

STOCKAGE MASSIF DE L'ENERGIE :

OPTIONS ENVISAGEABLES ET VERROUS IDENTIFIÉS

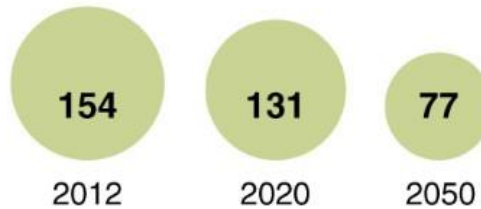
G. GEBEL ET H. BURLET

CEA-LITEN, CEA-GRENOBLE

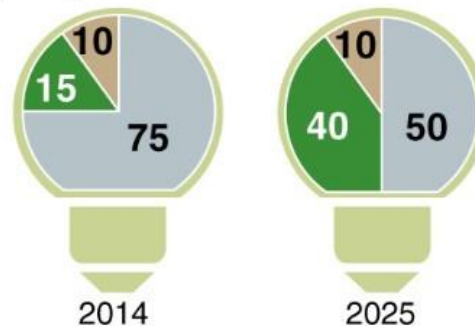
LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE pour la
CROISSANCE VERTE

Le projet de transition énergétique

Réduire la consommation énergétique
(en millions de tonnes équivalent pétrole)



Diversifier la production d'électricité
(en %)

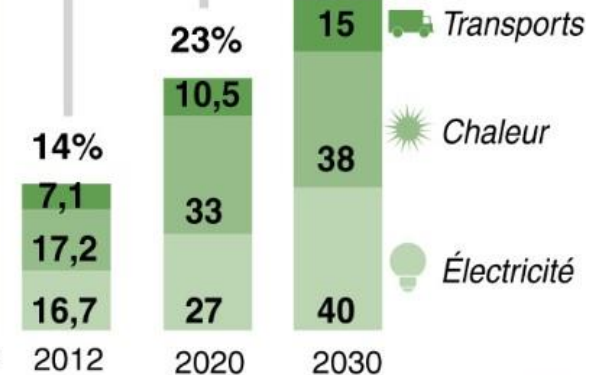


Augmenter la part des énergies renouvelables
(en %)

■ Renouvelable ■ Conventionnelle



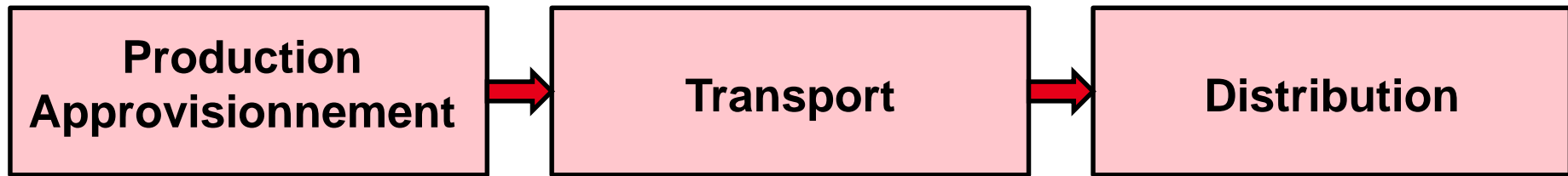
Répartition par filière de la part renouvelable (MTEP)



■ Renouvelable ■ Autres ■ Nucléaire

Source : ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie

Energies : Electricité, fossiles (pétrole, gaz); chaleur



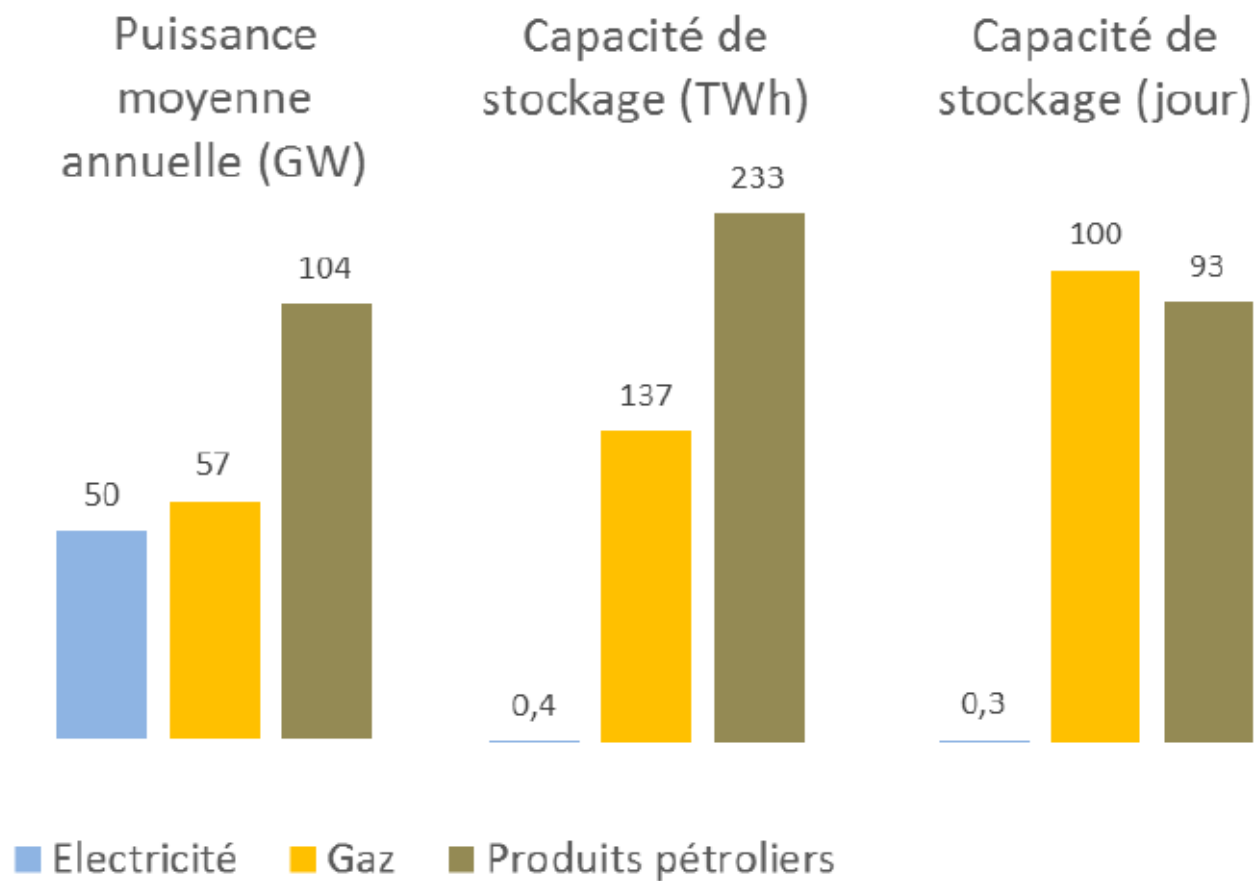
Networks in France							
	Main Transport	Regional Transport	Distribution Lines	Number of cities	Population Access	Number of Customers	Annual Energy Delivered
	(km)	(km)	(km)				(TWh)
Electricity	47 630	52 580	1 332 000	36 000	100%	35 000 000	550
Gas	8 110	29 107	193 340	9 461	77%	11 000 000	470
Heat	0	0	3 600	350	6%	2 100 000	23

