

Des technologies compétitives au service du développement durable

Conférence du 12 novembre 2012

IESF-Groupes Energie

Jean Bergougnoux

La mission « Prospective technologique du CAS »

Trois secteurs : énergie, transport, bâtiment

Deux objectifs :

- ✓ Évaluer l'apport des progrès technologiques en terme de développement durable
- ✓ Apprécier la compétitivité de la France sur les sujets en cause aux niveaux scientifique, technologique et industriel

Deux préoccupations :

- ✓ Intégration systémique
- ✓ Datation réaliste de l'accès à maturité des nouvelles technologies

Horizons : 2030 2050

Le rôle important des technologies transverses

- ✓ Une technologie est un assemblage cohérent de méthodes et de « techniques élémentaires » relevant elles-mêmes de différentes disciplines ou technologies
- ✓ Parmi celles-ci, certaines « technologies transverses » sont omniprésentes : métrologie, modélisation, TIC, régulation, contrôle-commande et pour les plus nouvelles, nanotechnologies
- ✓ Les progrès réalisés dans les technologies transverses impactent directement les progrès réalisables dans les technologies spécialisés
- ✓ Leur maîtrise scientifique et technologique est un facteur clé de la « compétitivité technologique »

Quelques conclusions générales

- ✓ Deux horizons : 2030 et 2050
- ✓ Les trois phases : R&D, opérations de démonstration, déploiement à échelle industrielle
- ✓ Maturité technologique, maturité économique, maturité sociétale (ex : gaz de schiste)
- ✓ L'innovation technologique doit être pensée au niveau mondial
- ✓ Les pays émergents (Chine, Inde, ...) joueront un rôle de premier plan dans le déploiement massif des nouvelles technologies.

Un travail collectif de grande ampleur

- ✓ Le Centre d'Analyse Stratégique, lieu privilégié d'échanges et de concertation, a fourni une équipe permanente de rapporteurs de qualité
- ✓ 60 spécialistes venus d'horizons divers (recherche, industrie, administrations,...) ont participé de manière assidue au comité de pilotage de la mission et à ses sous-groupes de travail
- ✓ Plus d'une centaine d'auditions de personnalités extérieures et une abondante bibliographie ont permis d'enrichir cette réflexion collective

Le propos du présent exposé est d'illustrer très concrètement trois thèmes importants

- ✓ L'apport des technologies transverses dans l'innovation technologique : l'exemple des nanotechnologies
- ✓ Le temps de maturation d'un saut technologique : l'exemple du développement des réacteurs nucléaires du futur (génération IV)
- ✓ L'importance des aspects systémiques : l'exemple de l'intégration des EnR dans les systèmes électriques

Un exemple de technologie transverse :
les nanotechnologies

Des « merveilles de la nature », naguère inexplicables



Des artéfacts aux propriétés naguère mystérieuses

Ici, la coupe de Lycurgus (300 après Jésus-Christ)

