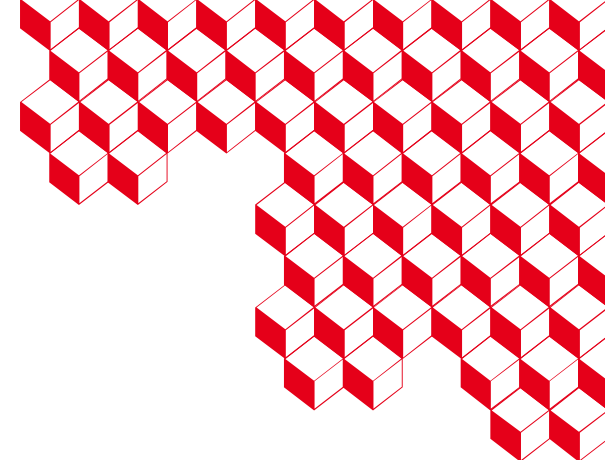




# **Le programme énergies du CEA**

Hélène Burlet

Direction scientifique des énergies

Mars 2023

# Le CEA

## Construire aujourd'hui la société de demain

Changement climatique, pandémies, menaces géopolitiques, accès aux matières premières et développement accéléré des technologies numériques...

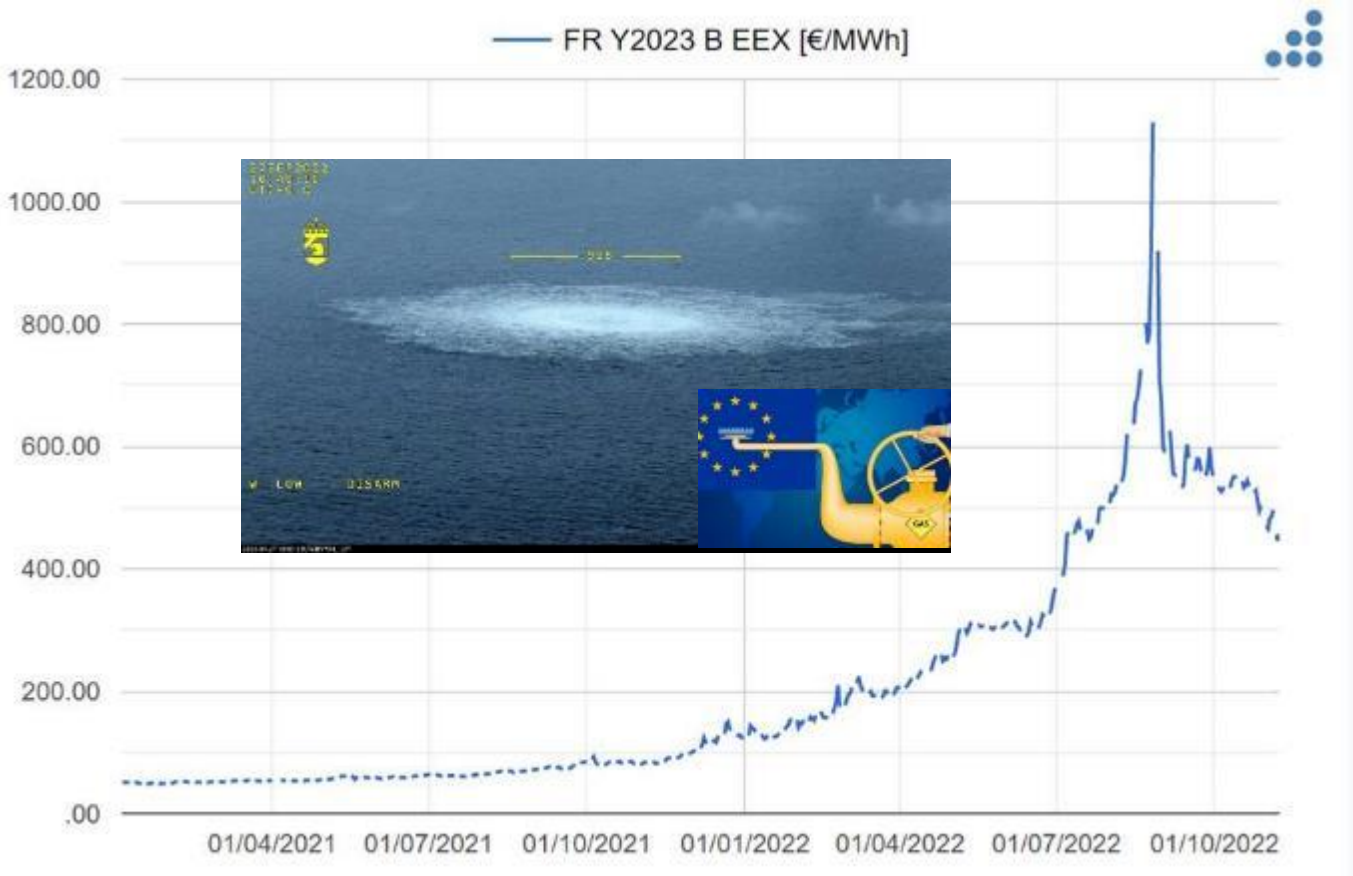
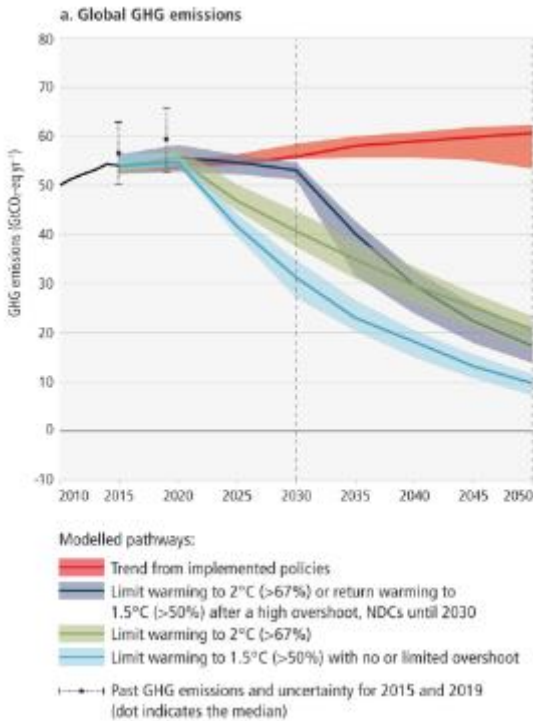
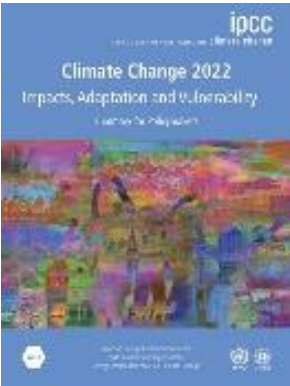
Nécessité de mieux maîtriser 4 mutations sociétales majeures :

