

Cycle de formation 2004/2005
et
Séminaire “Énergie et Environnement”

Les nouvelles technologies du nucléaire

Contenu

Le nucléaire dans le monde

Les technologies actuelles (GEN II)

Nouveaux types de réacteurs (GEN III)

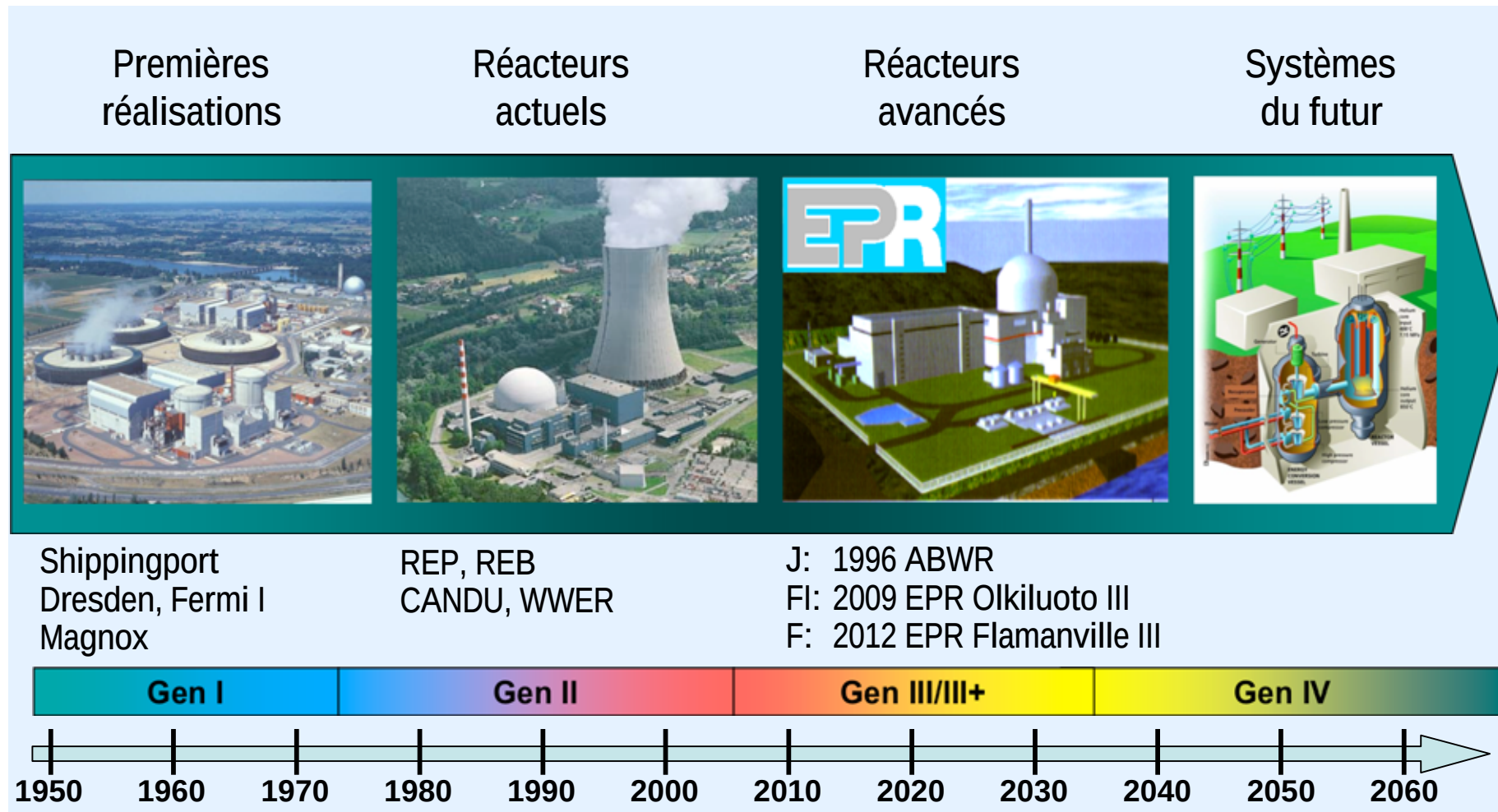
La prochaine génération (GEN IV)

