

# Réacteurs de Génération III description, comparaison, tendances

Université d'été de Sauvons le climat  
23/09/2016

J-B Thomas - v5 (post) - 11/10-14h

Références : enseignements de Génie Atomique et Master européen MNE/NRPE  
plus relectures et discussions amicales : merci ...

Pourquoi et comment ?

L'offre et la demande; marketing (nucléaire) et design

Tendances : contexte : Energies et Sociétés

La place dans les Transitions Energétiques

La place dans la transition du parc actuel au *parc* de Génération IV

Une crise du « design » nucléaire ? Ou un rebond ?

Les époques du nucléaire : l'éternité devant soi → plus une minute à perdre

## Pourquoi et comment ?

### Génération 3 : post-Chernobyl

- Importance du confinement;
- Protection contre le corium, H<sub>2</sub>;
- Rejets massifs hors site : inacceptables

### Exigences :

- Sûreté accrue (prévention et « mitigation »)
- Simplification
- Fiabilité et *flexibilité opérationnelle*
- Compétitivité (contre le meilleur fossile)

Le poids de ces priorités et leur traduction technique, économique, dépendent des « régions ».

# GEN-IV : Bill Magwood (DOE)

## THE EVOLUTION OF NUCLEAR POWER (from US VISION : DOE around 2000)

Le problème des ressources n'est pas encore évoqué ...  
Porté par des partenaires dont la France, il sera fortement présent dans le GIF (3 types de FBR)

Generation I



Early Prototype Reactors

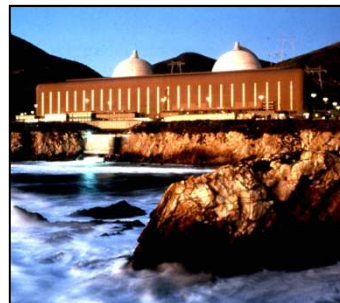


- Shippingport
- Dresden, Fermi I
- Magnox

Generation II



Commercial Power Reactors



- LWR-PWR, BWR
- CANDU
- VVER/RBMK

Generation III



Advanced LWRs



- ABWR
- System 80+
- AP600
- EPR

Near-Term Deployment

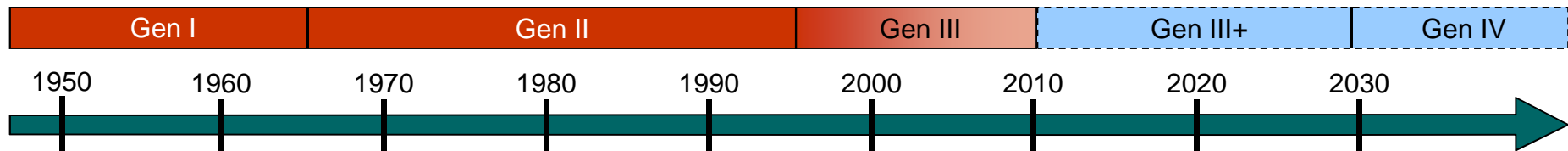


Generation III+  
Evolutionary Designs Offering Improved Economics

Generation IV



- Highly Economical
- Enhanced Safety
- Minimal Waste
- Proliferation Resistant



# The Next Step ? Bill Magwood (NEA)

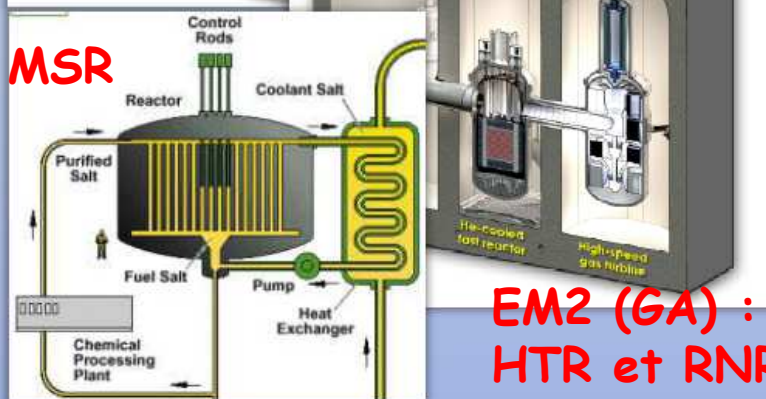
Gen-IV en 2000 : horizon 2030; NI 2050 en 2016

## *Nuclear Innovation 2050 - A Roadmap for the Future of Nuclear Energy Technology*

SFR à boucles



Un podium virtuel Gen-IV ?



EM2 (GA) :  
HTR et RNR

- What technologies will be needed in 10 years? 30 years? 50 years?
- What research and development is needed to make these technologies available?
- Is the global community doing the R&D needed to prepare for the future?

## Les bases (en Europe)

1989 : « Common Project » NPI

Approche de sûreté commune germano-française (1995)

- Concepts « évolutionnaires »
- Réduction de la probabilité de fusion du cœur
- « Practical elimination by design » d'accidents avec des rejets radioactifs significatifs; pas de fusion de cœur sous - haute ou moyenne - pression; pas de défaillance précoce du confinement
- En cas de fusion du cœur, mesures à prendre limitées dans le temps et l'espace (population, agriculture)
- Conception déterministe, mais aide des études d'évaluation probabiliste du risque
- Protection renforcée contre les agressions
- **Post-Fukushima** : cf. **WENRA** : Défense en profondeur « étendue »

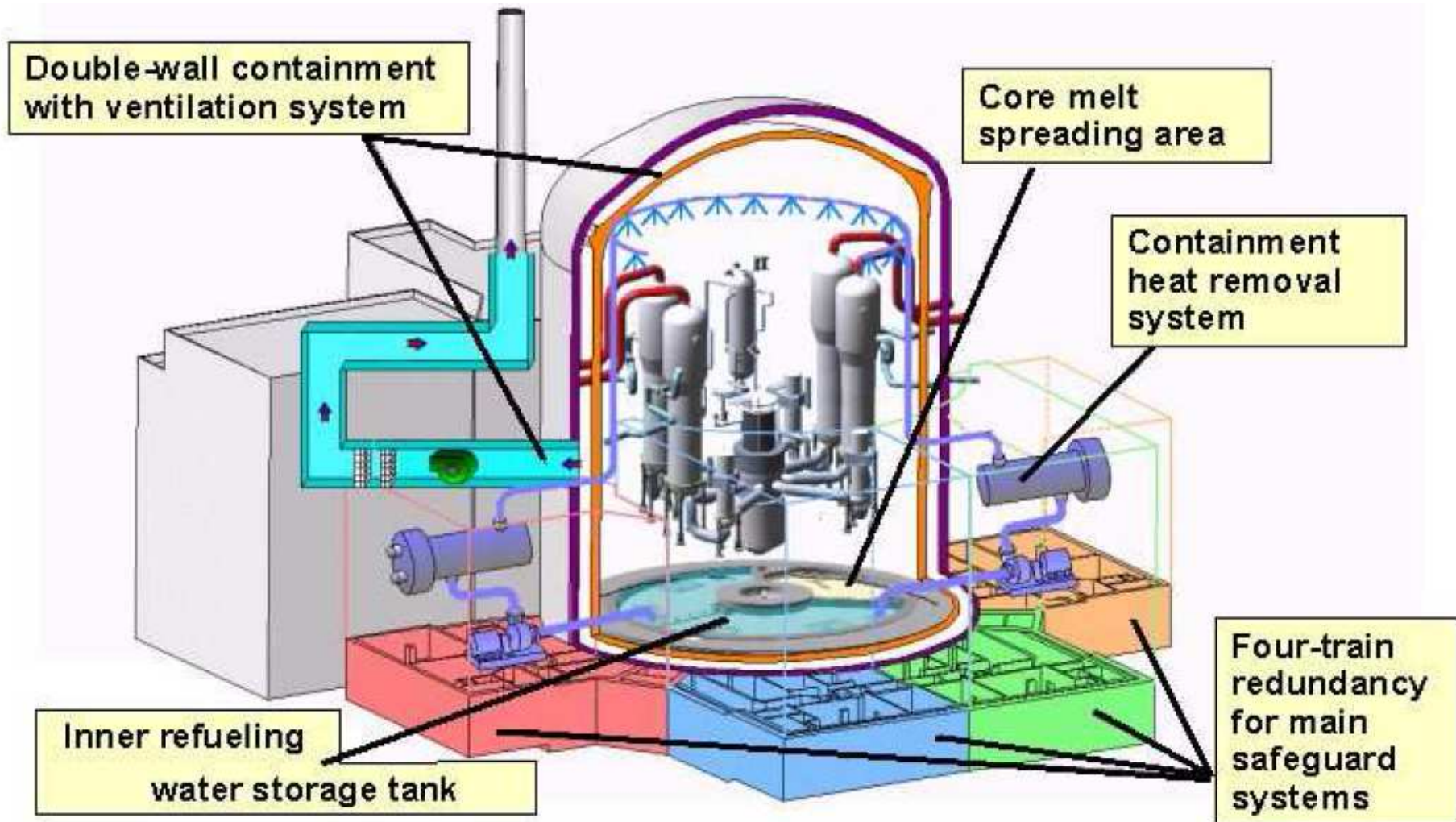
## Quelques EUR (European Utility Requirements): $\neq$ USA : URD (EPRI)

- REP ou REB, 600-1500 Mwe, pas de biais en faveur du « passif » (voir point de vue IRSN 2016); îlots nucléaires standardisés (...) construits en Europe.
- Probabilité de fusion du cœur - toutes causes -  $< 10^{-5}/R.an$
- Probabilité de rejets « massifs »  $< 10^{-6}/R.an$
- Pas d'évacuation prolongée ( $> 1$  an) au-delà de 800 m
- Restriction limitée à la consommation de produits agricoles cultivés alentour
- « Design Basis Conditions + *Design Extension Conditions* + Internal Hazards »
- Temps sans intervention humaine (ex. : 72 heures); {et ... post-Fuku, blackout, temps sans électricité du tout}
- Au moins 50% MOX
- kWh compétitif avec le meilleur concurrent fossile pour 4500 à 5500 jepp / an. (☹)

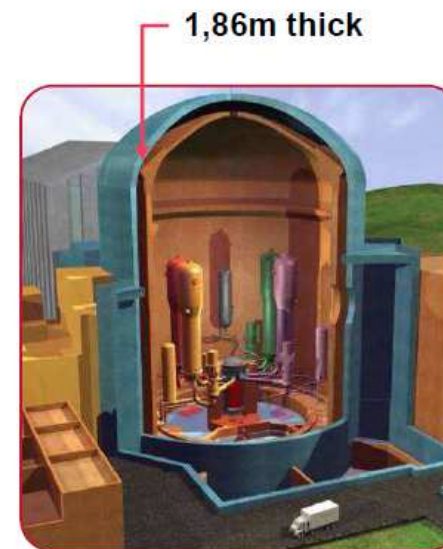
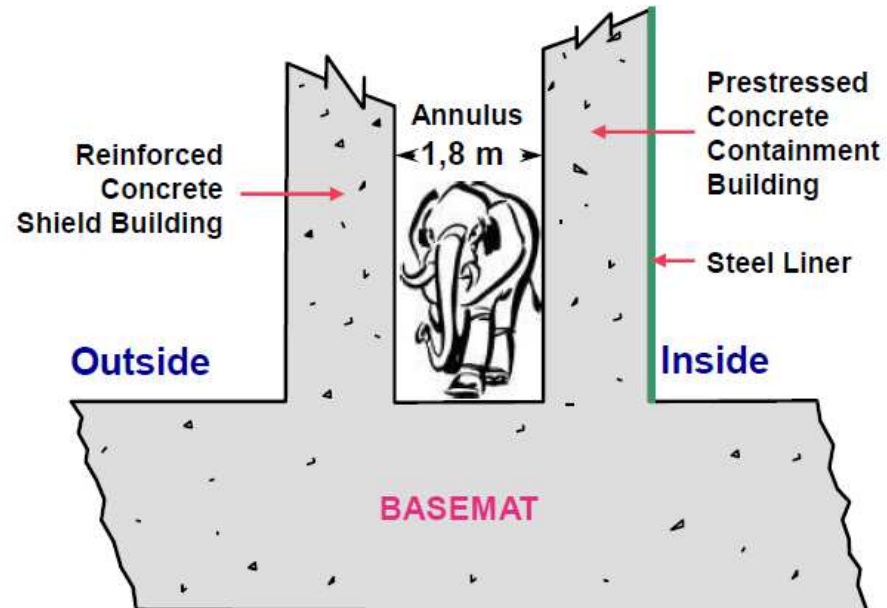


## EPR : résumé

Positif : pas de révision du design nécessaire après Fukushima

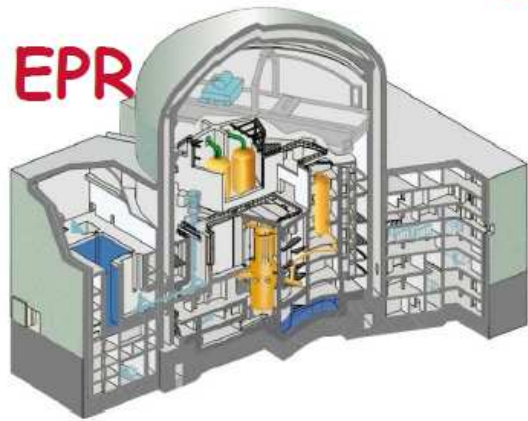


## Deux exemples : récupérateur de corium et enceinte





# L'offre REP (Gen-III « ± ») internationale



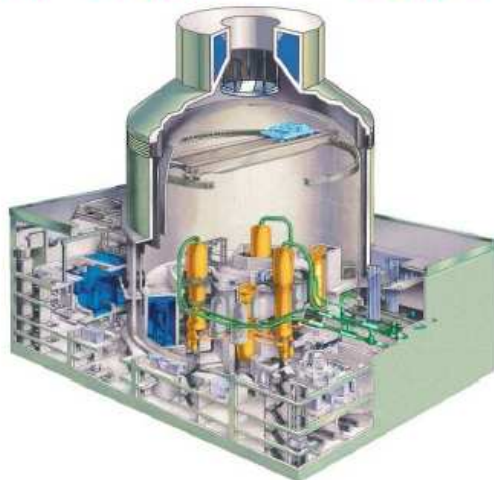
APR 1400 S Korea



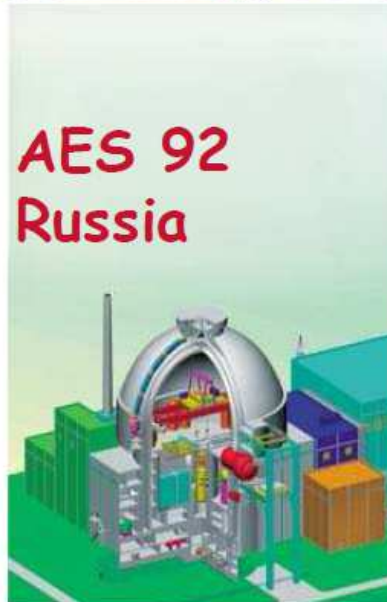
APWR Japan



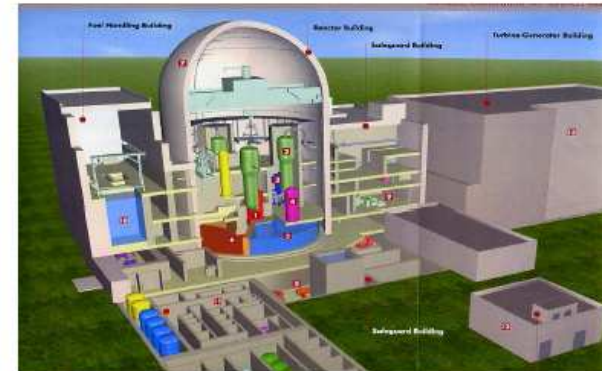
AP 1000 USA



AES 92  
Russia



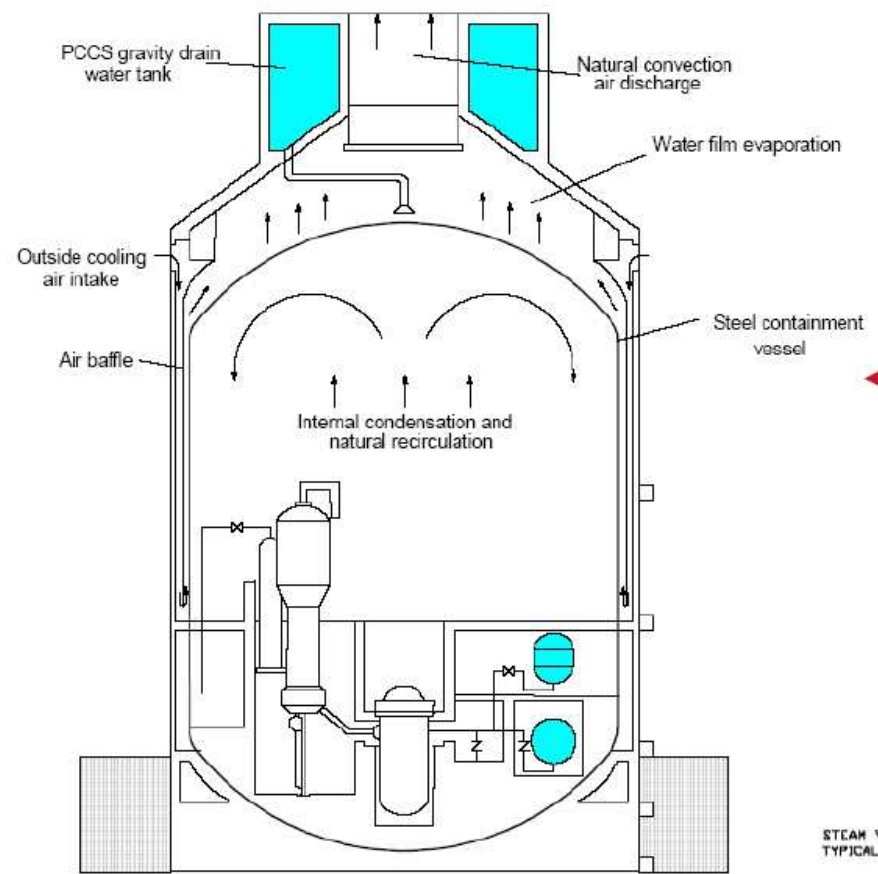
ATMEA Areva-  
Mitsubishi



+ « HUALONG » (Chine) : voir actualité : convergence CNNC - CGN;  
filiation conception Française et apports + récents;  
export : tête de pont UK ...

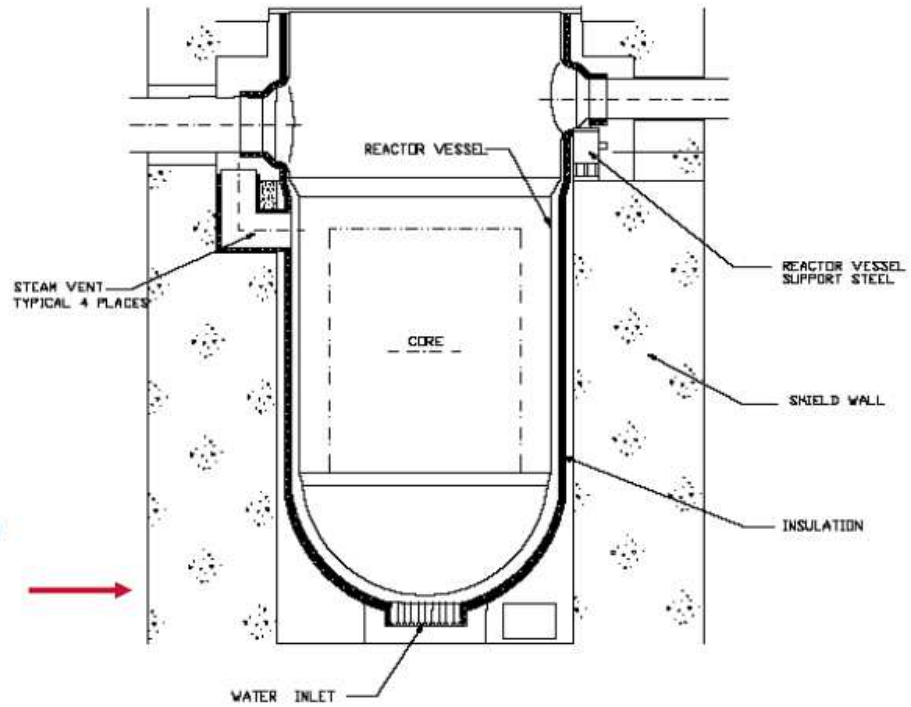
# REP : « Focus » (1) : AP 1000

## AP 1000 Toshiba Westinghouse



Passive containment cooling system

Configuration to promote In-Vessel-Retention of molten core debris



**AP 1000 : une conception à part :  
innovant (→ avantages + mise au point);  
complètement « Gen-3 ? » (dans quel sens ?)**

Quelques points sensibles, liés à la place et au poids accordés au probabiliste :

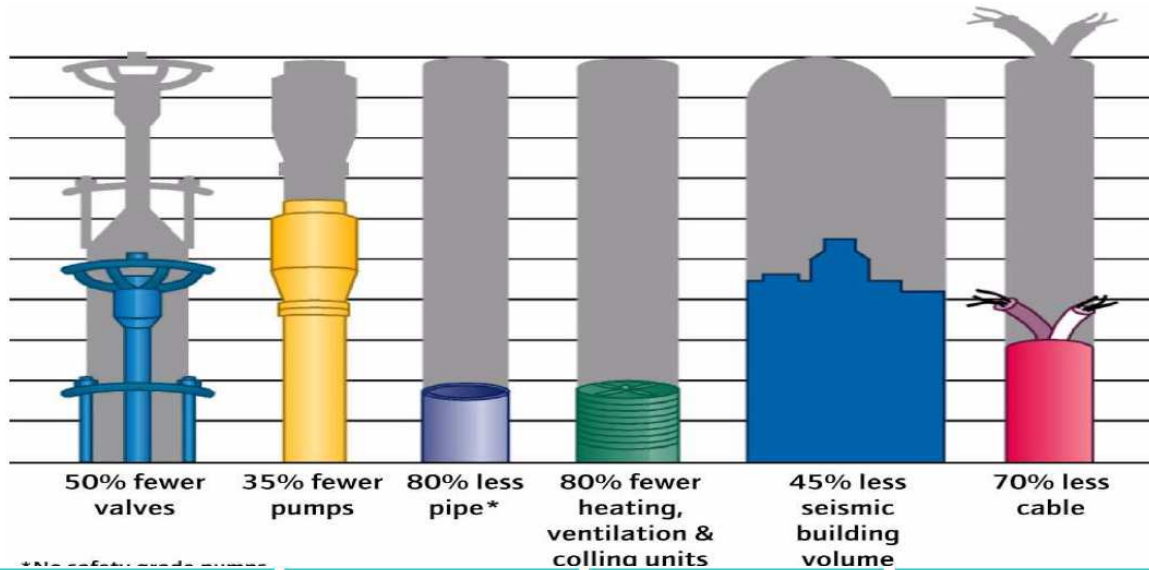
- Le « tout passif » ne l'est jamais complètement et n'est pas forcément sans risque d'échec (ex. : Fukushima), voir IRSN, WENRA;
- La solution IVR (In Vessel Retention) est-elle déjà démontrée pour le dimensionnement de l'AP 1000 ? Est-elle « démontrable » ? Elle a convaincu les arbitres au sein d'une évaluation globale déterministe + probabiliste. A suivre (puissance d'entraînement des autorités de référence). Besoin d'harmonisation mondiale sur des bases bien informées (de la R&D au consensus).
- La vulnérabilité à des agressions externes « ciblées » (au moins à l'export).
- Une cheminée au sommet : concilier bunkerisation et évacuation de puissance à indice de performance modeste, donc « encombrante ».