- **la transition énergétique**
- **la transition numérique**
- **la santé du futur**
- **la défense/sécurité globales**



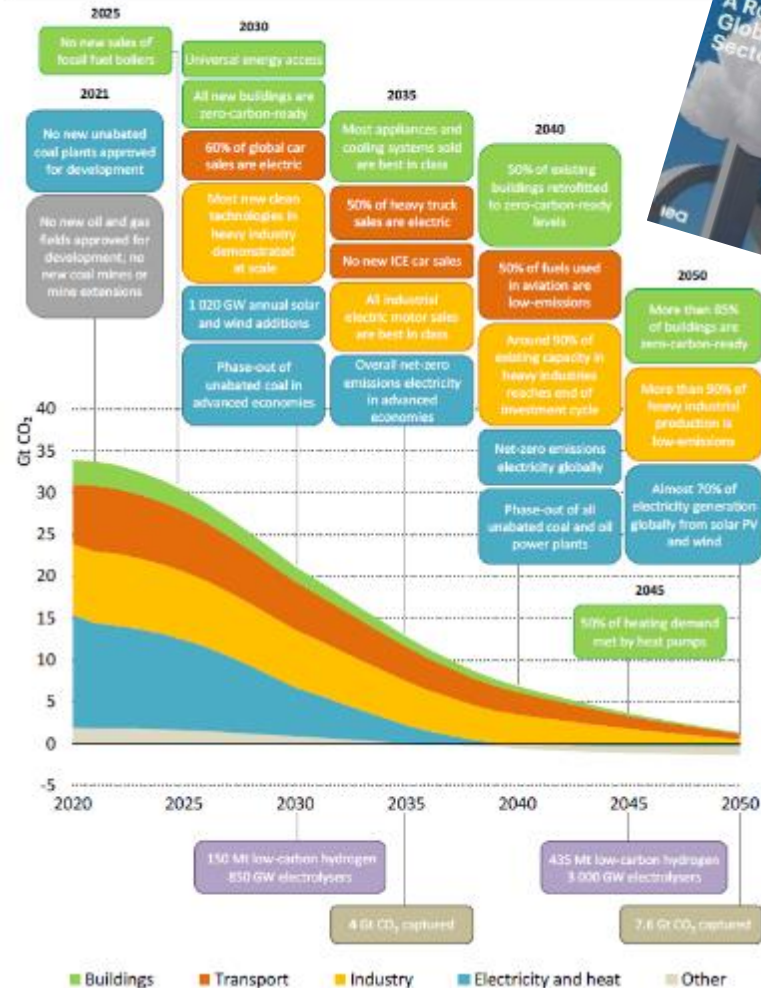
# L'énergie en crise

Climat & environnement – Approvisionnement et souveraineté – Prix

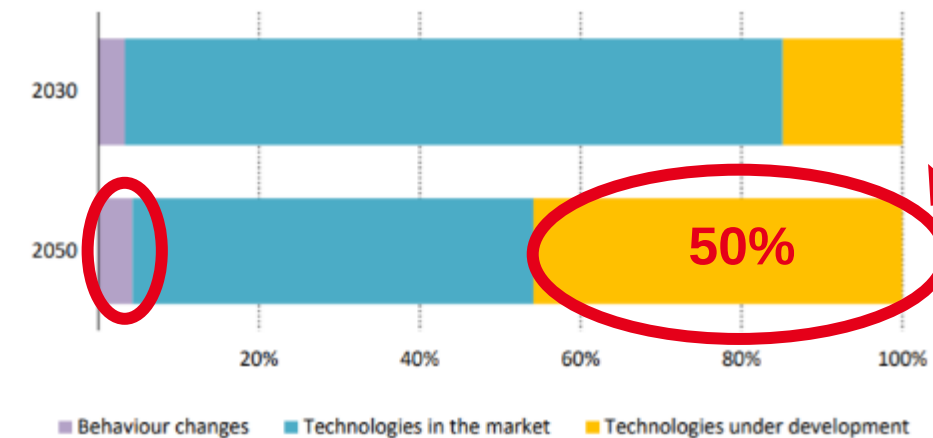


# Vers un agenda 'net zéro carbone' en 2050 : ENR, nucléaire et hydrogène

Key milestones in the pathway to net zero



Annual CO<sub>2</sub> emissions savings in the net zero pathway, relative to 2020