Le futur du nucléaire en Suisse

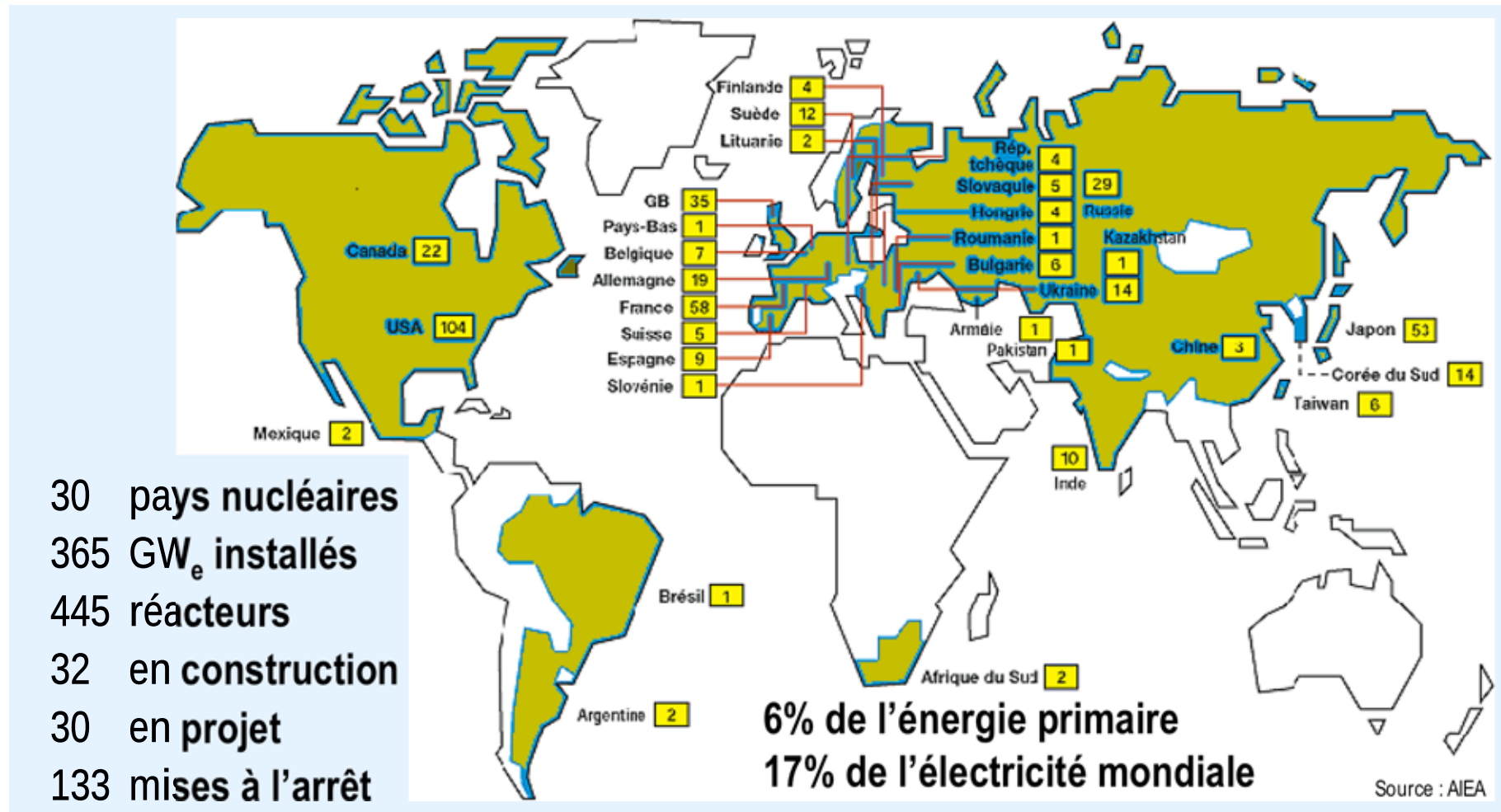
Peter Hardegger

7 avril 2005

Introduction: Les générations du nucléaire



Le nucléaire dans le monde (2004)



Le nucléaire dans le monde

- Contribution à l'électricité mondiale: 17%, neutre quant au CO₂ émis
- 10'000 réacteurs*ans d'expérience opérationnelle
- Incidents graves: Harrisburg (1979); Tchernobyl (1986)
- Dépôts pour déchets:
 - de faible et de moyenne activité (DFMA) en service (S, FI)
 - de haute activité et de moyenne activité à vie longue (DHA) en construction (USA/FI)
- Suisse: 5 centrales (3.2 GW_e), 140 réacteurs*ans d'expérience, disponibilité >90%, 40% de la production d'électricité, 10% augmentation de puissance (depuis 1990)

Une prise de conscience des Etats

USA : “*The NEPD Group recommends that the President support the expansion of nuclear energy in the United States as a major component of our national energy policy.*”

Report of the National Energy Policy Development Group, May 2001



Commission Européenne: « **La contribution du nucléaire (...)** une stratégie européenne vers une réduction de réchauffement global, vers une sécurité d'approvisionnement énergétique et vers un développement soutenable »

Commission Européenne, livre vert, Novembre 2000

Nucléaire... Le vent tourne !



Finlande : « *The new nuclear power plant unit will be a light water reactor, BWR or PWR type, with an electricity output of 1,000 – 1,600 MW. »*

vote au parlement finlandais en faveur d'un 5ème réacteur, mai 2002

France : « *Un projet de loi qui consacrera un rôle accru pour les énergies renouvelables mais aussi une place reconnue pour l'énergie nucléaire »*

