

Les SMRs, un nouveau modèle de nucléaire : contexte et enjeux associés

P. Gavaille – CEA

25/10/2023 – GdR MaNu

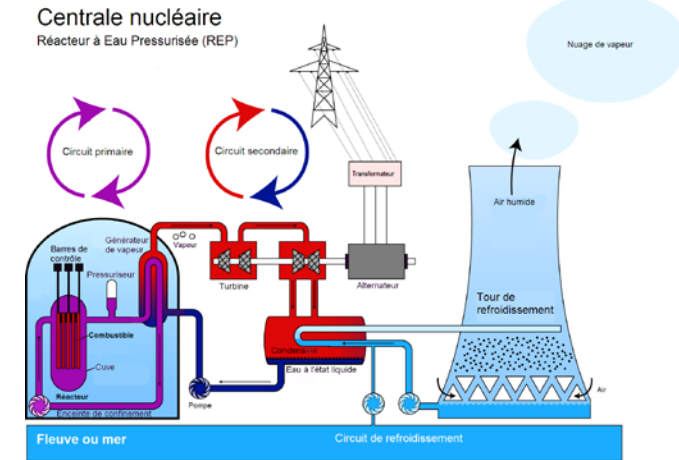




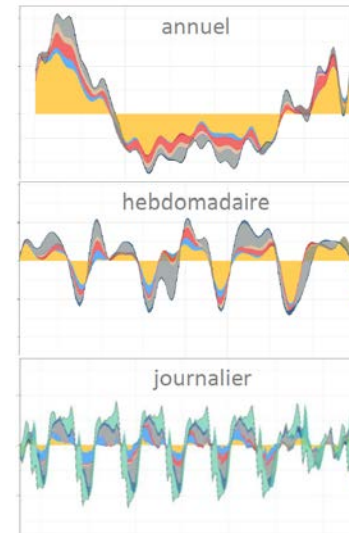
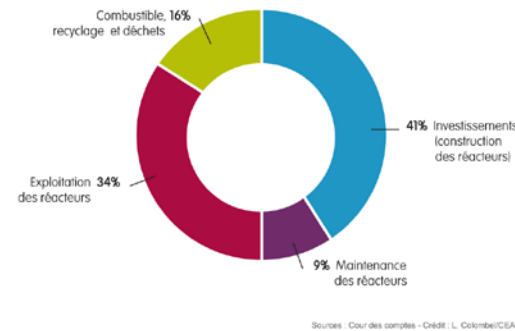
1 ■ SMRs: de quoi parle-t-on?