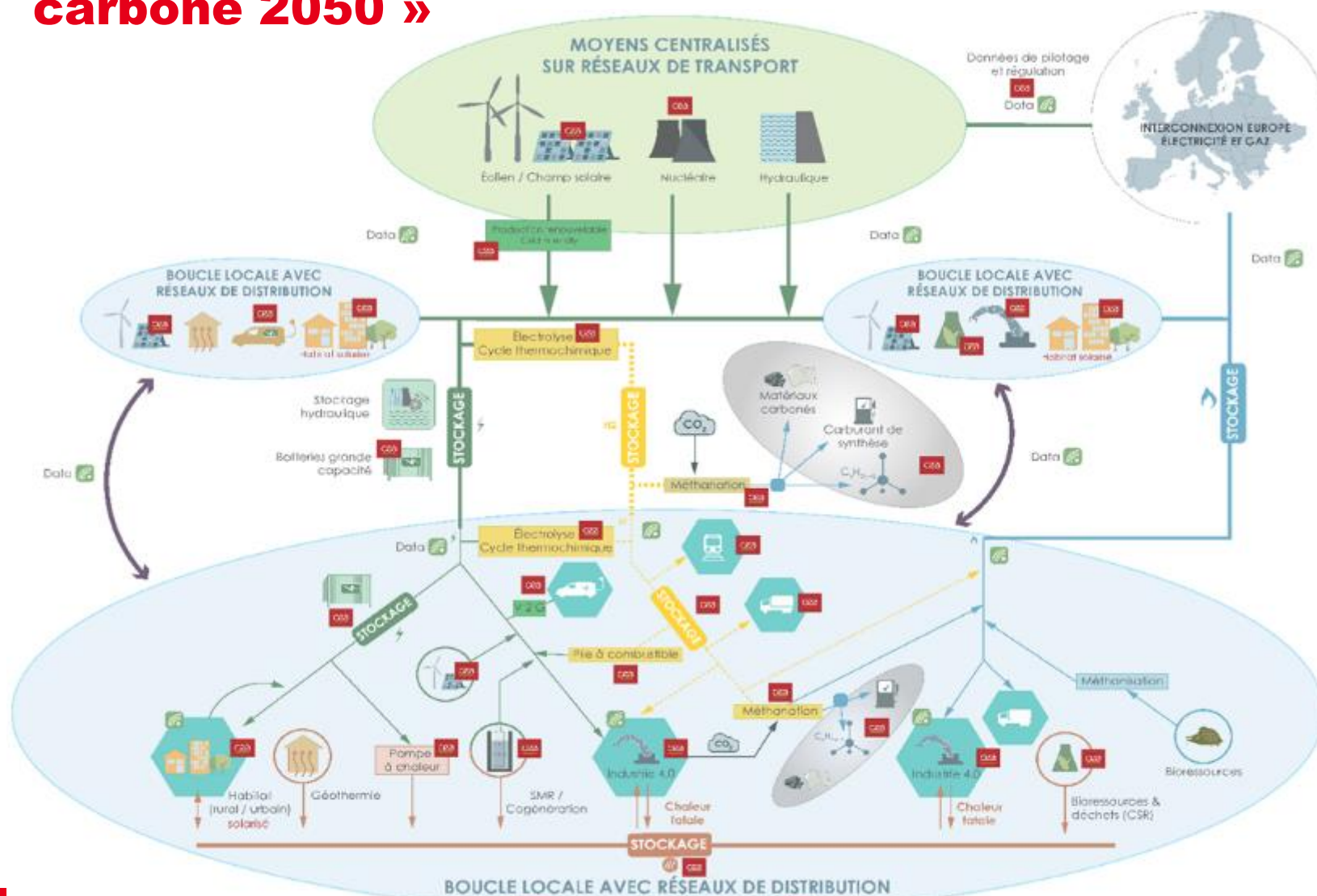
Innovation

Source : rapport AIE (Agence Internationale de l'Énergie), 2021, « NET ZERO BY 2050 A ROADMAP FOR THE GLOBAL ENERGY SECTOR »

- Electrification : 20% en 2020 → 50% en 2050 (conso. finale )
- Fossiles : arrêt des développements dès 2020
- Nucléaire : énergie x2 avec 10% en 2050 (+24 GW/an après 2030)
- ENR : 70% en 2050 avec PV et éolien
- H2 : 3000 GW électrolyseurs en 2045



# Mission énergie : une vision technique partagée d'un système énergétique pour atteindre l'objectif « neutralité carbone 2050 »



Système **multi-vecteurs**  
électricité, chaleur, gaz /  
hydrogène

Système **multi-échelle** et  
**multi-agents** (de la boucle  
locale  
à l'échelle européenne)

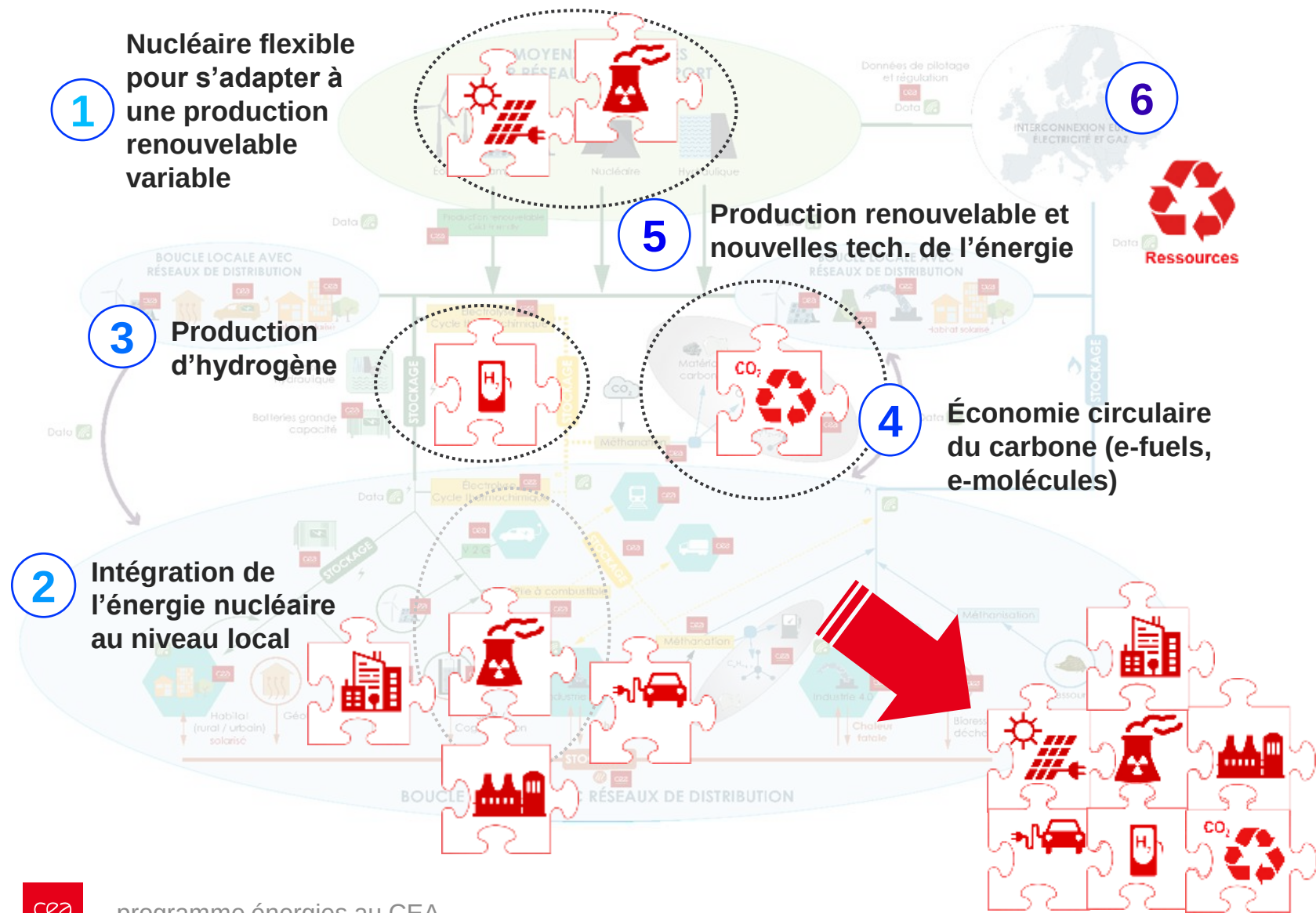
**Réseaux intelligents**  
digitalisation et instrumentation,  
demande pilotée