Le stockage de l'énergie est indispensable :

Temps court : régulation du réseau

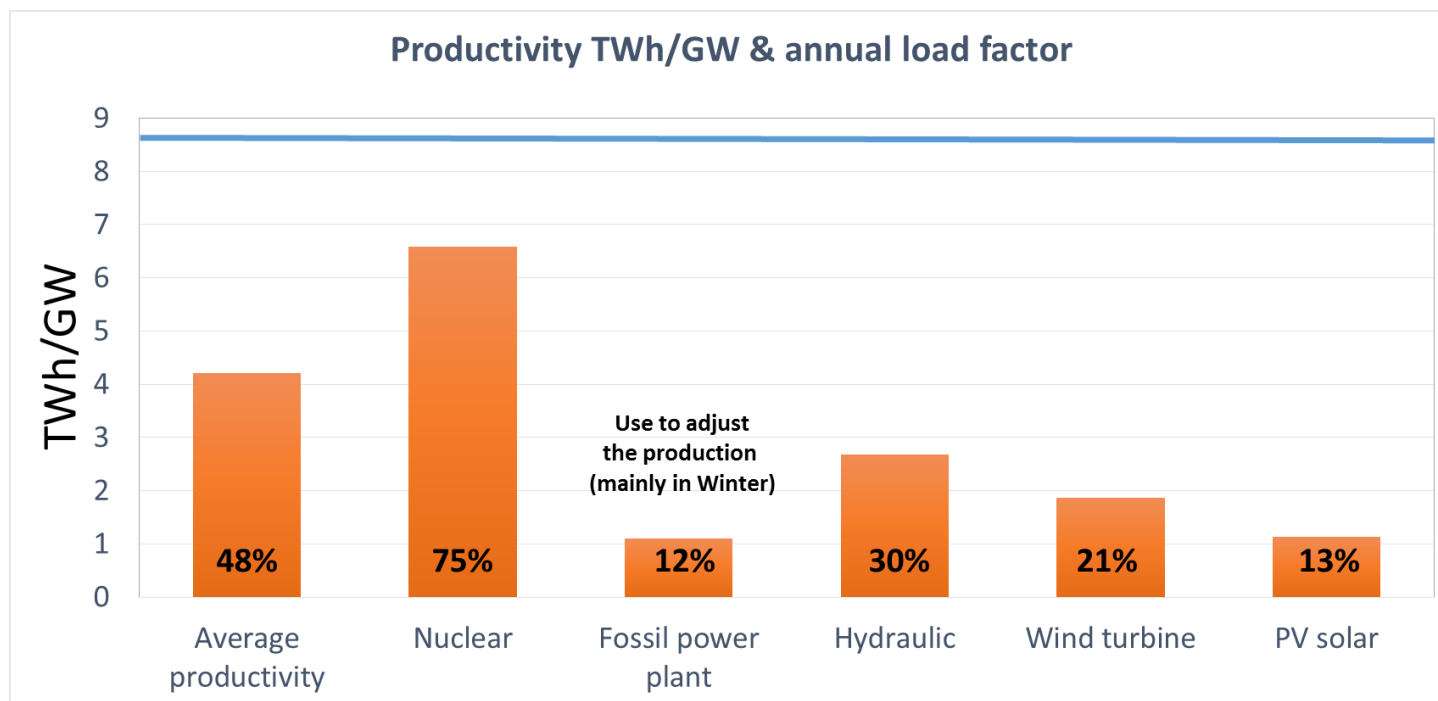
Temps moyen : adaptation production/demande

Temps long : stockage saisonnier



Transition énergétique :

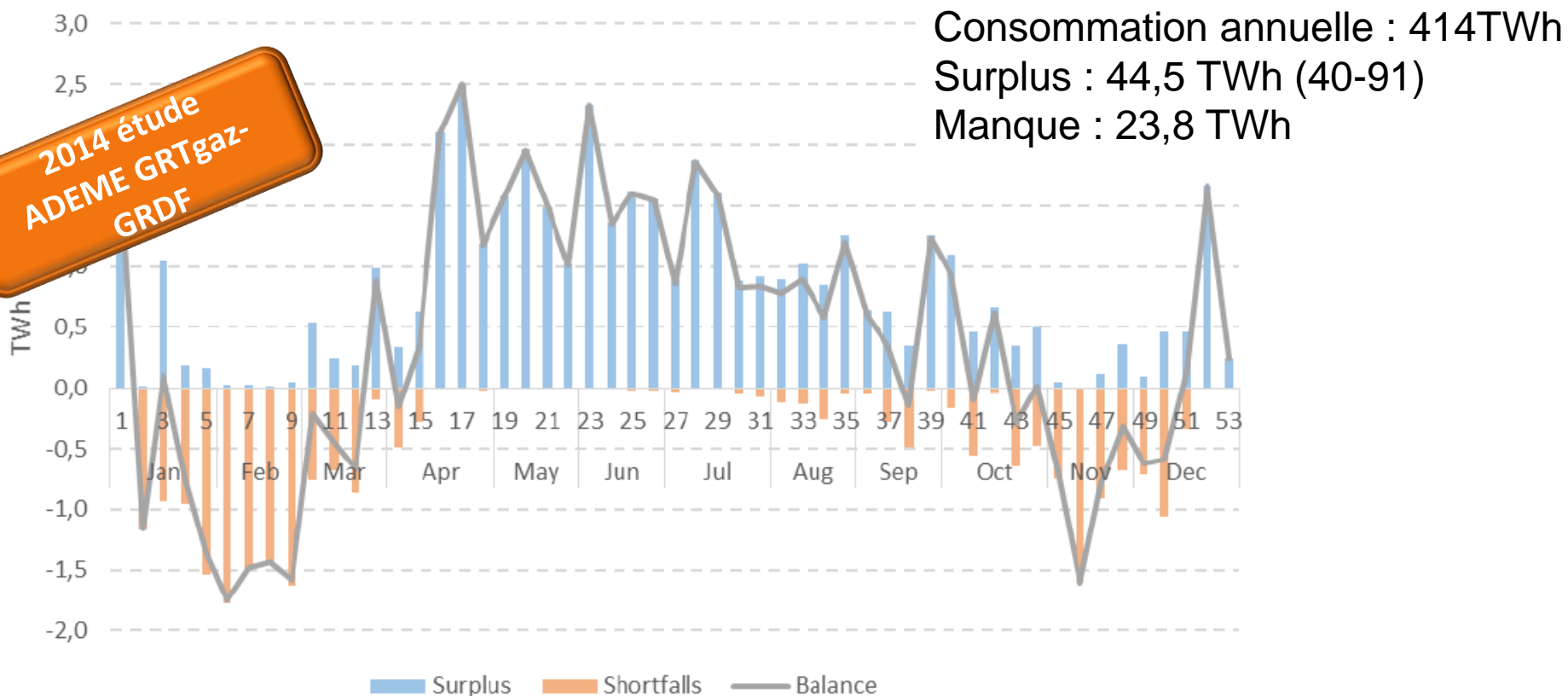
Introduction massive d'énergies renouvelables (intermittentes)