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

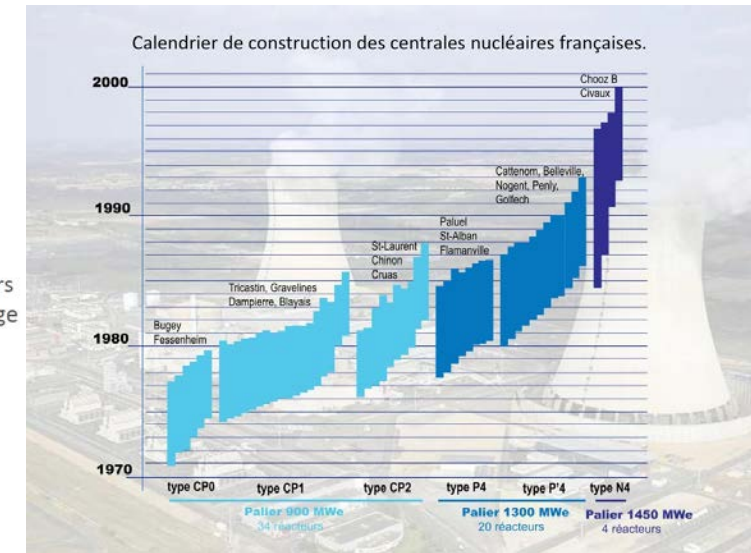


Composition du coût de production du parc nucléaire actuel



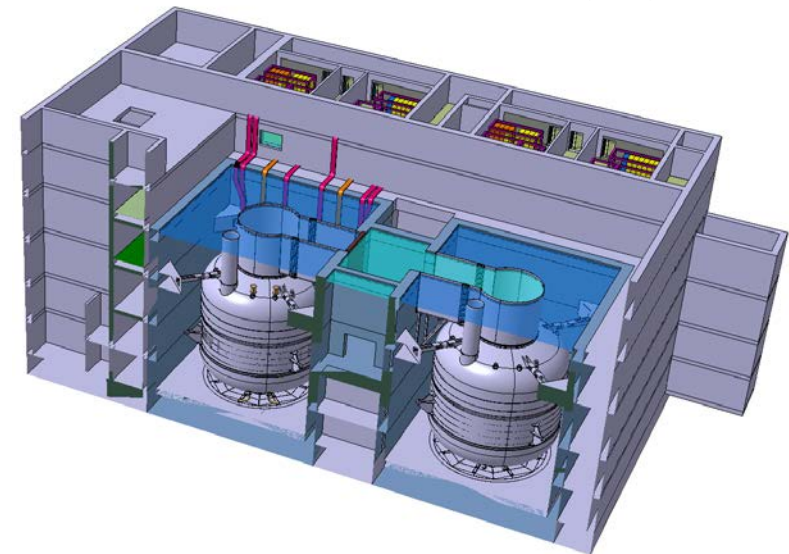
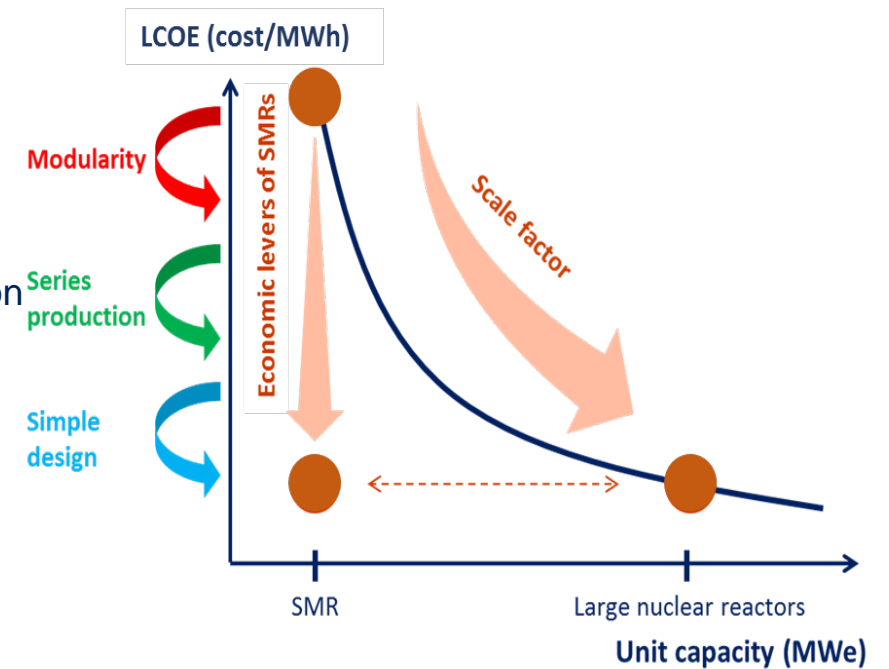
Besoins de flexibilité et leviers actuels

- 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

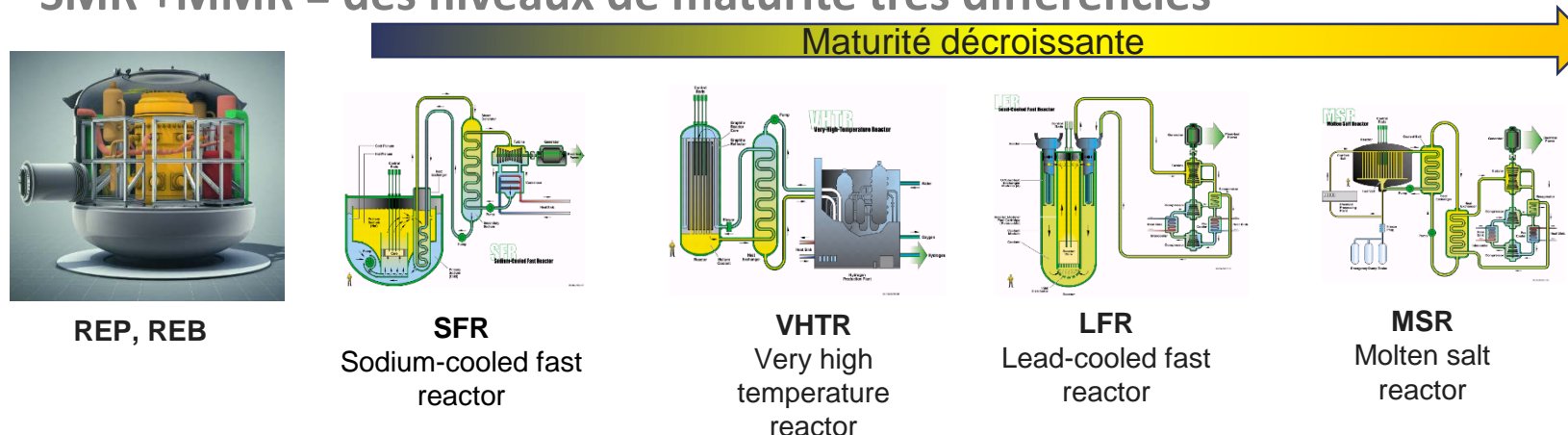
■ MMR = Micro Modular Reactors

- ❑ 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



Contexte SMR: au niveau politique national

Le sujet SMR/AMR est mentionné lors des 2 derniers CPN:



Février 2023:

- Loi d'accélération sur la construction de nouvelles installations à proximité d'installations existantes (dont les SMR)
- Soutien et accélération du projet NUWARD et AAP 2030
- Réflexion sur le cycle nucléaire yc SMR/AMR

Juillet 2023:

- Rôle renforcé du CEA sur la R&D y compris sur les SMR
- Refonte de l'AS en lien avec les nouveaux enjeux dont les SMR
- Continuation du projet RJH avec mention explicite d'appui à la R&D sur les SMR

Contexte SMR: au niveau politique européen

La France avec 16 autres pays membres crée l'**Alliance Nucléaire**:

- Souligne la contribution clef du nucléaire pour atteindre la neutralité carbone : jusqu'à 150GWe de Nucléaire en 2050 dans l'EU (100GWe aujourd'hui), avec la construction de gros réacteurs et de SMR
- Feuille de route sur plusieurs sujets dont l'innovation en particulier sur les SMR et AMR

Participation de la France à la **SMR pre-partnership Initiative**:

- 5 thématiques: Marchés, Licensing, Financement, Supply Chain, R&D
- Rapports publics et ouverts aux commentaires sur le site nuclear europe
- Destiné à préparer un soutien politique et financier au niveau européen