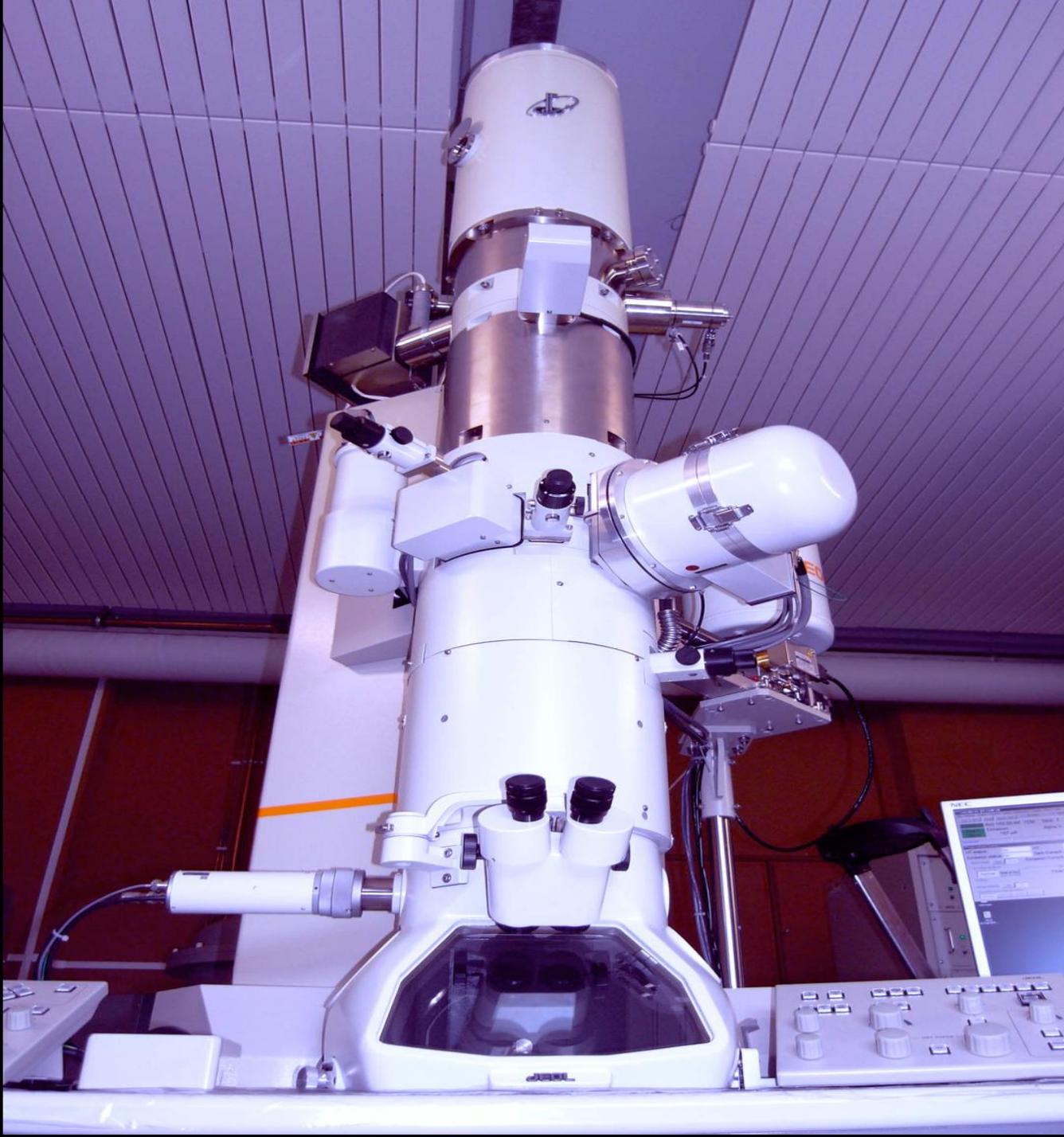


Les nanosciences

S'appuyant sur le développement d'outils d'observation et de manipulation de la matière à l'échelle nanométrique (microscope à effet tunnel,...), les nanosciences permettent de :

- comprendre les propriétés très particulières de la matière à cette échelle
- créer des objets nanométriques
- comprendre les propriétés macroscopiques des matériaux nanostructurés.

Elles ouvrent la voie aux nanotechnologies et à leurs applications



Microscope à
effet tunnel

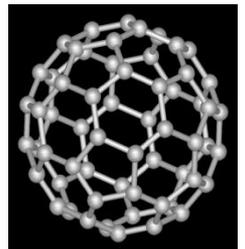
Une question d'échelle

1 nanomètre = 1 milliardième de mètre

L'épaisseur d'un cheveu = 80 micromètres
= 80 000 nanomètres

La terre / un ballon de football / une nanoparticule

(ici le fullerène C60)



Nanomatériaux

- Nanoparticules
- Nanotubes
- Nanofeuillets

Propriétés de la matière à l'échelle nanométrique

- ✓ Physiques : taille, masse volumique, résistance, conductivité, propriétés optiques,....
- ✓ Chimiques : réactivité

Un exemple : matériaux de construction et nanotechnologies

La conjonction

- ✓ des progrès réalisés en matière de connaissance fine de la structure du béton et de sa modélisation multiéchelle (du nano à la structure macroscopique)
- ✓ et du développement des nano technologies
permet le développement de « nouveaux bétons » offrant des performances améliorées et des fonctionnalités nouvelles :

- ✓ Bétons à ultra haute performance
- ✓ Bétons auto-réparants
- ✓ Bétons autonettoyants et dépolluants
- ✓ Bétons à conductivité thermique réduite

De même, les nanotechnologies permettront le développement d'isolants thermiques : aérogels, mousses nanométriques,...appelés à jouer un grand rôle dans la rénovation thermique des bâtiments existants

La production industrielle

- Noir de carbone
- Silice nanométrique
- Dioxyde de titane
- Nanotubes de carbone
- Dioxyde d'argent
-

Applications actuelles

- Electronique (têtes de lecture, écrans, batteries,...)
- Eclairage
- Matériaux de construction (béton, vitrages, isolation)
- Pneumatiques
- Peintures, encres
- Articles de sport
- Textiles
- Cosmétiques
- Alimentaire
- Applications médicales

Applications en développement

- Photovoltaïque
- Stockage de l'énergie
- Filtration
- Informatique

- Et demain : convergence NBIC ????

Les risques

- Pour la santé
- Pour l'environnement
- Pour les libertés
- Pour l'intégrité de l'homme

Vers un « nucléaire durable »

La « feuille de route » Génération IV

Le cahier des charges d'un « nucléaire durable »

Le nucléaire est une « énergie d'avenir » : la Chine, l'Inde, la Corée du Sud, entre autres, ont fait de son développement un thème majeur de leur politique énergétique.