Innovation → avantages : simplification → économies (réduction du nombre de composants, du nombre de composants classés sûreté, voir figure ci-après); construction (voir plus loin);

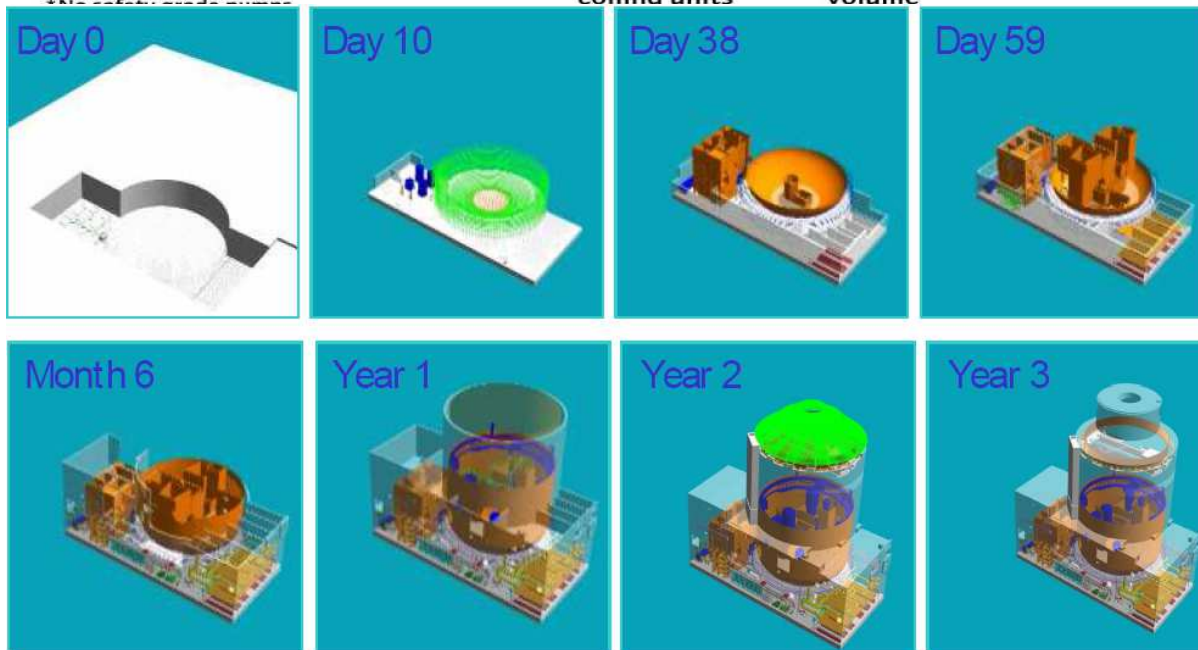
Mise au point, « essuyage des plâtres » : pompes à moteur noyé de grande puissance (puissance > pompes éprouvées); construction.



# AP1000 (voir AP600 ...) : simplification; « modular and open top construction »



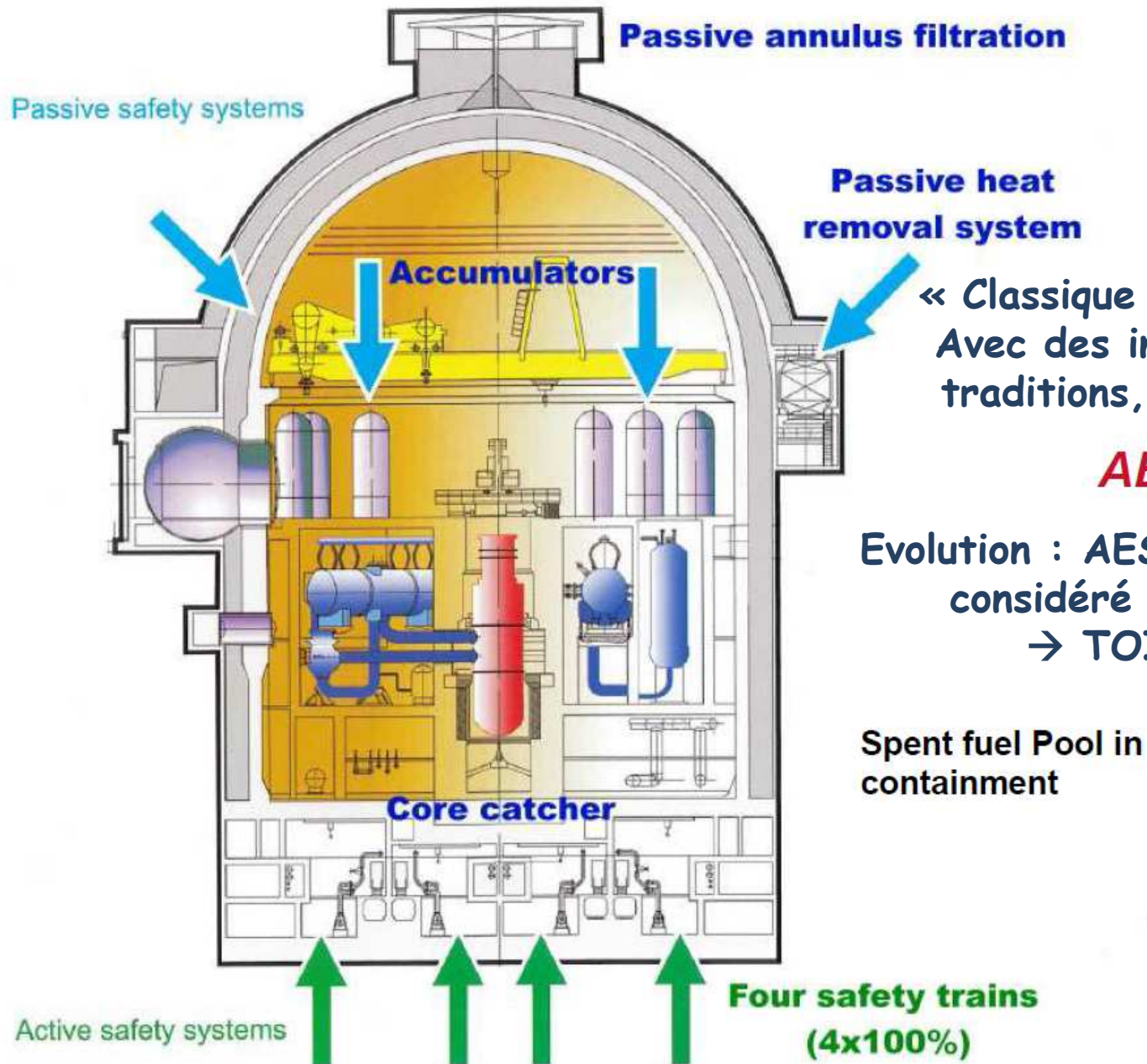
Réduction significative du nombre de composants classés sûreté - « safety relevant » (et également du nombre total de composants)



Une fois « les plâtres essuyés », sans doute un atout (voir construction plus loin)



# REP : « Focus » (2) : AES92



« Classique », plutôt complet;  
Avec des innovations (ou des  
traditions, souvent bonnes);

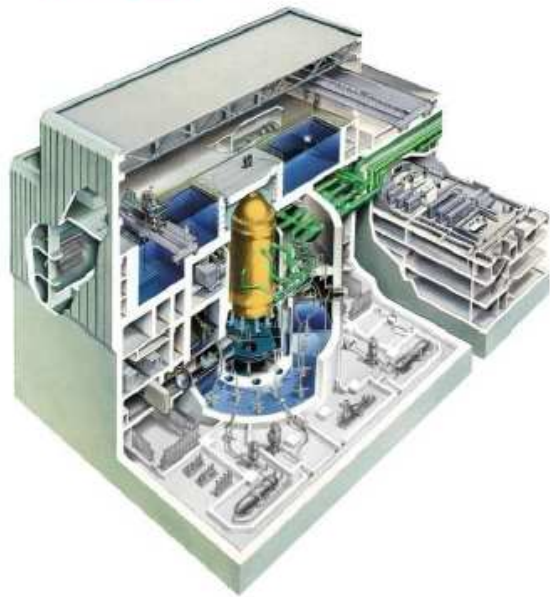
**AES 92**

Evolution : AES 92 → AES 2006  
considéré comme Gen-3  
→ TOI (export)

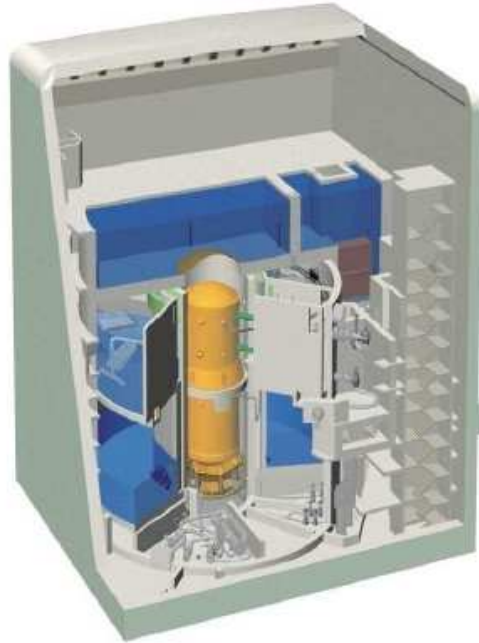
Spent fuel Pool in  
containment

# L'offre REB internationale

ABWR  
Hitachi

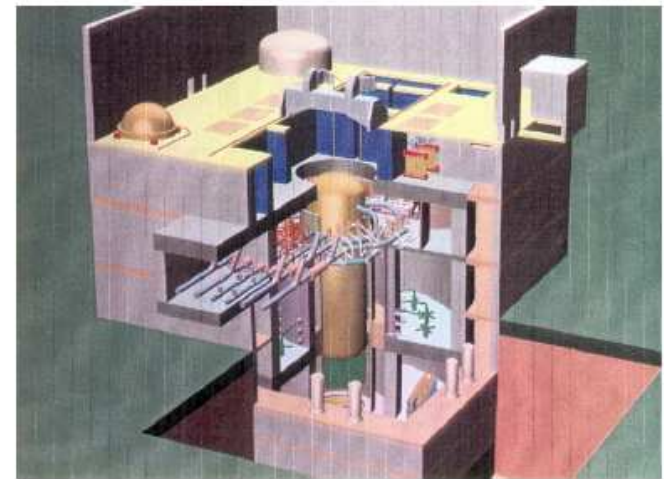


GE-



KERENA  
AREVA

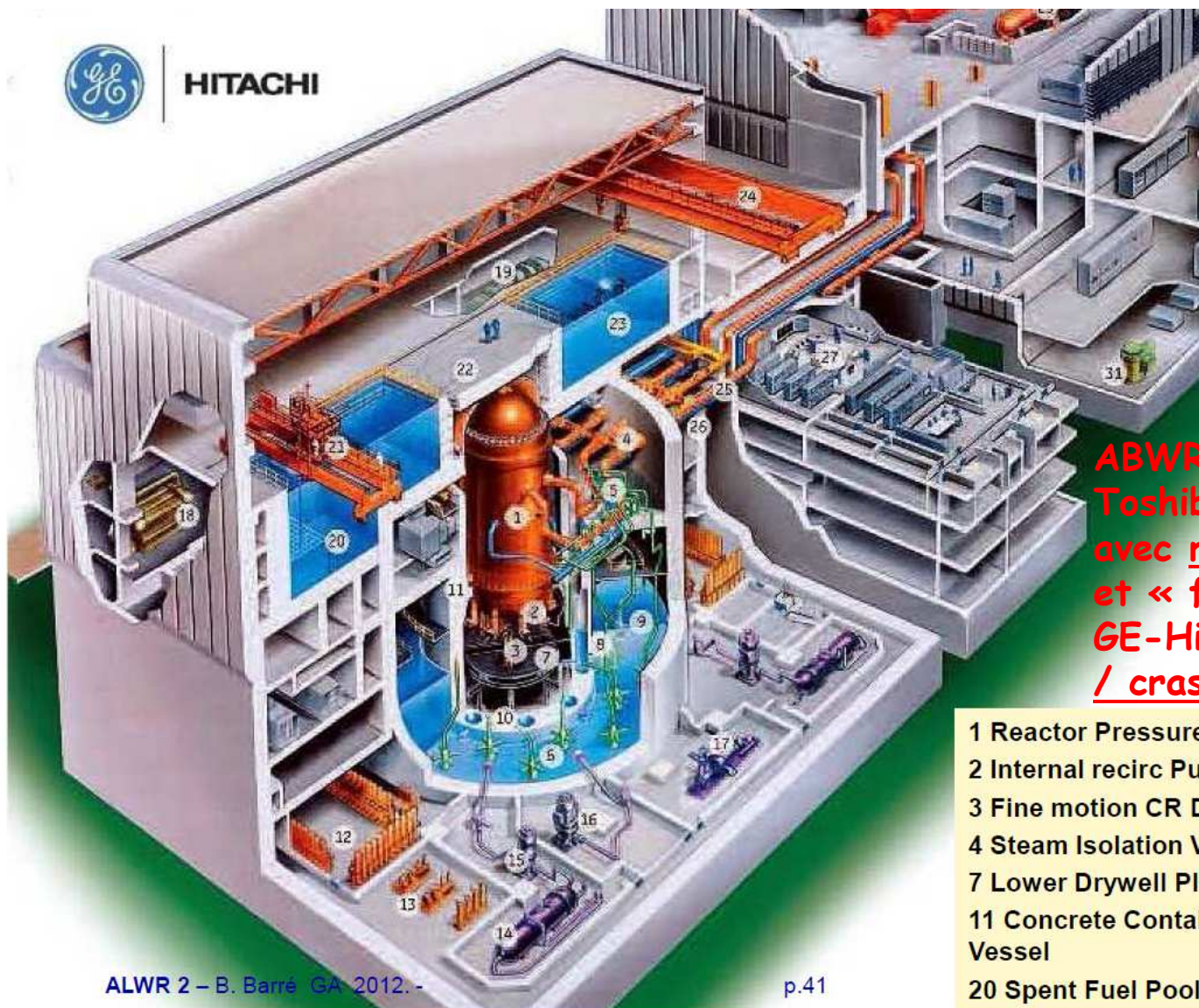
ESBWR GE





# Kashiwasaki-Kariwa, Japanese ABWR

Réacteurs 6 et 7; le 6 est entré en exploitation commerciale le 7/11/1997;  
durée de construction : 4 ans; 6 et 7 ont subi sans dommage un fort séisme

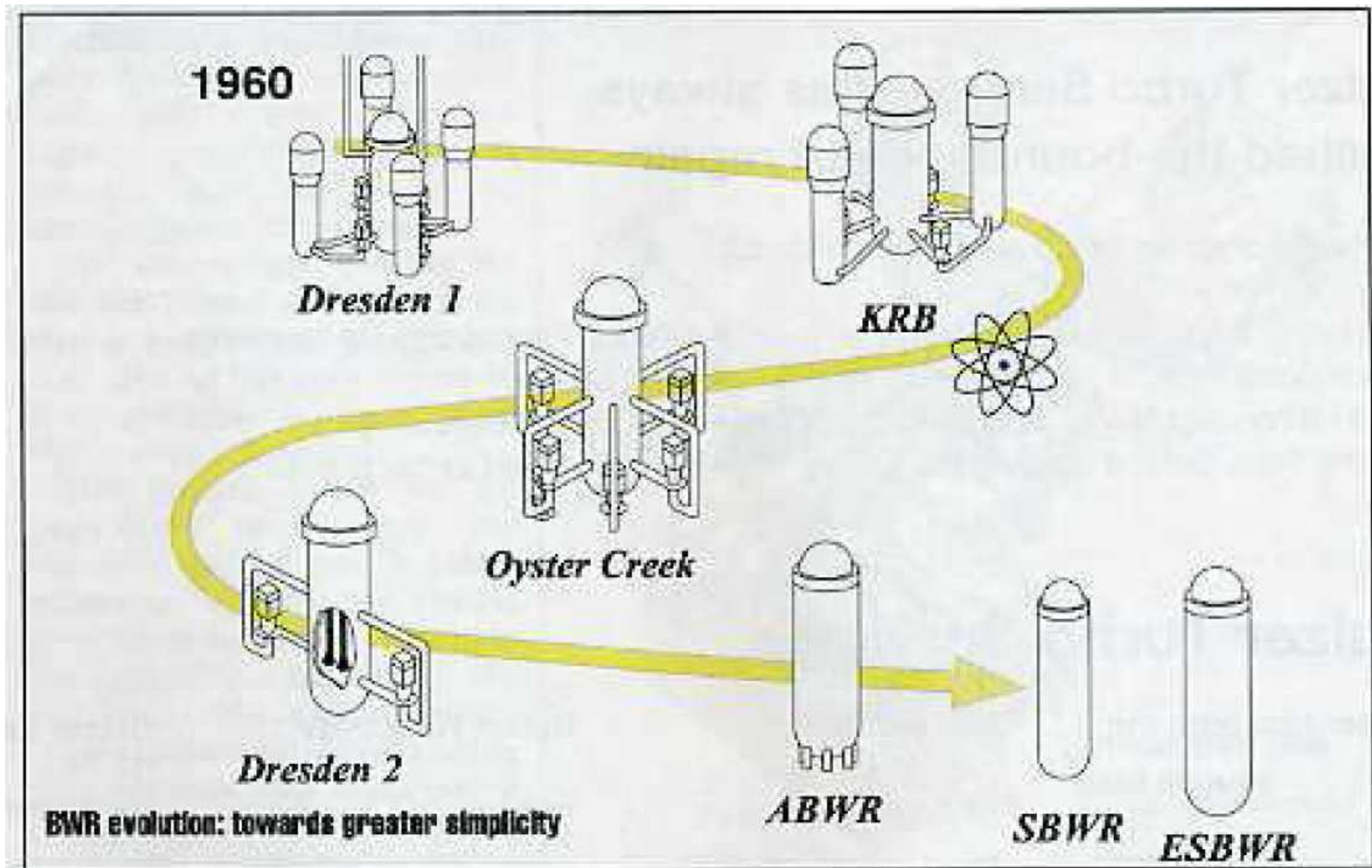


→ Nom  
générique  
variantes  
± Gen-3

ABWR-II @ 1717 Mwe  
Toshiba : EU-ABWR  
avec recup. de corium  
et « filtered vent »  
GE-Hit. : → version OK  
/ crash d'avion

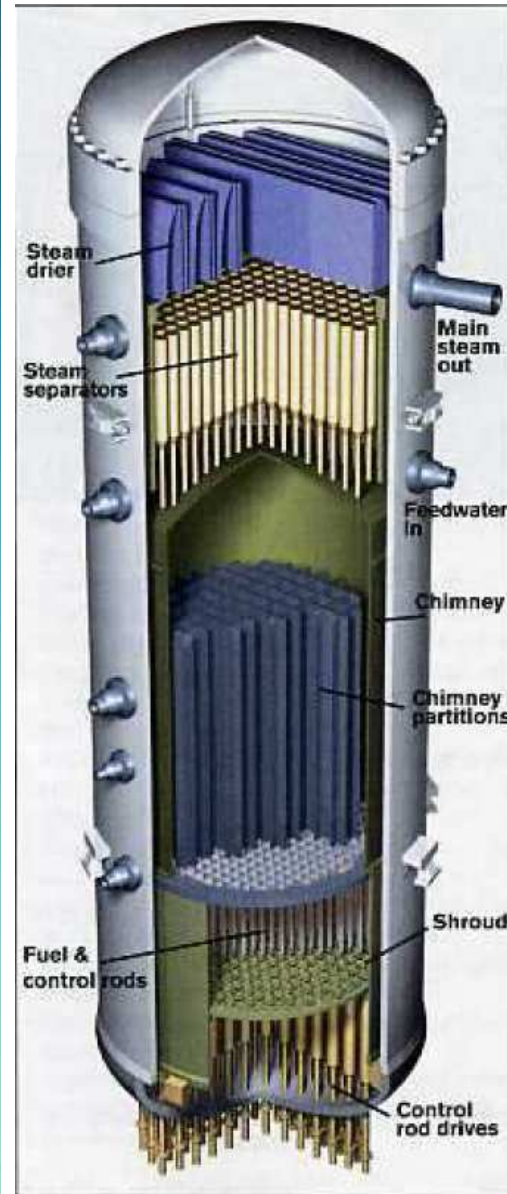
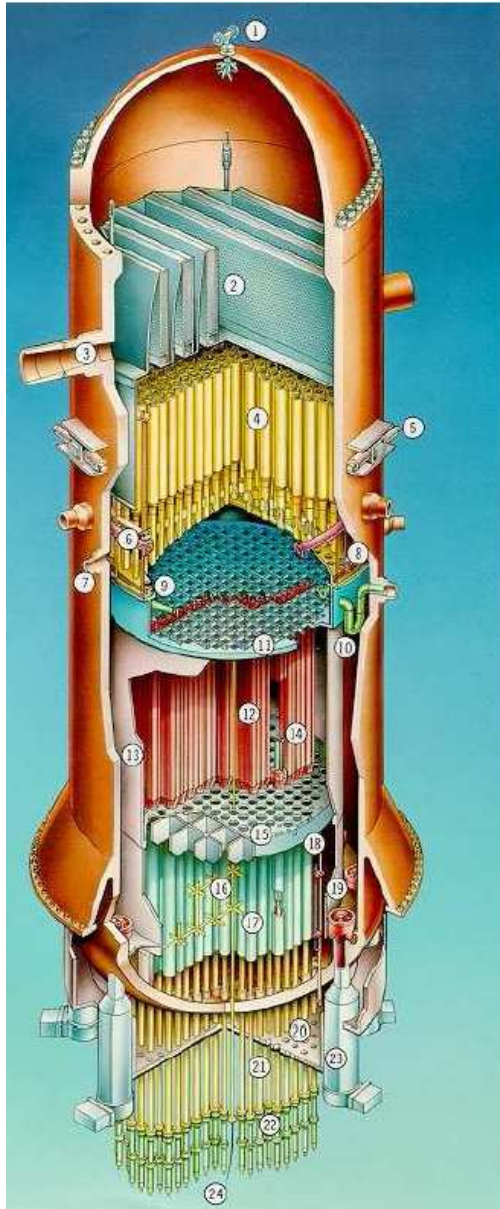
- 1 Reactor Pressure Vessel
- 2 Internal recirc Pumps
- 3 Fine motion CR Drives
- 4 Steam Isolation Valves
- 7 Lower Drywell Platform
- 11 Concrete Containment Vessel
- 20 Spent Fuel Pool