**Economie circulaire** matières,  
matériaux avancés, carbone

## CONDITIONS DE RÉALISATION :

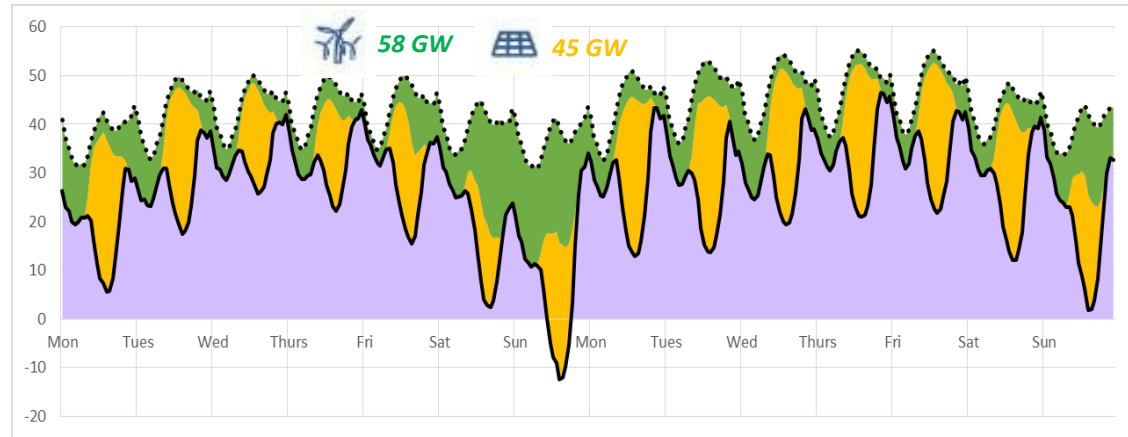
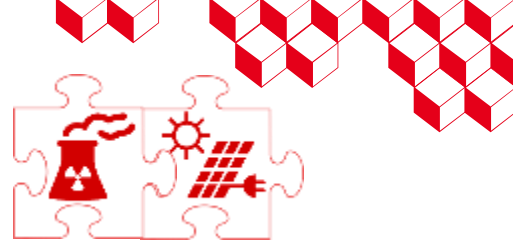
- Une « convergence » nucléaire et NTE
- Des innovations technologiques
- Des modèles industriels & économiques / régulation
- Un volet sociétal (diffusion, adhésion et appropriation)

# Convergence nucléaire / renouvelable pour accélérer la transition énergétique



- 1 Flexibilité du nucléaire
- 2 Production nucléaire au « niveau local » (SMR ou AMR)
- 3 Production d'hydrogène
- 4 Economie circulaire du carbone
- 5 Production renouvelable et NTE (technologies & réindustrialisation)
- 6 Economie circulaire (réduction dépendance matériaux)

# Renforcer la flexibilité du nucléaire pour répondre à la production variable des énergies renouvelables



La production variable d'énergies renouvelables a un impact sur la production de base (illustration hebdomadaire).

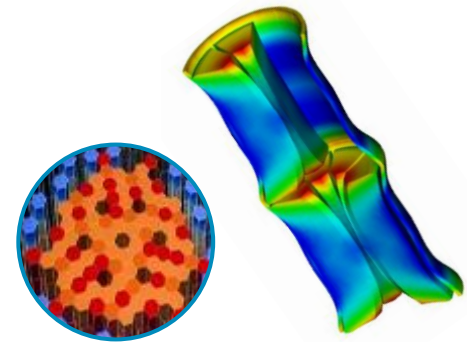
Source : EU Référence scénarios 2050

## Accroître la flexibilité du nucléaire

- L'énergie nucléaire est **dispatchable** et peut fonctionner de manière **flexible**
- L'augmentation des énergies renouvelables entraîne une demande accrue de flexibilité pour le système électrique et pour le nucléaire
- La production en base est challengée !

Focus sur la flexibilité  
(i) combustible flexible

(ii) stockage thermique





# Intégrer l'énergie nucléaire dans un système local



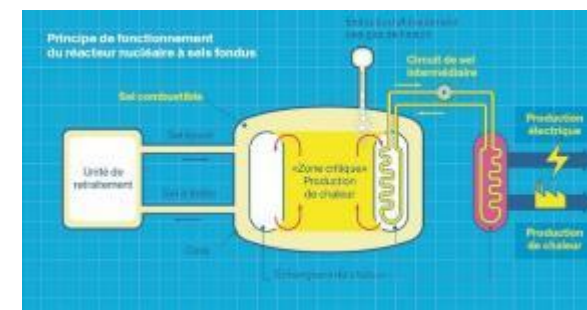
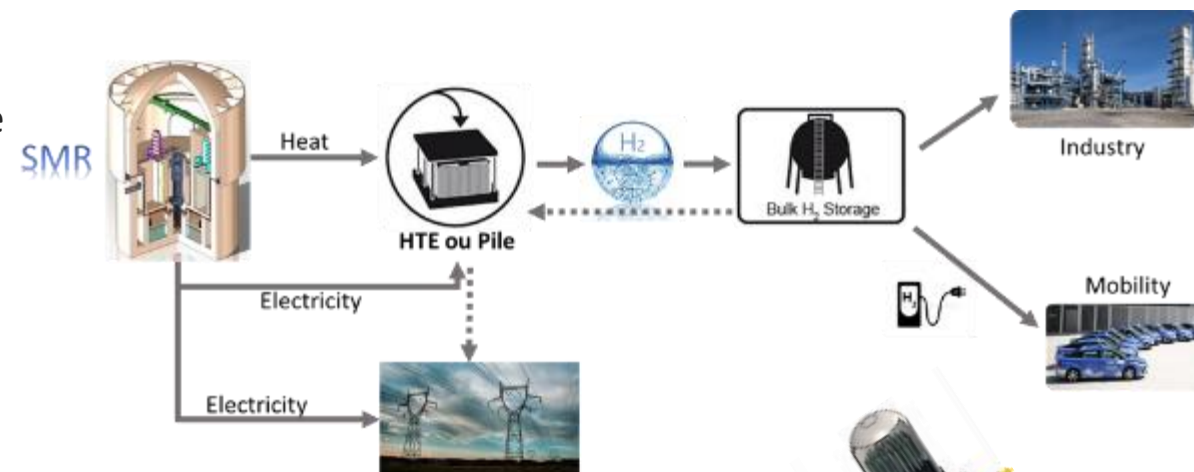
L'intégration de l'énergie nucléaire à l'échelle locale répond à plusieurs défis liés à la transition énergétique

- Limitation de la capacité d'accueil des réseaux électriques pour de grandes centrales nucléaires.
- Fourniture d'électricité aux sites isolés
- La production locale d'électricité peut être pertinente ou nécessaire pour équilibrer la production intermittente et éviter le renforcement du réseau.
- Remplacement des centrales au charbon

Le SMR et l'AMR offrent de nouveaux cas d'usage pour contribuer à la décarbonation d'autres secteurs.