Pour être « durable », le nucléaire du futur devra :

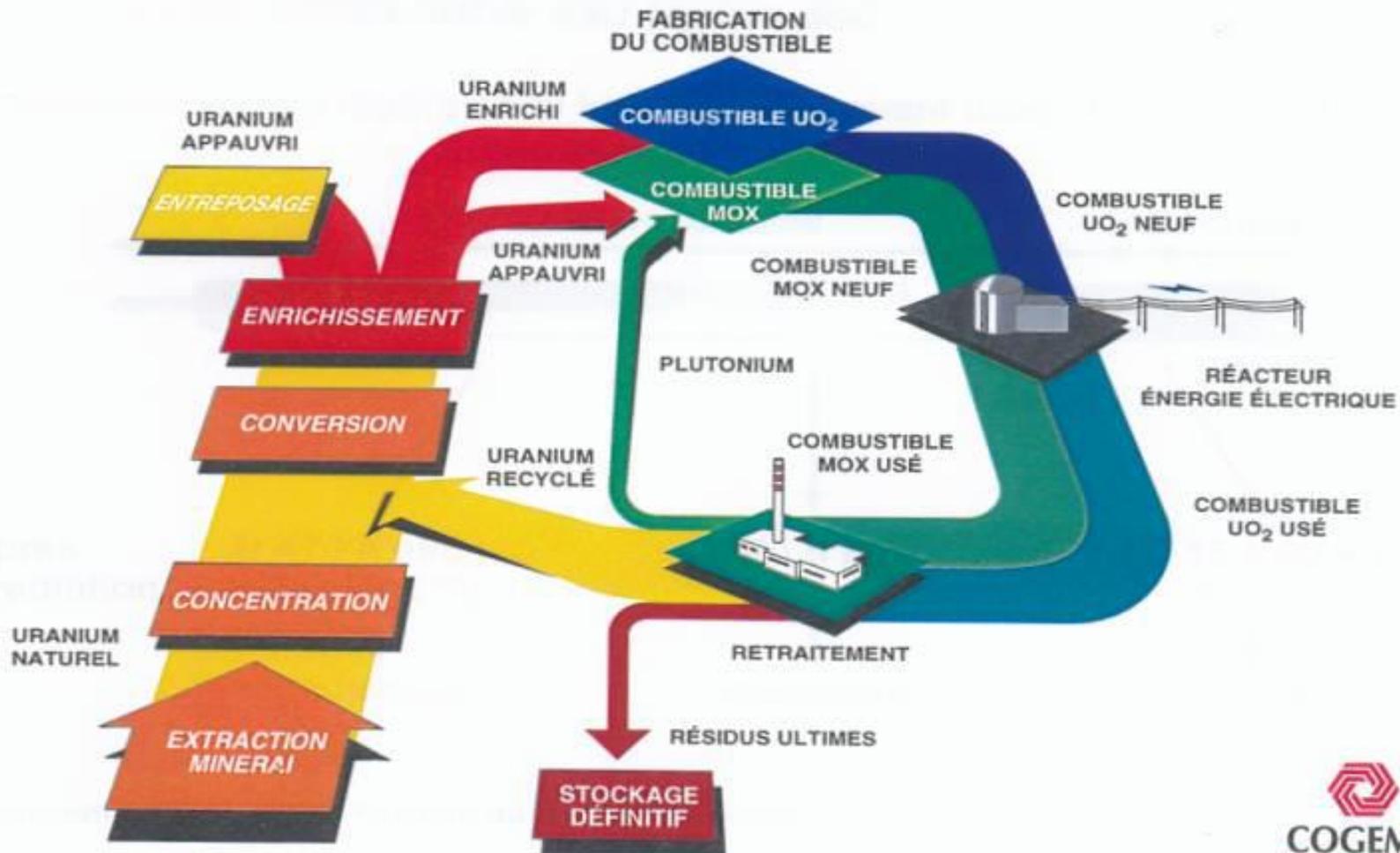
- ✓ Utiliser aussi complètement que possible, la ressource rare que constitue l'uranium naturel à faible coût d'accès
- ✓ Produire le moins possible de déchets ultimes
- ✓ Conforter son acceptation sociale par une performance économique et une sûreté exemplaires

Au centre de la problématique, le cycle du combustible nucléaire

Quelques rappels :

- ✓ L'uranium naturel se compose de 99.3 % d'U238 et de 0.7 % d'U235. Ce dernier est le seul fissile.
- ✓ La majorité des réacteurs aujourd'hui en service (réacteurs modérés à l'eau légère) utilisent un combustible enrichi en U235 (3 à 5 %)
- ✓ Après son utilisation en réacteur (3 à 5 ans), le combustible utilisé contient de l'uranium résiduel (près de 95 %), du plutonium (1%) dont les $\frac{3}{4}$ des isotopes présents sont fissiles, des produits de fission (4%) et des actinides mineurs (0.1%)
- ✓ Le traitement des combustibles usés permet de séparer ces différents composants. L'uranium résiduel peut être réenrichi et recyclé en réacteur, le plutonium mélangé avec de l'uranium appauvri constitue le combustible MOX utilisable dans de nombreux réacteurs à eau légère, les produits de fission et les actinides mineurs constituent les déchets ultimes du cycle de combustible.