# L'évolution des NSSS REB





## Les internes (de l'ABWR à l'ESBWR)

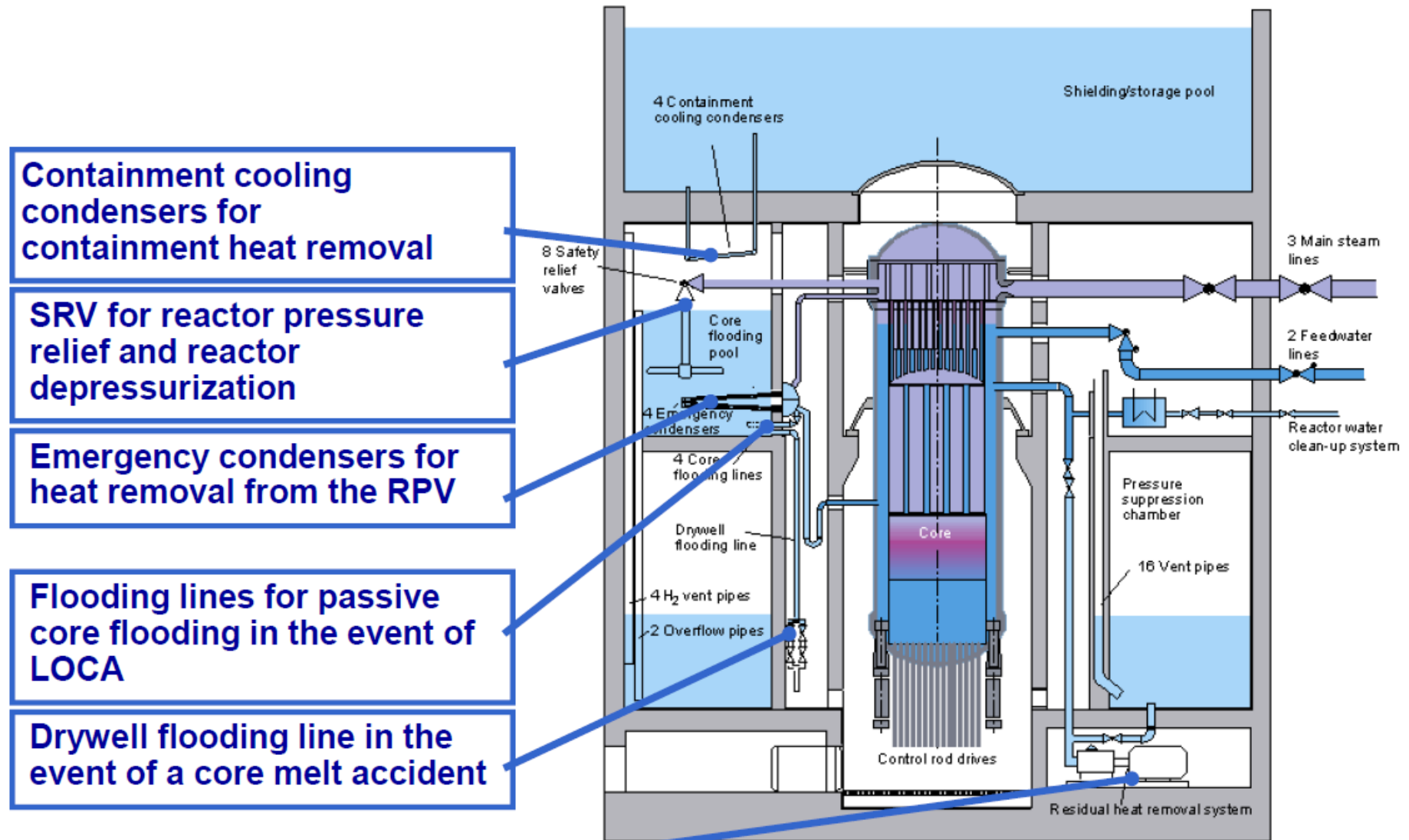


Plus de pompes  
La cheminée crée un puissant « tirage » diphasique mais le pilotage de la flexibilité en suivi de charge est limité aux croix de contrôle.

Sûreté  
Vers le tout passif. Le mix optimal est-il encore à concevoir (voir plus loin)?

## Le « design » (« drawing ») de KERENA et ses mérites

sûreté, simplicité : « œuf NSSS » + anneau de service (eau à tous les étages) + diphasique + gravité + « lac d'enceinte » (C. Fribourg) rechargeable. Un lac au sommet ?



**En déterministe, il n'y a que des conditions nécessaires**

Le « passif » ne suffit pas pour engendrer, quel que soit le contexte, un enchaînement de transitions sans échec vers un état final sûr.

Ensuite, il y a les probabilités ... Et la réalité qui advient.

FUKUSHIMA

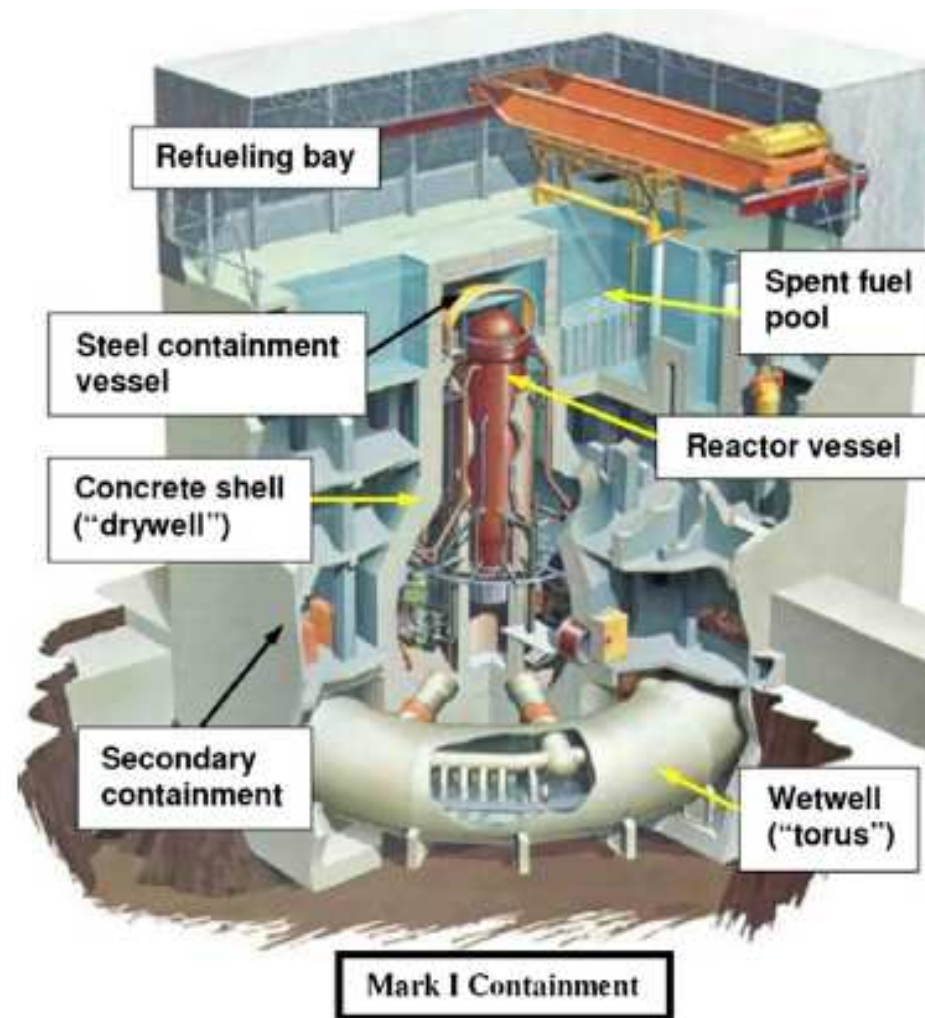


Figure 12.15. Overview of Mark-1 type BWR (Unit 1, 2, 3 and 4). ©DR.

Un excellent principe  
(des années 60), une  
défaillance élucidée  
en août 2014

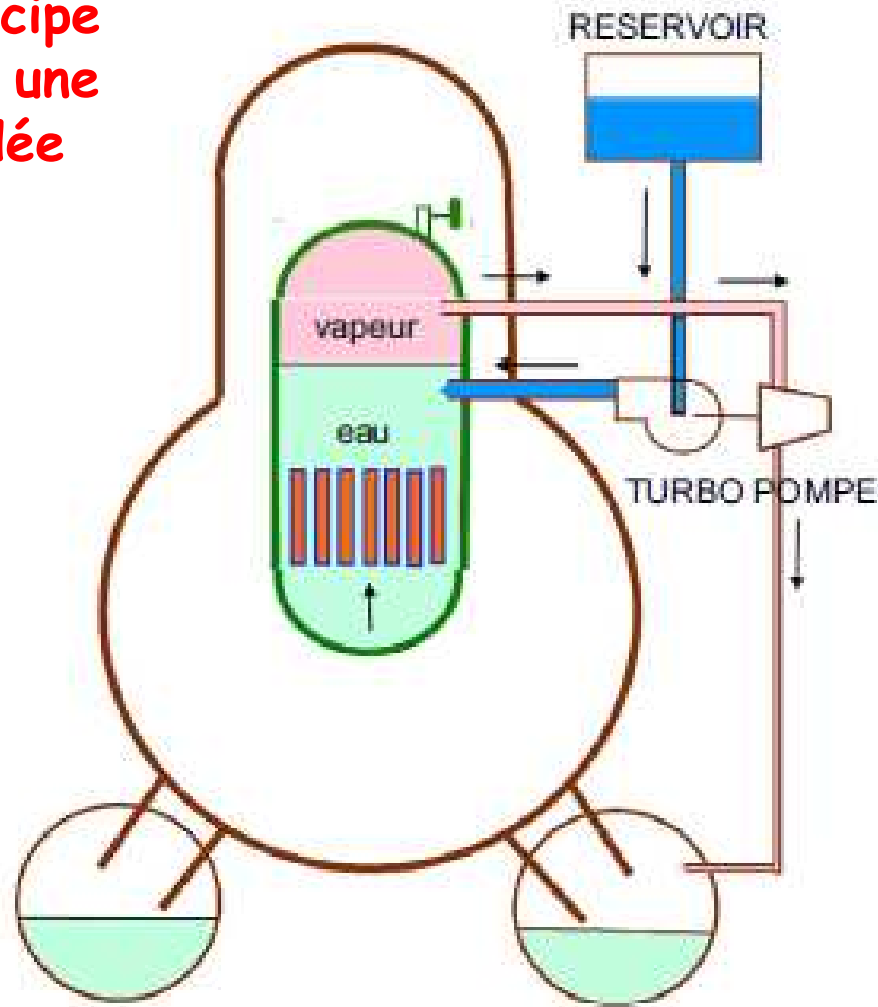
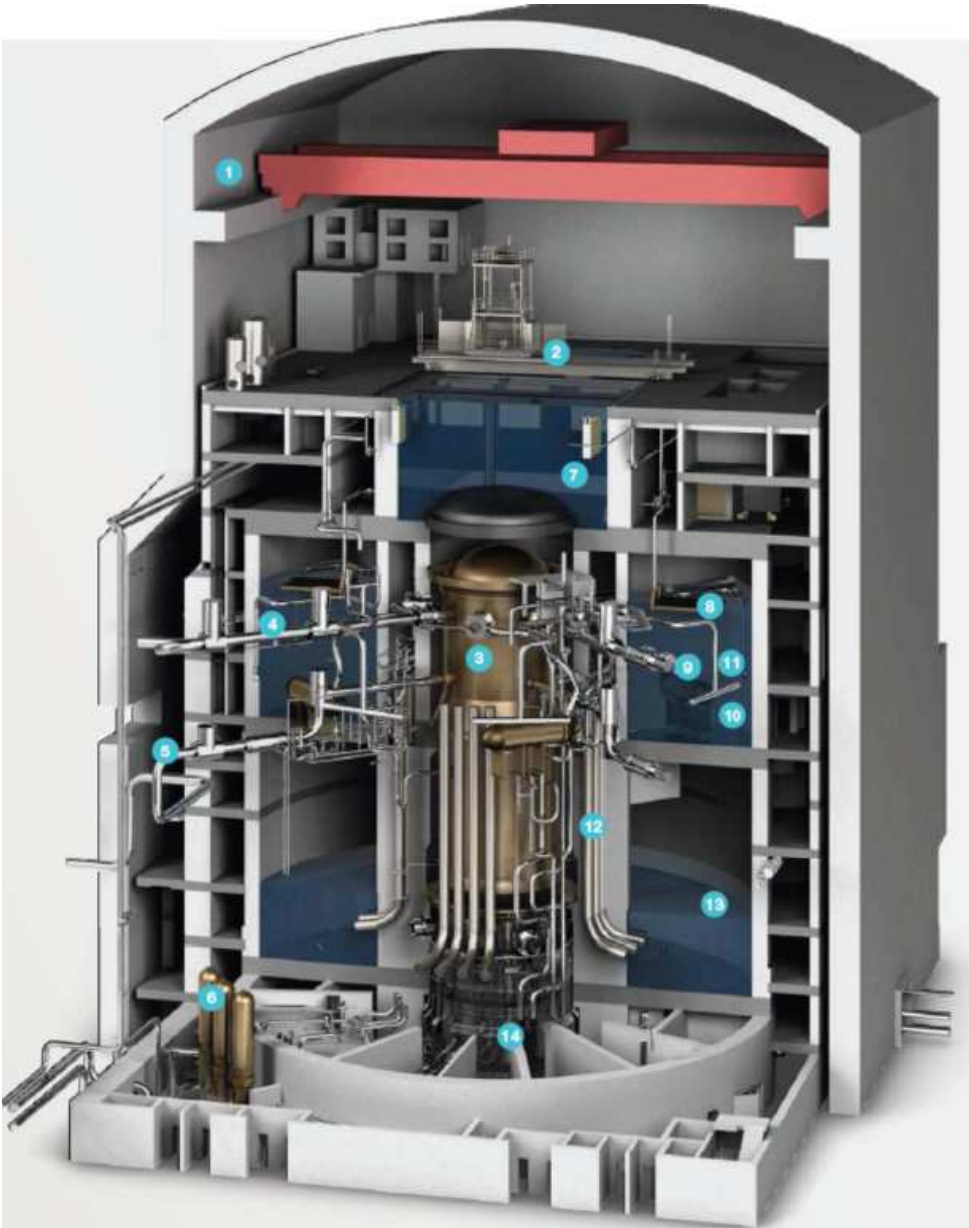


Figure 12.16. The potentially long-lasting passive cooling of the core by a turbo-pump driven water circulation.



# Retour à KERENA



## Retour sur et autour de l'EPR

**Flexibilité** : minimum technique à 25% Pn et remontée à 2.5%/mn → 60% Pn puis à 5%/mn → 100% (total < 25 mn)

ATMEA1 : 25 - 100%;

KERENA : suivi de charge : 100% ↘ sur variation de vitesse des pompes et ↘ 40% avec les croix de contrôle.

Grand cœur + structures (réflecteur épais) + instrumentation interne (collectrons et aeroballs) : avantages et inconvénients :

- Économie de neutrons et protection de la cuve (avec mesures et simulation);
- Mesures au démarrage; connaissance de l'état 3D du cœur (avec simulation);
- pilotage/flexibilité : mode T résout.

Construction (voir AP1000 – page suivante)

### EPR-NM

Références : Oscar Wilde; rasoir d'Ockham; formulation St Exupéry. En substance et partiel : la perfection est atteinte ... Quand on ne peut plus rien retirer.

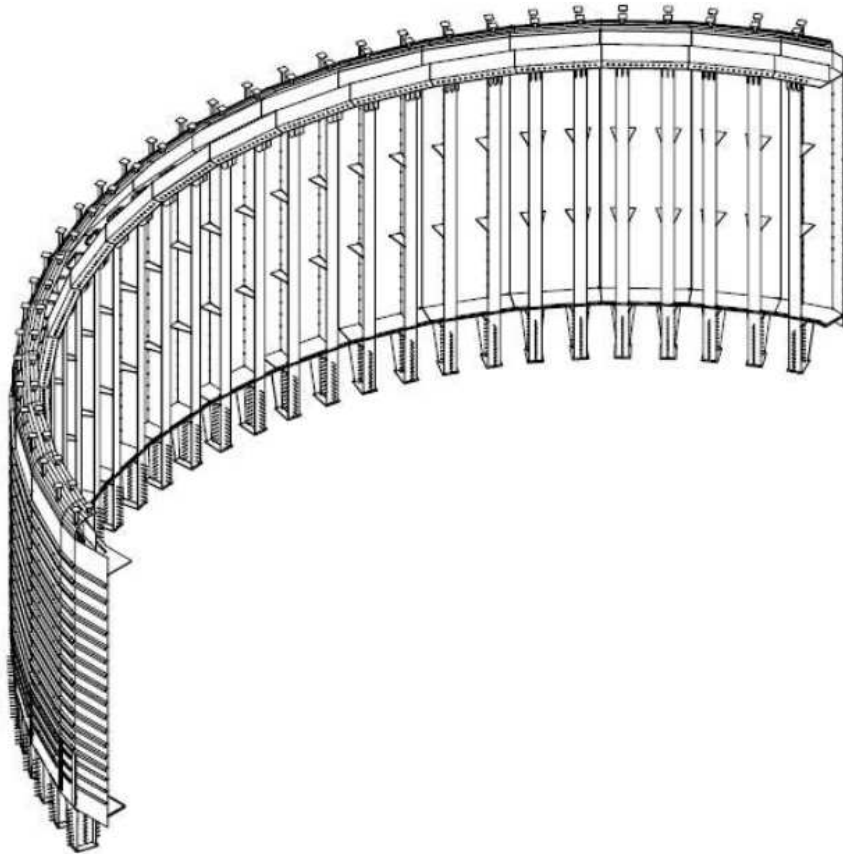
Une paire en 2030 ? Loin. Pourtant logique, vu d'aujourd'hui. Rappel : 2000 ... Construction ... Gains potentiels, valorisables ?

### **Autres thèmes pour l'innovation :**

IVR/EVR; APRP et combustible (« accident tolerant fuel », le mal nommé ?); REP sans bore; instrumentation<sup>+</sup> ; etc.

**Au-delà** : voir plus loin : le cycle et le cœur

## Innovations en construction : AP1000 (d'après Ansaldo)



AP1000 - CA03 Structural Wall Module

Size: 35m(L) x 14m(W) x 13m(H) – Weight: 190509kg

Quelques difficultés :

- Contrôle des déformations (fabrication, assemblage, installation); cf. liner EPR Olkiluoto?
- **Connexions** après pose d'un module équipement/composant (tuyauteries)
- Exigence élevées de précision n-points/n-positions, **alignement** difficile

**190 †**

Plant	Concrete (m <sup>3</sup> )	Rebar (t)
Sizewell B (UK)	520.000	65.000
US Typical	300.000	46.000
ABWR	351.000	<12.000
AP1000	<100.000	Approx. 10.000

**12000 vs. 10000 :**  
**Intéressante**  
**comparaison** <sup>23</sup>

## Le marathon en cours

Constructeur	Réacteur	Puissance brute	Notes
<b>Opérationnels</b>			
GE-Hitachi	ABWR	1380	Quel statut ? Japon; exploitation 1997
KHNP	APR 1400	1450	Shin Kori - exploit. 01/2016 → UAE En cours d'évolution (convergence)
Gidopress	VVER 1200	1200	Novovoronezh2, mi 2016 ( <u>AES-2006</u> ):
<b>En construction</b>			
Westing-Toshiba	AP1000	1250	Chine; USA (→ UK ... etc.)
EdF-AREVA	EPR	1750	Olkiluoto; Flam3; Hinkley Point (presque ...)
CNNC & CGN	Hualong One	1150	Fangchenggang, Fuking; convergence/export
<b>Planifiés Nizhny Novgorod etc. (Russie)</b>			
GE Hitachi	ESBWR	1600	USA, etc. (UK); 1600 ...
Mitsubishi	APWR	1530	Tsuruga; design certifié US, EU
AREVA-Mitsu	Atmea1	1150	Turquie (Sinop)
Gidopress	VVER-TOI	1300	Nizhny Novgorod etc.; Aqkkuyu (Turquie)



## Éléments de comparaison selon les principaux critères de Gen-3

**Sûreté accrue** (*prévention & mitigation; événements extrêmes*) : constat : convergence vers deux ou trois modèles de base comprenant par exemple, pour les REP de puissance significative, double enceinte et récupérateur de corium. EPR « complet ». AP 1000 un peu « à part ». Pour les REB, maquis « ABWR »; ESBWR un peu « extrême » (voir les tendances GE-Hitachi pour la suite de l'évolution). Protection contre la chute d'avion sous presque tous les angles : à préciser.

**Economie** : paramètres argumentables **et** éléments stratégiques

**Simplification** : deux volets (liés) : les composants et la construction; modularité; processus : AP1000 (en cours de rodage, gains à confirmer) ; l'empreinte et les masses de béton et d'acier très réduites par rapport à Sizewell-B (mais le ferrailage : proche de l'ABWR, connu : simplicité - compacité, dry-well / wett-well).