Rapport d'initiative parlementaire sur le sujet SMR (F. Bogovič)



European SMR pre-Partnership
Reports

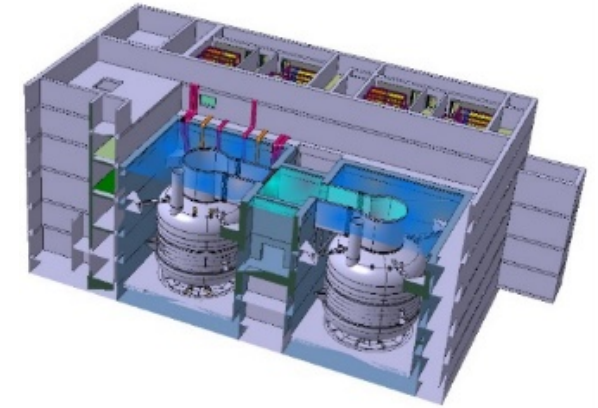


EN:REG
European Nuclear Regulatory Group

nucleareurope



Soutien financier de l'Etat: France 2030



nuward

1 Milliard € sur 10 ans pour promouvoir l'offre française de SMR/AMR:

- **NUWARD: 500M€** (déjà accordés: 50M€ en APS et 300M€ en APD)
- **Appel à Projet Réacteurs Innovants** initié en Mars 2022
 - Faire émerger de nouveaux acteurs sur le nucléaire innovant
 - Favoriser de nouvelles idées / concepts (usages, sûreté, cycle combustible et déchets)
 - Phase 1 terminée au 28/06/23: examen des dossiers en cours; 2 lauréats déjà officiellement annoncés (Newcleo et Naarea).

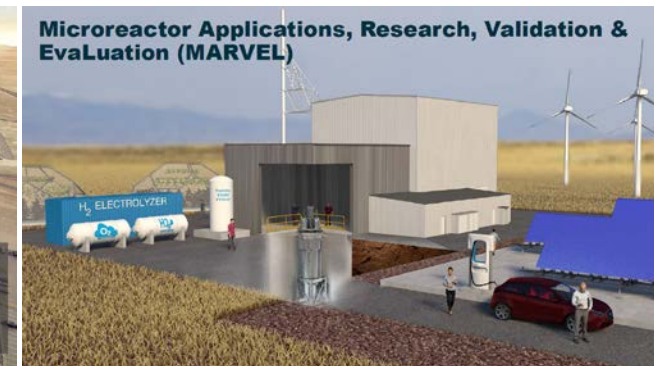
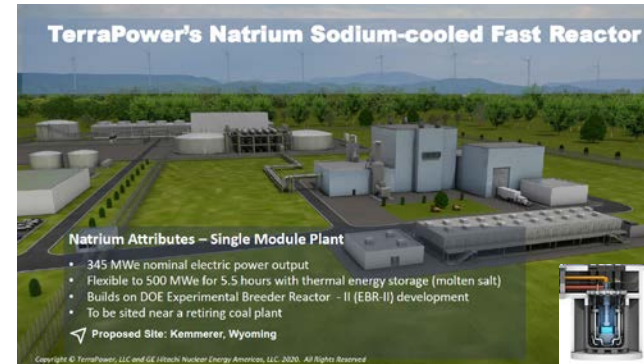
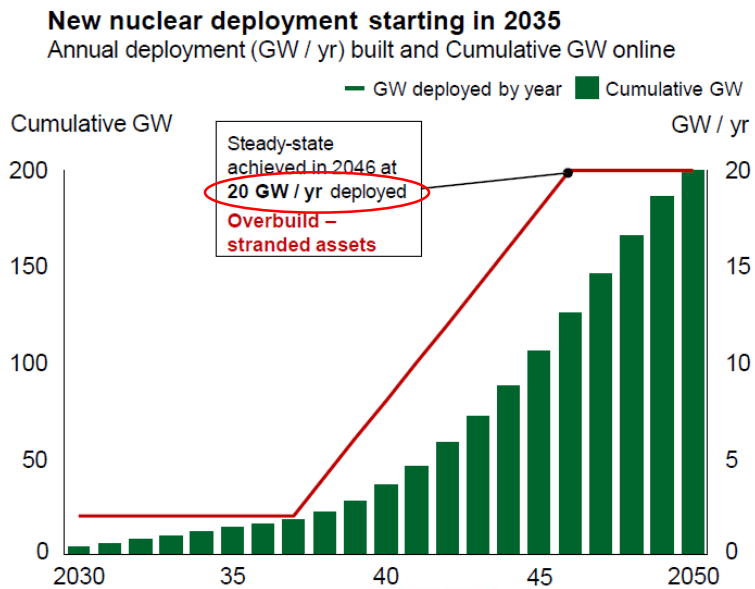


Rôle du CEA: soutien technique et scientifique aux SU

La concurrence à l'étranger

USA: très important soutien financier de l'état

- Bipartisan Infrastructure Law: 8.5B\$ + ¼ des 8B\$ pour regional H2 hubs
- IRA: 700M\$ sur HALEU; -15\$/MWh; 30% CAPEX; 10B\$ Project Credit



La concurrence à l'étranger

USA et Chine: une débauche de moyens et de concepts...

Chine:

- 1 SMR en opération; 1 en construction
- Exploration méthodique de tous les concepts SMR et AMR...

