

Energies du futur et ruptures technologiques

P. CLEMENT

- Nucléaire
- Renouvelables
- « Fossiles »
- Quelles ruptures ?

Mise en œuvre : *en cours* *avant 2050* *2050 et au delà*

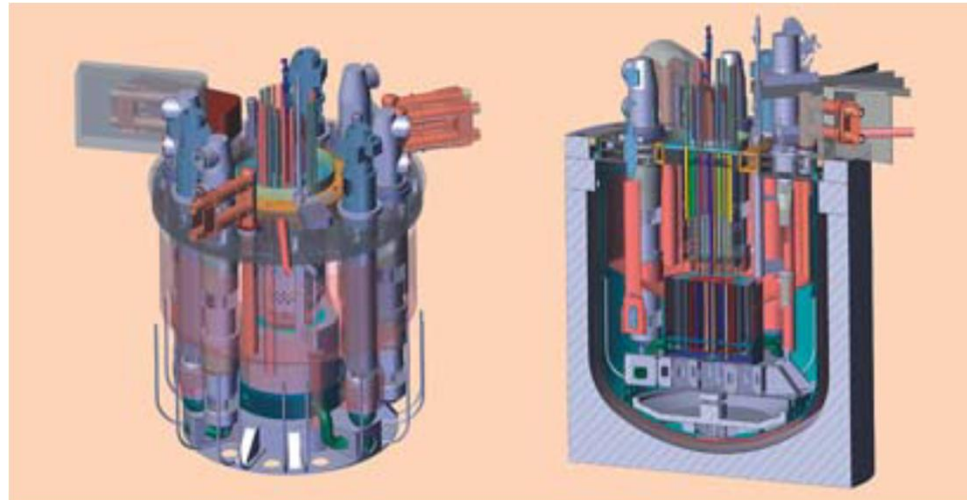
Energie nucléaire du futur

- Réacteurs de fission (génération IV)
 - ✓ Filière U- Pu
 - ✓ Filière Th
- Réacteurs de fusion nucléaire
- Cogénération nucléaire

Forum Génération IV (13 pays + Europe):

concevoir des réacteurs plus sûrs, plus économes, plus résistants à la prolifération et aux agressions externes

- 6 concepts retenus en 2002...
- La France choisit le réacteur à neutrons rapides refroidis au sodium (Retour d'expérience Phénix- Superphénix) :
 - Etude d'un démonstrateur industriel de 600 MW: ASTRID * pour une mise en service industriel avant 2050

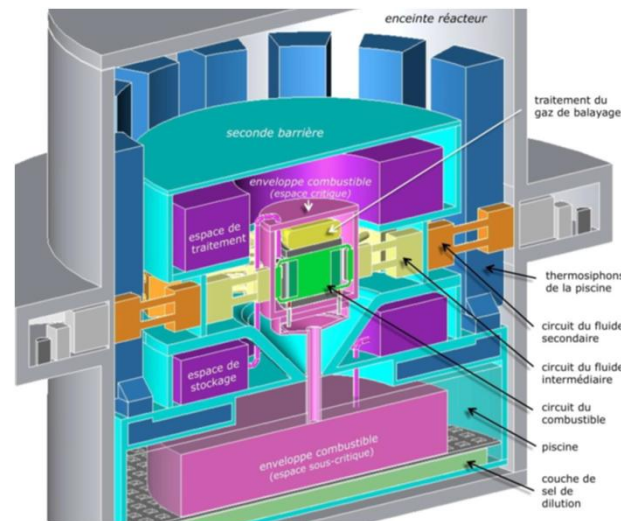


* *Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration*

Réacteurs à sels fondus : la filière Thorium

- Un des 6 concepts retenus en 2002...
- Étudié par la Chine, l'Inde, le Canada, la Norvège...

*Schéma d'un réacteur
à sels fondus*



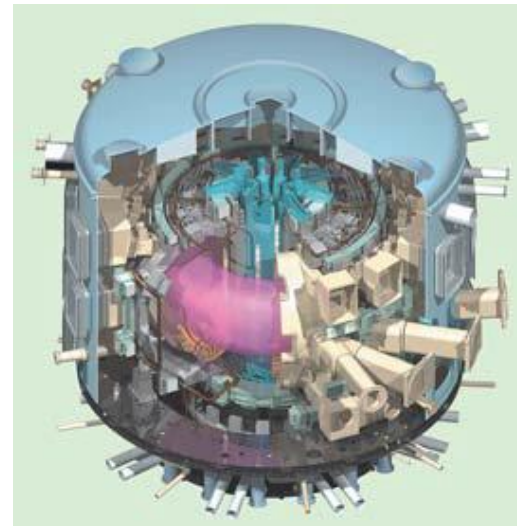
➤ Nécessite de développer un nouveau cycle du combustible