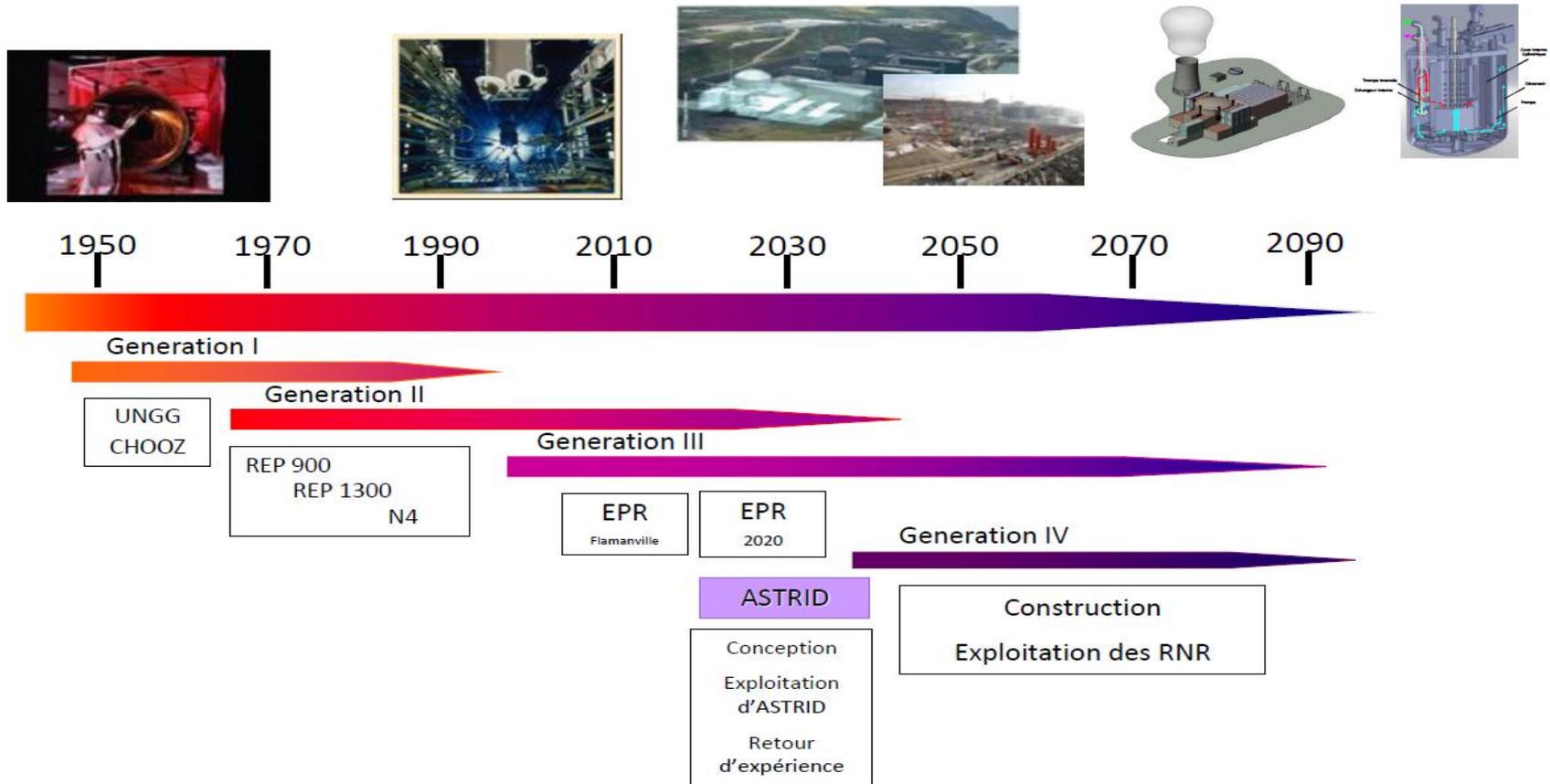
LE CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE



Aujourd'hui, le combustible MOX n'est pas retraité

- ✓ Le monorecyclage du Plutonium a été choisi car le multirecyclage dans les PWR conduit à la création de nombreux actinides mineurs
- ✓ Toutefois la retraitabilité du combustible Mox a été démontrée
- ✓ Le scénario de référence aujourd'hui est le retraitement différé au moment de la construction d'un parc de réacteurs à neutrons rapides (éventuellement le stockage direct pourrait être envisagé si ce parc ne devait pas être construit)
- ✓ Une seule des 4 piscines de La Hague suffit pour entreposer 40 ans de production EDF

L'évolution des réacteurs nucléaires en France depuis les années 1950



Source : CEA

Le forum international « Génération IV »

- ✓ Créé en 2000 (sur initiative DOE)
- ✓ 12 pays participants + Euratom
- ✓ Mise en commun des efforts de recherche pour développer des réacteurs innovants et soucieux du développement durable

Les solutions en présence

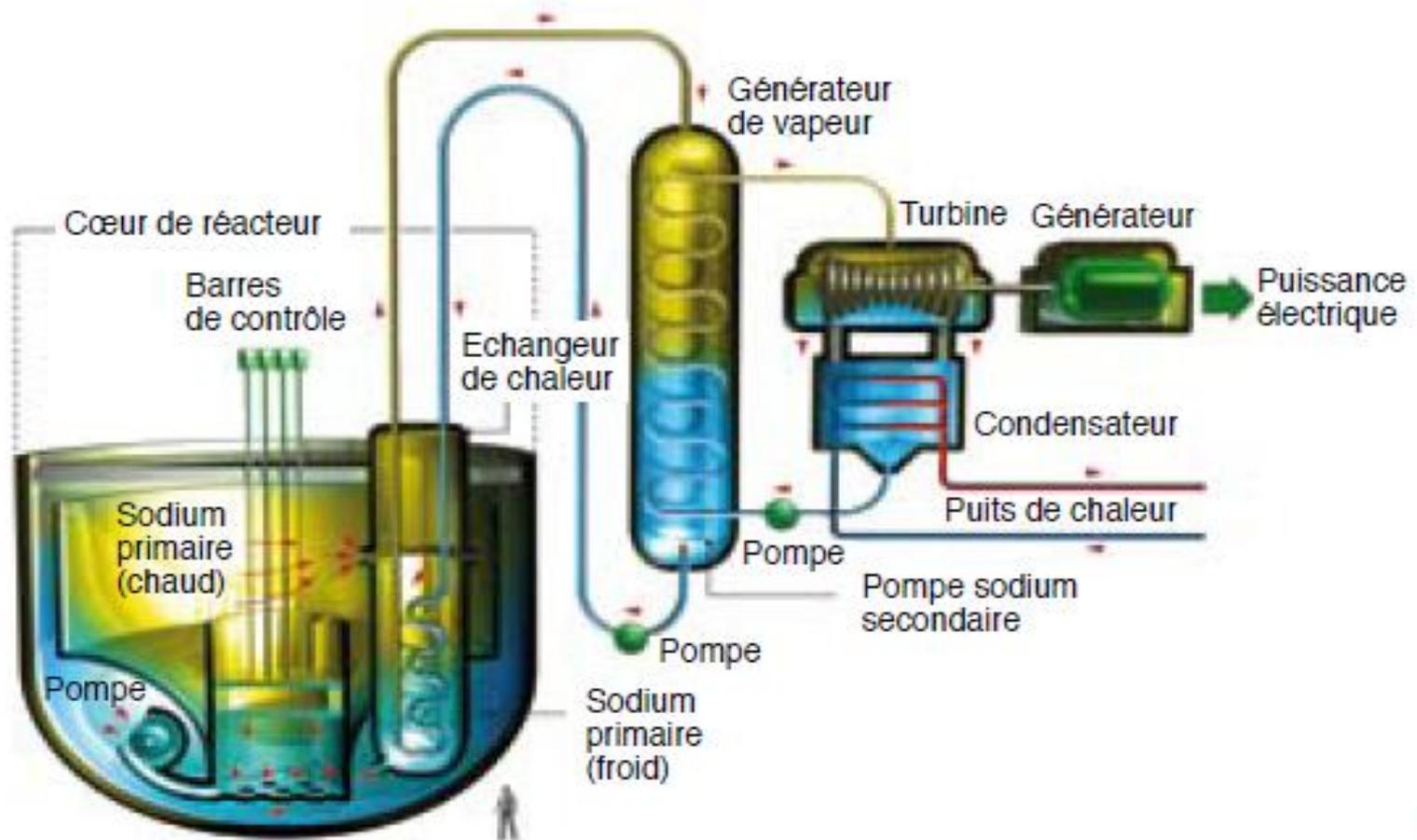
- ✓ Réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) : ils disposent d'une avance de plusieurs décennies sur les autres concepts
- ✓ Réacteurs rapides refroidis au gaz (RNR-G) : concept intéressant mais faisabilité à établir
- ✓ Réacteurs à eau supercritique et réacteurs à sels fondus : rupture technologique totale. 2080 ???
- ✓ Réacteurs à haute température : pas de « fermeture du cycle » mais possibilité de production d'hydrogène