- Besoin de multiplier les unités de production
- Besoin massif de capacités de stockage

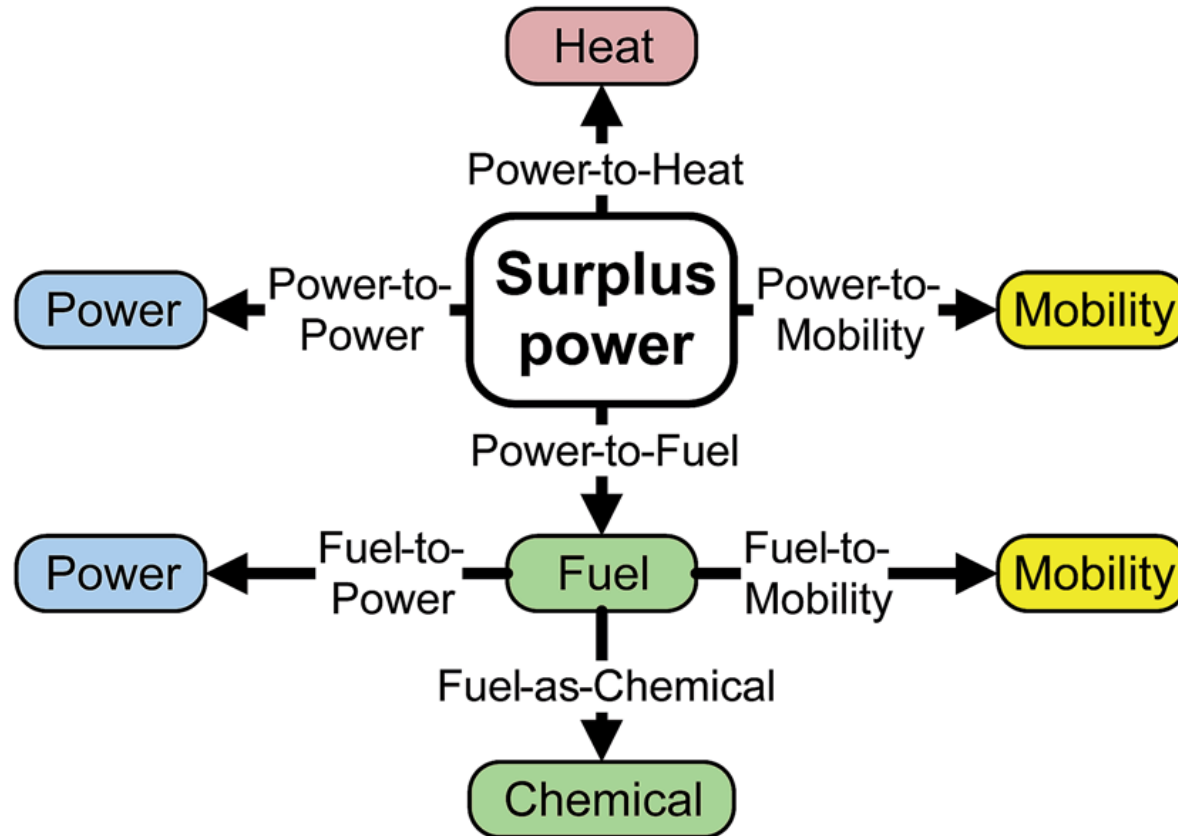
SURPLUS D'ELECTRICITÉ

45 % d'énergie renouvelable en 2050 (ADEME – scénario Median)



→ **Surplus fréquents sur plusieurs jours consécutifs**
(~ 36 TWh > 2 jours consécutifs)

QUE FAIRE DE L'ÉNERGIE EN SURPLUS ?



Stockage par pompage hydraulique (STEP)

Système très efficace (70 à 85%)

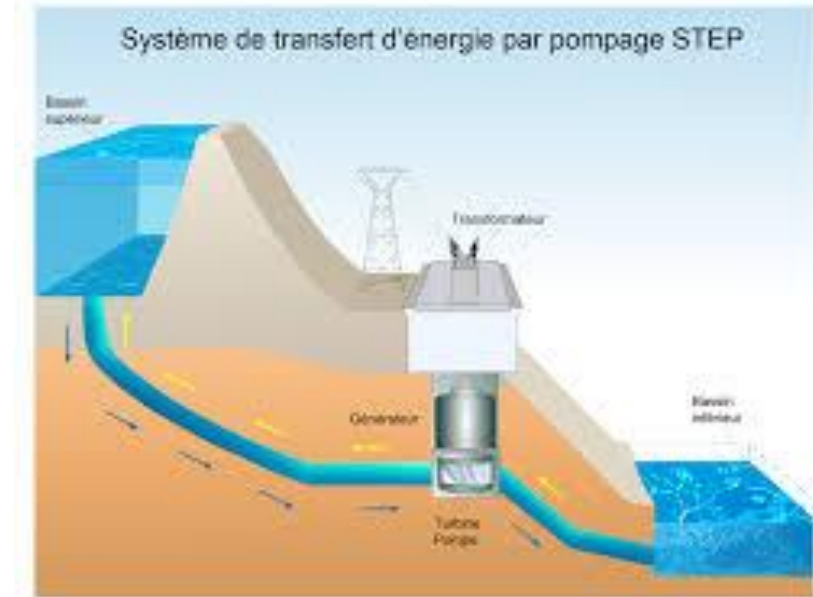
99% des capacités de stockage au niveau mondial (> 120 GW)

France \approx 5 GW

Problème :

Difficile d'étendre la capacité de stockage

- nombre de sites disponibles (\rightarrow μ STEP)
- acceptabilité sociétale
- délai de construction



Stockage d'air comprimé (CAES)