**Fiabilité & Souplesse de fonctionnement**

...

**Éléments « stratégiques »** dont le financement et l'offre sur le combustible (neuf ... et usé :Russie; GNEP : USA vers 2006).

## Classement ?

Classer des réalisations (cycle de vie, mais au moins construction + exploitation) de concepts « **accomplis** »,

Or : évolution et convergences en cours

Et : biodiversité (passée, présente)

La sanction viendra du « marché », au bout de quelle période de rodage (sans catastrophe) ?

→ «Marketing et design » (A. Bucaille) (voir table ronde)

Mais attention : marketing « nucléaire » (voir **forces et acteurs**),

Et « **le nucléaire est invendable** » (Anonyme, conforme au développement de S. Gabriel, alors Bundesminister / Umwelt)

Invendable partout ? Pas vraiment ... → un élément de réponse

En tout cas : pas de « low cost » au sens « dégradé ». →

Harmonisation des évaluations de risque, des exigences. Long chemin ?

Et il y a des gains accessibles par l'innovation, le design, le REX

# SMR ? « Demi-foulée » ou véritable complément ? Marché ? Concepts

Le réacteur, le processus ou les finances ?

« Licensing by operating » (Andy Kadak)

Flexibilité accrue ?

Sûreté-sécurité, urbanisation (ONU)

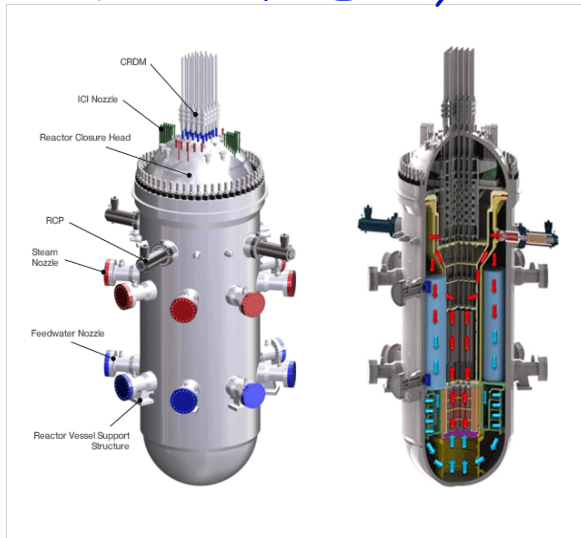
Comparaison avec le solaire et principe de spécialisation ?

Réalité/utopie/devenir

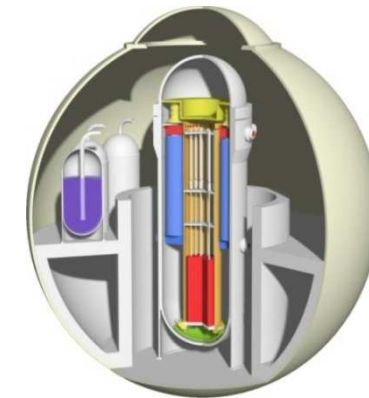


# "petits réacteurs" (SMR) - REL

*SMART - KAERI, Corée*

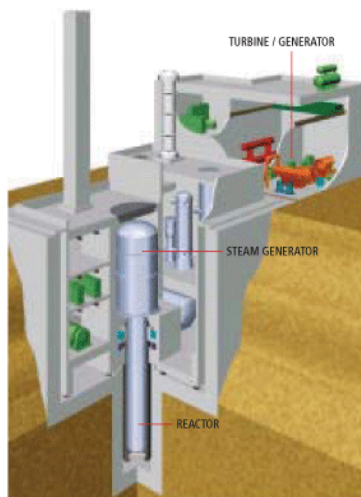


*mPower - B&W, USA*



*IRIS - Westinghouse, USA*

*"Small is beautiful... but Big is efficient"*



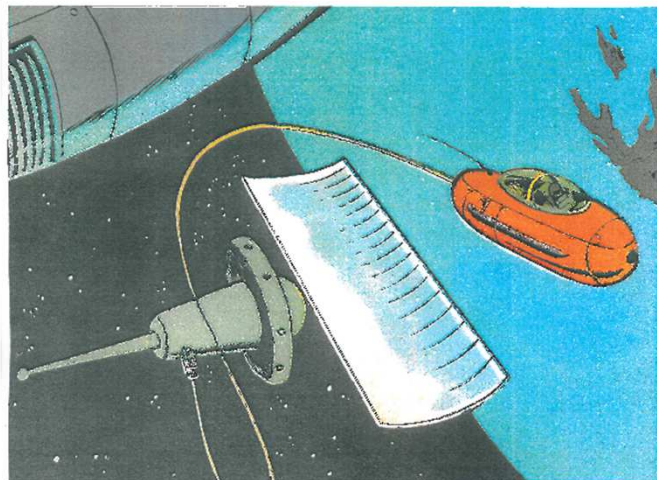
*4S - Toshiba, Japon*



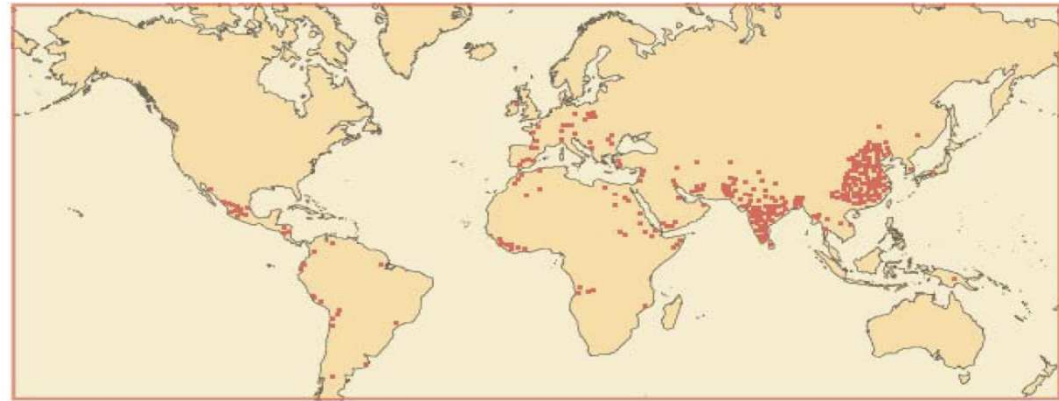
*KLTs 40 S - OKBM, Russie*



## Tendances : le contexte Energies et sociétés



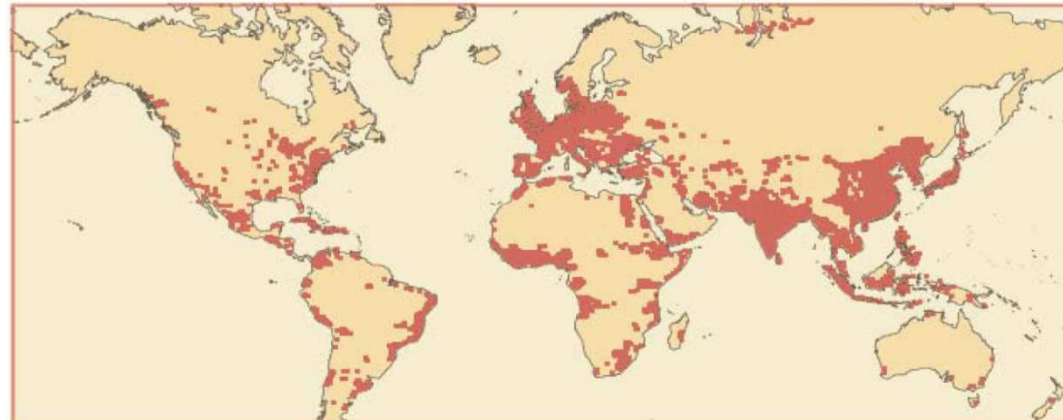
**« Reality is what which,  
when you stop believing in it,  
doesn't go away »  
Phillip K. Dick**



**il y a 1 000 ans : 300 millions d'habitants**



**en 1800 : 1 milliard d'habitants**



**en 1960 : 3 milliards d'habitants**

*Images : Pr. Jacques Foos,  
déc. 2011)*

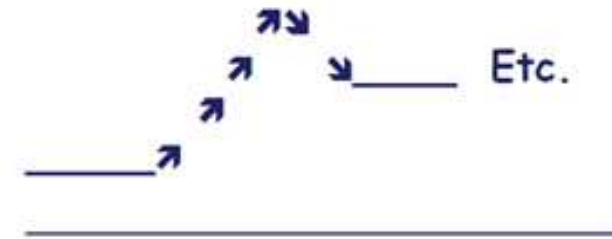




en 2050 : 10 milliards d'habitants

Historiens « de la longue durée »  
 Les effets démographiques d'un « saut » technico-social en agriculture, énergie ... reproduisent un « pattern » récurrent « catastrophique » sans auto-contrôle → souffrance pendant, galère après comme avant, en intensité d'effort, pour un progrès des conditions de vie « moyennes » ; au XXIème siècle : maîtrise ??

GES : Il n'y a pas que « l'énergie » et il n'y a pas que le CO<sub>2</sub>  
 + effets non-linéaires du réchauffement : dégagement de CH<sub>4</sub> ...



J. Foos

Il n'y a pas que le CO<sub>2</sub>

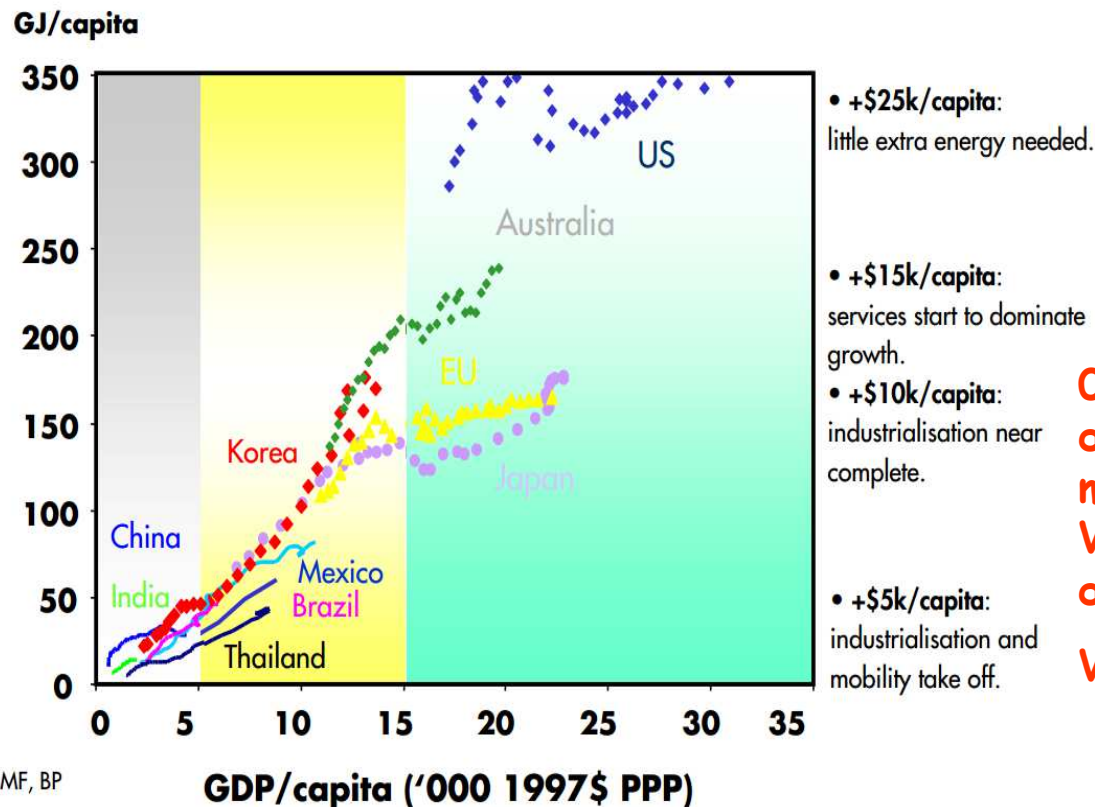
*Il y a aussi le méthane, 23 fois plus nocif pour l'effet de serre que le CO<sub>2</sub>*

*Exemple : un bovin émet 650 kg de CO<sub>2</sub>/an et 360 kg /an de méthane, soit 9 tonnes en équivalent CO<sub>2</sub>/an*

*(respiration humaine : 0,5 t de CO<sub>2</sub>/an et individu)*



# Climbing The Energy Ladder



• +\$25k/capita:  
little extra energy needed.

• +\$15k/capita:  
services start to dominate  
growth.

• +\$10k/capita:  
industrialisation near  
complete.

• +\$5k/capita:  
industrialisation and  
mobility take off.

0-5000 \$(1997) / hab.an :  
**décollage : industrialisation,  
mobilité, urbanisation vivable  
Voir Inde (présent + tendances  
démographiques et économiques)**

**Voir Afrique : idem**

En 2008, 1.3 Milliard de personnes, soit 22% de la population des pays en voie de développement (PVD, environ 6 Milliards d'habitants), vivaient avec moins de 1.25 \$ par jour. En Afrique subsaharienne, 47% de la population vivait avec moins de 1.25 \$/jour.

42% de la population des PVD (6 Ghab.) vit en-dessous du seuil de 2 \$ / jour.

“Le véritable défi semble être celui des 2 \$ quotidiens, qui constitue le seuil médian des PVD : le nombre vivant en-deça a seulement décro de 120 millions d'individus entre 1981 et 2008”  
D'après Le Monde - 2 mars 2012

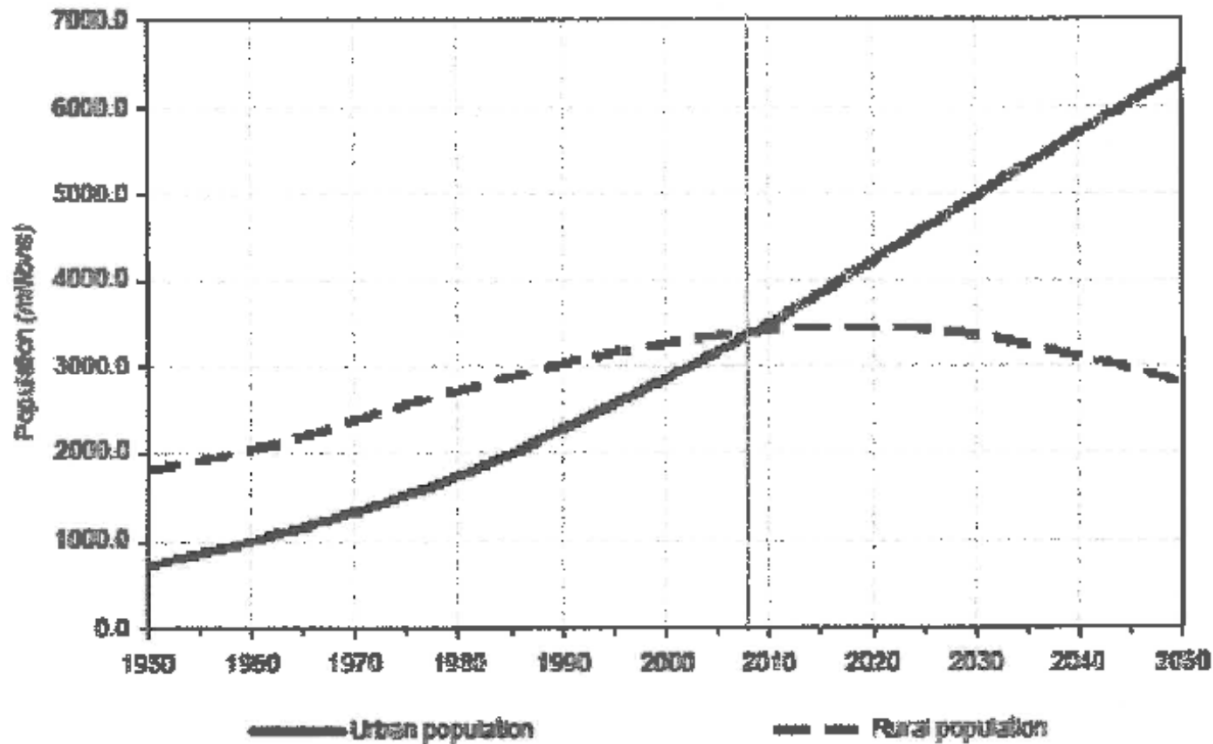


**Les bases d'un scénario heuristique : les tendances durables de la croissance en cours :**

**l'évolution du taux d'urbanisation d'ici 2050 selon l'ONU**

**Population mondiale urbaine (en trait continu), rurale (en tirets)**

Figure 1.1. Urban and rural populations of the world, 1950-2050



# The "3E's" of Energy Supply

## Contextual

performance  
dimensions

- **Political strength**
- **Societal strength**
- **Economic strength**

**WEC**

Nucléaire : Prométhée, Hybris;  
Robur le Conquérant - le plus  
lourd que l'air - (Jules Verne) :  
« Trop tôt » ...

Déjà ? 😊

Economics

Et la culture :

« Votre ère, à vous,  
ingénieurs, s'achève. Elle  
était fondée sur trois  
piliers : l'intérêt général,  
la rationalité, le projet »

« **Moreover, nuclear  
is a very boring  
technology** »

Environment

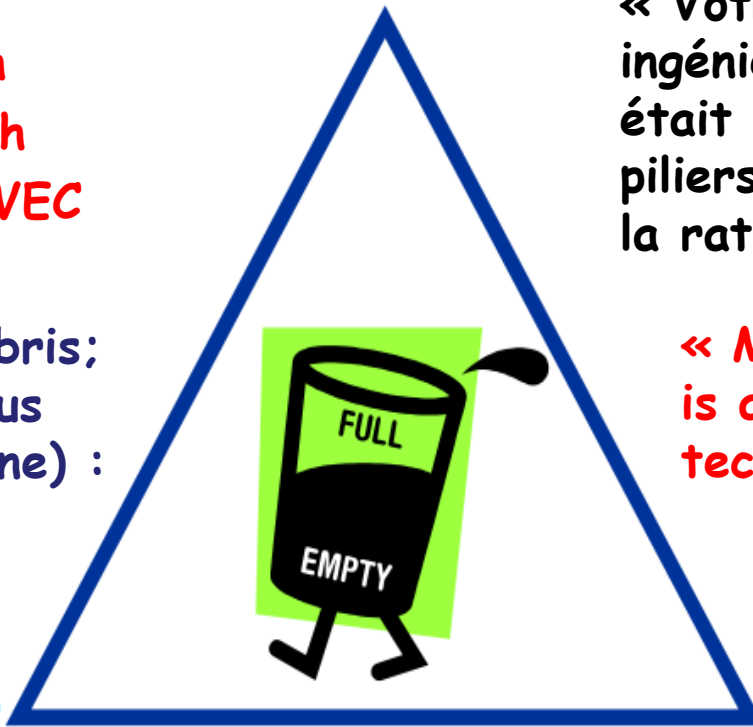


Image SHELL

Energy  
Security

## La place du nucléaire dans la transition énergétique

### 2 - la capacité de satisfaire les conditions de la croissance

Scénario enveloppe proposé → vers 2050 : 1500 GW-él.an/an : 20 Gtep, 50%  
électricité; > 25% nucléaire (?)

#### Conditions à satisfaire :

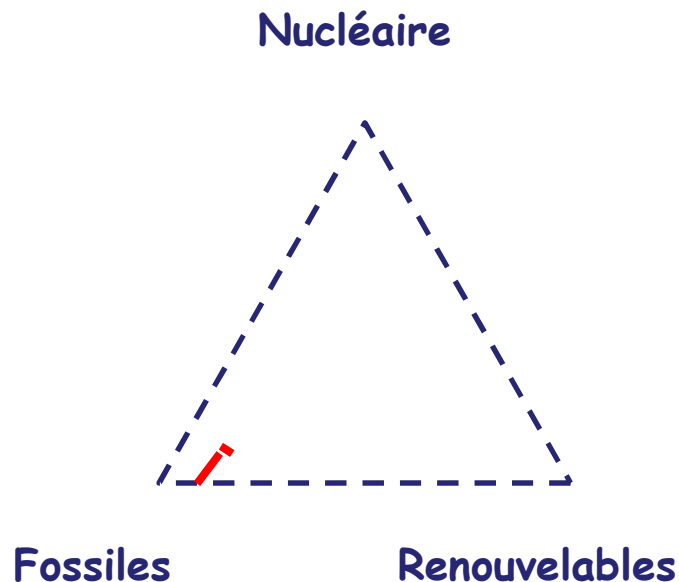
- Filières : compétitivité (en base), sûreté;
- Capacités technologiques (dont compétences en construction - exploitation, sûreté : autorités et TSO, harmonisation : ex. : APRP, IPG, RIA; IVR vs. EVR; industrielles, économiques;
- Corpus réglementaire et stratégique (prolifération, sûreté, commerce, transports, déchets) harmonisé mondialement
- Ressources (uranium naturel (pour l'U5 ...); thorium).
  - Ressources "abordable"; Masses "engagées" par le parc considéré: distinction entre calcul de l'investisseur et calcul de l'héritier;
  - Rente minière;
  - Améliorations du cycle;
  - Problèmes du recyclage : physique du coeur et combustible; usines du cycle et transports

Conclusion : il n'y a que des conditions nécessaires; elles peuvent toutes être satisfaites pour 1500 GW-él.an/an, mais en mettant le système en mouvement accéléré et sous tension. Au-delà : surchauffe et Incertitudes. (1500GW-él.an/an ↔ ~ 1800 GW-él installés)

## Temporalité et spatialité

Le temps de l'énergie est un temps long

- Les faits : évolution de la structure du bouquet énergétique mondial de 1965 à 2012



1965 - 2012 : offre mondiale d'énergie  
primaire : 3,75 Gtep ↗ 12,45 Gtep : x 3,3  
Structure du bouquet : évolution lente, part  
toujours dominante des énergies fossiles.  
Inertie de la demande + inertie de l'offre

- Stratégie : « King Coal », pétrole ...
- Investissements : capital et projets ...

Fonction de production KDP : Kapital + Labor +  
Energy →  $Y = K^\alpha L^\beta E^\gamma$  (Cobb -Duglas)

Coût et élasticité

L'investissement sera déterminant

Attention à la capacité industrielle ...