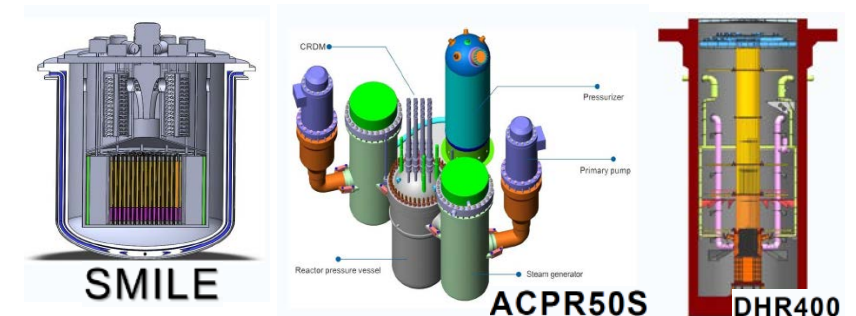


ACP-100



HTR-PM – en fonctionnement

| No. | Model | Reactor Type | Designer | Rated Power | Status |
|---|------------|--|-------------|----------------|-----------------------|
| Part 1 Water-cooled SMR (Land-based) | | | | | |
| 1-1 | ACP100 | PWR | CNNC | 125 MWe | Under construction |
| 1-2 | DHR-400 | LWR | CNNC | 400 MWt | Basic Design |
| 1-3 | NHR-200II | PWR | THU-CGN | 200 MWt | Basic Design |
| 1-4 | HAPPY200 | PWR | SPIC | 200 MWt | Detailed Design |
| 1-5 | CAP200 | PWR | SNERDI/SPIC | >200 MWe | Basic Design |
| Part 2 Water-cooled SMR (Sea-based) | | | | | |
| 2-1 | ACP100S | PWR | CNNC | 100 MWe | Basic Design |
| 2-2 | ACPR50S | PWR | CGN | 50 MWe | Detailed Design |
| Part 3 Gas-cooled SMR | | | | | |
| 3-1 | HTR-PM | HTGR | THU-CHNG | 2*100MWe | In Operation |
| Part 4 Molten-salt Reactor | | | | | |
| 4-1 | smTMSR-400 | MSR | SINAP, CAS | 168 MWe | Pre-Conceptual Design |
| Part 5 Lead/LB-cooled Reactor | | | | | |
| 5-1 | SMILE | Liquid metal cooled fast reactor (pool type) | SPICRI/SPIC | 3MWt/ 1MWe | Conceptual Design |
| 5-2 | BLESS-D | Liquid metal cooled fast reactor (pool type) | SPICRI/SPIC | 300MWt/ 100MWe | Basic design |