Solution en fort développement

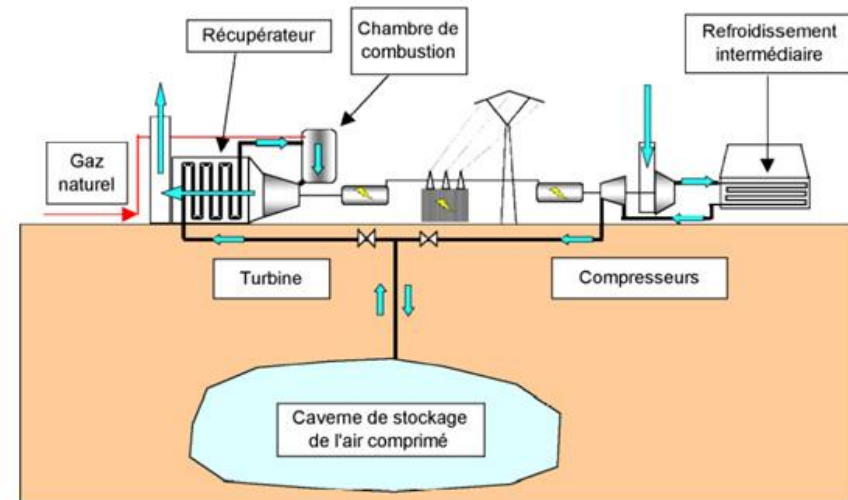
Efficacité énergétique assez faible $\approx 40\%$

Problèmes :

Echauffement du gaz lors de la compression
→ Systèmes adiabatiques

Nombre de sites disponibles (cavernes, anciennes mines,...)
→ sites sous-marins

Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé



Stockage de chaleur sensible (eau, huile, roches)

Ballons d'eau chaude

Simplicité et efficacité

40 à 80 kWh/m³

Aérien ou enterré (à proximité)



Stockage de chaleur latente

Matériaux à changement de phase (MCP) Temps

Recherches en cours : Matériaux efficaces et peu onéreux

Stockage thermochimique

Hydratation-deshydratation de composés

Energie décentralisée

Sites isolés, autoconsommation

Coûts élevés, risques importants de coupures



Energie centralisée

Mutualisation des coûts et des risques

Problèmes : Coût, durée de vie, autodécharge, gestion du système



Mobilité électrique

Fort développement du parc

Objectif très moteur pour la recherche

Coût, autonomie, vitesse de charge, durée de vie, sécurité,...



Batteries Acide-Plomb, NiCd, Ni-MH,

Systemes éprouvés

Ex: unité Pb à Chino (USA) = 40MWh/10MW

Mais : présence de plomb, Cd, Ni, ...
et capacité très limitée

Batteries Sodium-soufre

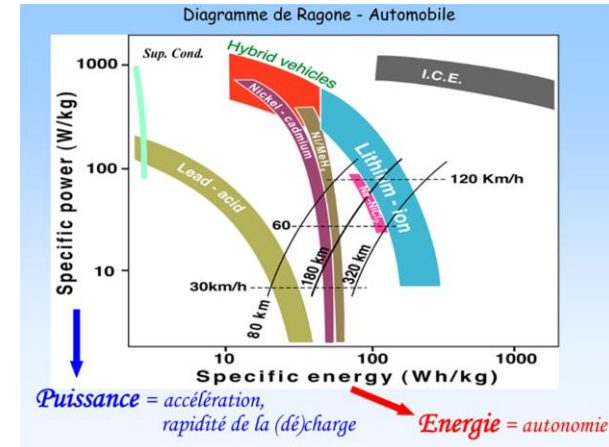
Fonctionnement à haute température (300-350°C)

Stables et efficaces (85%) mais forte autodécharge, sensibles décharges profondes