Comparer à la prévision de l'Energiewende : 63% de renouvelables en 2030  
Comparer à la voiture électrique à la Foire de Paris autour de 1900



## Temporalité (fin ?)

*« Je crois que l'eau sera employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène, utilisés isolément ou séparément fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisable »*

*Jules Verne – L'île mystérieuse*

### Le carburant hydrogène

*En 1805, le premier moteur à explosion fonctionnait à l'hydrogène (de l'inventeur suisse Isaac de Rivaz)*

*En 1899, la première voiture à dépasser les 100 km/h est électrique (la « jamais contente » de l'inventeur belge Camille Jenatton)*



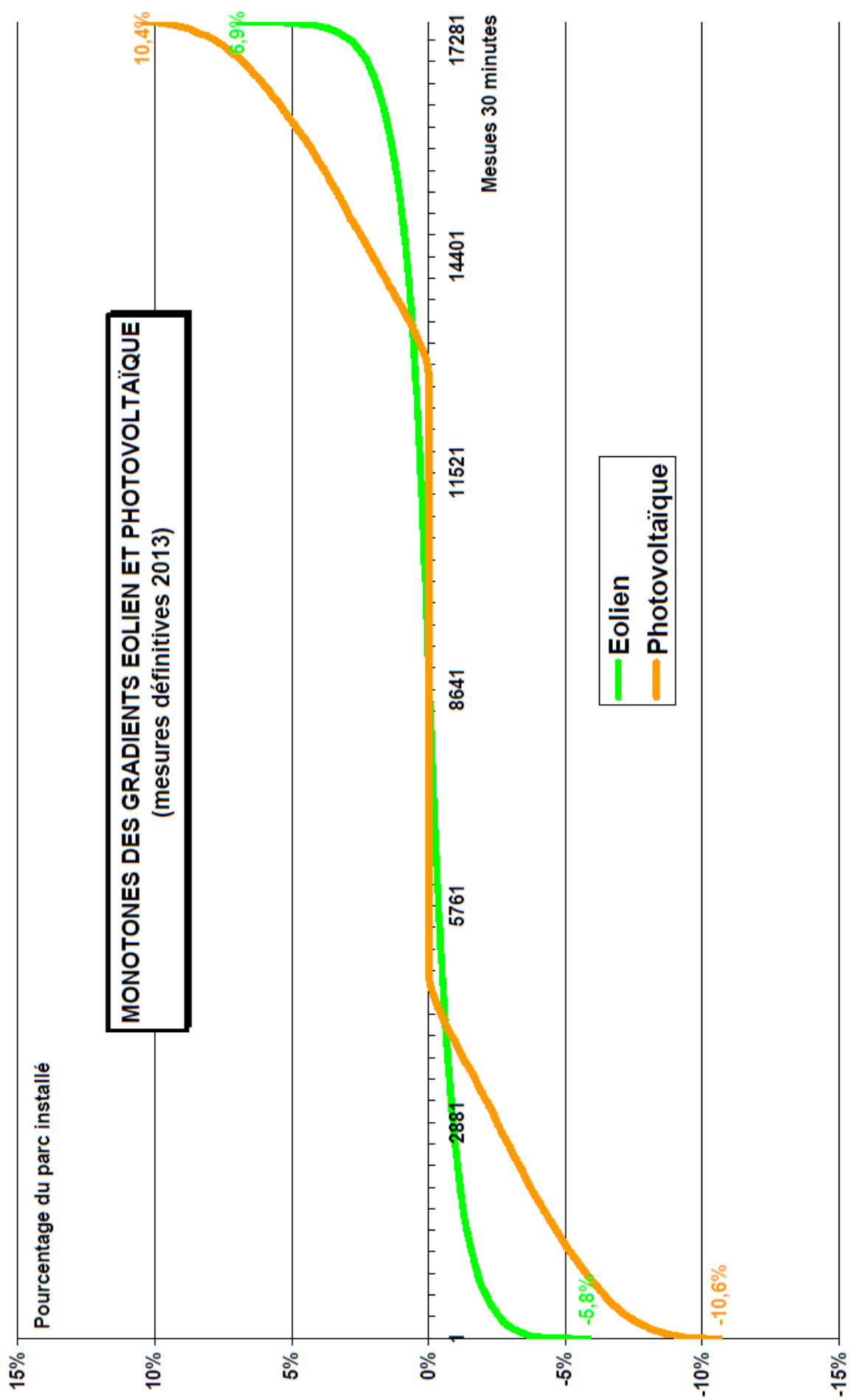
Professeur Jacques FOOS - 6 décembre 2011 85

**1900 - "The motor vehicle of the future will obviously have an electric engine, if cheap and light refill batteries are available in the most remote places."**

Tendances - 1 : valeur ajoutée dans la transition énergétique :  
une base flexible pour l'intégration des EnR-I  
+ un stockage à fort  $k_p$  et longue durée de vie

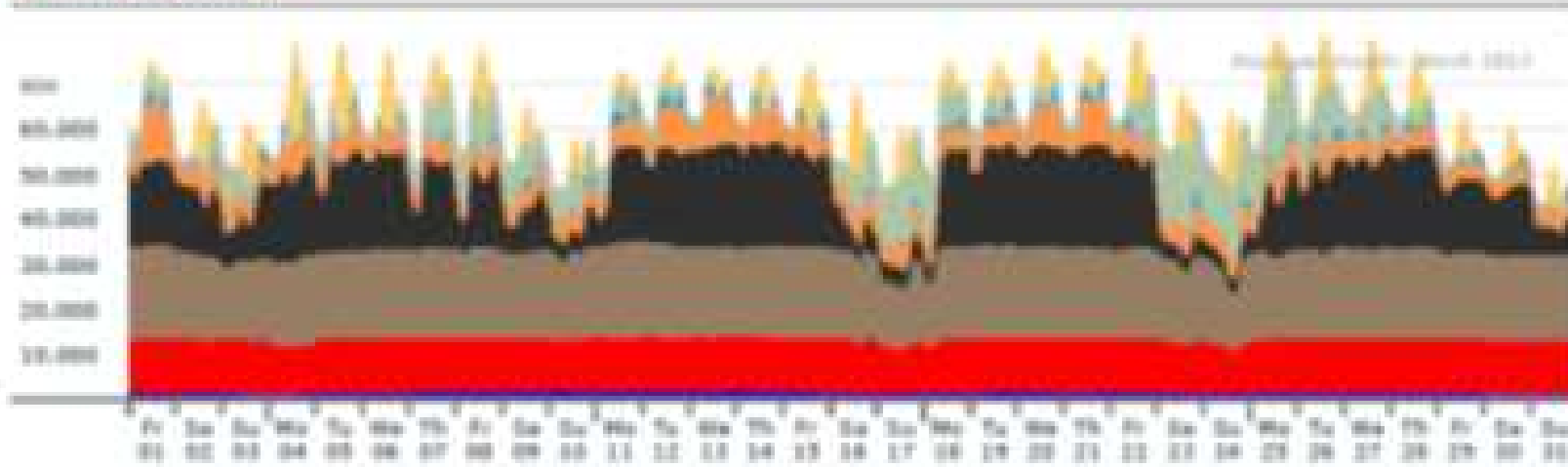
Rappel : « a system issue »; les invariants :

- L'introduction d'une puissance installée PI d'EnR-I ne réduit la puissance installée du parc préexistant, que de typiquement 3% (PI)  
Causes : hibernation solaire, « siestes » anticycloniques éoliennes paneuropéennes. Le stockage intersaisonnier « abordable » à grande échelle est - durablement - irréaliste.
- Le  $k_p$  des autres sources baisse arithmétiquement; gaz premier touché (aujourd'hui) ...
- L'intermittence ne doit pas être considérée comme un problème scalaire (PI(t)). La qualité du courant est cruciale. Elle dépend de la source, des réseaux (T,D), des réactivités et flexibilité du stockage, de la base flexible et du « back-up ». Une donnée utile est le spectre des fréquences (J-P Hulot, RTE) des Enr-I → calcul.
- L'écrêtage utile, facilement calculable et peu coûteux, s'imposera.
- Valoriser l'énergie utile vs. toxique → auxiliaires bien dimensionnés (réactivité, P, énergie stockée, %Pn/mn et localisés de « time shift » et de consolidation (« firming »).

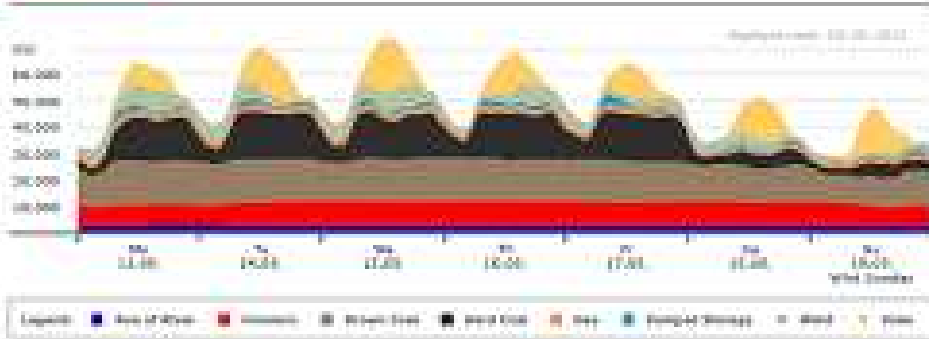


# Allemagne (2013)

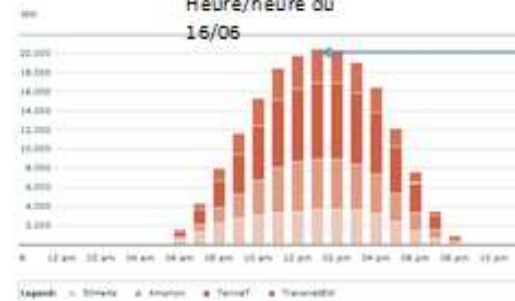
Actual production



Actual production



Production  
solaire  
Heure/heure du  
16/05

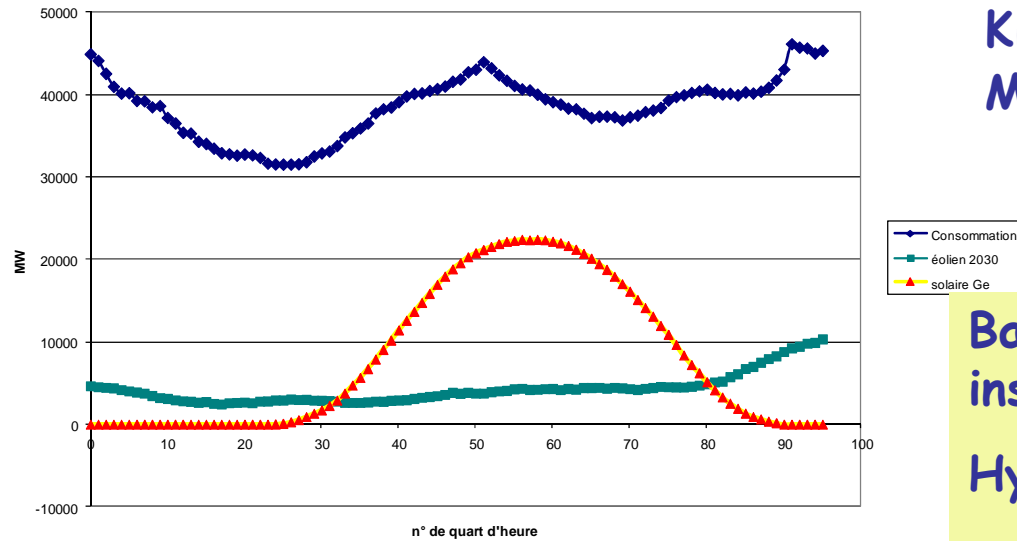


Pic de production de la  
journée : 20000 MW



# Transposition à la France (autour de 2030)

16/06/2013 : consommation vs, solaire et éolien "2030"



Killing the base-load fleet "softly"  
Menace sur les réseaux (T,D)

Remèdes ?

Base flexible de grande puissance installée

Hydraulique pilotable

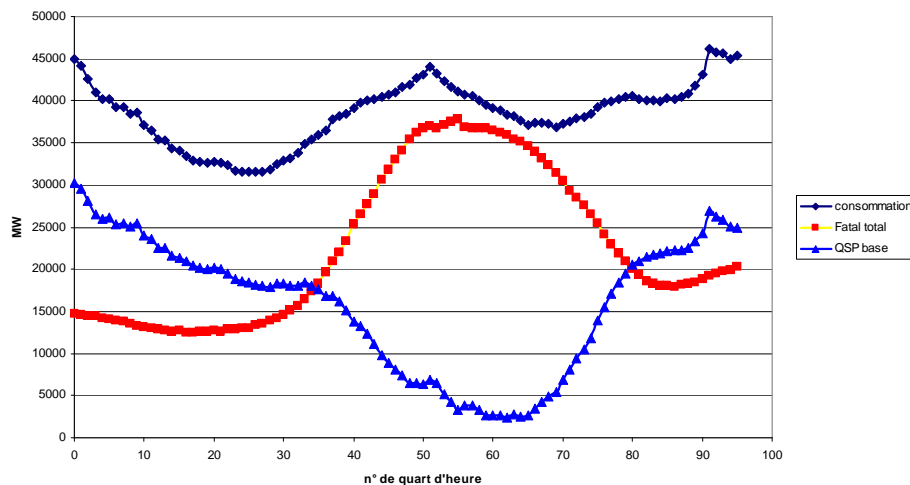
Cogénération

"Back-up par stockage" réduisant le besoin de back-up par production

time-shift, at the right location

Plus climatisation et pompes à chaleur efficaces (?) en hiver

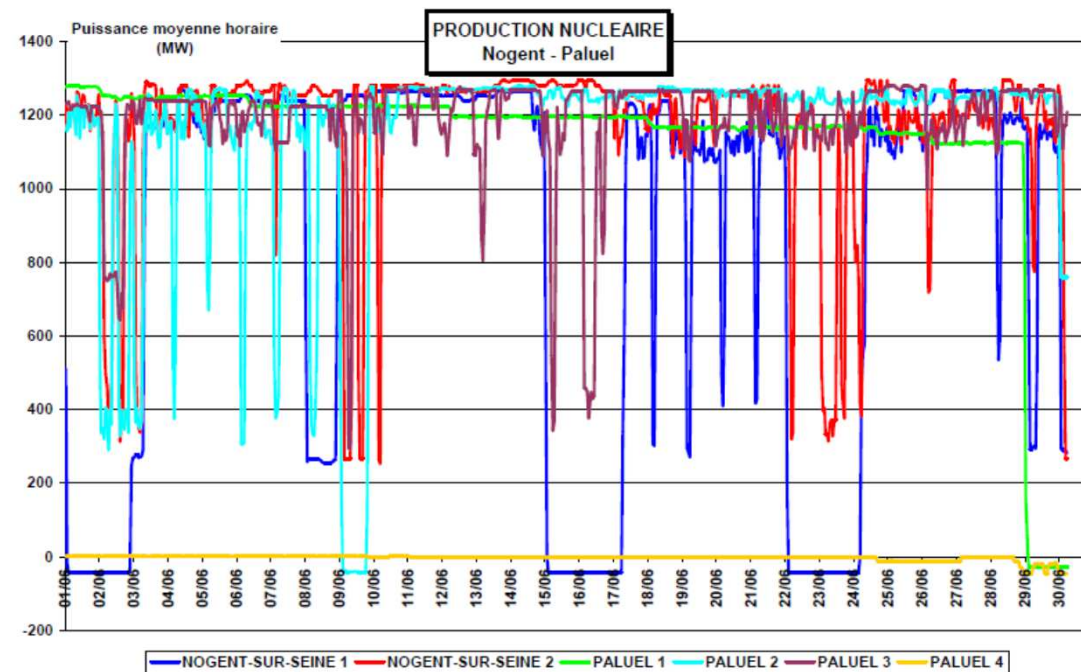
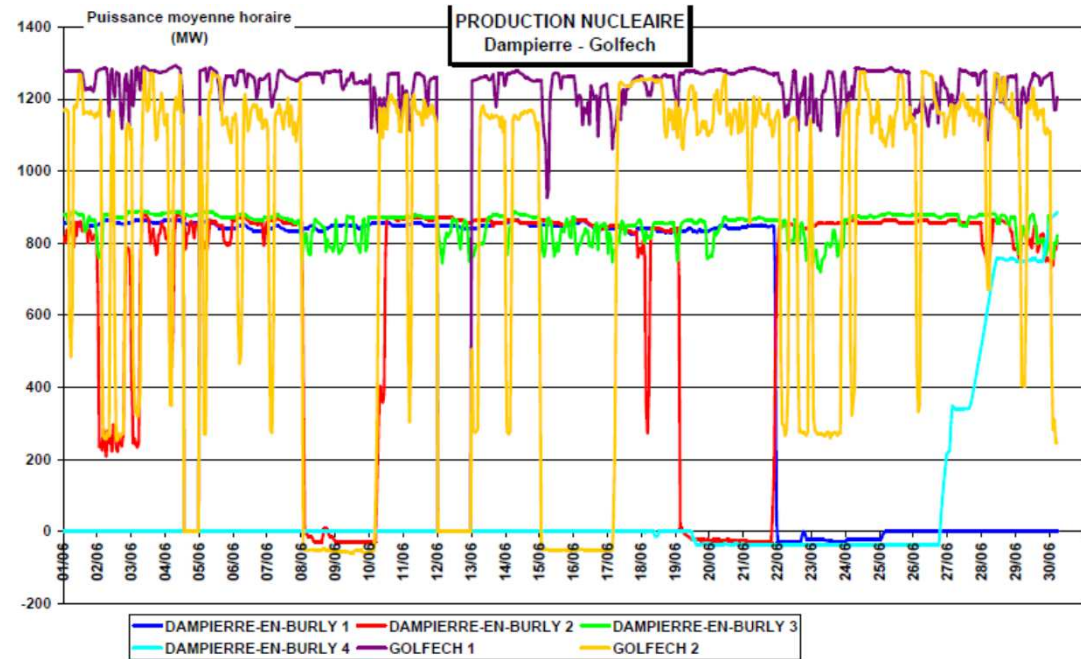
base résiduelle en été en 2030 (données du 16 06 2013 Fce et Ge)



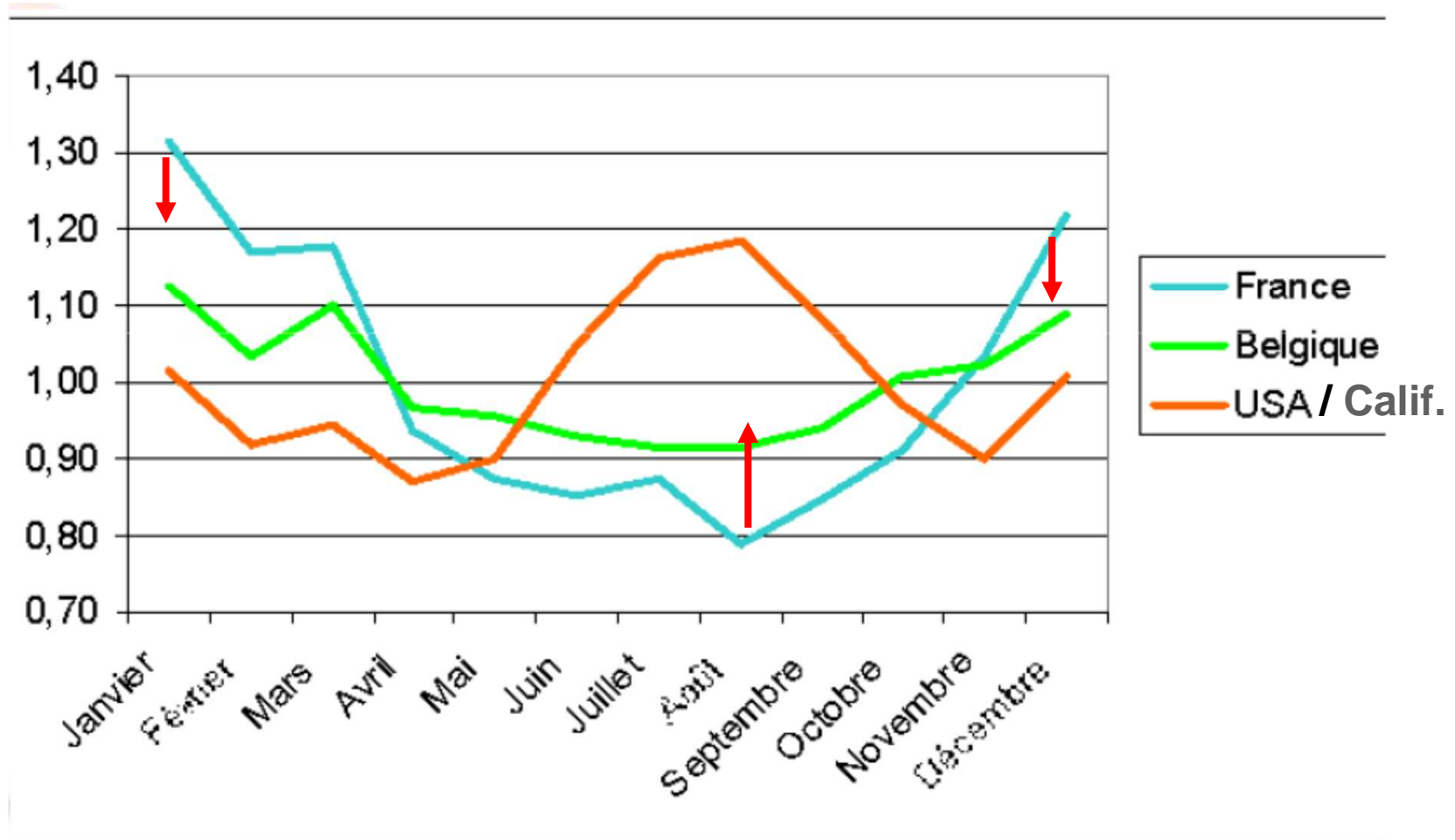
Le nucléaire « peut le faire »,  
autant que le charbon moderne  
et le gaz ancien : voir  
caractéristiques EPR et  
contributions actuelles du parc:  
parfois + 20 GW en 3 heures  
en hiver; ci-contre : un  
dimanche d'été (2013),  
Attention aux arrêts de  
tranche sur « flare solaire »,  
transposés en 2030. Mais le  
stockage « circadien » est  
possible. + Clim ...