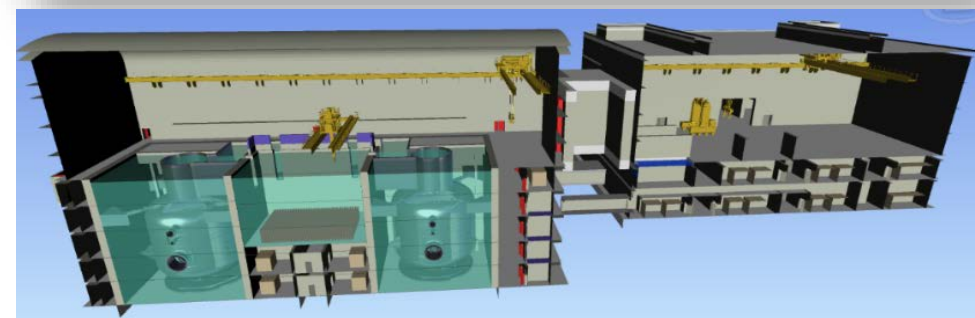


2 ■ Le programme SMR

Nuward: Caractéristiques



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



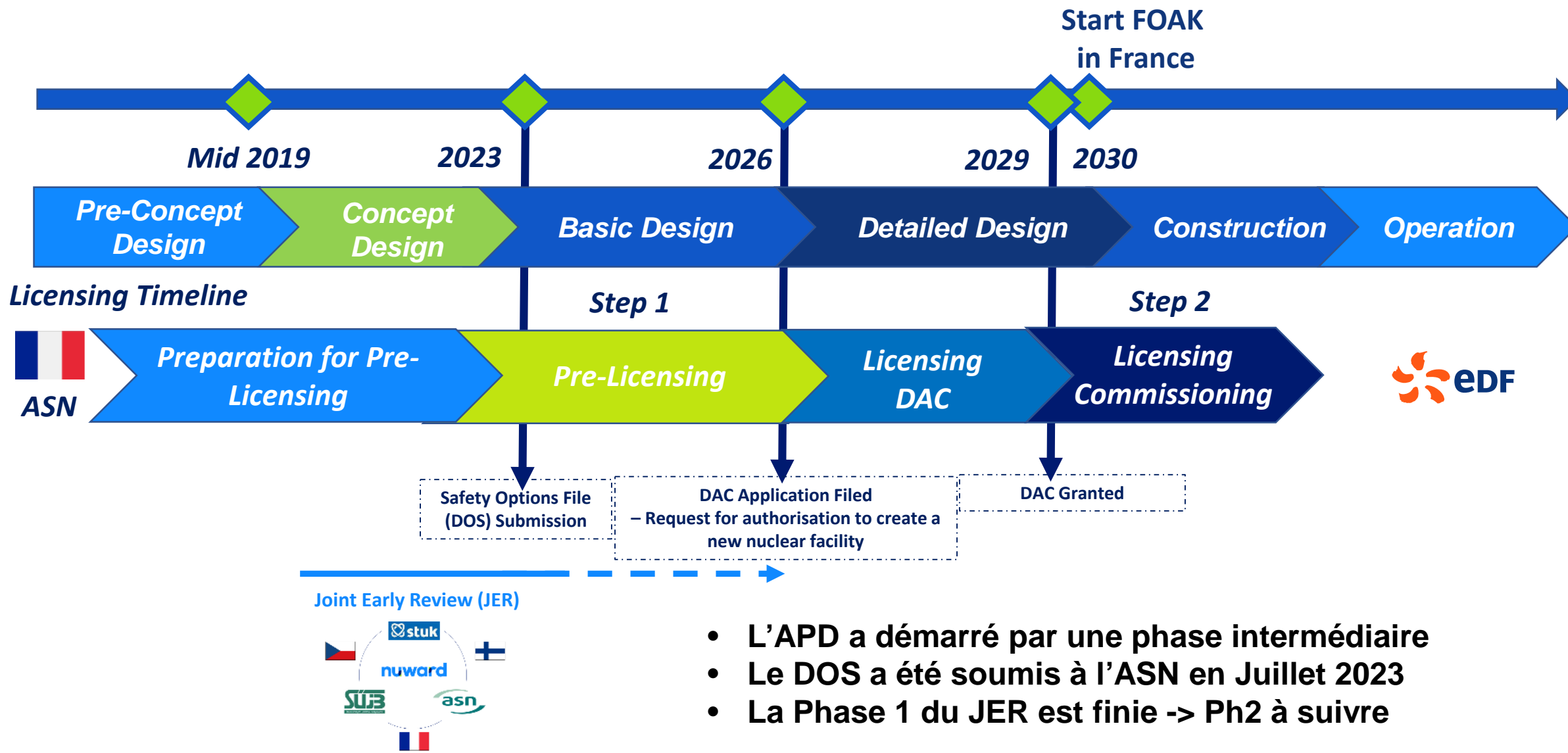
The NUWARD™ Nuclear Island: 2 Units and 1 common pool



nuward



NUWARD™ Timeline



- L'APD a démarré par une phase intermédiaire
- Le DOS a été soumis à l'ASN en Juillet 2023
- La Phase 1 du JER est finie -> Ph2 à suivre

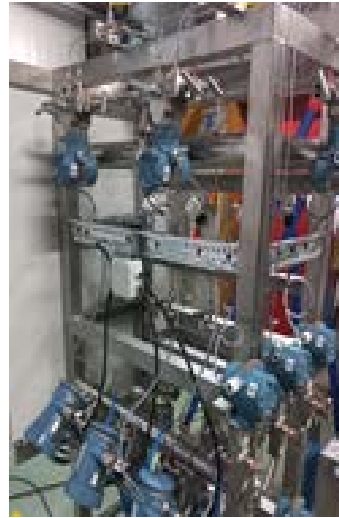
NUWARD – bilan contribution CEA en APS

Design et Manufacturing

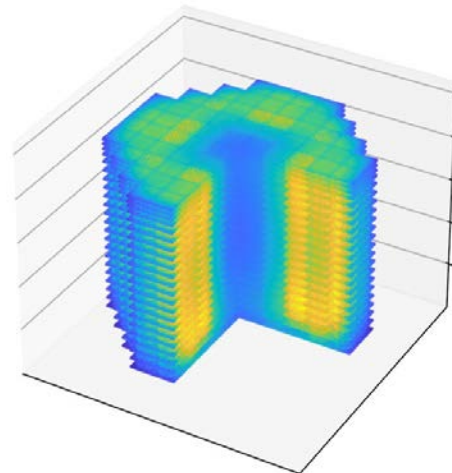
- Fabrication GV à plaques (DRT/LITEN)
- Tenue en service des GVs (BEENCH)
- Design condenseur

Simulation neutronique / TH

- Conception neutronique du cœur sans bore
- Calculs de transitoire TH
- Schéma de calcul APOLLO3
- V&V et Développement CATHARE



Boucle BEENCH



Distribution de puissance du cœur de référence en fin d'APS

Boucles expérimentales TH

- Réalisation des essais sur EXOCET (transitoire d'écoulement dans les condenseurs)
- Boucle EVEREST sur le fonctionnement RRP
- Préparation design boucle TREVI



Boucle d'essai Exocet



Boucle avec SACO installé



Boucle –Bassin représentatif mur d'Eau



Echangeur TEMPCO livré

Boucle d'essai Everest

Le programme SMR - projet IDNES

SMR program

CO SMR

IDNES

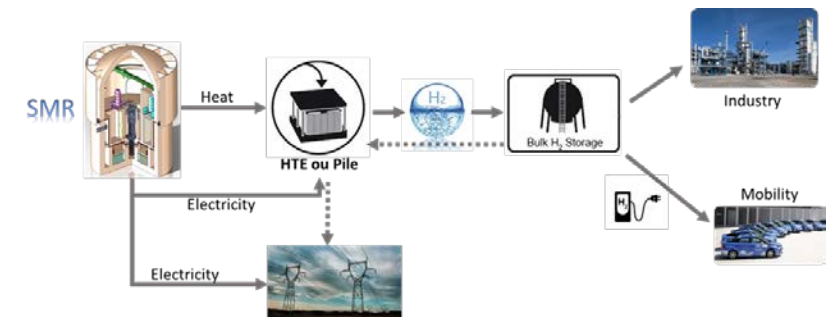
Création en 2020

Développement de NUWARD



Systèmes énergétiques nucléaires hybrides au-delà de l'électricité

- Innovative Decarbonized Nuclear Energy Systems initiative
- Approche analyse marché
- Systèmes énergétiques multi vecteurs avec de la cogénération nucléaire