- Chaleur pour les industries à forte consommation d'énergie,
- Réseaux de chauffage ou de refroidissement urbain,
- Production locale d'hydrogène pour des usages territoriaux (mobilité, industrie).

→ **Focus sur SMR et AMR (notamment SFR-Na et MSR) et système hybride/couplé**





# Réinventer le nucléaire

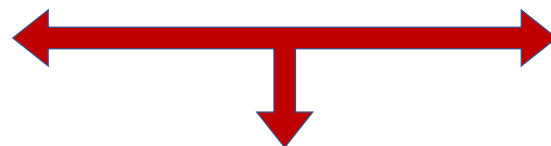
2

## Le CEA engagé dans des projets majeurs avec la filière nucléaire

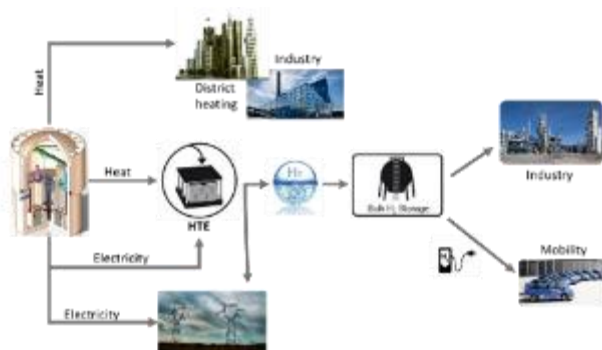
nuward



- SMR multi-usage by design
- Fin APS et passage en APD en 2023
- 2030 : premier béton de la centrale de référence (FOAK) en France
- Dimension EU en développement / Partenariat Industriel EU

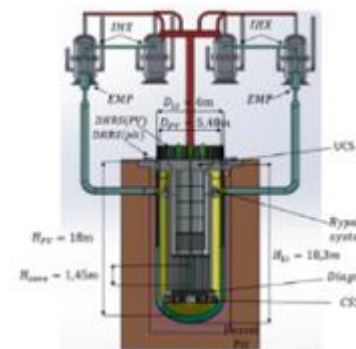
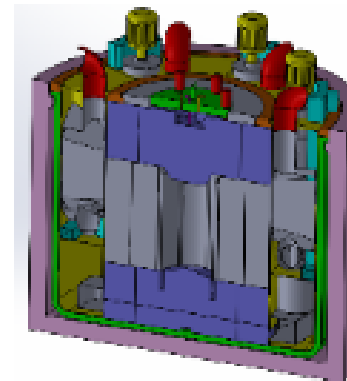


SMR  
pour des hubs énergétiques  
locaux



& la production massive  
d'hydrogène

Réacteur Sels Fondus (RSF)  
Projet ISAC



- Coopération entre les acteurs de la filière
- Briques techno. pour un RSF → conversion d'actinides
- R&D sur les principaux verrous



