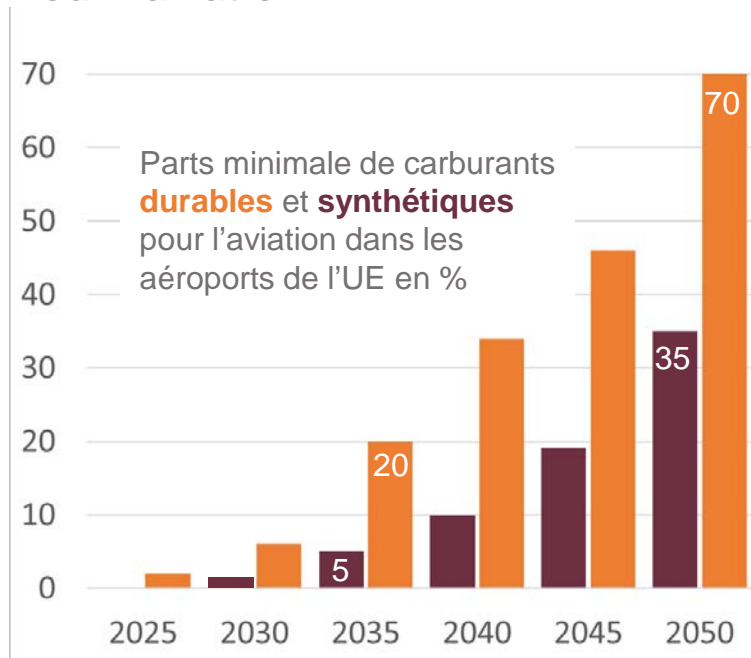


Répartition de la consommation d'énergie primaire en France, pour un total de 2900 TWh, en 2018. Données exprimées en % (données non corrigées de variations climatiques) ; ENR = énergies renouvelables ; d'après « Chiffres clés de l'énergie - Edition 2018 », données SDES; Commissariat général au développement durable.

# Les transports longue distance comptent pour 28% des émissions de gaz à effet de serre en Europe

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

➤ Pour l'aviation:

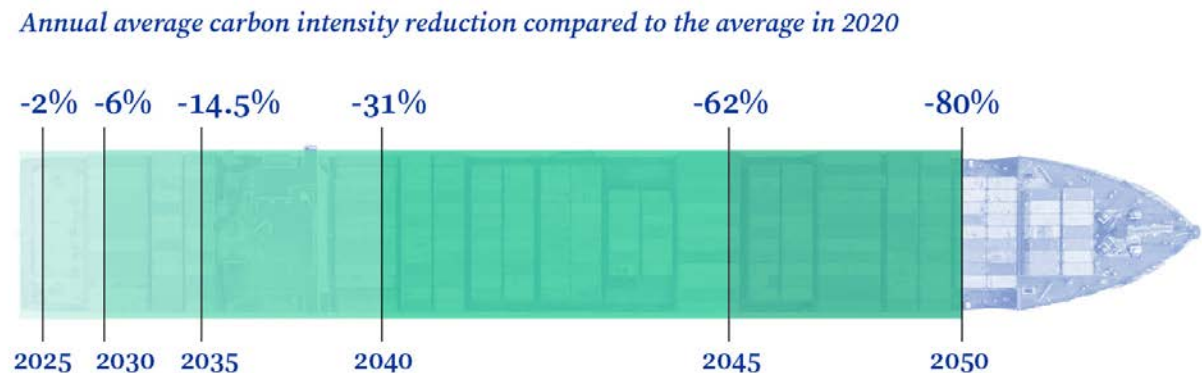


Source: Sustainable aviation fuels, EPRS, March 2022.

➤ 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



# Ordres de grandeur pour la France et l'Europe

## ➤ En France, le secteur de l'aviation

- émet 21 MtCO<sub>2</sub>/an
  - 6.8% des émissions totales
  - 83% des émissions du secteur sont dues aux vols moyen et long courrier
- consomme 7 Mt/an de kérosène
  - Issu de produits pétroliers
  - Augmentation régulière de 4%/an