Accroître : la proportion de  
réacteurs participants et  
réduire le minimum technique

Graphiques : JP Hulot et RTE



**"It's the air conditioning, stupid !"**



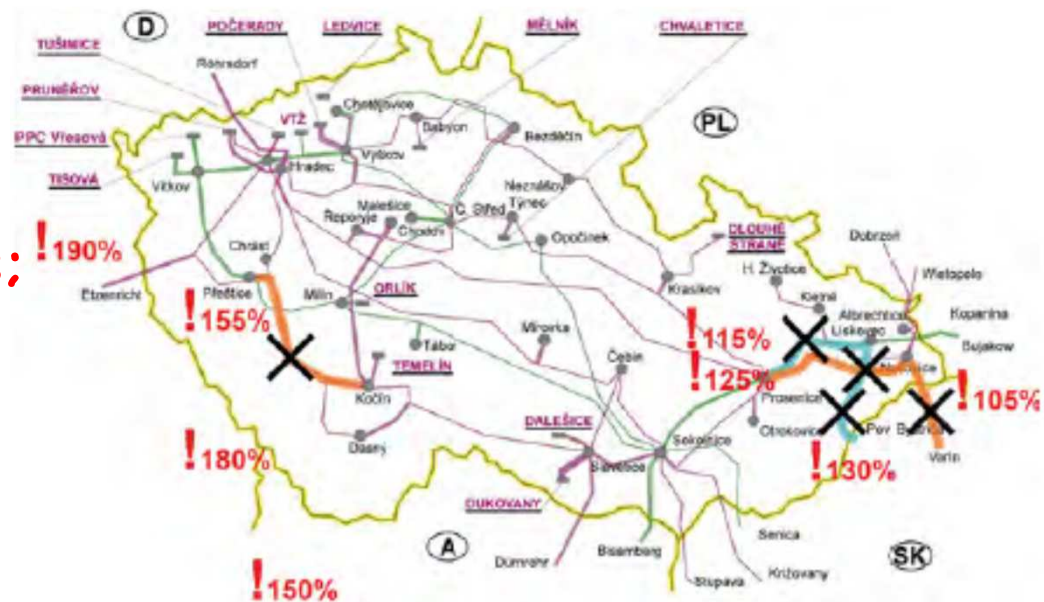
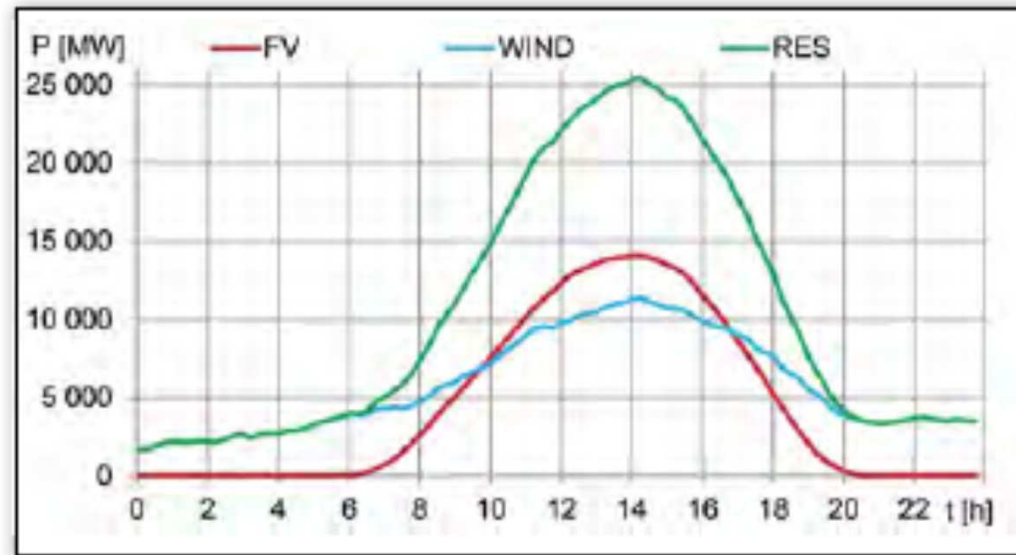
“The power flows from North to South through lines of least resistance, causing parallel flows in Benelux countries in the West (2006) and in Poland and the Czech Republic in the East”.

+ Limitless exchanges between Germany and Austria.

Europhysics News (2013)

Le réseau européen:  
 territoires et interconnexions;  
 T&D : crucial.  
 Vitesse d'évolution ?  
 « Follow the money »  
 + résistances.

▼ FIG. 4: Production from German renewable energy sources (RES) on August 22<sup>nd</sup>, 2012. Red denotes the photovoltaic, blue the wind power; the green curve is the sum.

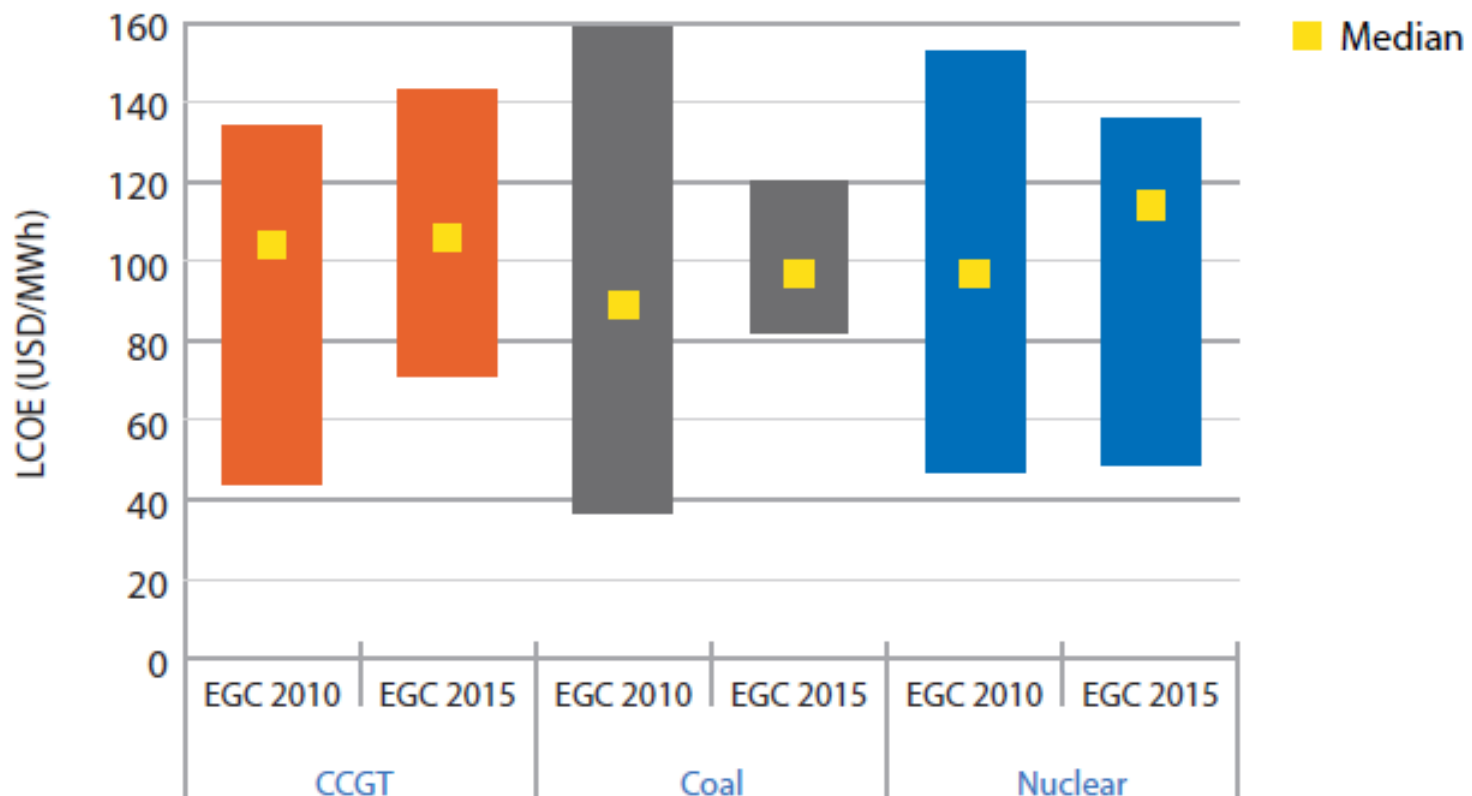




## Tendances - 2 : réduire le coût actualisé, donc surtout l'investissement Coût de production actualisé pour les technologies de « base » (2010 et 2015) - OCDE

Carré jaune : médiane. Plusieurs causes d'écart entre des coûts actualisés très différents (facteur 3 entre les extrêmes). Difficile de « déconvoluer ». Poids des durées engagées avant la MSI et des intérêts intercalaires.

Figure ES.3: EGC 2010 and EGC 2015 LCOE ranges for baseload technologies  
(at 10% discount rate)

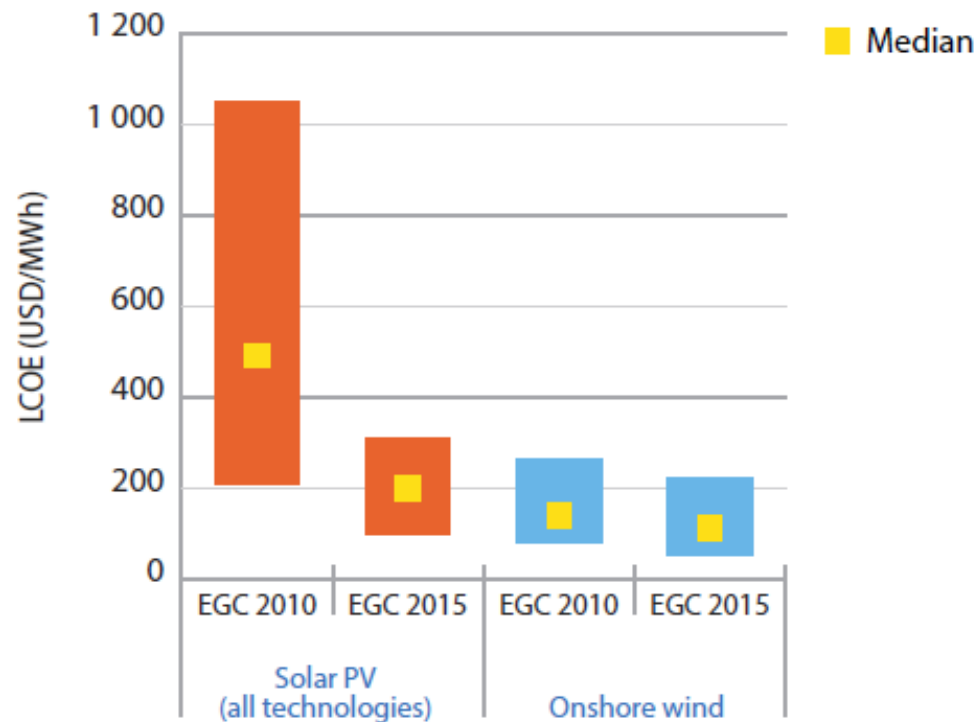


† EGC 2010 results have been converted to USD 2013 values for comparison.

## Coût de production actualisé pour le solaire et l'éolien terrestre (2010 et 2015)

Nettement supérieur (sauf l'éolien onshore). Eolien offshore autour de 200 €, donc plus en USD 2013 et à dynamique lente sinon bloquée. Surtout, il faut ajouter le stockage, les surcoûts réseau, le surcoût pour capacité de back-up (incluant les bases flexibles). Largement inconnus et croissant non-linéairement, au-delà de 25 à 40% (selon le contexte régional) de pénétration des EnR-i.

Figure ES.4: EGC 2010 and EGC 2015 LCOE ranges for solar and wind technologies  
(at 10% discount rate)



EGC 2010 results have been converted to USD 2013 values for comparison.

# Tendances - 3 : fermeture du cycle. USA/DOE : si près, si loin ... Laisser du temps au temps pour converger, mais pas pour agir

An illustrative nuclear fuel cycle evolution studied in the United States

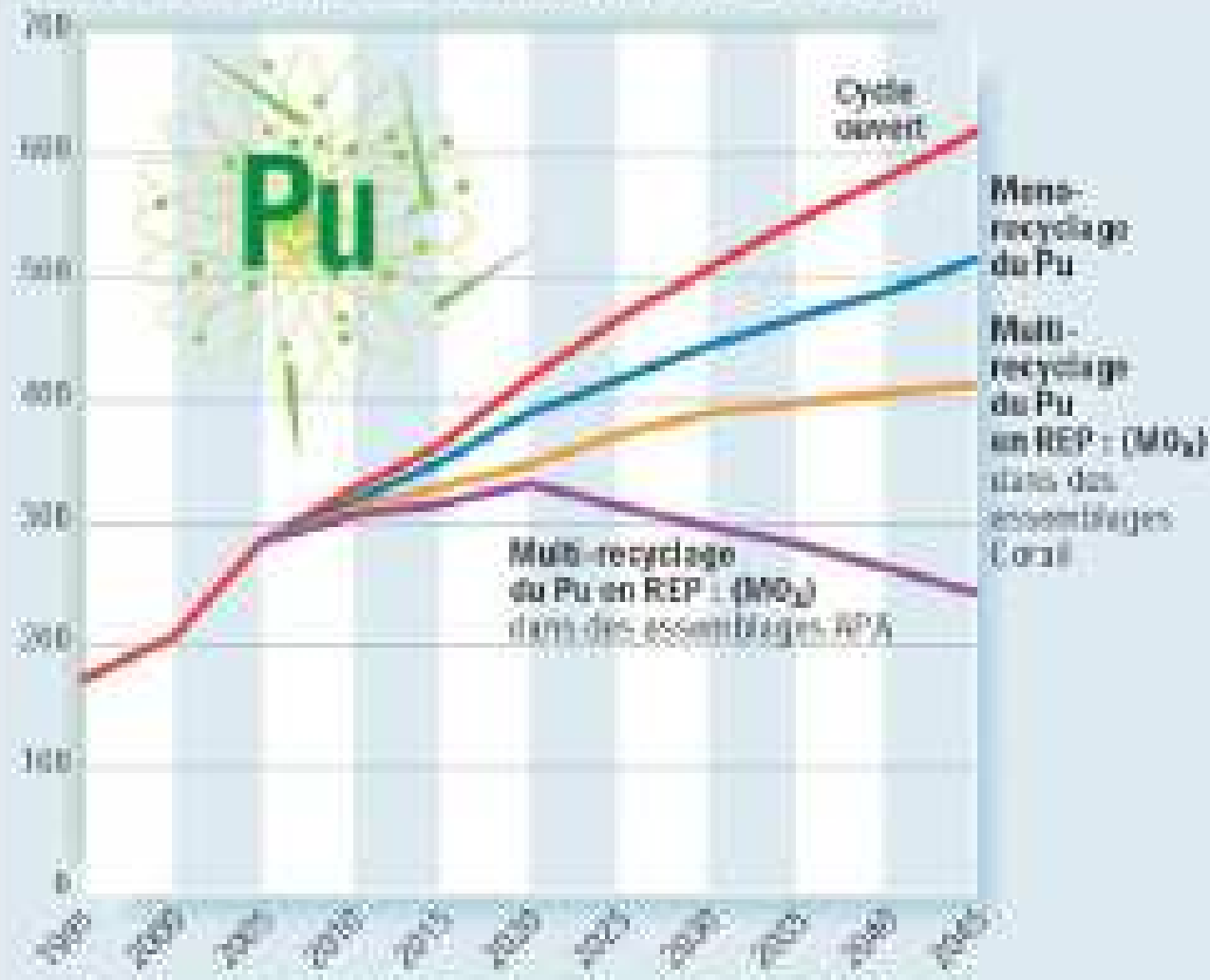
Source : **USDOE - 2005**  
Cité dans document AEN



Dans un contexte (autour de 2000) d'étude de phase-out, quelques variantes de consommation du Pu dans le parc REP. Les questions fluctuent, le Pu et le multi-recyclage restent centraux

## Gestion des stocks de plutonium en REP

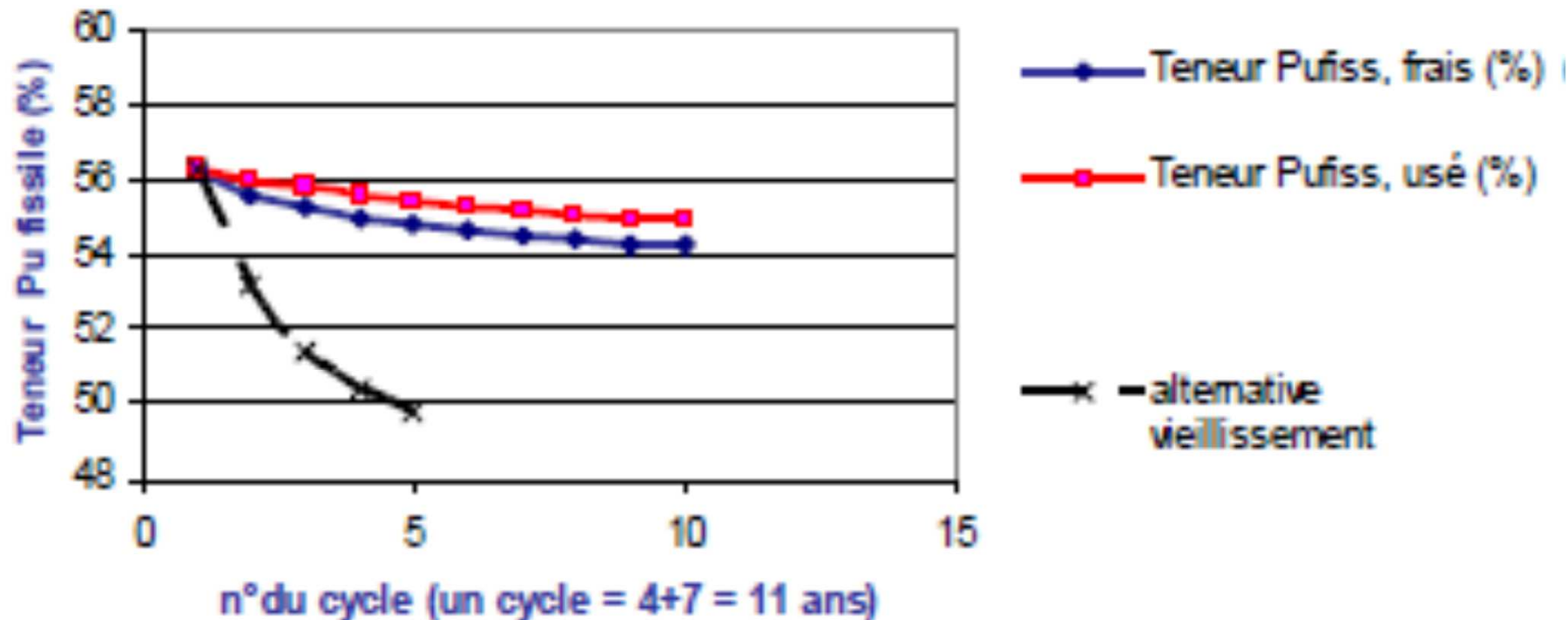
(Pu) en réacteur à eau sous pression (REP) (400 TWh/ann)





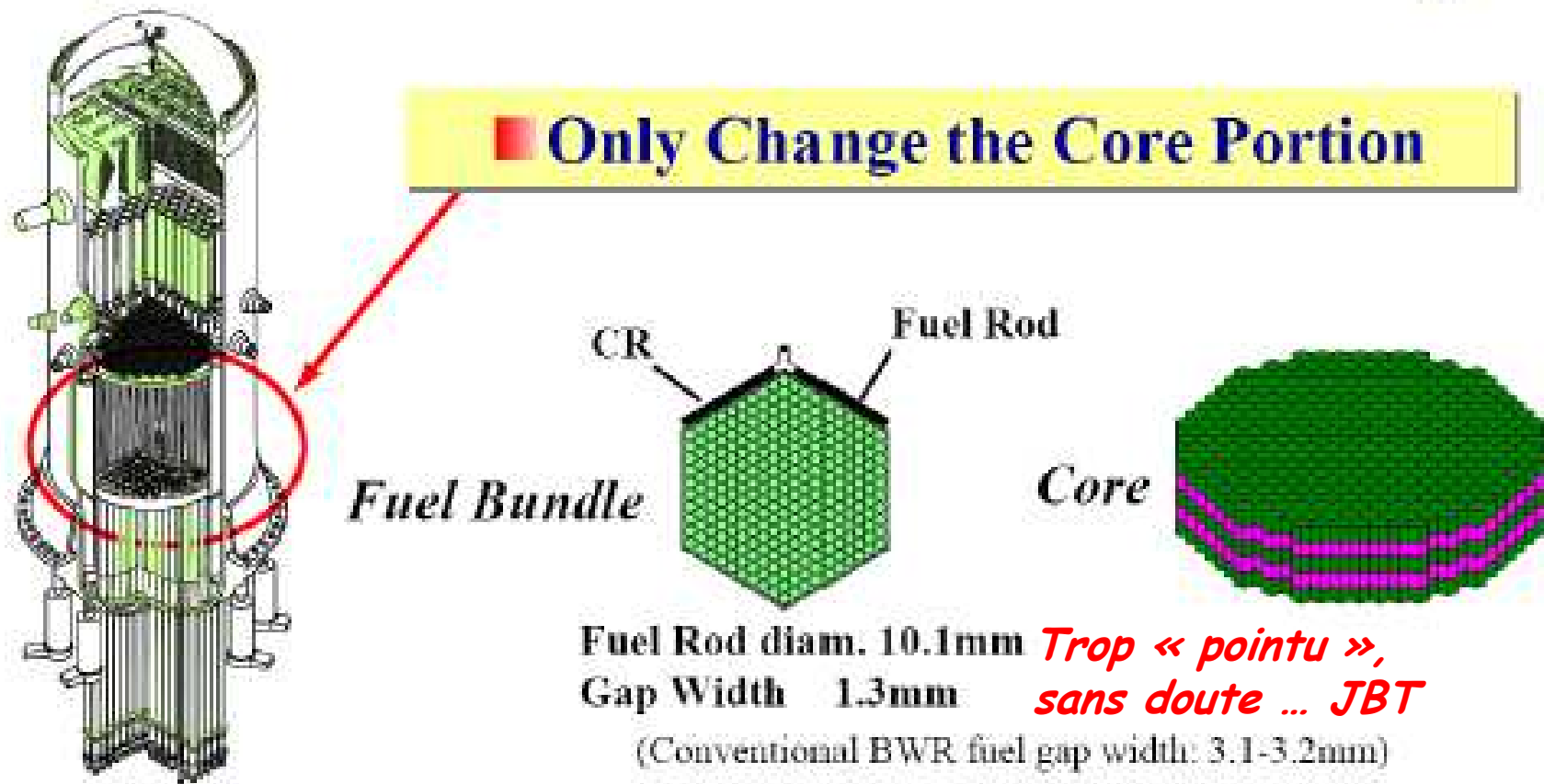
Le « smart recycling » en REL (rapport de modération réduit, juste assez) comme « redresseur » sous flux du vecteur isotopique; comparer à l'attente « sur étagère » : conserver en quantité, protéger la qualité, produire du courant, réduire la conso d'Unat et contribuer à « vider » les étagères. Illustration en REP

Pu fissile (%) : MOX frais et usé : cycles (de 1 à 10)  
Alternative vieillissement



## 4.5 Overview of Innovative RBWR

- High conversion reactor can be realized with BWR technology.