Les axes de travail lancés en 2020

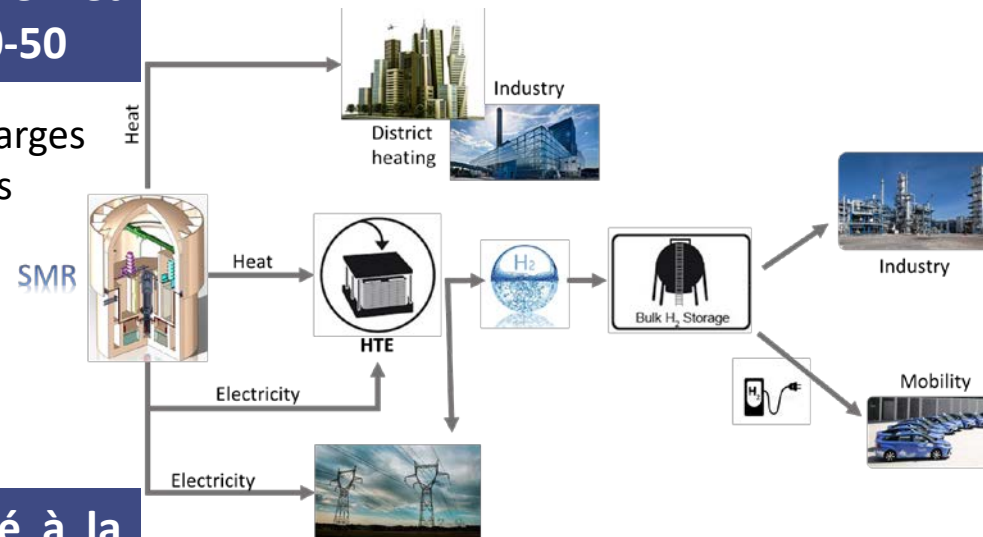
- Identifier des nouveaux marchés et définir des configurations de systèmes hybrides associées
- 2 études d'opportunités en support : SMR Calogène & couplage SMR-EHT

Axe #1 : études de marché et identification des besoins @ 2030-50

Définition d'un cahier des charges fonctionnel et performances attendues

Axe #3 : Etudes d'un SMR dédié à la production d'hydrogène

Systèmes couplant un SMR avec EHT
Performances & coût versus besoins des marchés & sûreté des systèmes



Axe #2 : Etudes d'un SMR dédié à la production de chaleur

Etudes de préconception des SMR calogènes
Performances & coût versus besoins des marchés & sûreté des systèmes

Axe #4: R&D sur des systèmes de conversion d'énergie innovants

Etude de systèmes multi vecteurs (électricité, chaleur, H₂, eau)
Optimisation avec le stockage (thermique, batterie, gaz...)
Intégration des autres sources d'énergie: EnR

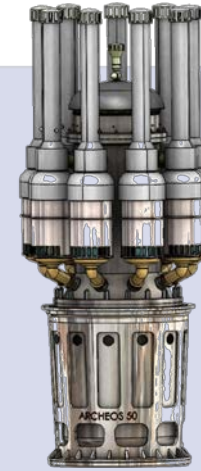
Produire de la chaleur décarbonée

Analyse du marché de la chaleur :

- Un enjeu majeur de la décarbonation
- Chaleur urbaine : 300 TWh principalement fossile

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

- Concept **REP basse pression** optimisé pour la fourniture de chaleur industrielle basse T°
- Prise de PI avec 5 brevets, essaimage en cours



Design SMR calogène intégré

- Puissance ~50 MWth
- T° : 150°C
- Cycle combustible > 10 ans
- Simplification du design

France (heat <250°C) :

- Industry : 100 TWh
- District Heating : 450 TWh
- Average power / site : 40MWth

Finland (District Heating) :