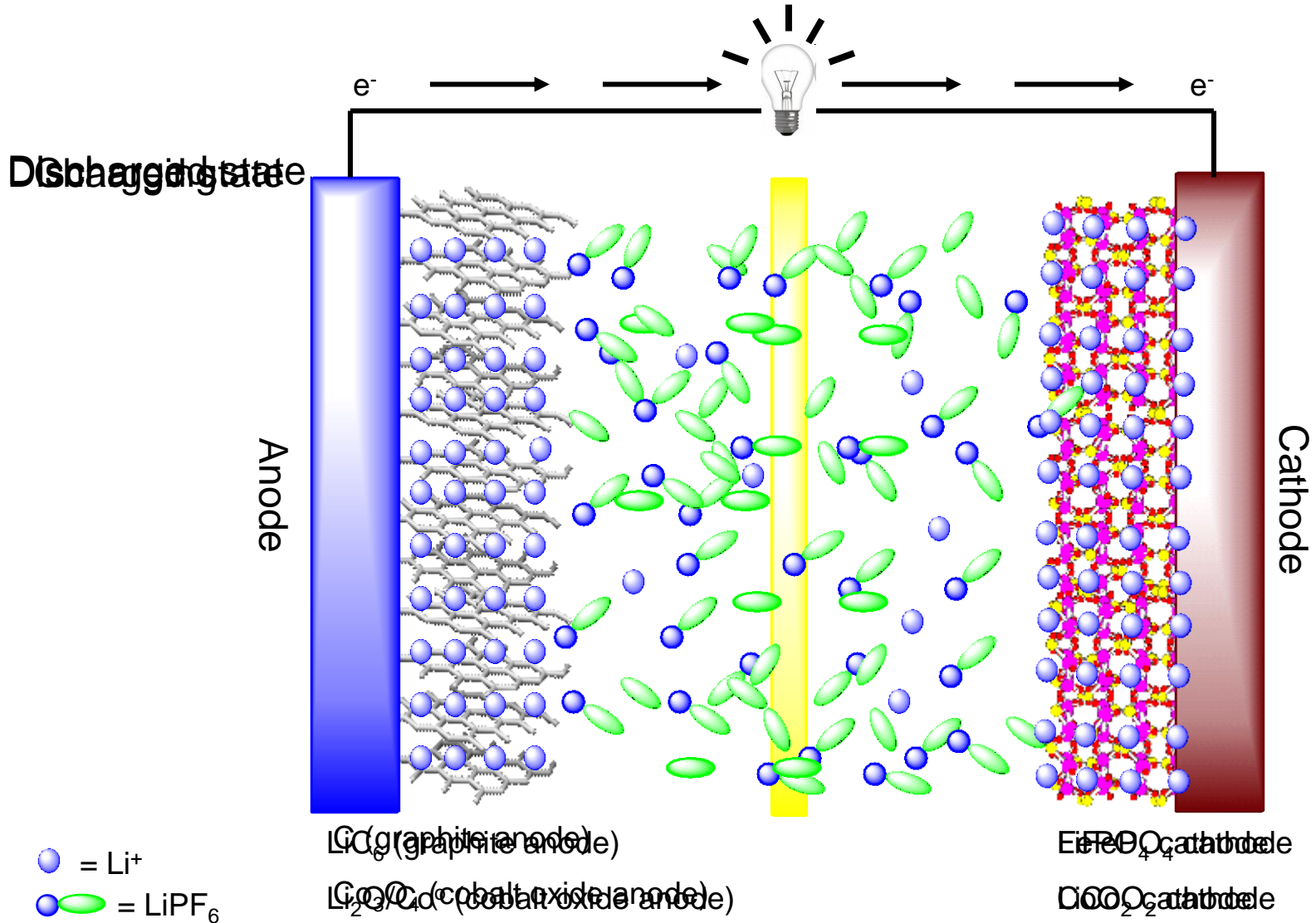
Batteries lithium

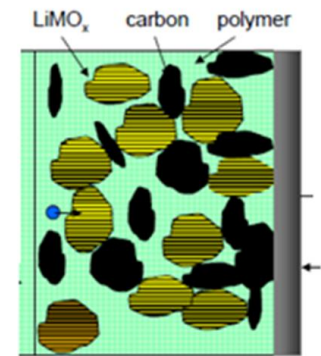
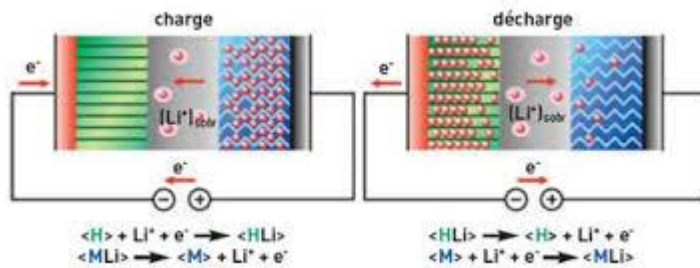
Fort effort de recherche piloté par électronique portable et marché automobile

Mais coût très élevé et problèmes à résoudre :
sécurité, autodécharge, vieillissement



BATTERIES LITHIUM





Performance, stabilité et sécurité :

Nouveaux composés d'insertion (\rightarrow 5V)

Nouveaux électrolytes liquides, polymères, gélifiés, solides
(couches d'interface : la SEI)

Additifs, séparateurs, liants,...

Structure des électrodes (nanoparticules)

Compréhension vieillissement (calendaire, en fonctionnement)

Système complet et gestion thermique (BMS)

BATTERIES POST-LITHIUM-ION

Lithium Soufre (Li-S):

2 fois plus d'énergie que les Lithium-ion

Mais : solubilité des polysulfures

Lithium Air (Li-Air):

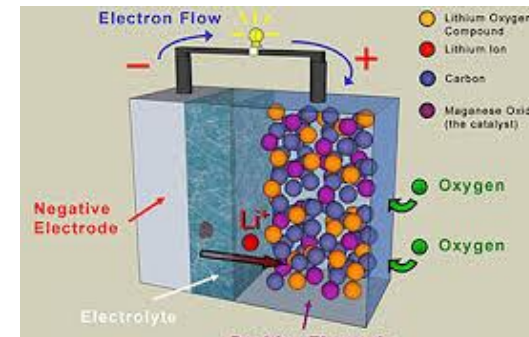
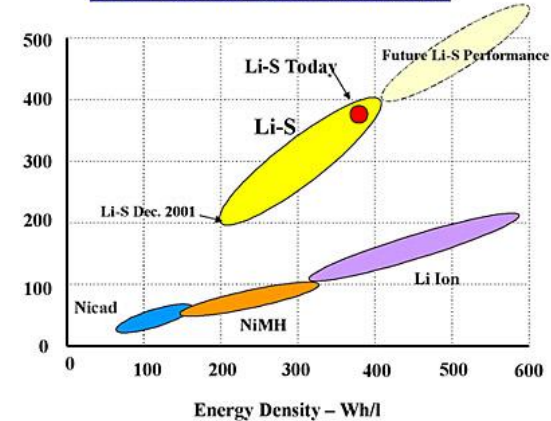
10 fois plus d'énergie que les Lithium-ion

mais prototypes (problèmes d'interfaces)

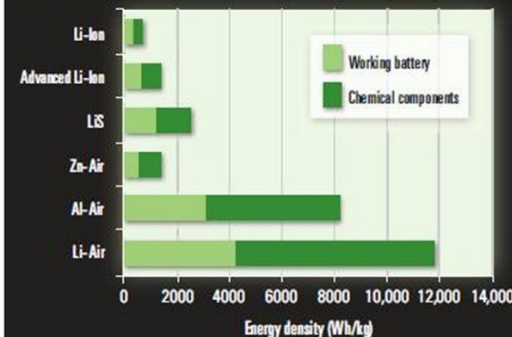
Sodium Ion (Na-ion):

Substitution du Lithium pour diminuer les coûts et assurer l'approvisionnement

Li-S vs. Other Cell Chemistries



THEORETICAL POTENTIAL OF BATTERY MATERIALS



Solution idéale pour stockage massif :

Cellules électrochimiques classiques

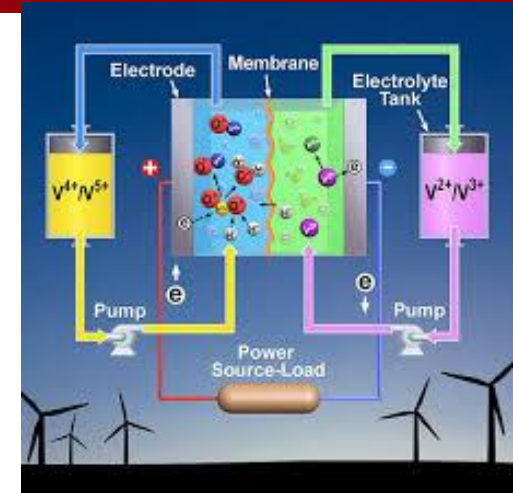
Capacité de stockage liée à la dimension des réservoirs

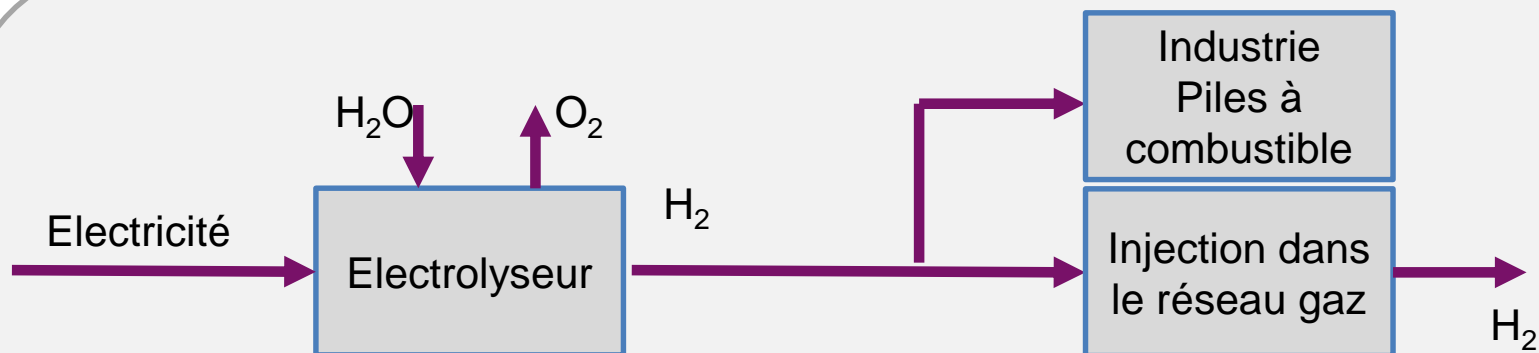
Mais :