# Le CEA crée 2 startups dans le nucléaire

## 2 AMR de quatrième génération

**HEXANA** : AMR à neutrons rapides et caloporteur sodium couplé à un stockage thermique

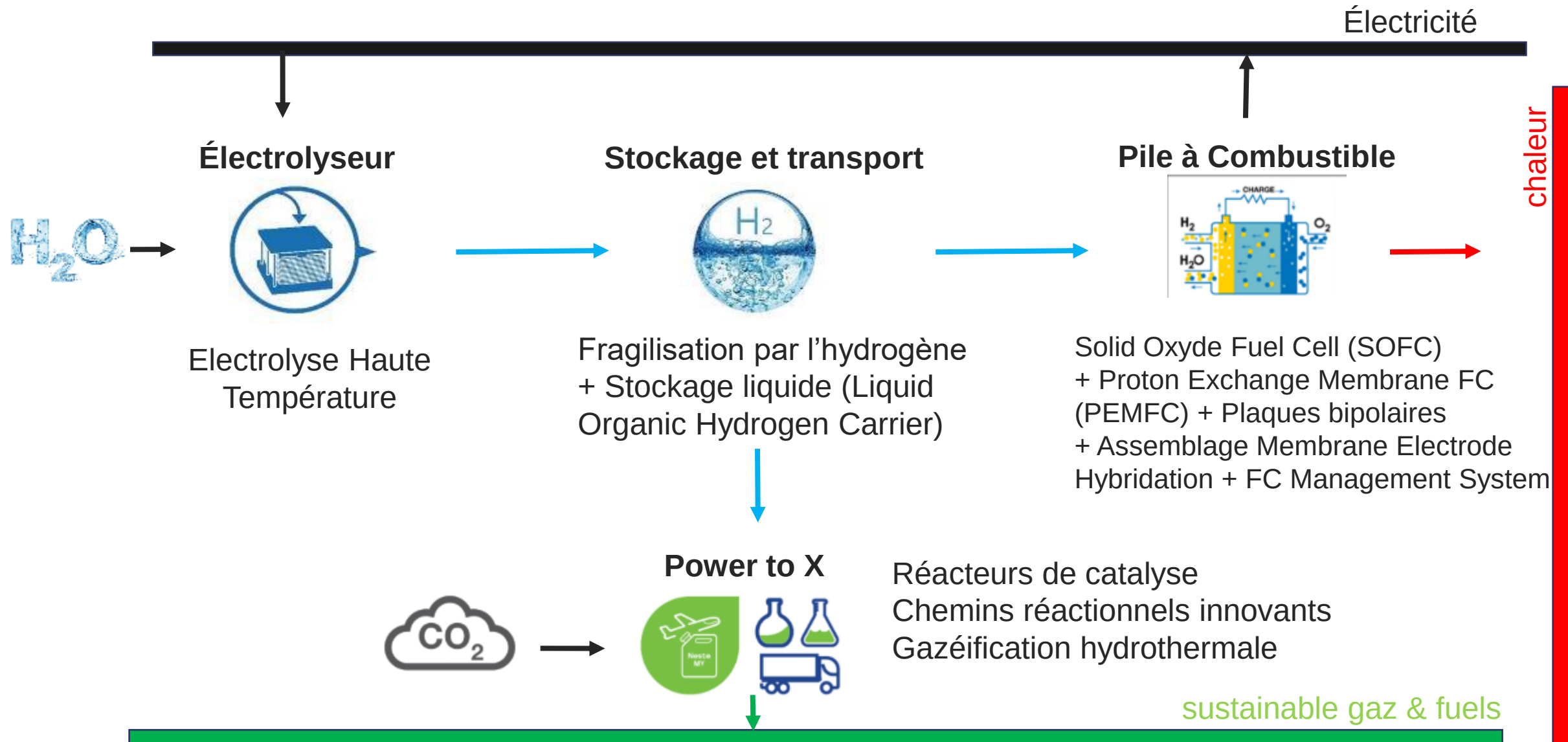
2 unités de 400MWth



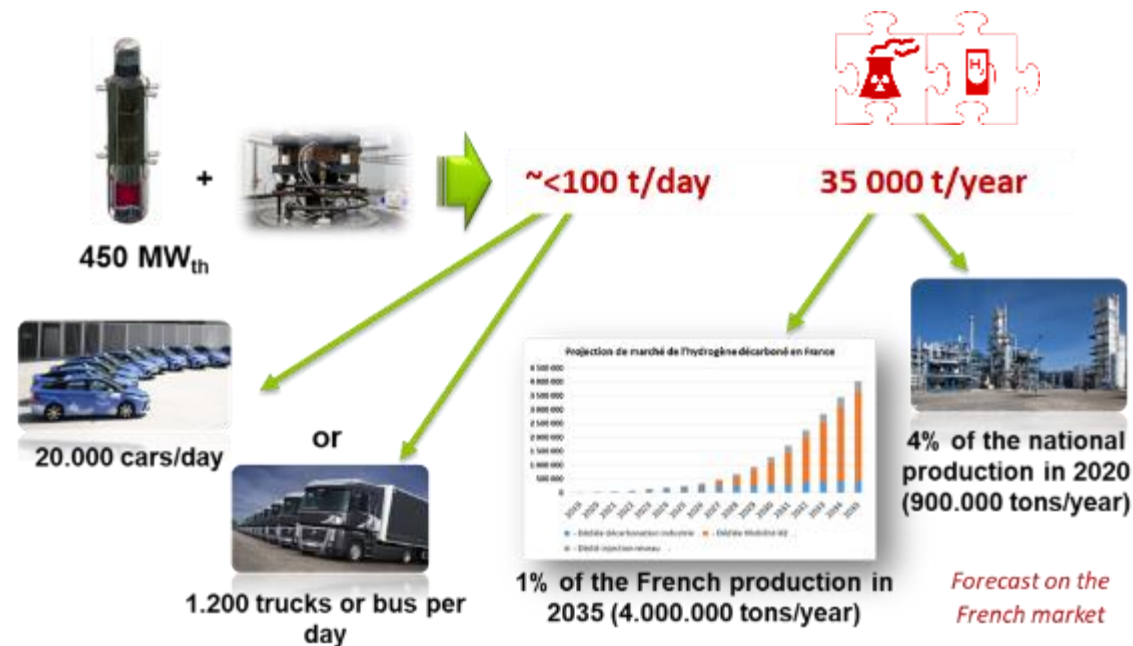
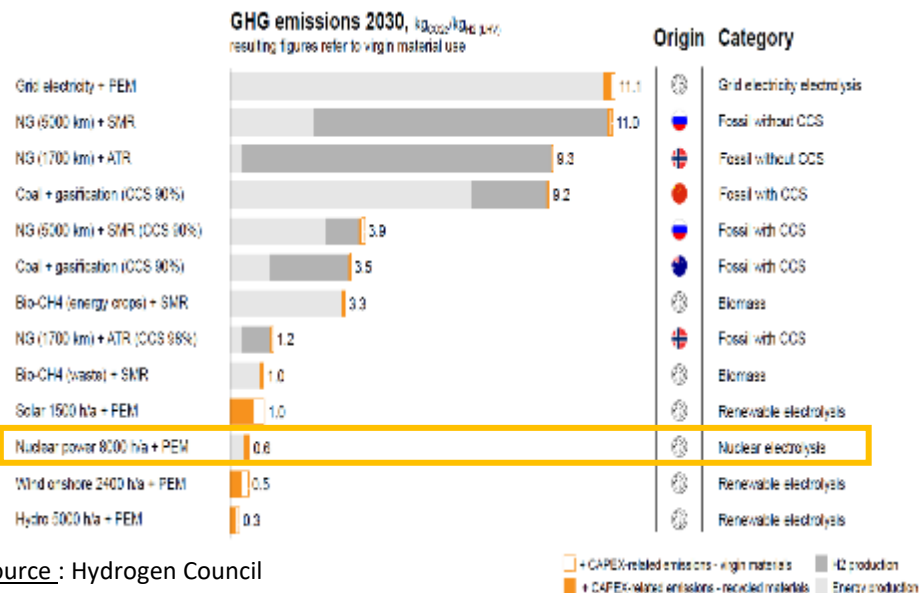
**STELLARIA** : réacteur à sels fondus  
Compacité : 250MWth dans 4 m<sup>2</sup>  
Combustibles envisagés : unranium, plutonium, MOX, actinides mineurs...

3

# Le vecteur Hydrogène: le CEA innove sur quatre composants clefs de la filière



# 3 Développer la production d'hydrogène aussi à partir de l'énergie nucléaire

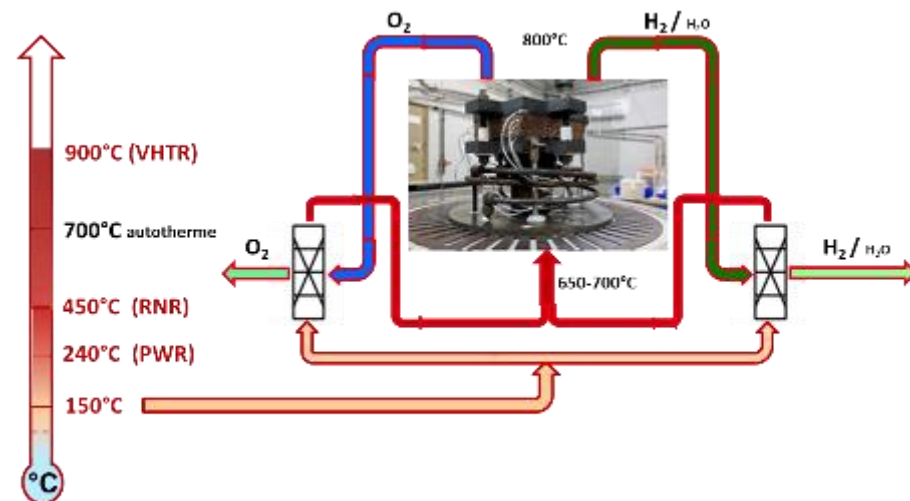


## Production d'hydrogène à partir d'énergie nucléaire

- Faibles émissions de gaz à effet de serre
- Plusieurs options techniques à l'étude dans le monde