## ➤ Pour Charles de Gaulle + Orly

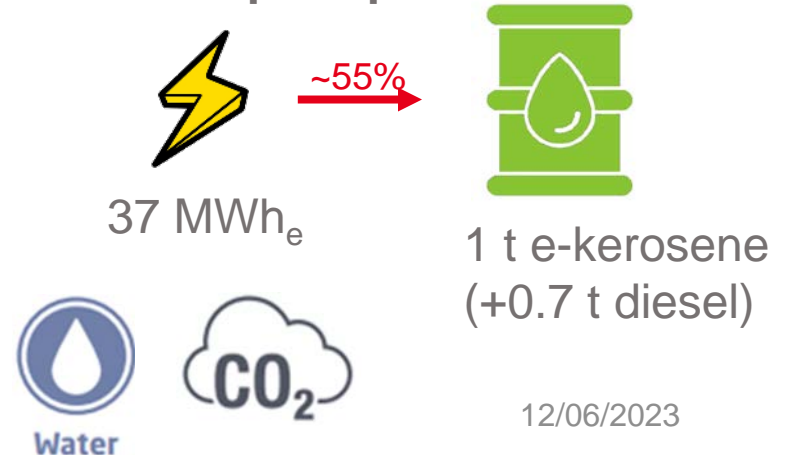
- 5 Mt de kérosène consommé par an



## ➤ En Europe, le secteur aérien consomme 50 Mt/an de kérosène



## ➤ Un besoin massif d'électricité bas carbone pour produire les e-fuels



# Une première génération de e-fuels à partir d'hydrogène bas C

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



E-kerosene

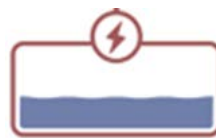


Electricité  
bas C



Hydrogen

H<sub>2</sub>  
bas C



Electrolysis

Electrolyseurs



CO<sub>2</sub> capturé



REP 900MW



Eoliennes 8MW  
45% facteur capacité



	2035 5%	0.25 Mt	9.3 TWh	180 kt	1.1 GW	1.3 Mt	1.5	300
PARISAÉROPORT	2050 35%	1.8 Mt	65 TWh	1.3 Mt	8.0 GW	8.8 Mt	11	2100
x10	2035 5%	2.5 Mt	93 TWh	1.8 Mt	11 GW	13 Mt	15	3000
	2050 35%	18 Mt	650 TWh	13 Mt	80 GW	88 Mt	110	21000



Coût de production env. 2 to 4 €/L  
En fonction des hypothèses (>50 €/MWh<sub>e</sub>, sources de CO<sub>2</sub>, etc.)

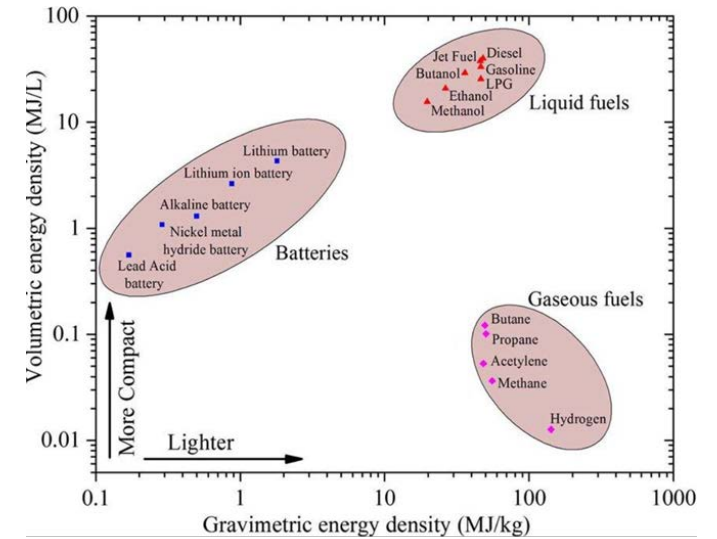
# Au-delà de l'électricité: du neutron à la molécule