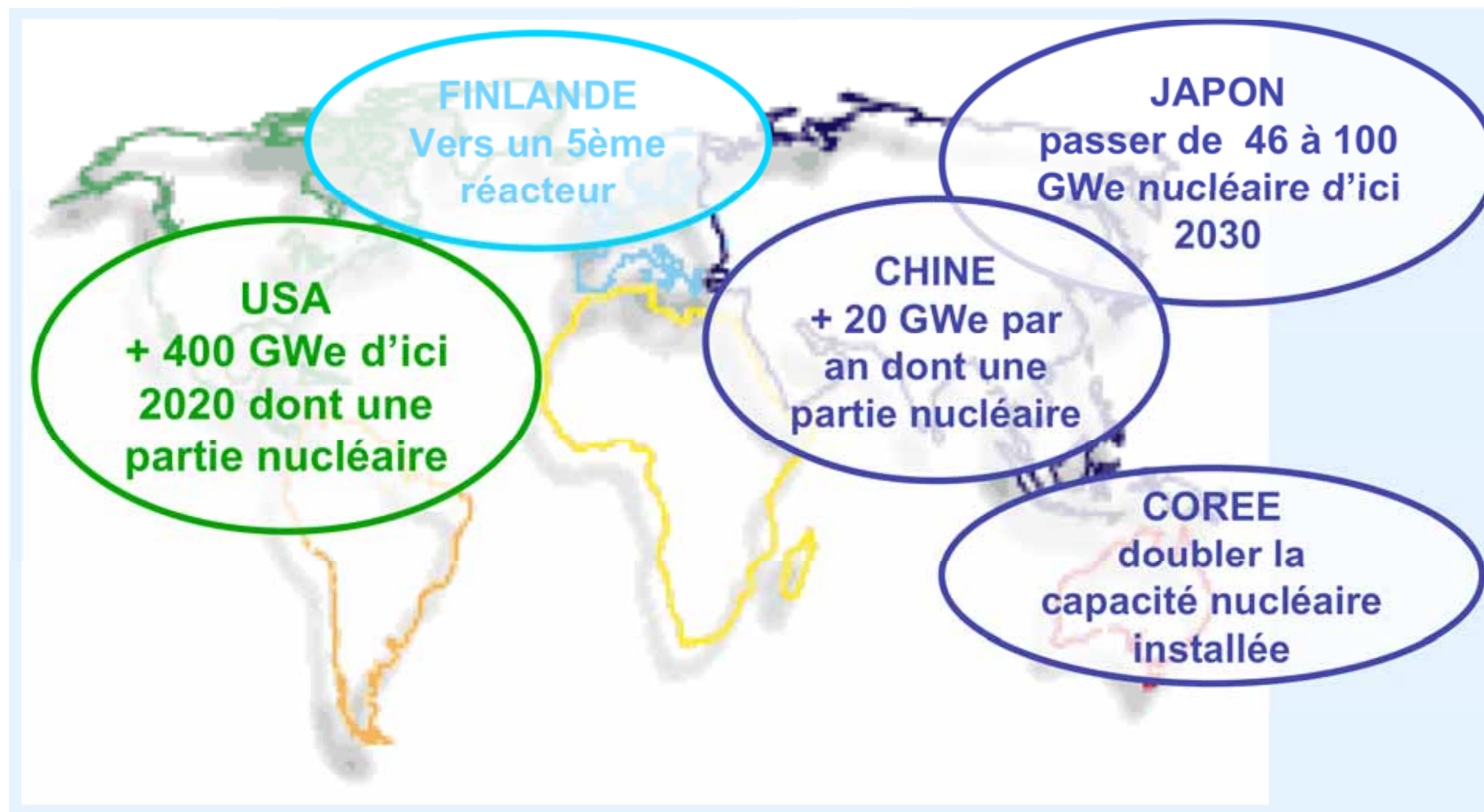
JP Raffarin, Discours de politique générale, Assemblée Nationale, 3 juillet 2002

WEC (2004) : « *... no energy source should be idolized or demonized. »*

Les positions envers le nucléaire

- Les pays en développement avec leur grand besoin d'énergie sont ouverts vers l'option nucléaire.
- Des programmes ambitieux en Chine, au Corée du Sud, au Japon et en Inde.
- Décisions d'abandon en Suède, Allemagne et au Belgique, abandon de facto en Italie. Mise à l'arrêt de centrales en Espagne et aux Pays Bas.
- En France et au Finlande des EPR seront construits. L'Angleterre considère des centrales nucléaires pour remplacer les vieux réacteurs.
- La Russie étend sa capacité nucléaire et exporte sa technologie.
- Les Etats Unis investissent dans l'option nucléaire.