Accent sur le couplage du SMR avec le SOEC (électrolyse à haute température)

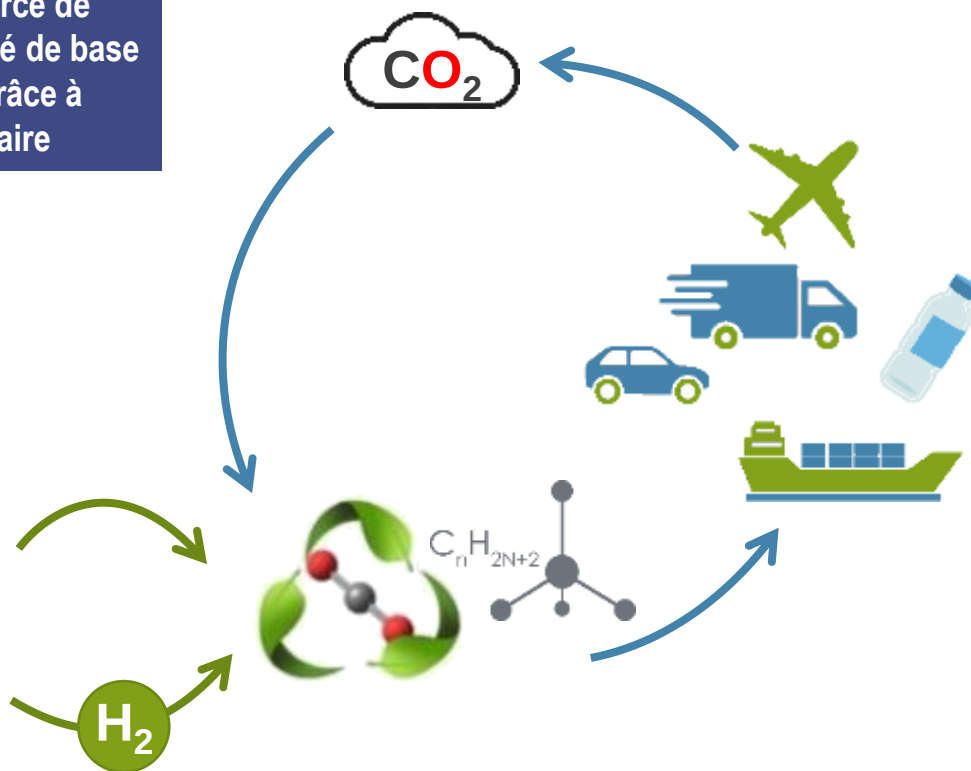
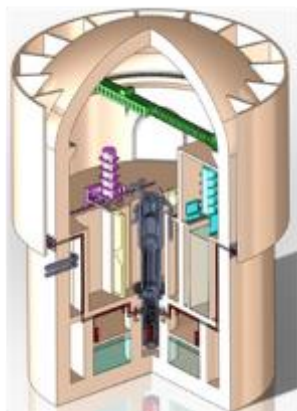




# Imaginer et inventer une raffinerie nucléaire pour les e-carburants?

4

Exploiter une source de chaleur et d'électricité de base et bas carbone grâce à l'énergie nucléaire



→ Focus sur le développement de briques technologiques et un programme de R&D pour la raffinerie nucléaire.



Les biocarburants 1G et 2G épuiseront les réserves de biomasse.

Les transports à longue distance ne seront pas assurés par l'électrification et l'hydrogène.

## Verrous:

- Carburants durables à partir de CO2 (e-carburants utilisant H2 et biofuels 3G)



Transport maritime  
=> Alternatives existantes



Transport lourd par route  
(longue distance)

- Molécules synthétiques (par exemple, méthane, méthanol, éthylène) à partir de CO2



# NTE : Réindustrialisation & souveraineté

## 5 – des opportunités pour la France et l'Europe



**Enjeu** = sécurisation des approvisionnements stratégiques pour système bas carbone

### BATTERIES

- Faire émerger sur le marché international une offre industrielle compétitive implantée en France et en Europe, traitant des différentes étapes de la chaîne de valeur (matériaux, anodes et cathodes, cellules)

### PV

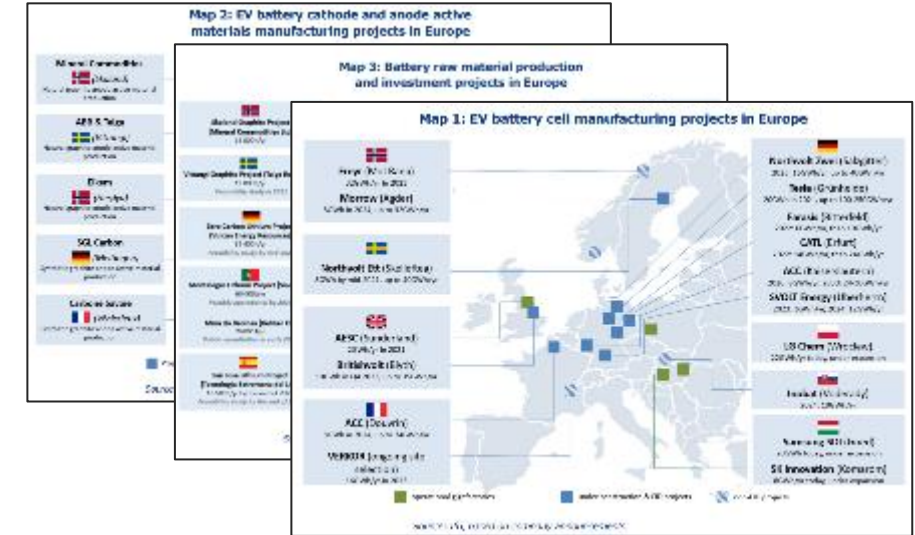
- Faire émerger des champions industriels innovants en matière de solaire photovoltaïque
- Réimplantation de tout ou partie de la chaîne de valeur photovoltaïque en France et Europe