Electrolytes à base d'oxydes de vanadium ou d'acide bromique

Membranes onéreuses (type Nafion)

Recherche : Nouveaux couples redox et nouvelles membranes





Electrolyseurs :

Alcalin (AWE)

Basse température à membrane (PEMWE)

Haute température à oxyde solide (SOEC)

Efficacité : de 70 à 80%

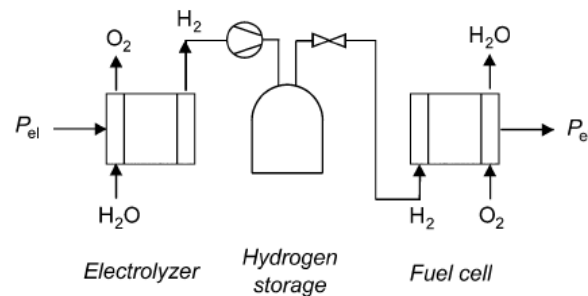
POWER-TO-GAS AND GAS-TO-POWER

Power-to-H₂ and H₂-to-Power :

Ex : plateforme Myrte en Corse

Problème rendement global (compression)

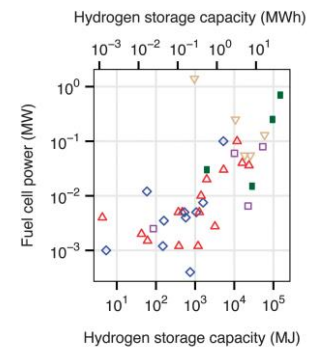
Envisageable pour les îles et sites isolés



Power-to-Gas and Gas-to-Power :

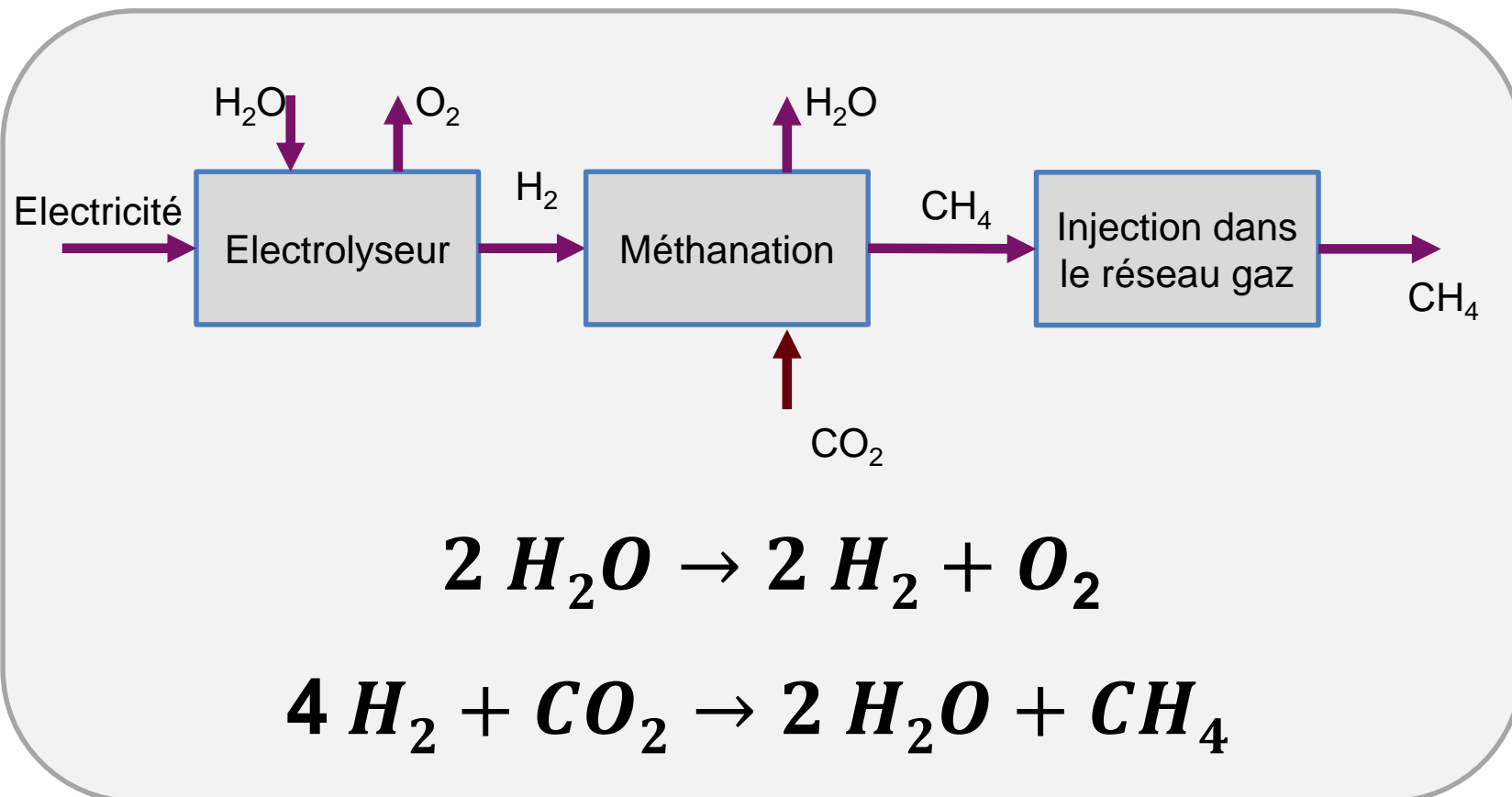
Rendement global beaucoup trop faible et coût trop élevé

Solution non viable industriellement



Electrolyzer-Fuel Cell Combination			
▲	AWE-PEMFC	▼	AWE-ICE
◇	PEMWE-PEMFC	□	Other
■	AWE-CHP		