Des perspectives importantes au plan mondial

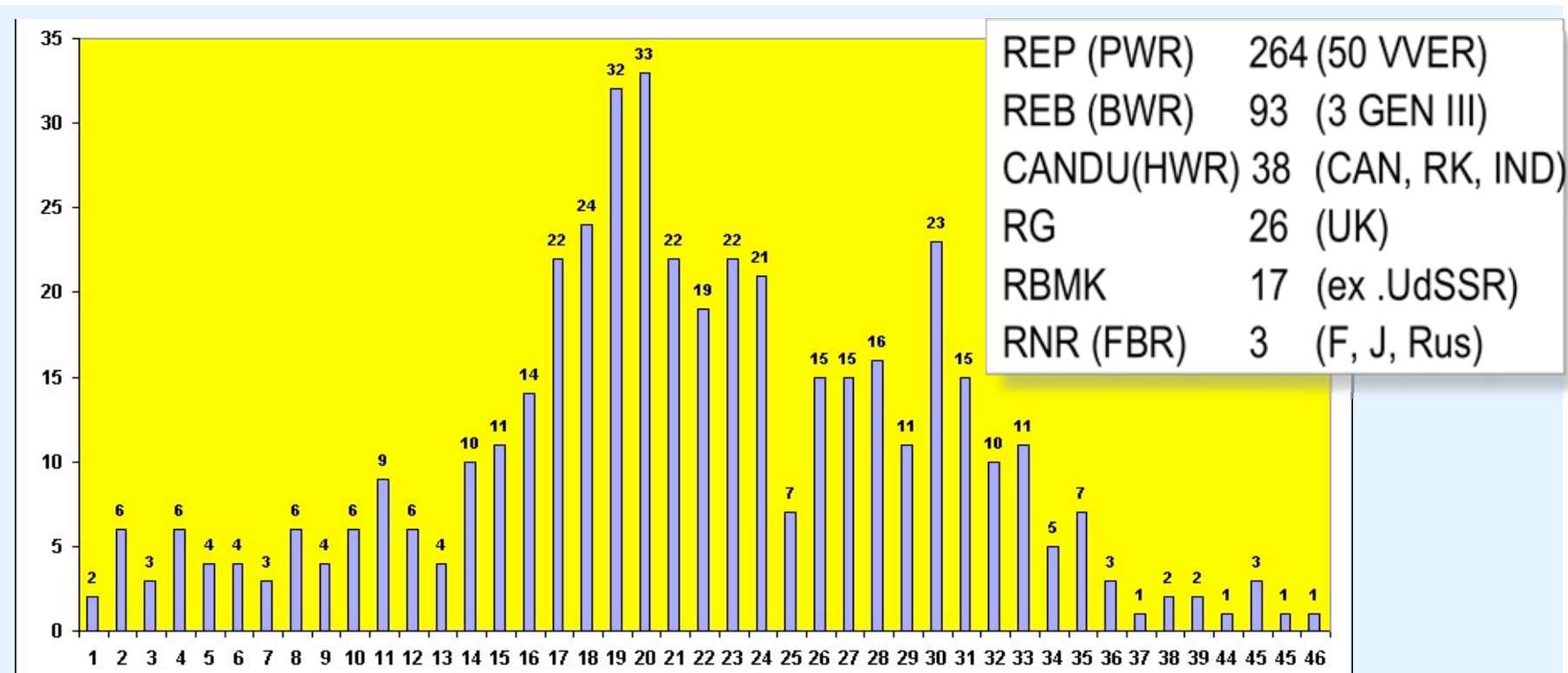


Les défis du nucléaire

Améliorations technologiques significatives et possibles du point de vue de ...

- la sécurité (probabilité d'incidents catastrophiques),
le souci public („Tchernobyl est partout“), manque d'acceptance,
- la réponse convaincante aux questions des déchets,
- la compétitivité (envers les „alternatives fossiles“),
- la réduction du risque de prolifération (Plutonium militaire),
- la robustesse vis-à-vis de la variété de conditions politique, économique et sociale (culture de sûreté).

Le parc actuel

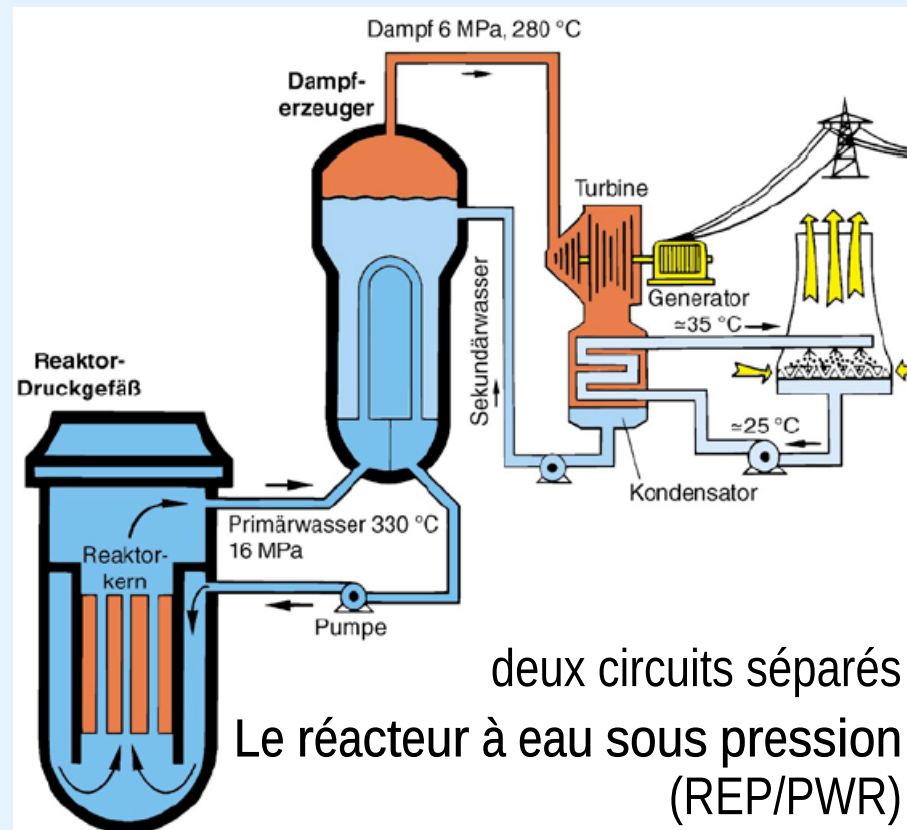


445 réacteurs dont 14 âgés de plus de 35 ans (GEN I)
 2 réacteurs de la dernière génération (GEN III)
 rythme de construction depuis 10 ans: 2 à 6 réacteurs par an