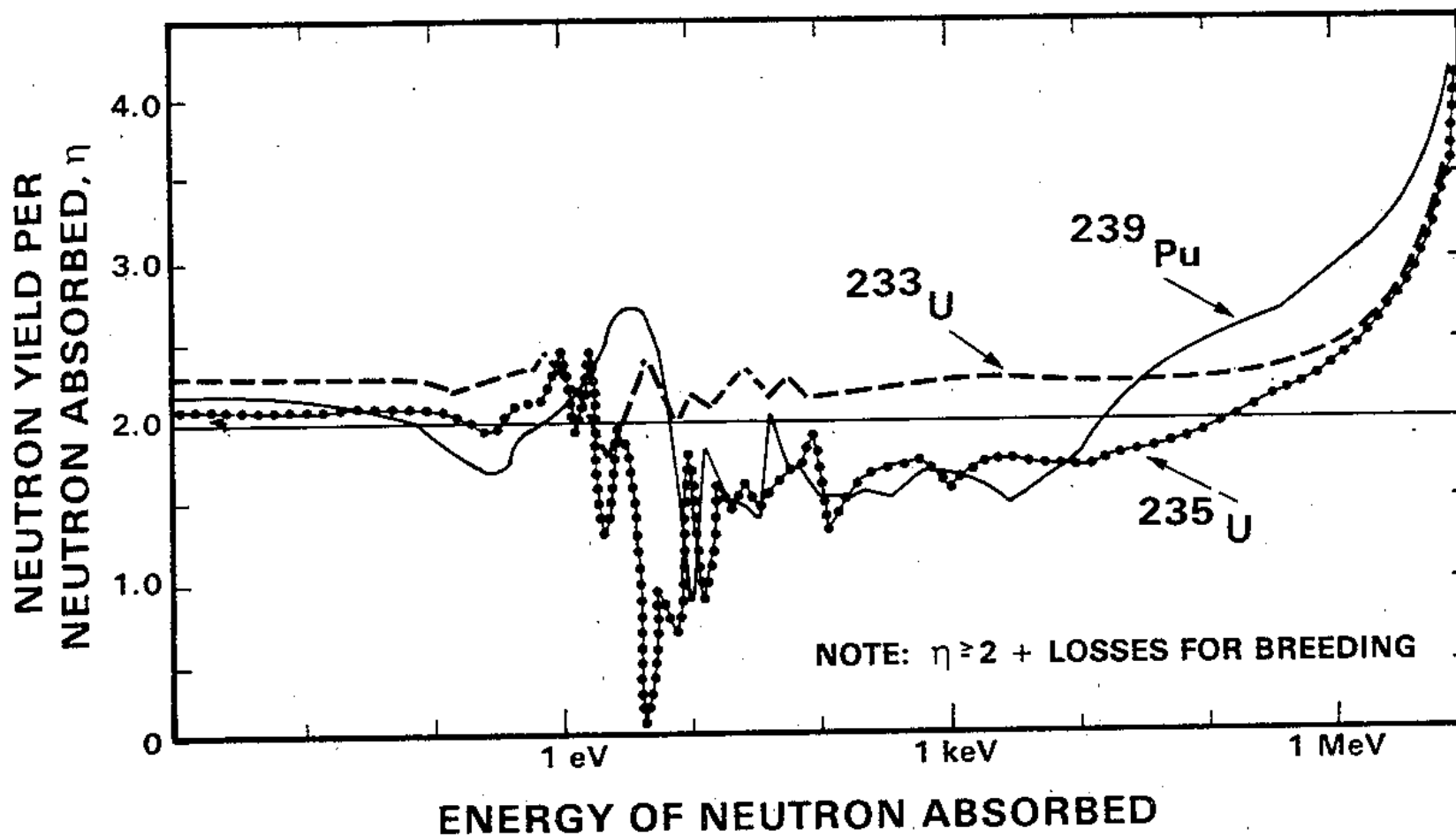


■ Only Change the Core Portion

RBWR : Resource-Renewable BWR

■ RBWR has High Conversion Reactor

**Nucléaire du futur : durabilité, couples fertile-fissile(s),  
spectre et coefficients de réactivité : back to basics**

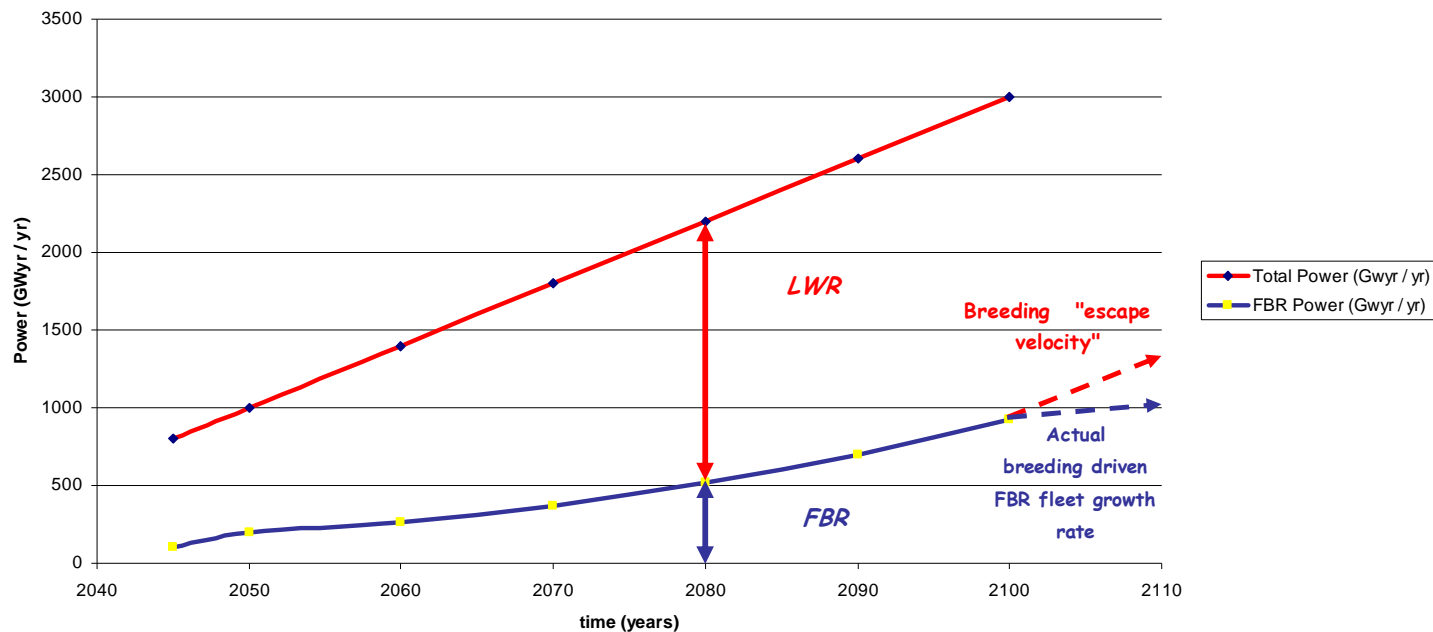


**FIGURE 1-3.** Neutrons produced per absorption vs energy for fissile isotopes.

# REL et FBR : une symbiose efficace, pour le parc mondial : pas une « alternative » mais une synergie (complémentarité) « War is (should be) over » ?

- Les REP fournissent le Pu de lancement des FBR : voir figure, avec une dynamique de type « As Strong As Reasonably Achievable »
- Le « smart recycling » aide à attendre efficacement la maturité des FBR si nécessaire;
- L'optimisation par étapes de la composition du parc > 2100 s'appuie sur du n-recyclage dans des REL, pour la partie qui ne fournit pas le Pu de croissance des FBR (ceux-ci utilisant également leur gain de surgénération)

LWR and FBR : a necessary symbiosis, worldwide

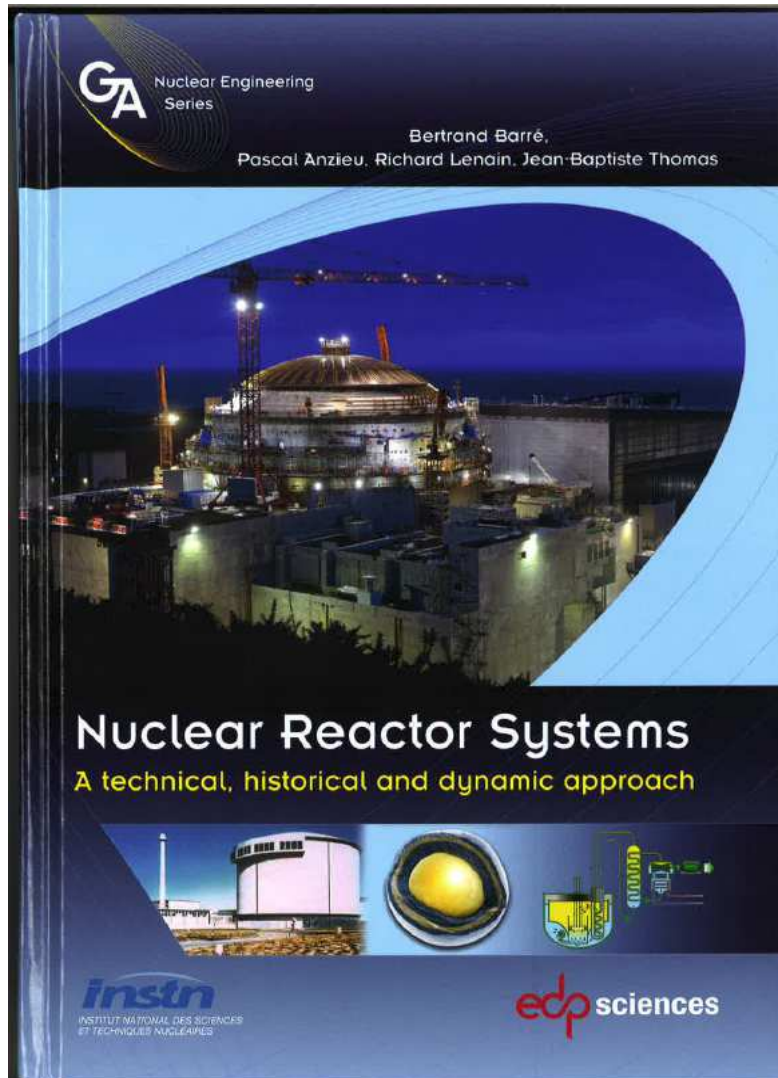




# Nuclear Reactor Systems

B. Barré - R. Lenain - P. Anzieu - J.B. Thomas

Combining four approaches : descriptive; axiomatic; historical; dynamic



The evolution of nuclear reactors since the 1942 Fermi experiment can be described along the lines of natural history, with an initial flourish of uninhibited creativity followed by a severe selection process leading to a handful of surviving species, with light water reactors occupying most of the biotope today.

This book combines four approaches:

- A descriptive one. This gives an overview of the main strengths and weaknesses of the different reactor systems.
- A historical approach, from the 1940's to nowadays, with an extrapolation to the near future. The LWR dominance being firmly established, what is the next step?
- An axiomatic approach. Starting with a set of long term criteria concerning the fuel cycle sustainability, a conceptual solution is established, and then a family of reactor systems is selected for development and qualification.
- A dynamic approach. In the early 2000s, the prevailing image combined a "nuclear renaissance", a strong limitation of the greenhouse gases concentration and a dynamic growth of the world economy. Updating the strategy in the wake of the last decade events requires a sharper understanding of the driving forces as well as of the influence of the post-Fukushima safety framework on the design constraints.

# Contents

## Foreword

Chapter 1 - Introduction

Chapter 2 - CO<sub>2</sub> Gas Cooled Reactors

Chapter 3 - RBMK (Reactor Bolchoi Mochtnosti Kanali)

Chapter 4 - Heavy water moderated nuclear reactors

Chapter 5 - Nuclear marine propulsion

Chapter 6 - Experimental reactors

Chapter 7 - Advanced « Generation III » reactors

Chapter 8 - High Temperature Reactor

Chapter 9 - Molten Salt Reactors

Chapter 10 - Liquid metal cooled fast neutron reactors

Chapter 11 - The gas-cooled fast reactor

Chapter 12 - BWR: specific features, trends

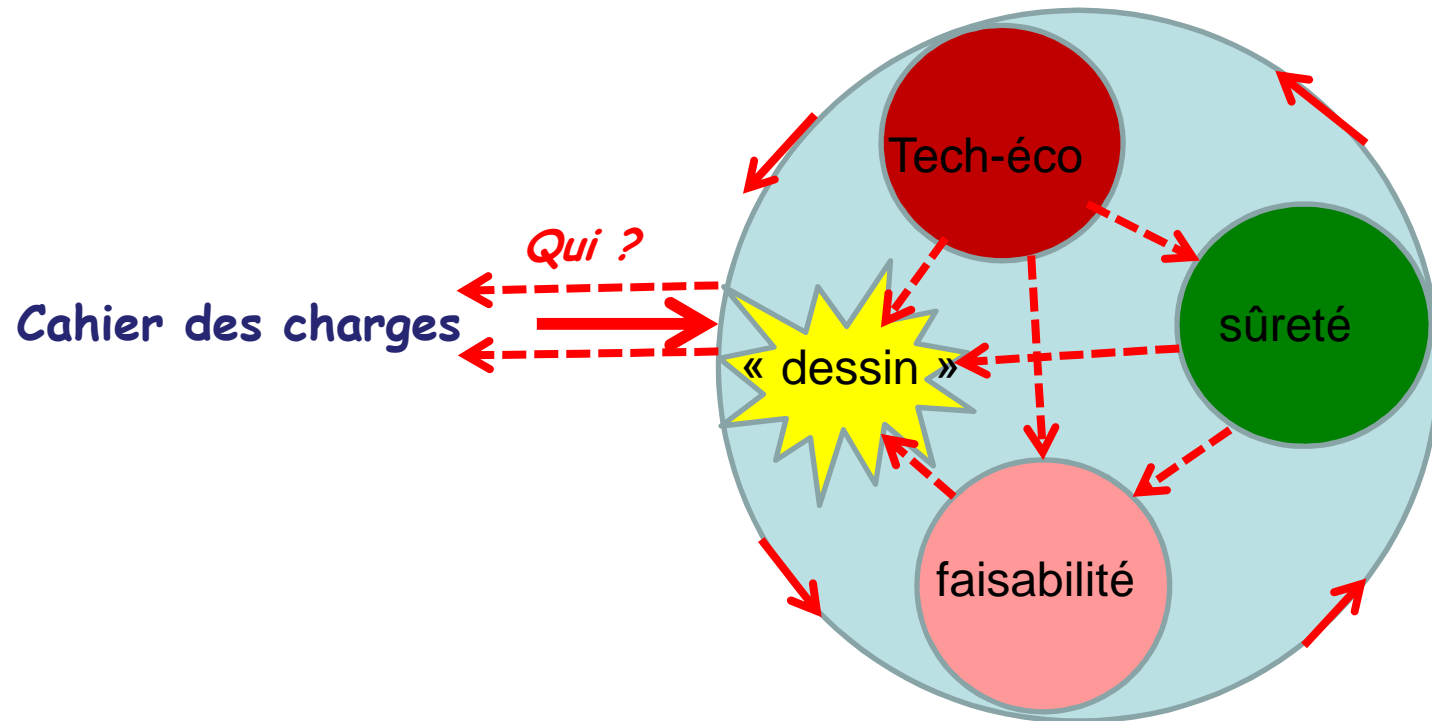
Chapter 13 - The place and the potential of LWR in the transition from Gen-III to Gen-IV

*{ Chapter 14 - Nuclear fusion*

*Chapter 15 - Futuristic systems: ADS, Space Nuclear Propulsion and power generation, ADNIS }*

Chapter 16 - A few questions fostering further thought on some key issues : design

## « Design - conception » : crise ou rebond ?



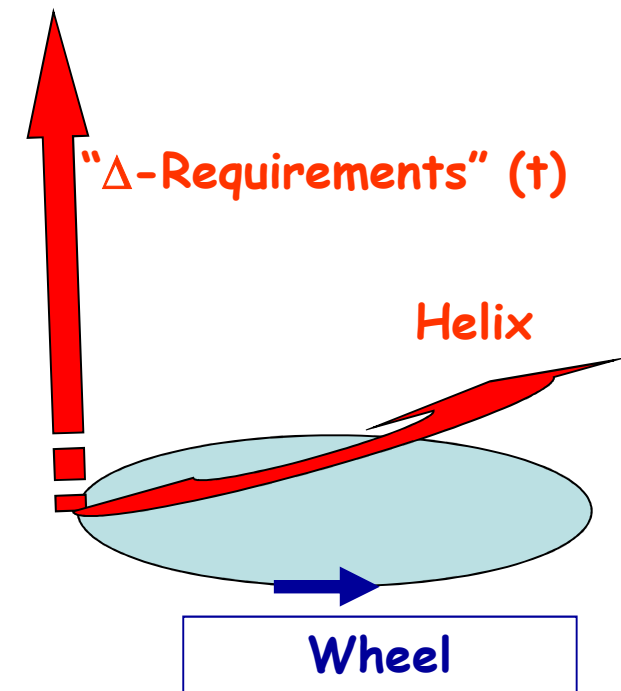
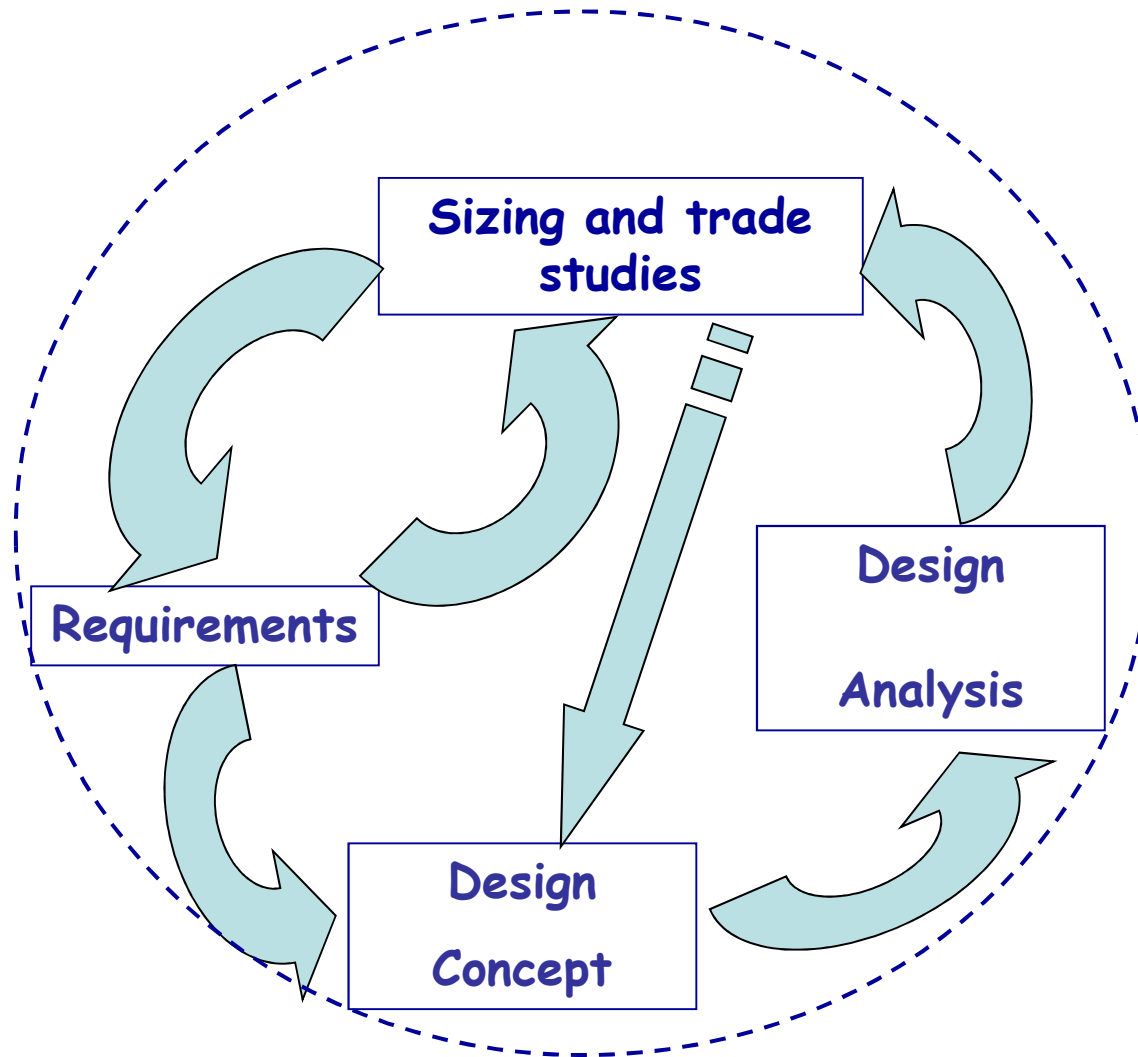
# Design as a separate discipline ; the design helix

From the basic wheel

(from "Aircraft design", a conceptual approach  
Daniel P. Raymer)

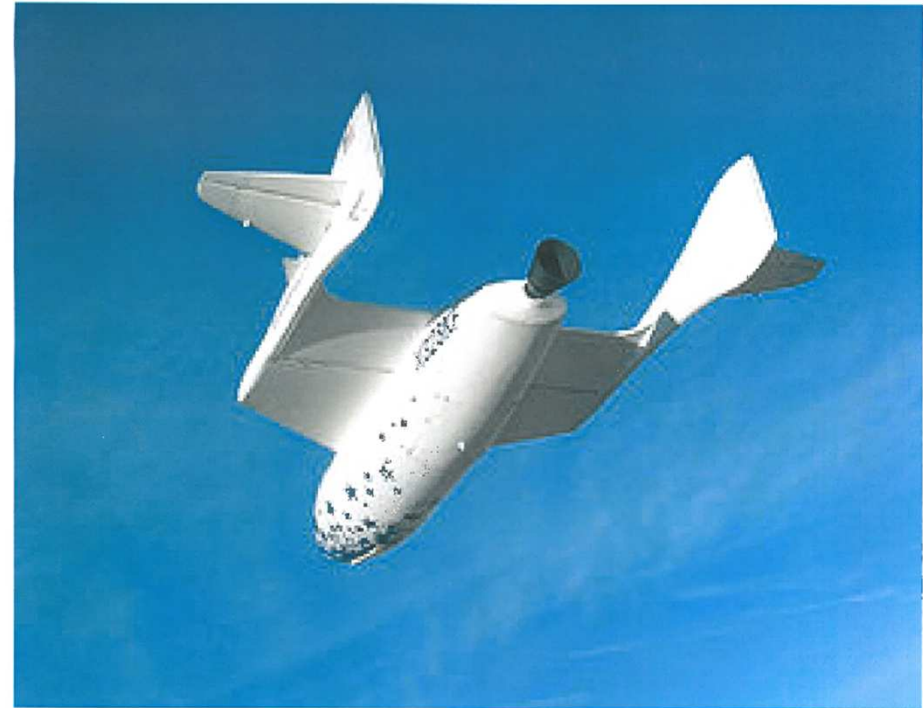


to the (nuclear) helix  
carefully !