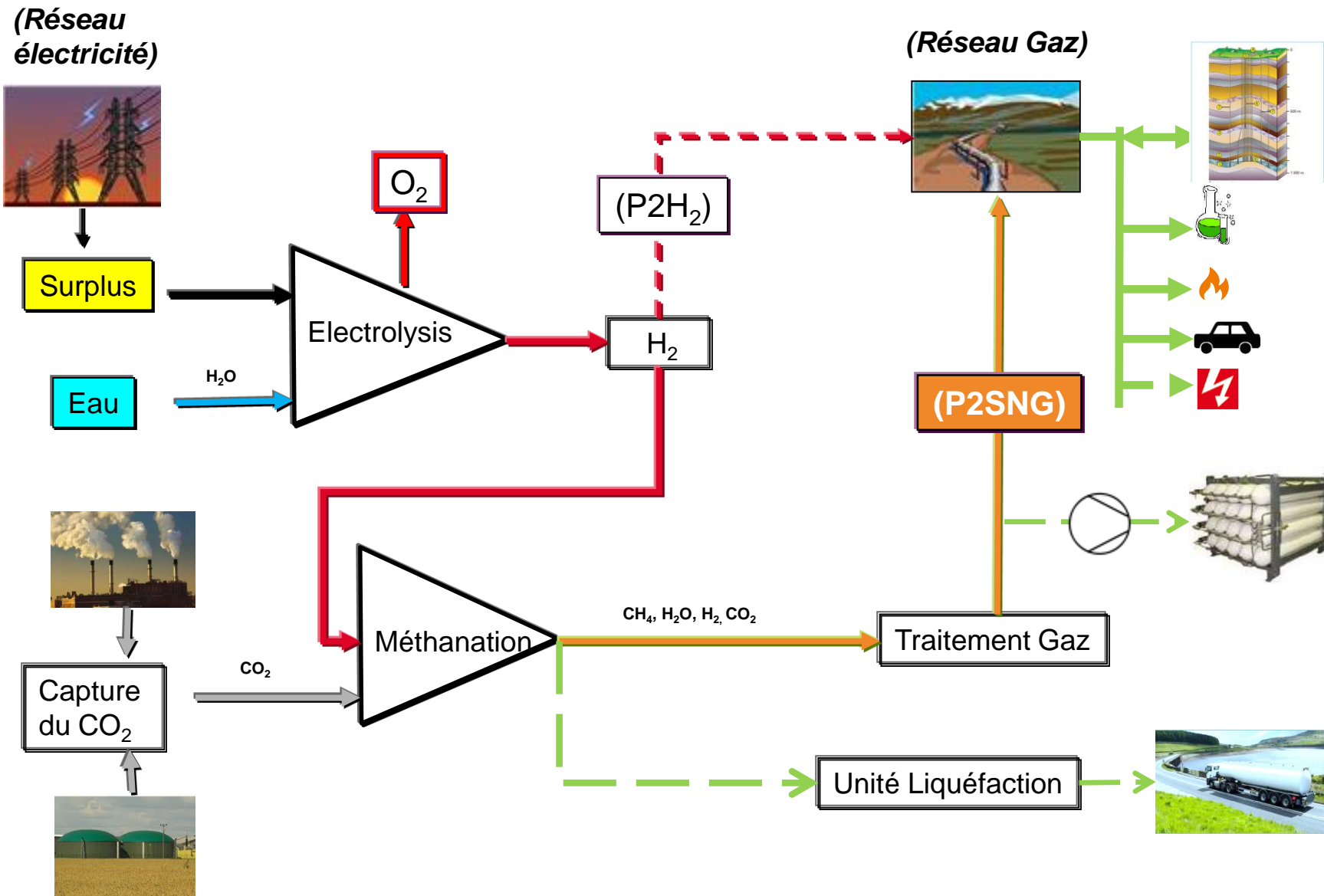
POWER-TO-GAS : PRODUCTION DE GAZ DE SYNTHÈSE (SNG)



Densité d'énergie CH_4 (vol) (36.1 MJ/Nm³)
3 fois plus que H_2 (10.8 MJ/Nm³)