La Chine, les Etats-Unis, la France et le Japon ont décidé de considérer prioritairement les RNR-Na et RNR-G

Le choix de la France : les RNR-Na

- ✓ Les réacteurs à neutrons rapides permettent grâce au multirecyclage du plutonium de maximiser le potentiel énergétique de l'uranium naturel
- ✓ Ils minimisent la production de « déchets ultimes du cycle », en particulier les actinides mineurs
- ✓ Ils pourraient permettre la transmutation des actinides mineurs
- ✓ On dispose déjà d'un retour d'expérience significatif
- ✓ Le prototype ASTRID (600 MWe) dont la mise en service devrait intervenir au début de la décennie 2020 et la R&D associée devraient permettre la validation des concepts de base de la génération IV et préparer son déploiement à échelle industrielle

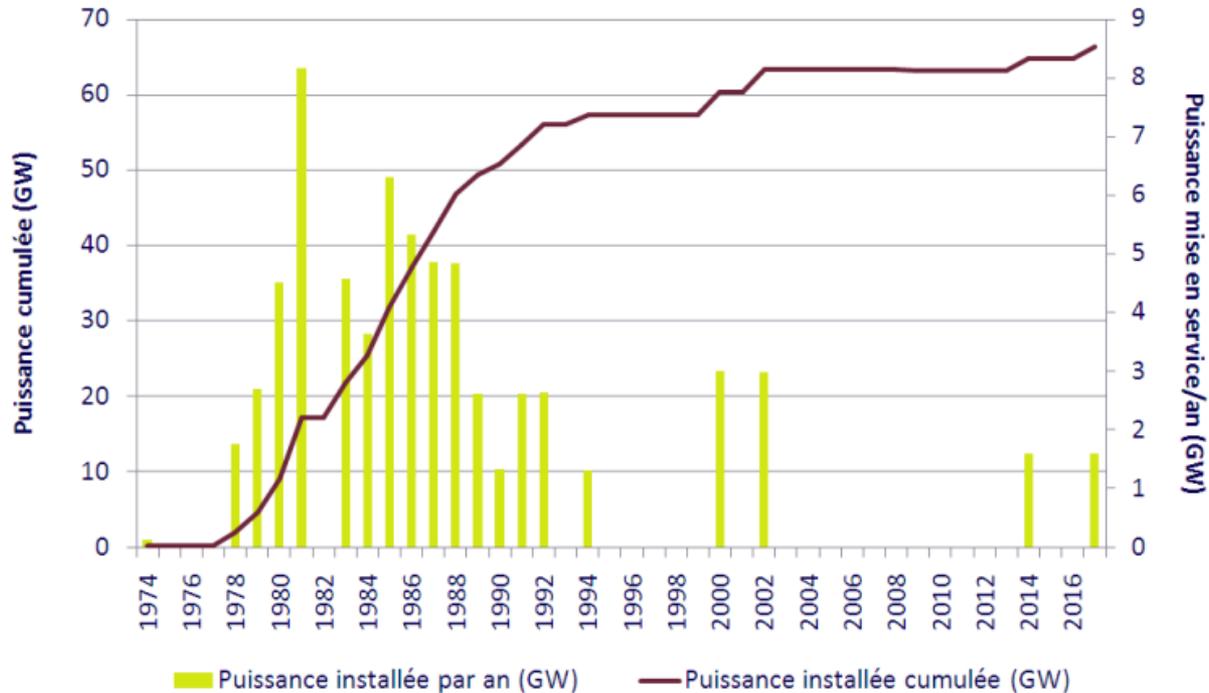
RÉACTEUR RAPIDE À CALOPORTEUR SODIUM



Où se déploiera, en premier, la génération IV à échelle industrielle ?

- ✓ En France, comme dans d'autres pays, la situation est complexe
- ✓ La Chine semble avancer sans hésitation et s'intéresse déjà de très près au procédé de retraitement du combustible utilisé par AREVA à La Hague