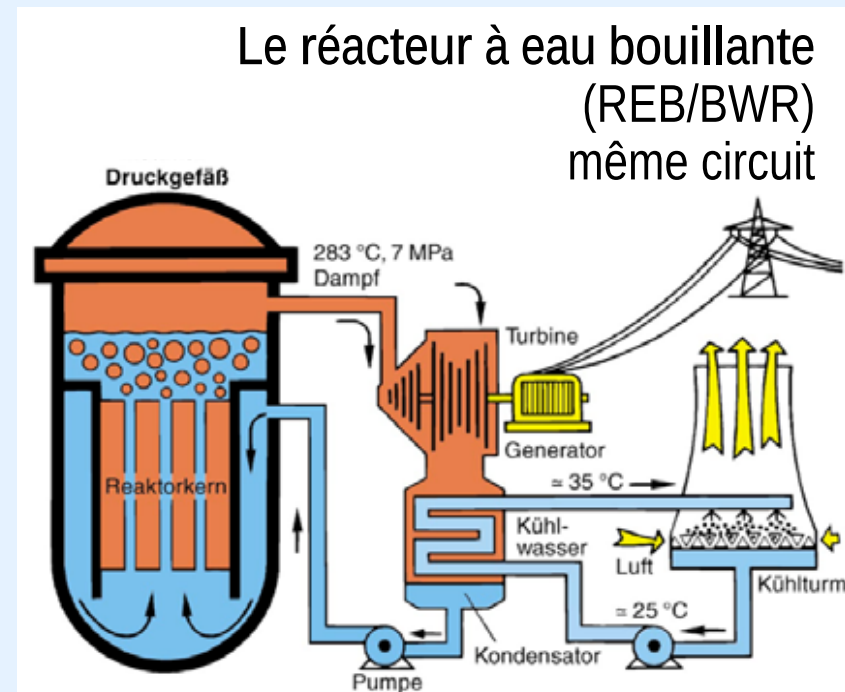
Source: IAEA, 2003

Les technologies actuelles: REL/LWR

Les technologies dominantes sont les deux filières de réacteurs à eau légère (REL/LWR)



Modérateur: Eau légère
Caloporteur: Eau légère



Les réacteurs suisses



Les technologies actuelles: CANDU

Le réacteur à eau lourde
(CANDU/HWR)

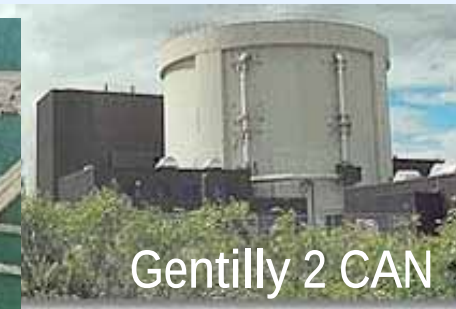
Modérateur/Caloporteur: Eau lourde (D_2O)

Combustible: Uranium naturel

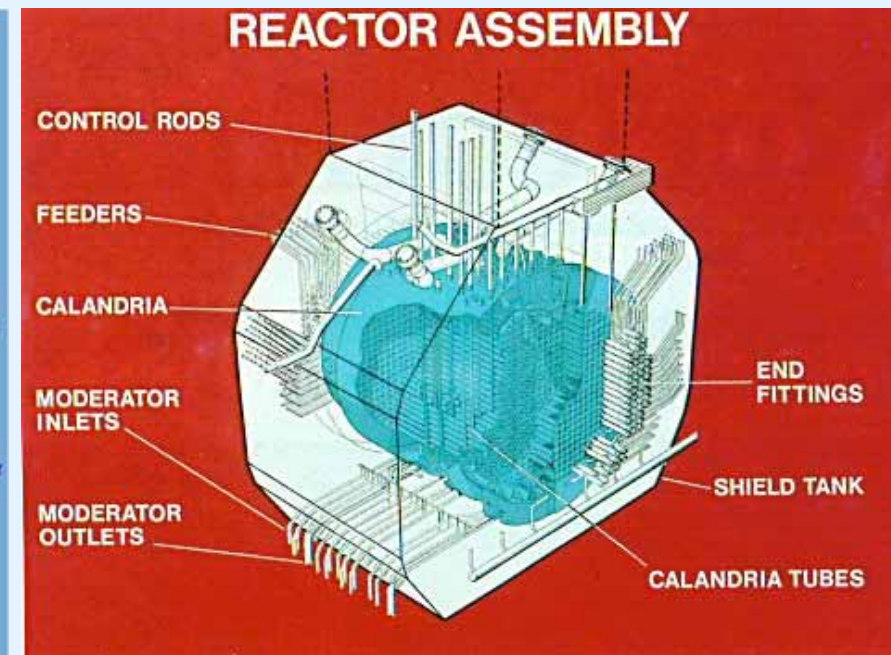
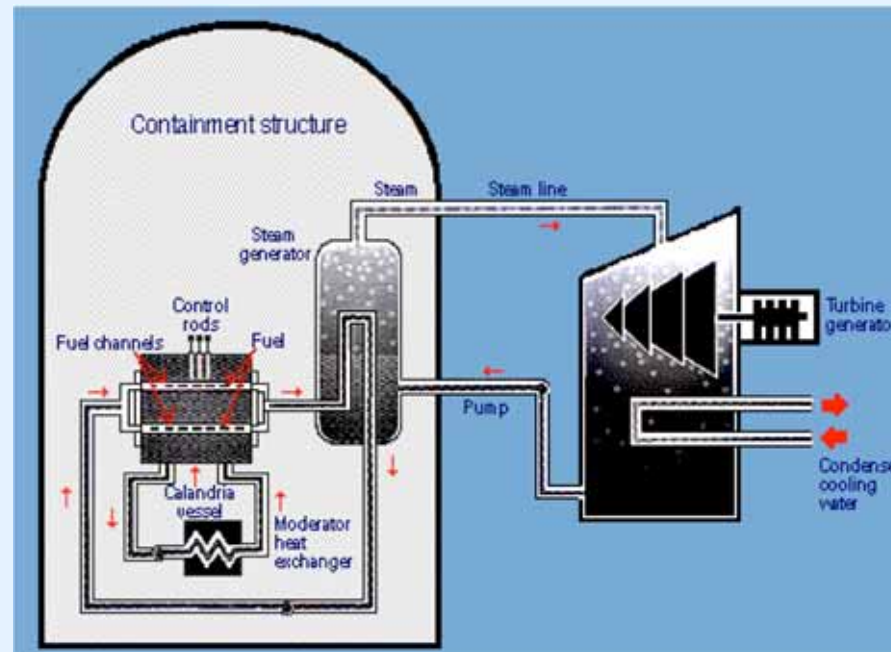
Construction: tuyaux pressurisés
Canada, Inde, Corée du Sud