**Aéronautique : du X-15 à SpaceShipOne (> 100 km d'altitude) :  
"design" et innovation (composites, propulseurs, etc.), plus marketing**



Un « crayon »

vs. « un volant de badminton » (Jérôme T.)

Nucléaire : de NERVA à ? ...

**HTR vs. NERVA** (propulsion spatiale, années 60) : performances !  
Bien sûr, la sûreté diffère totalement ! Mais un choix un peu opportuniste d'option "formelle" ("tout passif") n'est pas toujours compensable par **l'innovation technologique pure**.  
Irréversible ? Ou "back to design" ?

## NERVA NRX-A3

Série d'essais

P<sub>max</sub> : ~ 4,3 GW<sub>th</sub>; # EPR ...

HTR : P<sub>max</sub> : 600 MW<sub>th</sub> ☹

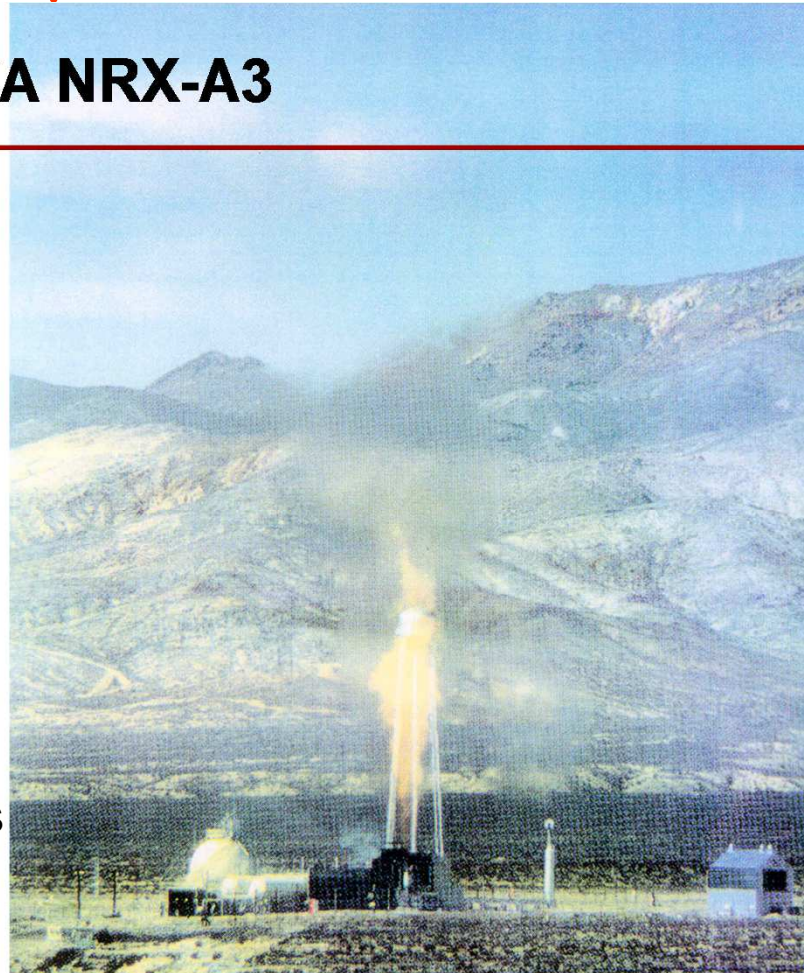
P<sub>vol</sub> - max : 10 MW/l !!

HTR : < 10 kw/l ...

Gagner un facteur  $\pi$  (sur 1000) ?

T(sortie) (H<sub>2</sub>) > 2000 °C (2500)

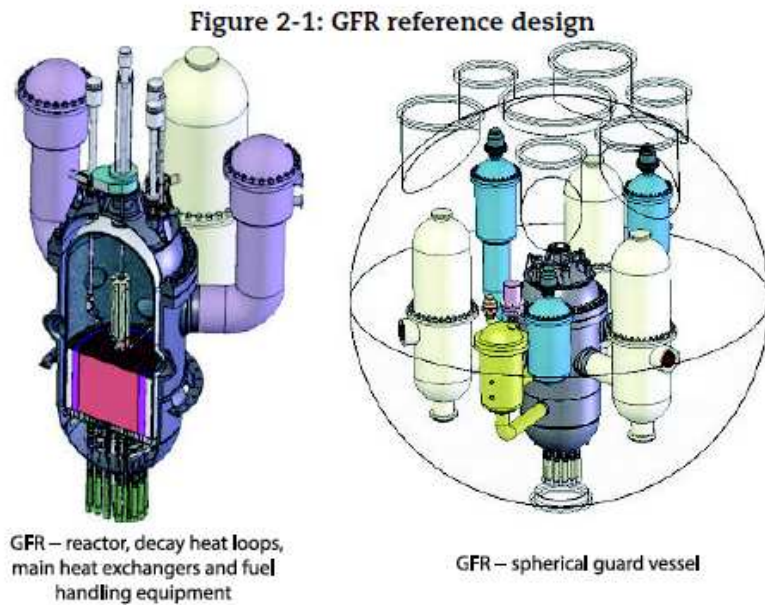
Jackass Flats  
Nevada  
Années **60**



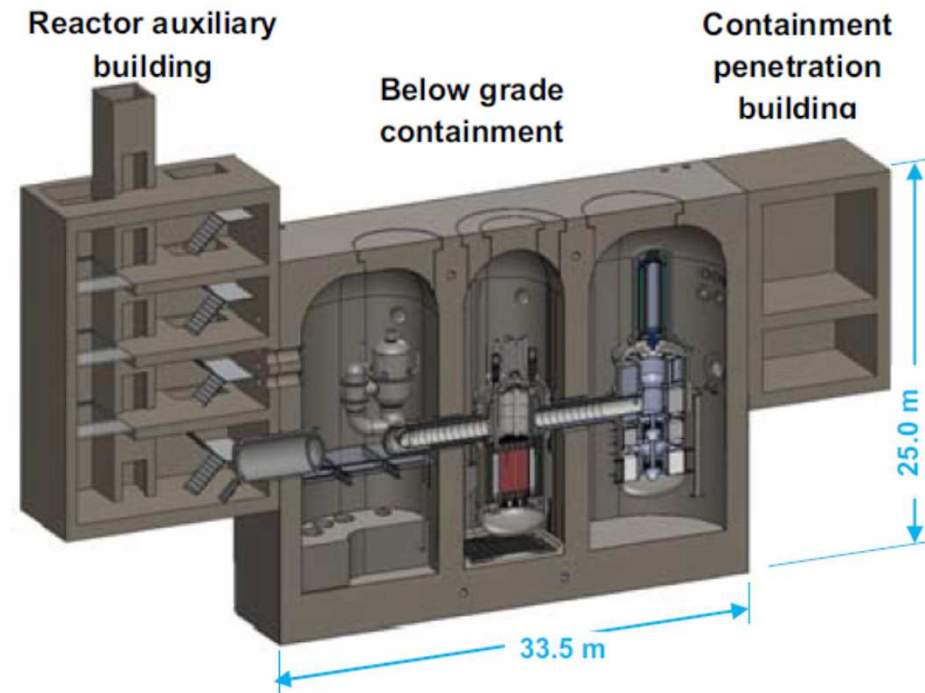
# De NERVA à ? ... La renaissance d'un "Gas Cooled Reactor" avec une densité de puissance significative et une puissance unitaire quelconque, pour tout spectre ?

GFR (Gen-IV, Fce), EM2 (GA), ALLEGRO et l'horizon de « Nuclear Innovation 2050 » (OECD/NEA).

## GFR



## EM2



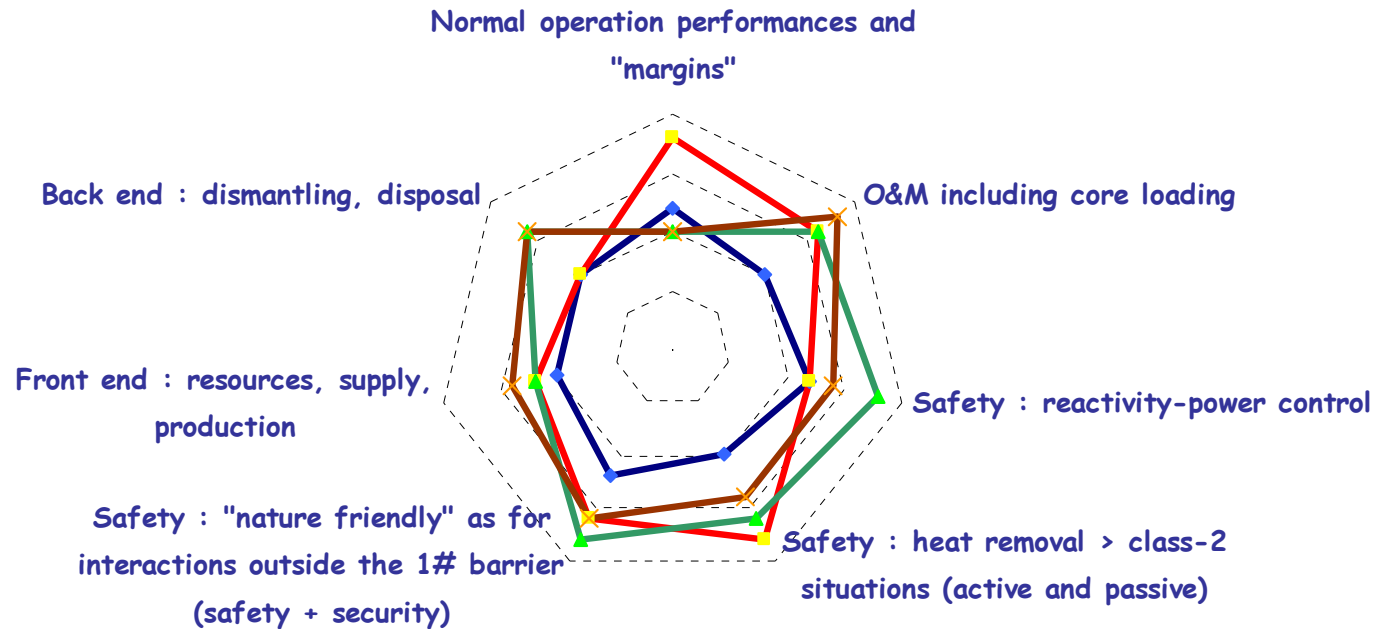
Définir un référentiel de sûreté pour les concepteurs, par filière de Gen-IV (GIF)

Dans le cadre des « Design Conditions Extension », construire un enchaînement de transitions sans échec vers un état final sûr.



# Forces et faiblesses des caloporteurs et caloporteurs pour les RNR

coolant SWOT : tentative assessment map



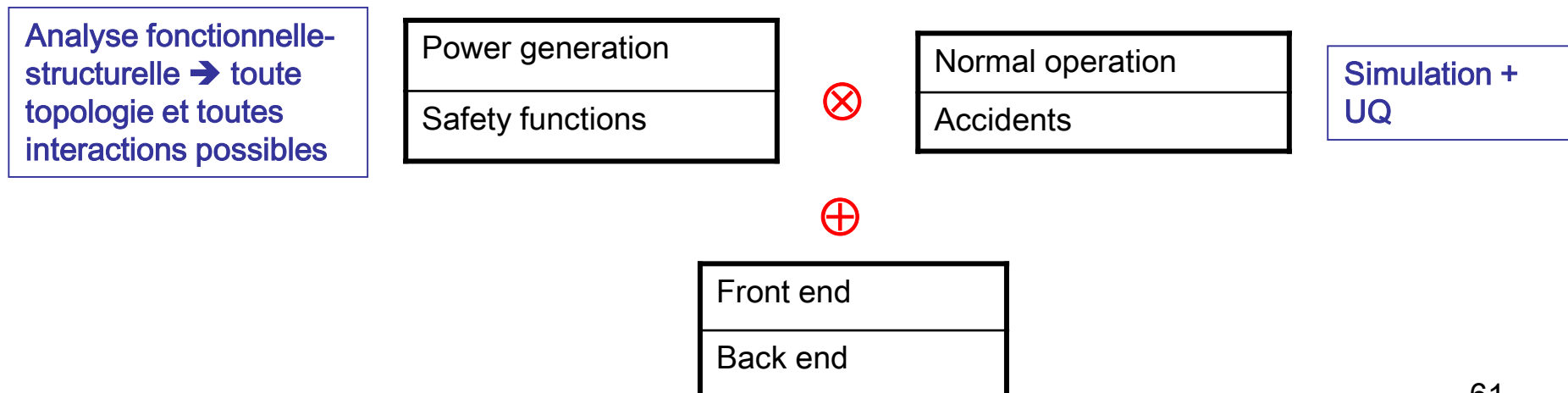


## Comparaison des Caloporteurs (2)

Limites du facteur de mérite :

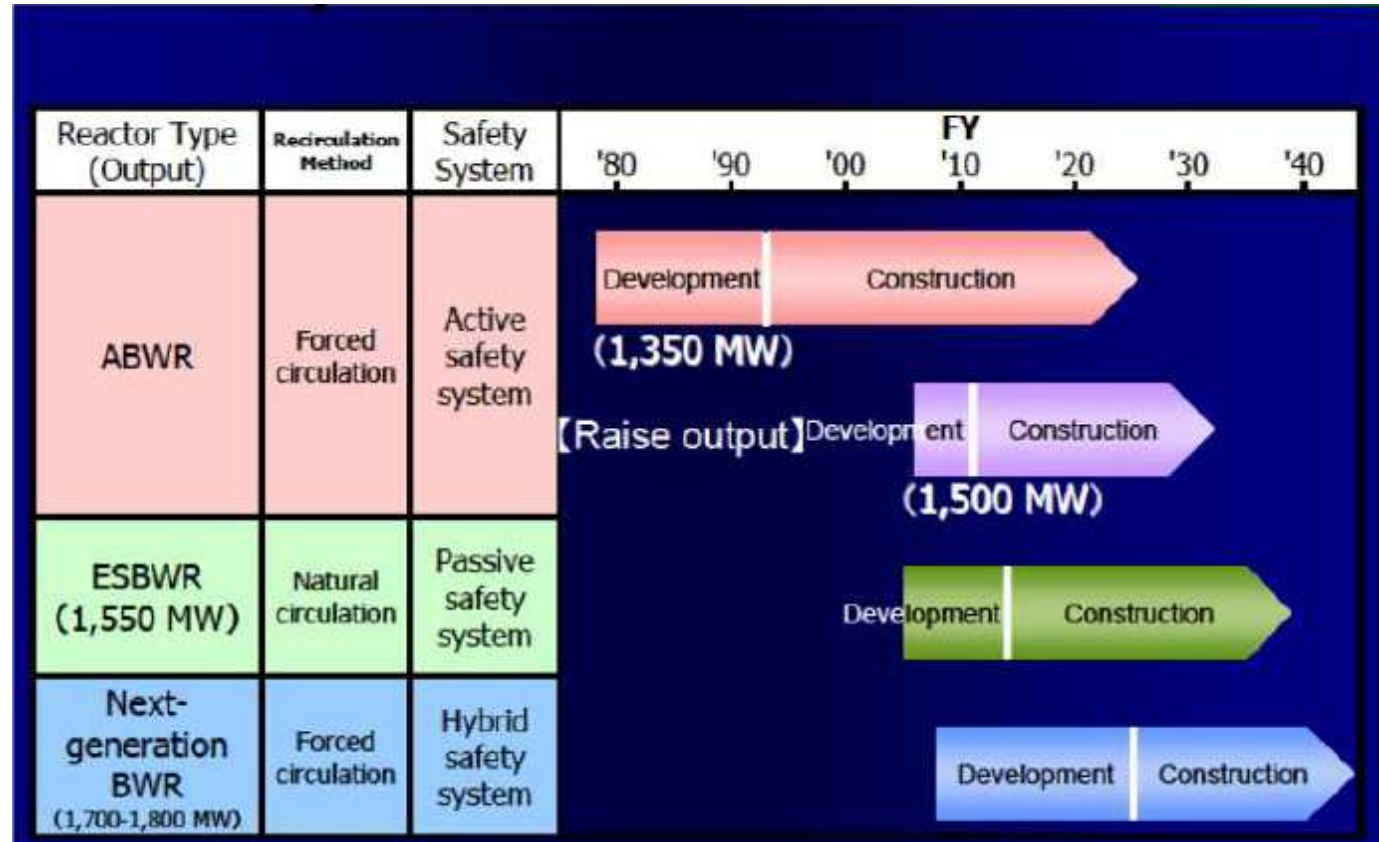
- Performances en fonctionnement normal;
- Dépendant du design : ex. :
  - REB :  $\infty$  dans ESBWR - circulation naturelle, et pas de "secondaire ...;
  - HTR vs. UNGG : effet du combustible froid et réfractaire et du  $\Delta T$  coeur élevé associé, ainsi que de la neutralité chimique de l'He supposé pur à HT ;
- Les atouts en extraction de puissance résiduelle, en "feed and bleed" (gavé ouvert) quand c'est nécessaire et possible sont essentiels; etc.

→ Grille d'analyse étendue : schéma de principe :



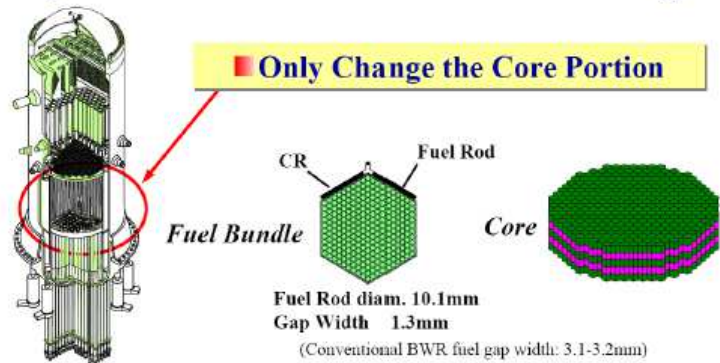
# Entre les REL, la course continue:

Ci-contre : d'après  
GE-Hitachi  
Et les innovations  
« incrémentales »  
seront aussi  
discriminantes



## 4.5 Overview of Innovative RBWR HITACHI 36

- High conversion reactor can be realized with BWR technology.



RBWR : Resource-Renewable BWR RBWR has High Conversion Reactor

## KERENA

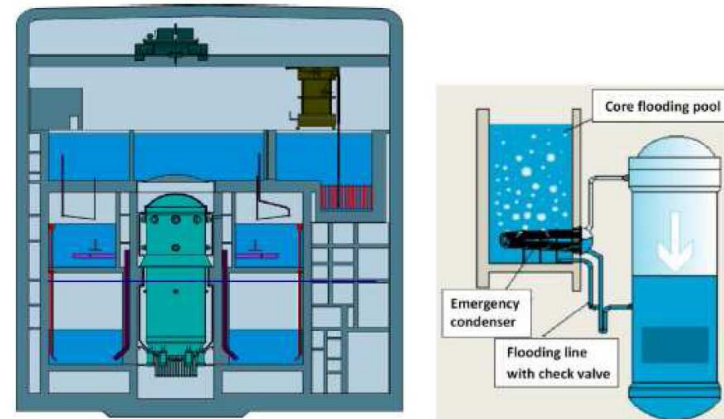


Figure 12.18. Design principles illustrated; passive and active safety systems integration in the containment; the example of the emergency condenser system (from AREVA).

## Les « époques » du nucléaire

OKLO

Gen-1 à 3 ; se souvenir de Wigner, de Rickover ... et d'autres

Parc de Gen-4 : « power reactors » + « enablers » → flexibilité

Brûler l' $U8$  ; avec le lessivage des continents, l'uranium de l'eau de mer, en iso-génération, est effectivement une ressource renouvelable à l'échelle des temps géologiques

Et l' $^{233}U$ , le Th ? → cycles croisés multifilières → défi d'investissement et d'optimisation conceptuelle (qui reste à trouver).

Et sinon ? Fission riche en énergie, limitée en neutrons → acheter des neutrons avec de l'énergie recirculée : « Nuclear Energy Synergetics » : Harms & Heindler - 1982 !

Hybrides fusion-fission comparés, pour Jules Horowitz, vers 1978, avec hybrides ADS et réacteur critique rapide. « Et alors ? ... »

Nucléaire : l'éternité devant soi; il n'y a plus une minute à perdre 63

## Nuclear Reactor Systems

“It played that same song fifty years ago when I was a little kid. That’s the nice thing about carrousel, they always play the same song.

... All the kids kept trying to grab for *the gold ring* ... The thing, with kids, if they want to grab for the gold ring ... If they fall off, they fall off, but it’s bad if you say anything to them.”

“The Catcher in the Rye” - J.D. Salinger

+ Garder à l'esprit la “réalité” selon Philip K. Dick :

“Reality is that which, when you stop believing in it, doesn't go away”

→ Trouver dans l'urgence un chemin vers “l'harmonie des contraires” (Héraclite)

Bonne chance !