### H2 (Electrolyse et Pile)

- Faire émerger sur le marché international une offre industrielle « électrolyseur » compétitive implantée en France
- Faire émerger une offre industrielle compétitive sur les piles à combustible pour des applications mobilité



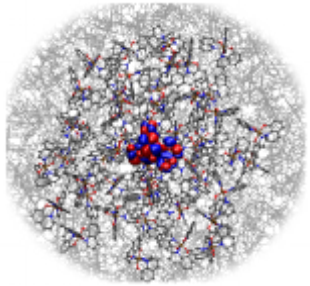
European Clean Hydrogen Alliance



# Les batteries: le CEA innove sur toute la chaine de la valeur



## Matériaux



Densité d'énergie  
Soutenabilité (matériaux critiques)  
Caractérisation avancée

## Cellules



Procédés de fabrication (tout solide)  
Soutenabilité (solvant)  
Design innovants

## Fin de vie



Procédés de désassemblage  
Procédés de recyclage  
Seconde vie

## Systèmes



Modélisation multi échelle / multi physique  
Battery Management System  
Hybridation

# Le photovoltaïque: le CEA innove de la cellule à la fin de vie des panneaux



## Cellules



Hétérojonction HJT (ligne pilote)  
Topcon (capabilité)  
Tandem

## Modules



Haute performance (grands champs)  
Photovoltaïque « everywhere »  
Eco-design

## Fin de vie



Procédés de désassemblage  
Procédés de recyclage  
Seconde vie

## Systèmes

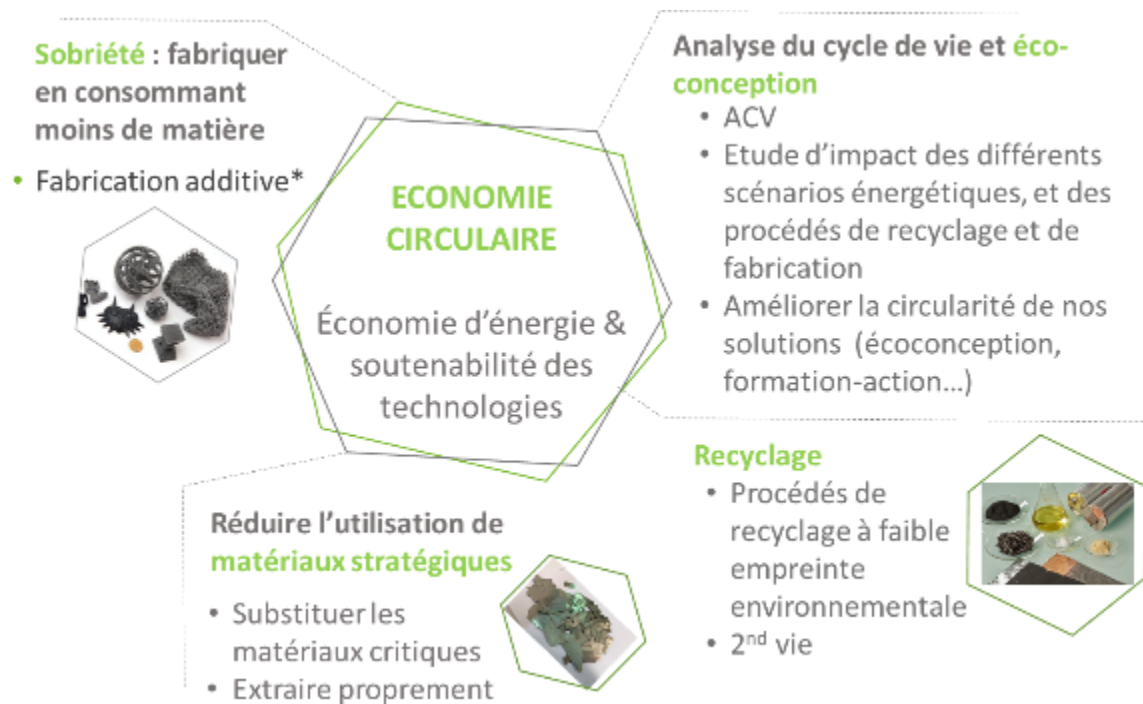
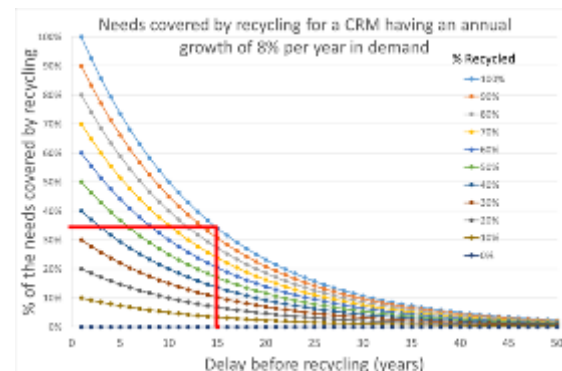


Modélisation multi échelle / multi physique  
Technico économie  
Intégration au réseau / aux applications



# Quels leviers face à ces nouveaux enjeux de sécurité d'approvisionnement & de souveraineté ?

- Amont : investissements capitalistiques dans des mines ?
- Recycler en fin de vie, nécessaire mais ...
  - réduire la dépendance vs être indépendant ?
  - Investissement dans un marché non stabilisé ?
- Développer une approche d'économie circulaire des ressources



# Programmes de recherche sur les énergies au CEA



Production  
d'énergie **décarbonée**  
(nucléaire, ENR)



Outils de **flexibilité**  
& **stockages**  
multi-vecteurs d'énergie



Cycle de matières  
& matériaux

Economie circulaire  
du **carbone**



## Nucléaire actuel et futur



Réacteurs  
Gén. 2 et 3



Cycle nucléaire



Réacteurs  
Gén. 4



Soutien aux activités  
de défense



R&D pour A&D



Installations

## Nouvelles Technologies de l'énergie



Production solaire



Stockage et solutions  
de flexibilité



Efficacité énergétique  
de systèmes  
complexes, réseaux

## Programmes communs



SMR  
et systèmes couplés



Procédés fabrication  
et recyclage - ACV



Simulation

## Programmes transverses



Recherche transverse  
amont



Economie circulaire du  
carbone



Technico - Economie

- ➔ 400 MEUR budget R&D sur les énergies, nucléaire et NTE (excluant le programme soutien défense et grands projets d'infrastructure comme RJH)
- ➔ 2200+ personnes
- ➔ ~250 brevets déposés par an
- ➔ 220 M€ de recettes externes , dont 70 % industrielles



**Merci de votre attention**