Ontario CAN



Gentilly 2 CAN



Les technologies actuelles: RCG

Le réacteur à caloporteur gaz
(RCG/AGR)

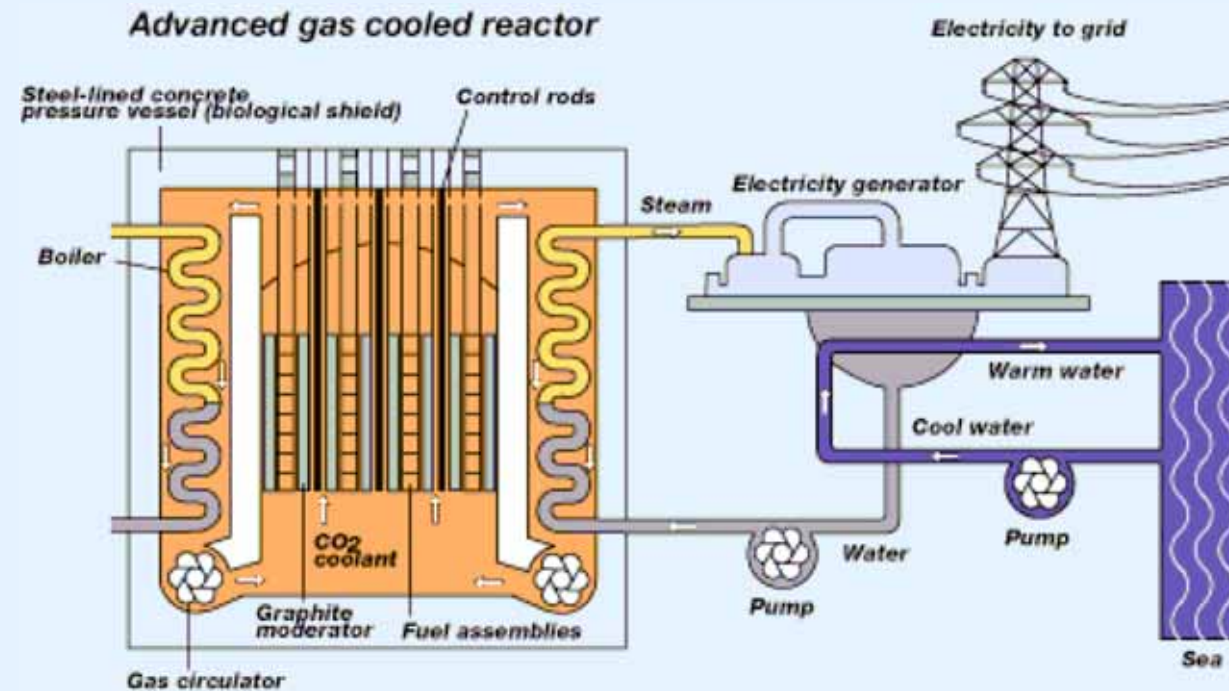
Modérateur: Graphite

Caloporteur: CO₂

Royaume-Uni



Huntington UK



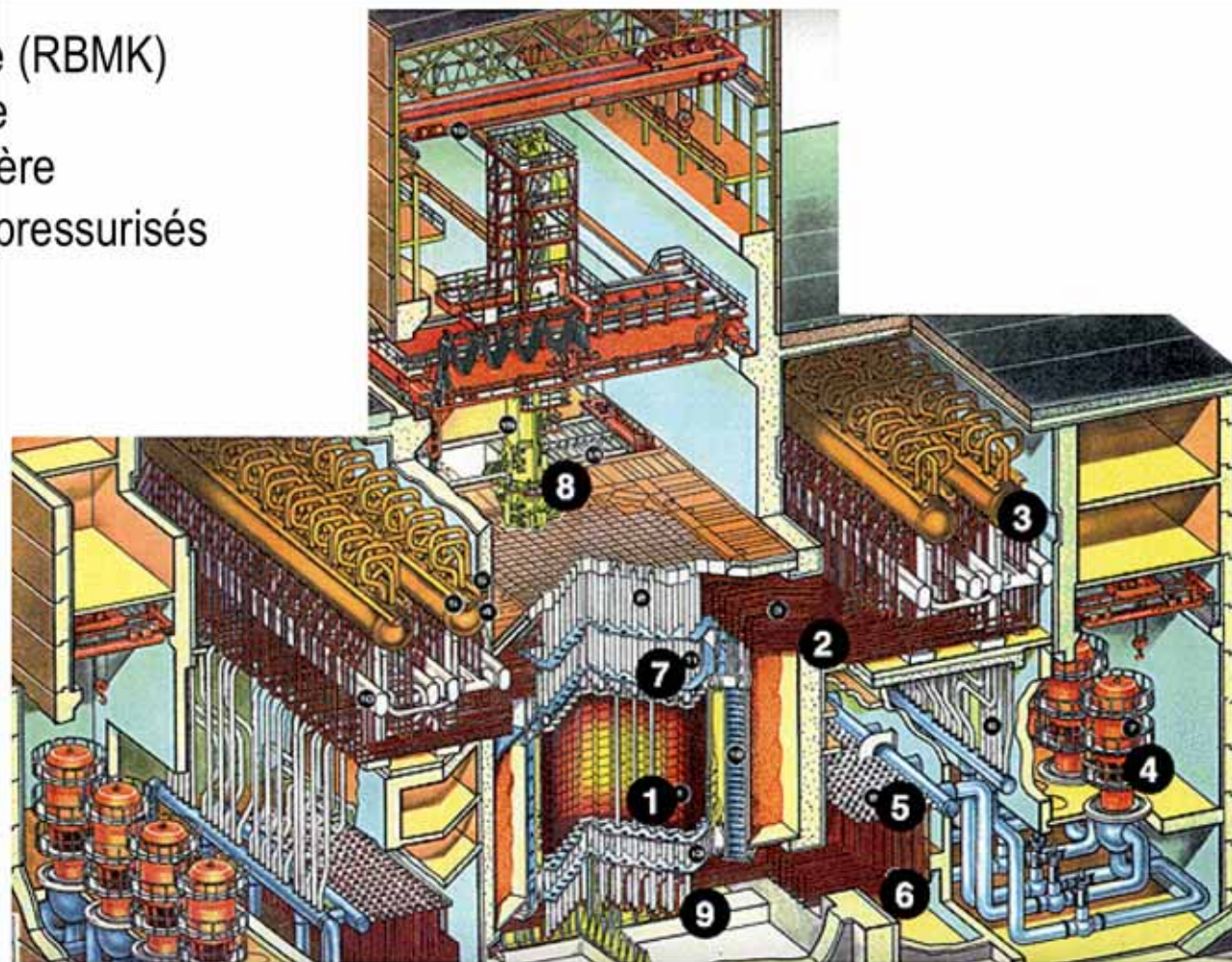