## ■ Combiner la production H<sub>2</sub> avec la capture CO<sub>2</sub> pour produire:

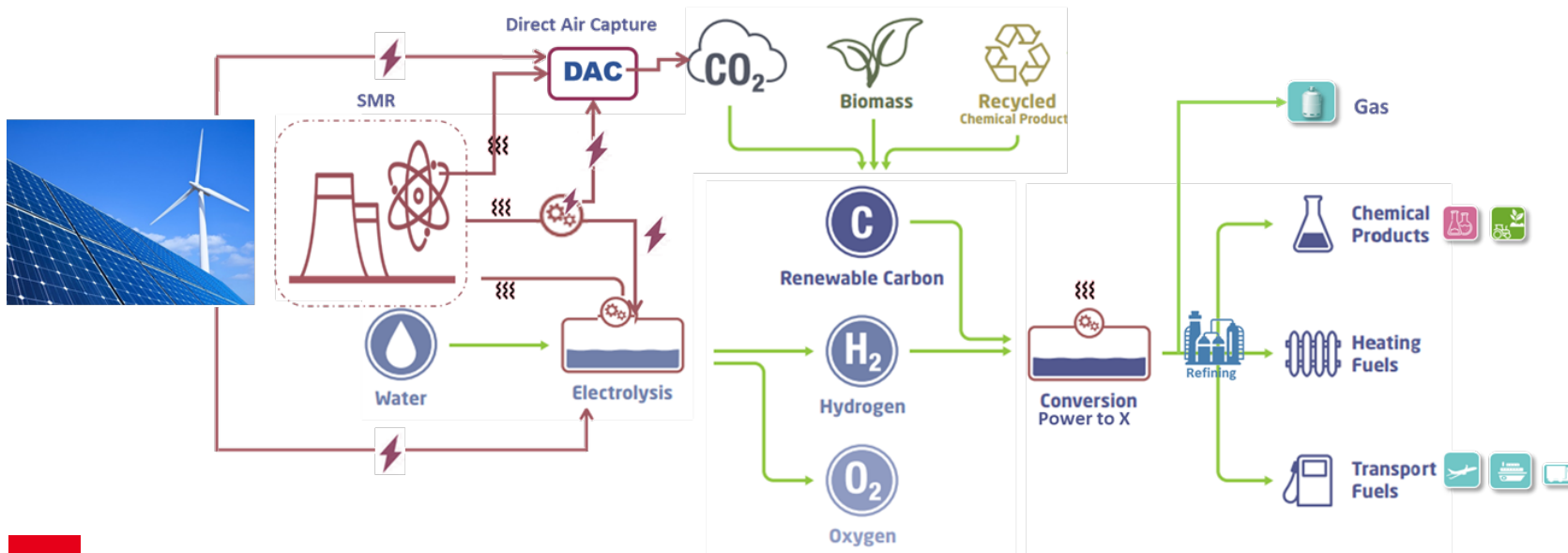
- Méthane / Methanol
- Ammoniaque
- Carburants de Synthèse



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



Rappel des densités de puissance / vecteur



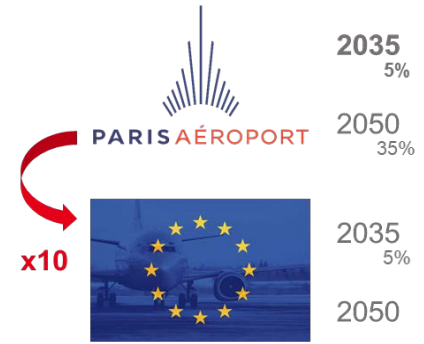
E-kerosene

2035 5% 0.25 Mt

2050 35% 1.8 Mt

x10 2035 5% 2.5 Mt

2050 18 Mt





# Quelques points à retenir

## Les SMRs:

- Différentes technologies de réacteurs, avec des niveaux de maturité différents, et des contraintes / avantages spécifiques (T° de fonctionnement, zone d'exclusion, cycle du combustible, densité/niveau de puissance)
- Certains concepts de réacteurs permettent d'envisager des applications mobiles (au-delà de celles déjà mises en œuvre sur des navires de grande taille)
- 3 facteurs importants / horizon de déploiement: maturité technologique, licencing, combustible (app. / retraitement)

## Les applications potentielles:

- Dans un contexte de difficulté croissante de l'approvisionnement en énergies et du réchauffement climatique, un réacteur nucléaire peut fournir, de façon pilotable une énergie bas carbone, en complément des ENRs.
- Un réacteur fournit de la chaleur. Il est ensuite possible de l'utiliser pour produire d'autres vecteurs énergétiques (électricité, H2, e-fuels) moyennant des systèmes de conversion.
- Le contexte d'utilisation des SMRs / AMRs est potentiellement plus large que celui des réacteurs de grande puissance, avec des enjeux d'acceptabilité sociétale, de nouveaux paradigmes de sûreté et de sécurité.
- La conception d'un système couplé (SMR + systèmes de conversion) dépend beaucoup du profil d'utilisation demandé (puissance requise, ratio électricité / chaleur, production H2,...) mais des briques communes sont à développer.