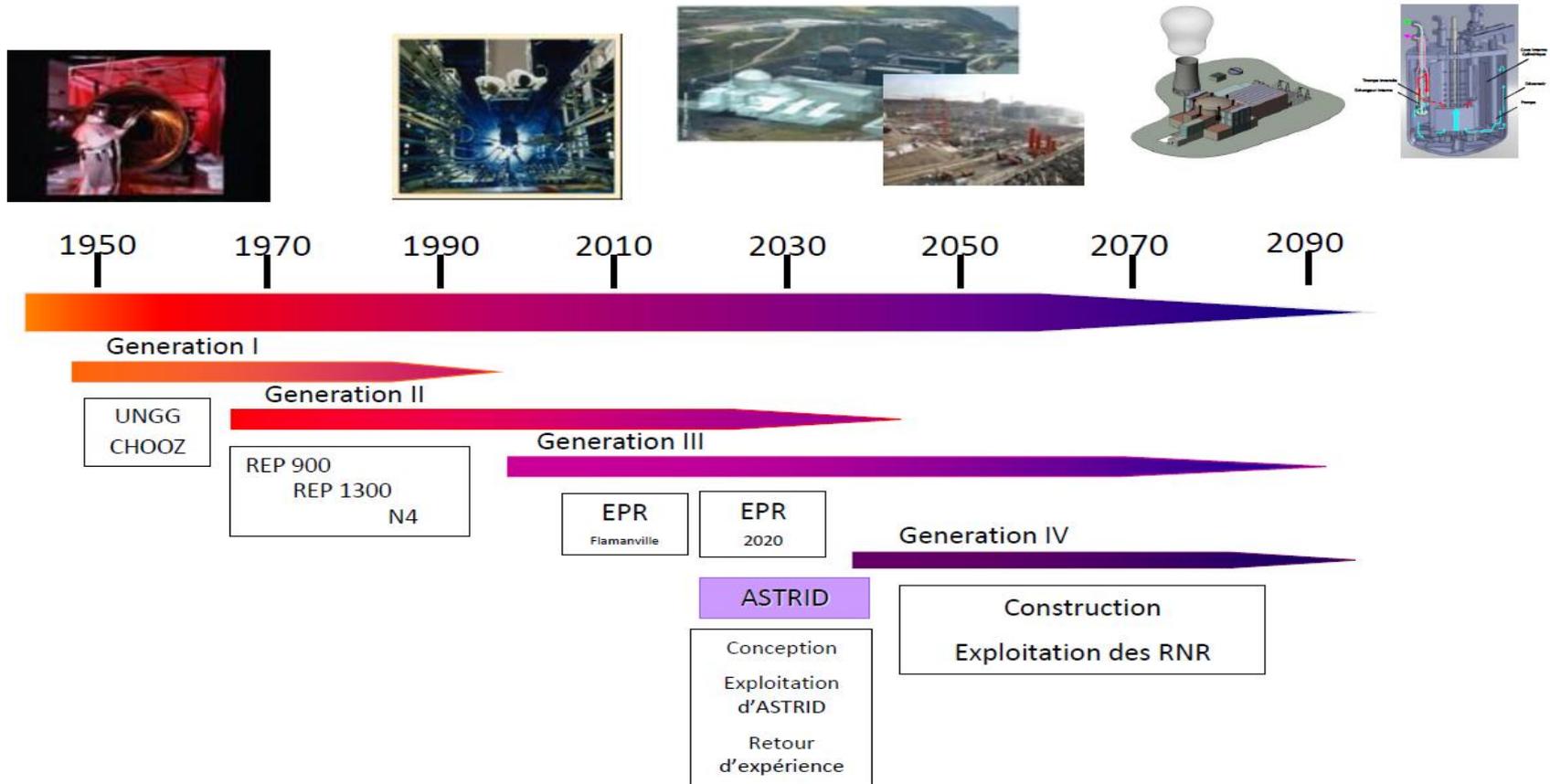
Le déploiement des réacteurs de deuxième et troisième générations en France



www.observatoire-electricite.fr

Par rapport à ce graphique Flamanville 3 (MSI prévue ici en 2014) a pris du retard et la date d'engagement de Penly 3 est incertaine

L'évolution des réacteurs nucléaires en France depuis les années 1950



Source : CEA

L'importance des aspects systémiques

L'intégration des EnR « intermittentes »
dans les systèmes électriques

Les coûts de production : état actuel et perspectives

Technologies de production : l'Eolien

D'ici 2030 :

- ✓ L'éolien terrestre (2-3 MW) est une technologie mature qui, dans des conditions favorables, présente des prix de revient moyens du MWh comparables aux prix actuels du marché européen. Les obstacles à un développement plus massif de l'éolien terrestre sont la relative rareté des sites favorables et l'acceptabilité des projets par les publics concernés.
- ✓ L'éolien off-shore dans les gammes de puissance aujourd'hui techniquement maîtrisées (jusqu'à 10 MW ?) apparaît trois fois plus coûteux et, donc, « hors marché »

Au-delà de 2030,

- ✓ l'éolien off-shore peut connaître des progrès significatifs grâce au développement d'éoliennes « géantes » (20 MW) et à la réduction des coûts de raccordement au réseau. Mais d'importants obstacles technologiques restent à lever
- ✓ L'élévation des prix de marché peut jouer en sa faveur
- ✓ La question du rôle que peut jouer l'industrie française dans le développement de l'éolien offshore doit être posée.