Les technologies actuelles: RBMK

Le réacteur à graphite (RBMK)

Modérateur: graphite

Caloporteur: eau légère

Construction: tuyaux pressurisés
anc. Union Soviétique



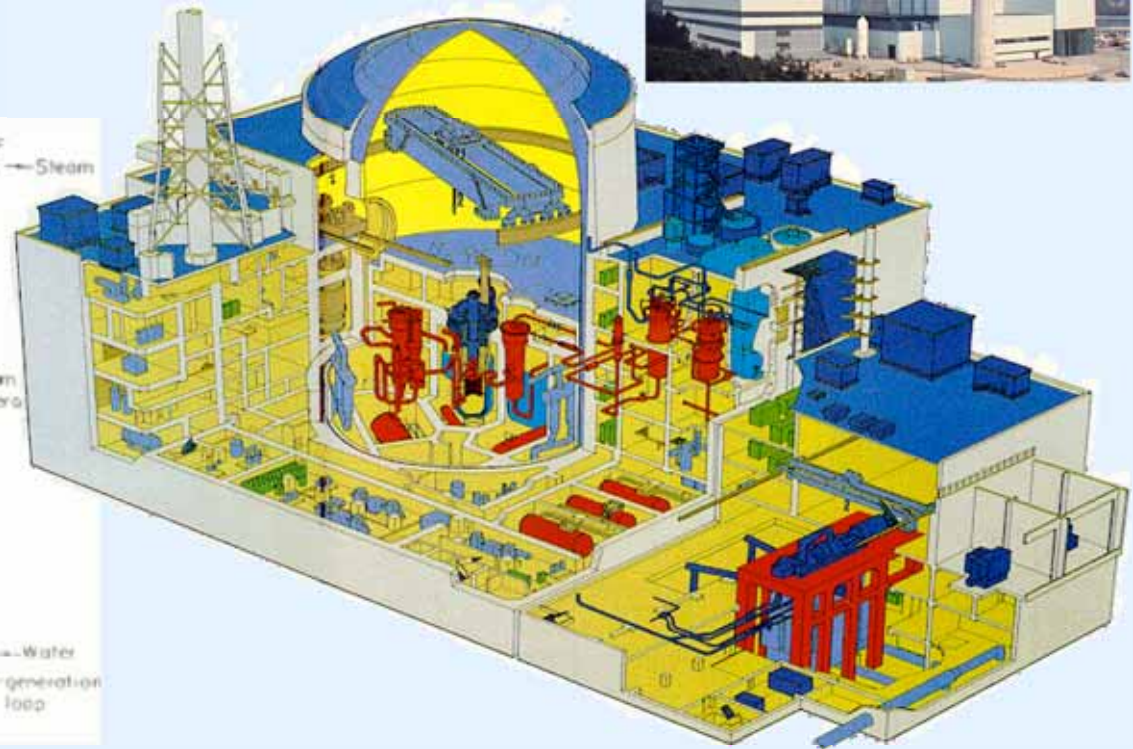
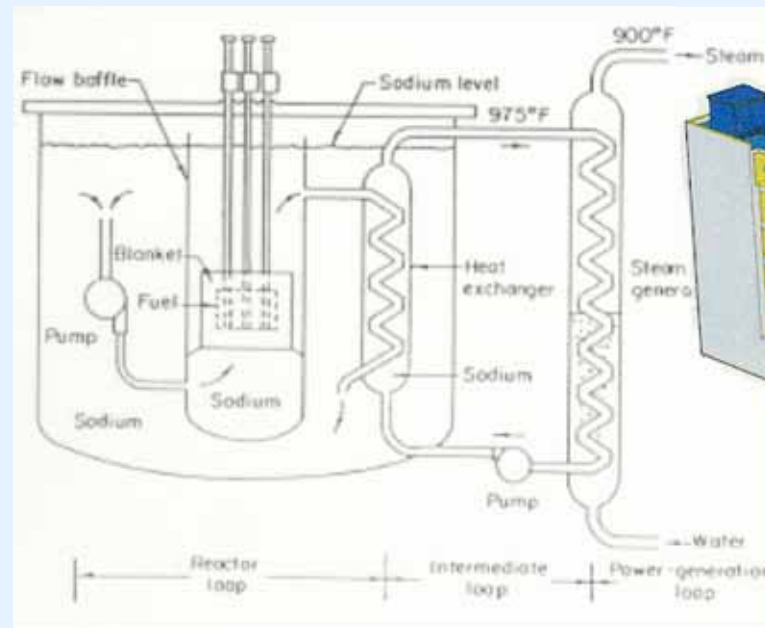
Les technologies actuelles: RNR