Les réacteurs à fusion nucléaire

- La fusion d'atomes légers (isotopes de H) produit beaucoup plus d'énergie que la fission d'atomes lourds
- Etudes internationales :

ITER (35 pays) 500 MW

Schéma du tokamak ITER

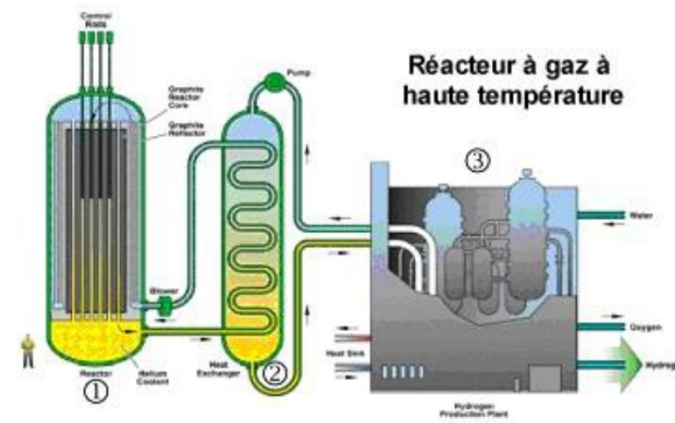


DEMO 2000 MW

- Nombreux défis et obstacles à maîtriser d'ici 2050
- Premiers réacteurs industriels pas avant 2^{ème} moitié du siècle

Cogénération nucléaire

- Production de chaleur pour les sites industriels
 - Fourniture de vapeur entre 180 et 250°C
 - Consommation des procédés industriels = 100 TWh (essentiellement à base de fossiles) dont 22 immédiatement accessibles au parc nucléaire actuel
- Production d'hydrogène par réacteur à haute température



Futur des renouvelables

- Solaire Photovoltaïque
- Solaire Thermique
- Eolien
- Energies Marines
- Biomasse
- Géothermie

Solaire photovoltaïque : les voies de progrès

- Augmentation du rendement de conversion des modules

PV trackers



- Optimisation du cycle de vie

- Gestion de l'intermittence

Batterie redox à circulation



Solaire thermique : les voies de progrès

- Très fort potentiel de développement dans l'habitat:



- Centrales solaires à concentration (2 GW installés):



Prototype à miroirs de Fresnel

Un nouveau souffle pour l'Eolien

- Equipement prioritaire des sites isolés (iles) en minimisant le CO2 émis

Parc d'Eoliennes VERGNET en Nouvelle Calédonie



- Augmentation des rendements
- Gestion de l'intermittence
 - Couplage avec équipements hydrauliques (STEP)
 - Stockage massif d'électricité (4 milliards € par GW !)

Energies marines

- Hydroliennes : potentiel 1 à 3 GW
En France



- Usines marémotrices :
 - Peu de sites équipables mais fort potentiel
40 GW en baie de Fundy



- Énergie thermique des mers :
 - Équipement des côtes tropicales proches de grands fonds
 - Faible rendement (écart de température de 15 à 20 °C)

Biomasse : vert l'avenir ?

- Biocarburants du futur :

- Bois énergie

- Cultures énergétiques *gazéifieur PEGASE (CEA)*

- Micro-algues

- Partage et mobilisation des ressources :

- Pratiques culturelles

- Zone maritime côtière

- Injection de bio-gaz dans le réseau

Photosynthèse de triglycérides dans une algue verte

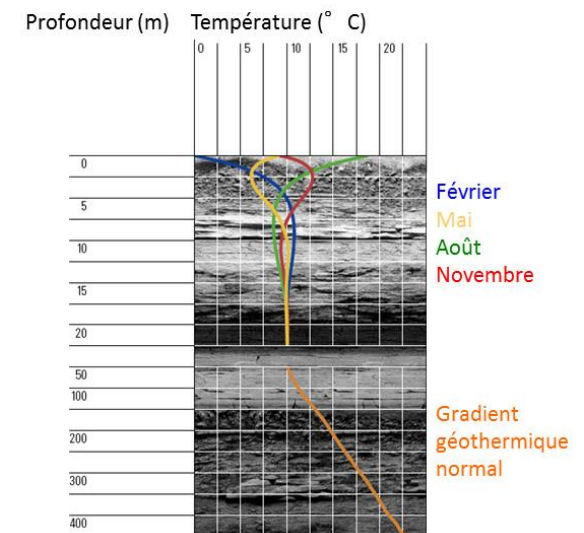


Géothermie

- Exploitation des sites hydrothermaux :
 - Chauffage habitations (Bassin Parisien)
 - Production d'électricité (Centrale de Bouillante en Guadeloupe)
- Hybridation solaire thermique- géothermie :
 - Extraction de chaleur du sous-sol l'hiver
 - Réchauffement l'été par capteurs solaires

Gradient de température du sous sol au cours de l'année

- Géothermie profonde :
 - Enhanced Geothermal System : pilote de Soult (Alsace)



Enterrés les fossiles ???