- 13 units of 120MWth
- 72 units of 24 MWth

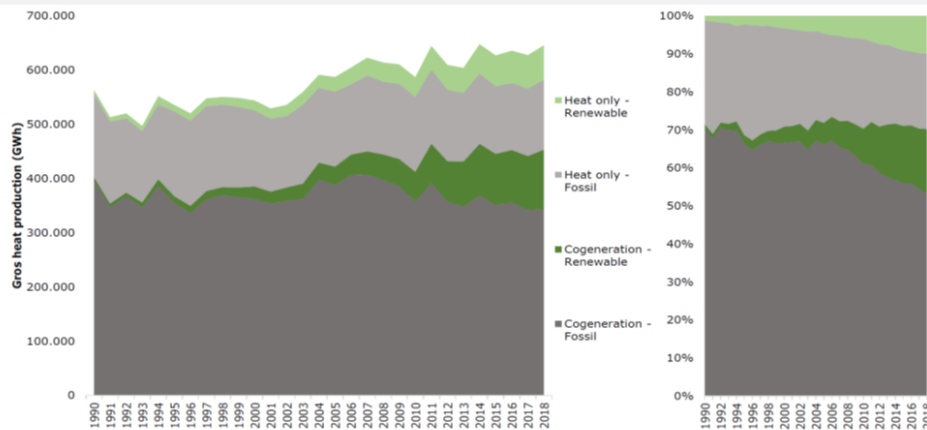
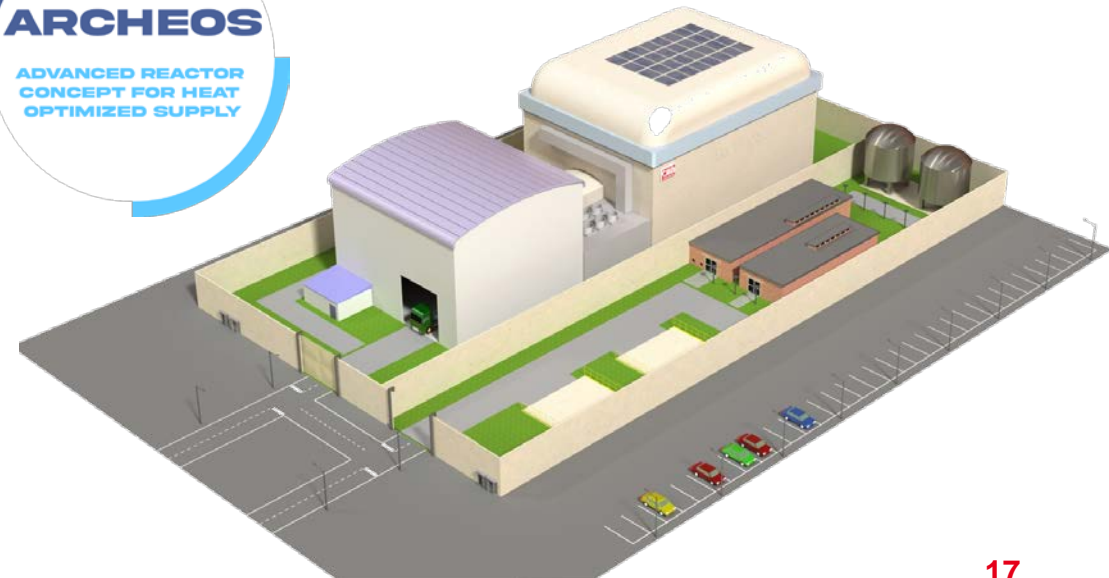


Figure 28: EU-27+UK Gross district heat production per type of generation (Main activity producers)



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:

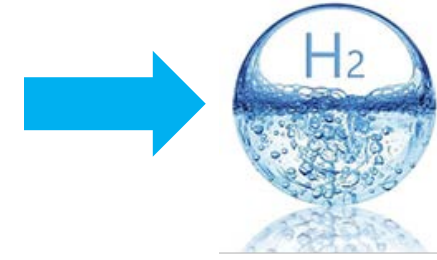
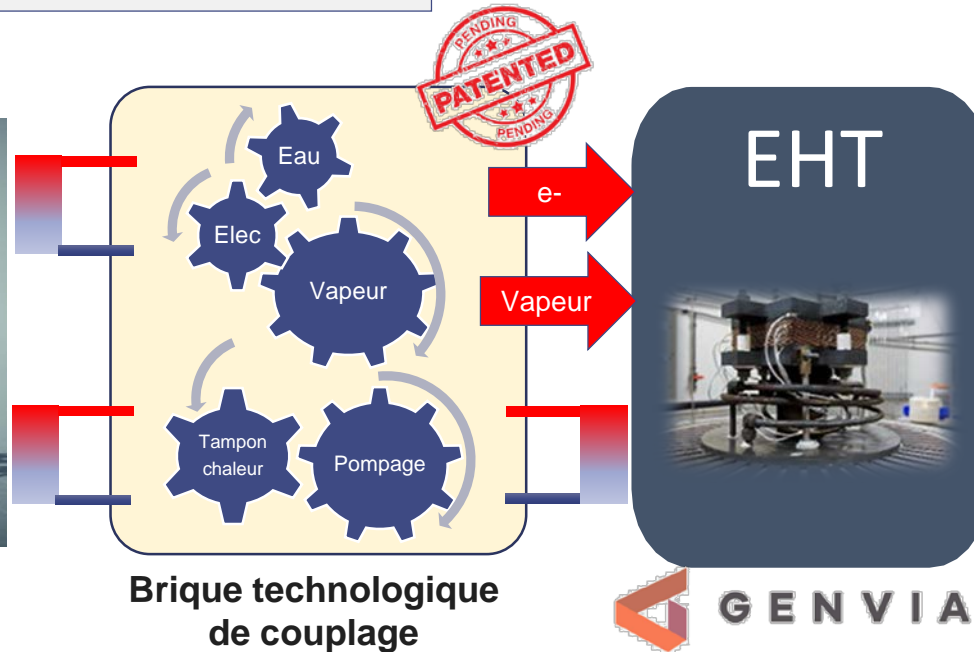
- Développement technologie EHT
- Optimisation du couplage énergétique



- Energie massive décarbonée
- Pilotable
- Cogénération : rendement maximisé



~500MWth
(170MWe)