Efficacité: de 50 à 60%

LE POWER-TO-GAS UN SYSTÈME COMPLET





Unité de méthanation

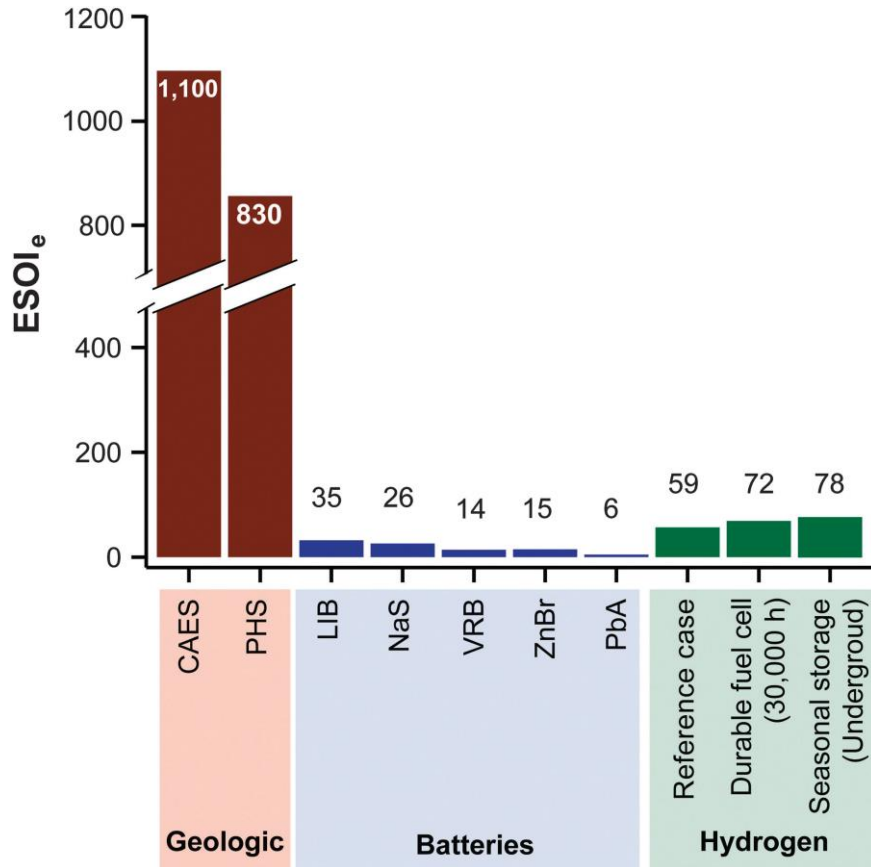
Démarrage du projet en cours

0.5 MW_{él} H₂

0.5 MW_{él} CH₄

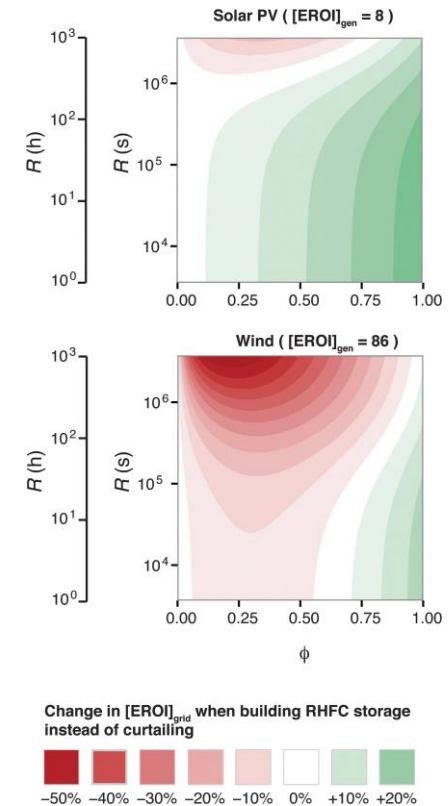
2018 - Injection dans le réseau gaz

RENTABILITÉ DES DIFFÉRENTES SOLUTIONS DE STOCKAGE



ESOI = Energy stored on invested

Rapport coût/bénéfice pour stockage H₂

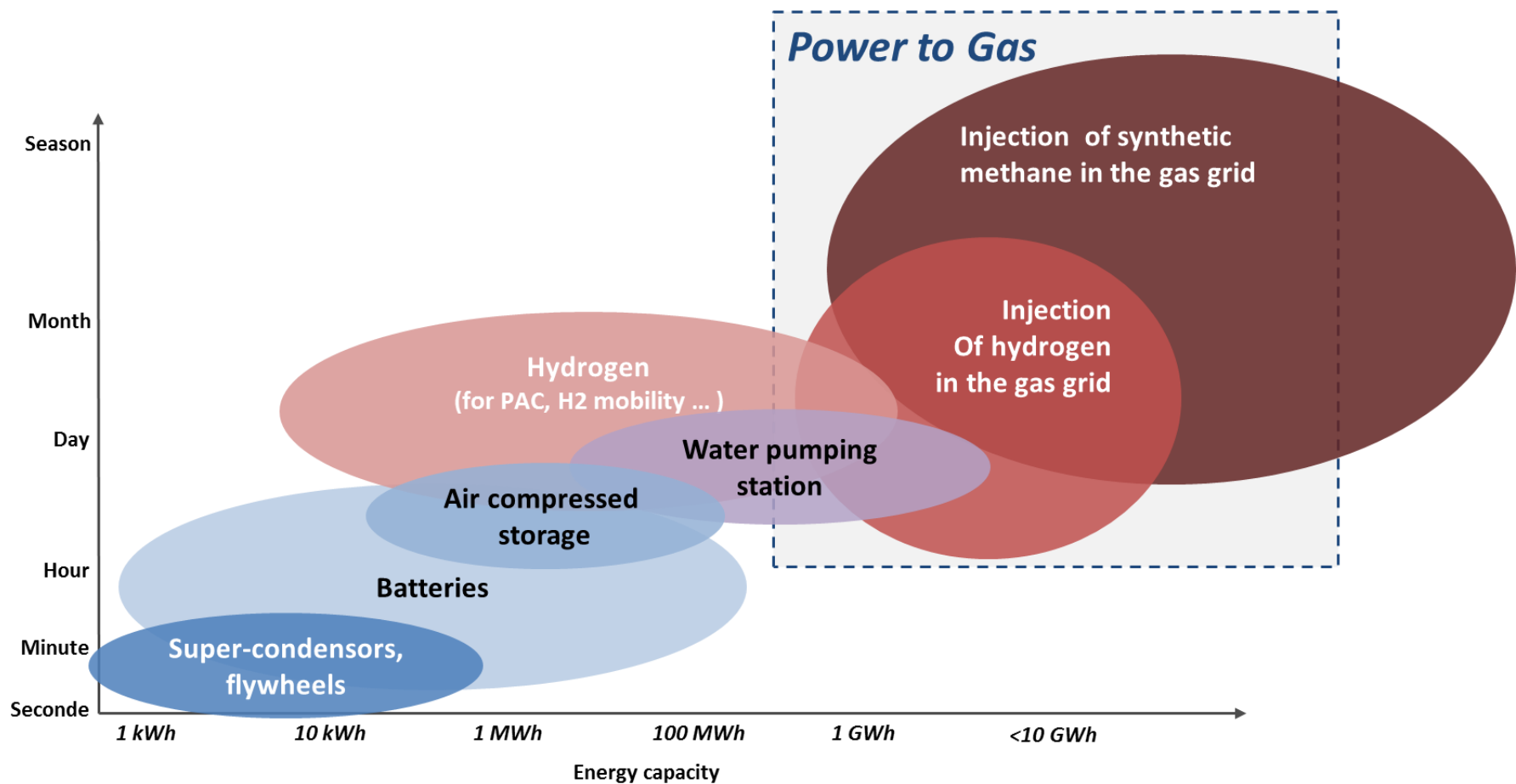


Φ = rapport de dérivation

R = Energy to power ratio

EROI = Energy return on investment

Fonction de la durée et de la quantité d'énergie



Transition énergétique et nouveaux usages

Besoin accru de stockage massif

Besoin de penser global (Electricité, Chaleur, Gaz, ...)

Besoin de penser territoires et interconnexion des réseaux

Besoin de penser différenciation des solutions

Besoin de penser degré de maturité

Stratégie de recherche

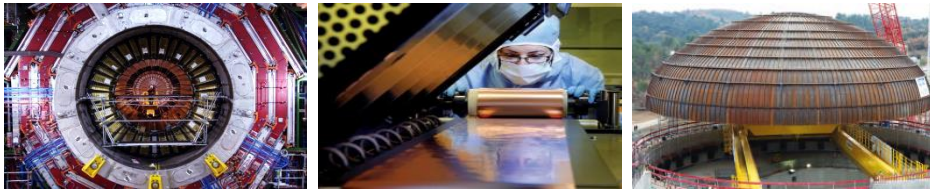
Penser à la fois mobilité et stationnaire pour baisser les coûts, bénéficier des études et envisager une deuxième vie des batteries

Et les physiciens dans tout cela ?

La gestion d'un réseau avec prise en compte du stockage est un phénomène complexe pouvant devenir chaotique.

Sujets plus ou moins matures mais besoins de compréhension à la fois des mécanismes élémentaires mais aussi phénomènes couplés.

Merci pour votre attention



FROM RESEARCH TO INDUSTRY



French Alternative Energies and Atomic Energy Commission

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre de Grenoble | 38054 GRENOBLE Cedex 09

Etablissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019

Direction de la Recherche
Technologique
Liten