- ***82 % de l'énergie mondiale à base de fossiles, pratiquement inchangé depuis 50 ans !***
- CSC
- Gazéification in situ
- H2 natif

Capture et séquestration du carbone

- Solutions actuelles trop coûteuses (énergie, finance):
 - Impacts environnementaux du stockage mal connus
 - Aléas (séismes, transport, relâchement accidentel)
- Le meilleur compromis : forêts captant et séquestrant le Carbone autour de zones de fortes émissions :
 - Revégétalisation massive
 - Bio remédiation (cultures énergétiques sur sols pollués)

Gazéification in situ

- Exploitation des gisements de carbone fossiles:
 - Combustion partielle dans le gisement (injection d'O₂ et H₂O) pour récupérer du gaz, réinjection du CO₂ produit
 - Evite les contraintes de l'extraction mécanique, maximise les quantités d'énergie extraites en évitant la pollution de l'air par les particules fines
 - Conséquences sur le sous sol encore mal maîtrisées...

L'Hydrogène « naturel »

- Forages profonds, sources hydrothermales, cratons relâchent de l'hydrogène « natif » :
 - Gisements en Russie, Afrique, Amérique du nord et du sud, Philippines...
 - Comment exploiter ces gisements ? (Méthanation in situ)

Quelles ruptures ?

- Efficacité énergétique
- Mobilisation des ressources
- Economies de matière
- Nouveaux matériaux
- Sociétales

Augmenter l'efficacité énergétique

- Maximiser les rendements et les facteurs de charge :
 - Éoliennes sans rotor (systèmes oscillants)
 - Élargissement du spectre utile en PV
- Adéquation production - consommation :
 - Cogénération, coproduction, récupération
 - Minimiser les pertes d'énergie
 - Choix des sites optimisé (distances)
 - **Nouveaux moyens de stockage**
- Architecture systèmes :
 - Battery Management System (gestion électrique et thermique des packs batteries)
 - Génie logiciel dans les réseaux (gestion du mix énergétique)



Mobilisation des ressources

- Le mix énergétique doit d'abord s'appuyer sur la **disponibilité des ressources** :
 - Régime de vents
 - Durée et profil d'ensoleillement
 - Température, débit et nature de la source froide pour les systèmes à cycle thermodynamique
 - Non-concurrence d'utilisation des terrains agricoles ou des espaces maritimes
 - Ressources en matières premières minérales...

Economies de matière

- Très grande variabilité en fonction des technologies :
 - 0,3 à 4 T de Cu et de 100 à 400 T de béton par MW installé (éolien)
- Ressources minérales en voie d'épuisement : besoins d'ici 2050 supérieurs à ce qui a été extrait depuis l'origine de l'humanité
 - Notion d' « intensité matière » pour les moyens de production
 - Notion de « durée d'immobilisation » (réseaux, infrastructures)
- Impacts sur la qualité de l'air, de l'eau

Nouveaux matériaux

- Alliages plus légers, plus résistants, plus efficaces :
 - Gain de poids, en coûts de fabrication, d'utilisation...
 - Rendement amélioré (pérovskites en PV)
- Composants nanostructurés :
 - Batteries (Li- S), piles à combustible, électrolyseurs
 - Stockage d'hydrogène (hydrures), de chaleur
- Matériaux bio-inspirés :
 - Hydrogénases
 - Photocatalyseurs

Photoproduction bio-inspirée d'H₂



Ruptures sociétales

- **Modification des habitudes de consommation:**
 - Instaurer un « vrai » prix de l'énergie : sortie programmée des tarifs et obligations d'achat !
 - Vers une Contribution Carbone Généralisée !
- **L'énergie : un bien collectif au niveau mondial ?**
 - Accès à l'énergie des Pays en Voie de Développement
 - Tendre vers l'égalité de l'empreinte carbone pour chaque habitant de la planète
- **Autarcie énergétique : utopique ?**
 - Imaginer des scénarios et faire des expérimentations locales à échelle croissante...

MERCI DE VOTRE ATTENTION