Les tarifs d'achat du photovoltaïque fin 2012

- ✓ Résidentiel Intégration au bâti
[0-9 kWc] : 341,5 €/MWh [9-36 kWc] : 298,8 €/MWh
- ✓ Résidentiel Intégration simplifiée au bâti
[0-36 kWc] : 170,4 €/MWh [36-100 kWc] : 161,9 €/MWh
- ✓ Enseignement ou santé Intégration au bâti
[0-36 kWc] : 227,9 €/MWh
- ✓ Enseignement ou santé Intégration simplifiée au bâti
[0-36 kWc] : 170,4 €/MWh [36-100 kWc] : 161,9 €/MWh
- ✓ Autres bâtiments Intégration au bâti
[0-9kWc] : 197,6 € /MWh
- ✓ Autres bâtiments Intégration simplifiée au bâti
[0-36kWc] : 170,4 €/ MWh [36-100kWc] : 161,9 €/MWh
- ✓ Tout type d'installation [0-12MW] : 102,4 €/MWh

Quelles conclusions tirer de ces tarifs d'achat

- ✓ Il faut rappeler que le photovoltaïque, tel qu'il est exploité aujourd'hui, ne produit que peu ou pas d'économie de réseau. Le point de comparaison est donc le prix de marché – c'est d'ailleurs ainsi qu'est calculée la CSPE. Ce prix de marché aujourd'hui déprimé (moins de 50 €/MWh) pourrait croître dans les prochaines années et atteindre un niveau de l'ordre de 80€/MWh vers 2020.
- ✓ Si l'on admet que les tarifs d'achat ont été calés de manière à donner une chance de développement au photovoltaïque sur tous les segments de marché, il apparaît clairement que
 - la généralisation du photovoltaïque de faible surface intégré au bâti (logique du BPOS) serait une utopie ruineuse.
 - le photovoltaïque en grande surface (couverture de centres commerciaux, de parkings, de grands ateliers industriels, ...) pourrait être rapidement proche de la compétitivité

En conclusion, si l'objectif est d'introduire au moindre coût du photovoltaïque dans le mix énergétique, il conviendrait de définir un prix d'achat unique et incitatif du kWh photovoltaïque ce qui conduirait à privilégier les solutions les plus économiques : photovoltaïque de grande surface en zones où l'ensoleillement est le plus favorable.

Technologies de stockage (1)

Stockage en réseau

- ✓ Avant 2030, les seules technologies matures économiquement sont le stockage hydraulique (réserves gravitaires et STEP) et dans certains cas favorables le stockage pneumatique. Le stockage par batterie relève de la démonstration ou de situations particulières (systèmes isolés)
- ✓ Après 2030, sous réserve de progrès décisifs, le stockage par batteries en réseau pourrait présenter un intérêt économique

Technologies de stockage (2)

Du côté de la consommation :

- Dès aujourd'hui, sous forme thermique (eau chaude, inertie thermique des bâtiments)
- Demain à une échelle plus ou moins importante : véhicule électrique, matériaux à changement de phase dans l'isolation des bâtiments
- Stockage par batterie associé au PV
- La production d'hydrogène par électrolyse pour résorber des excédents d'énergie intermittents est fréquemment évoquée ; son économie reste à établir (coûts d'investissement, rendements,..)

Utilisations de l'électricité

Evolution lente des fondamentaux de la demande d'ici 2020 :

- ✓ Modulations systématiques saisonnières et journalières
- ✓ Aléas climatiques

Vers 2020-2030, des évolutions plus ou moins importantes mais difficiles à quantifier :

- ✓ La climatisation
- ✓ L'impact du véhicule électrique
- ✓ L'impact des bâtiments, ou mieux des « eco-quartiers » à énergie positive

La régulation des systèmes électriques

L'introduction massive d'énergies :

- ✓ peu saisonnalisées mais aléatoires (éolien)
- ✓ contre modulées par rapport à la demande et aléatoires (solaire)

pose des problèmes nouveaux en terme de régulation des systèmes électriques

A horizon 2030, on peut envisager :

- ✓ De développer les possibilités d'intervention de l'hydraulique (optimisation de la gestion face aux aléas, suréquipement des usines de réservoir, développement des STEP)
- ✓ De jouer sur l'interruptibilité ou la modulation de certaines consommations, via les smart grids

En tout état de cause, on ne peut dépasser sans surcoûts ou risques excessifs un certain pourcentage d'énergies à production intermittente dans le mix électrique. Le développement des interconnexions internationales permet certes de faire « foisonner » les aléas sur des zones géographiques étendues mais, même à l'échelle de l'Europe entière, on constate à certains moments, une production éolienne qui n'excède pas 10 % de la puissance éolienne installée !