~100t / j



~20 000 pleins / j



~1200 pleins / j

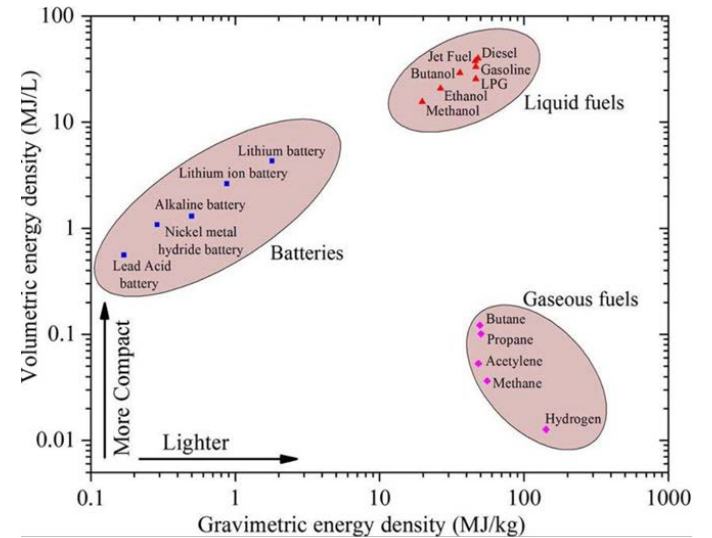
Au-delà de l'électricité: du neutron à la molécule

Combiner la production H₂ avec la capture CO₂ pour produire:

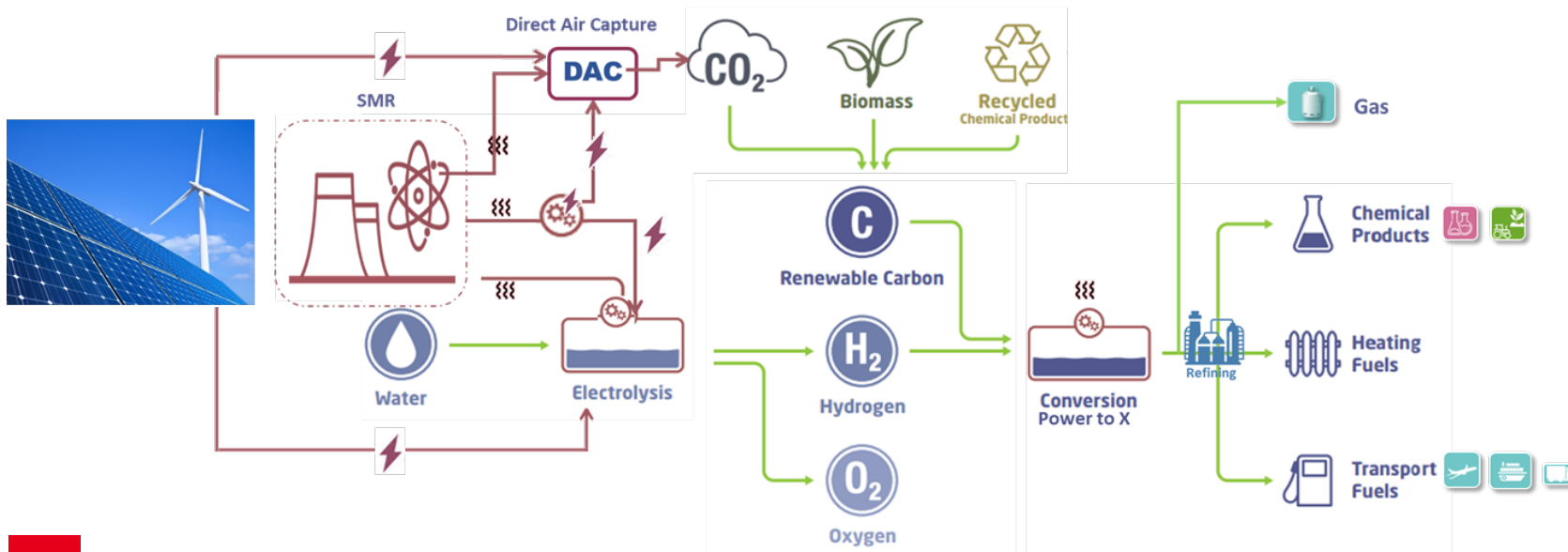
- Méthane / Methanol
- Ammoniaque
- Carburants de Synthèse



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



Rappel des densités de puissance / vecteur



E-kerosene

2035 5% 0.25 Mt



2050 35% 1.8 Mt



2035 5% 2.5 Mt

2050 18 Mt

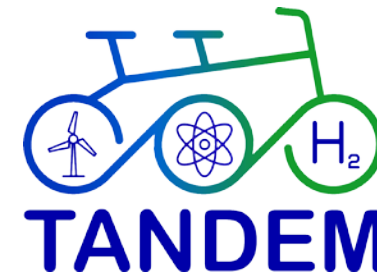
Les collaborations internationales

Projets Euratom :

- ELSMOR (2019 – 2023)
- TANDEM (2022 – 2025)
- Préparation call Safety of LW-SMR 2023

Discussions bilatérales:

- Finlande (SMR calogène)
- DoE
- Inde, Canada,...



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). Utilisation accrue de la sûreté passive.
- Certains concepts permettent d'envisager des applications mobiles, dans un cadre différent / parc actuel.
- 3 (a minima) facteurs importants pour l'horizon de déploiement: maturité technologique, licencing, combustible (appro. / retraitement). Et a ce jour, pas de supply chain en place...

Les applications potentielles:

- Dans un contexte de difficulté croissante de l'approvisionnement en énergies (sous différentes formes), un réacteur nucléaire peut fournir, sur une durée longue (jusqu'à plusieurs années sans rechargement combustible) un approvisionnement autonome en électricité, chaleur et produits « dérivés ».
- 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.
- Des technologies existent / sont en cours de développement pour produire à partir d'un couple (électricité, chaleur) de l'hydrogène, de l'eau douce, de l'ammoniac / des e-fuels.
- 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.

Merci pour votre
attention!