Le réacteur à neutrons rapides (RNR)

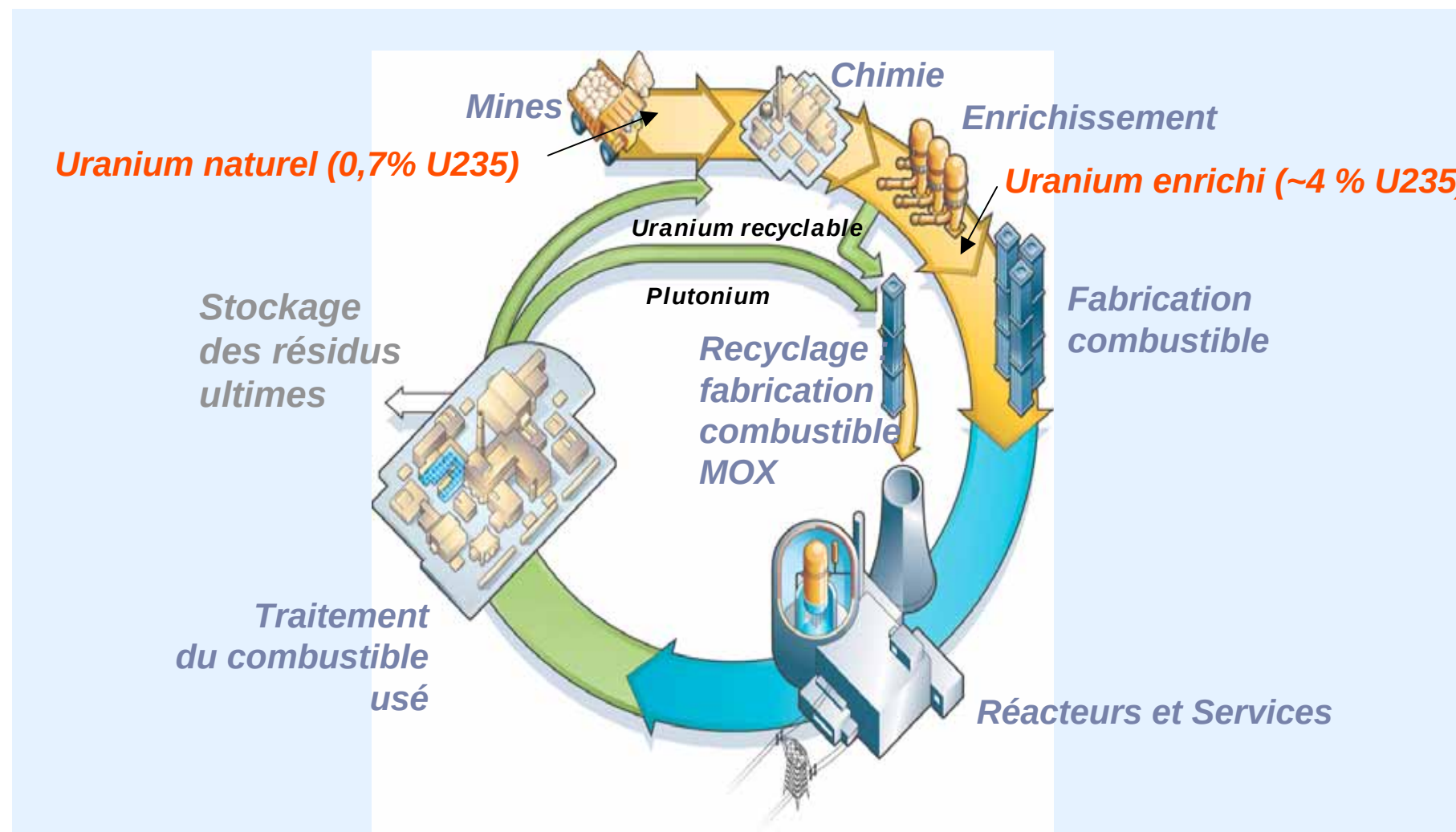
Neutrons: neutrons rapides

Caloporteur: sodium/plomb

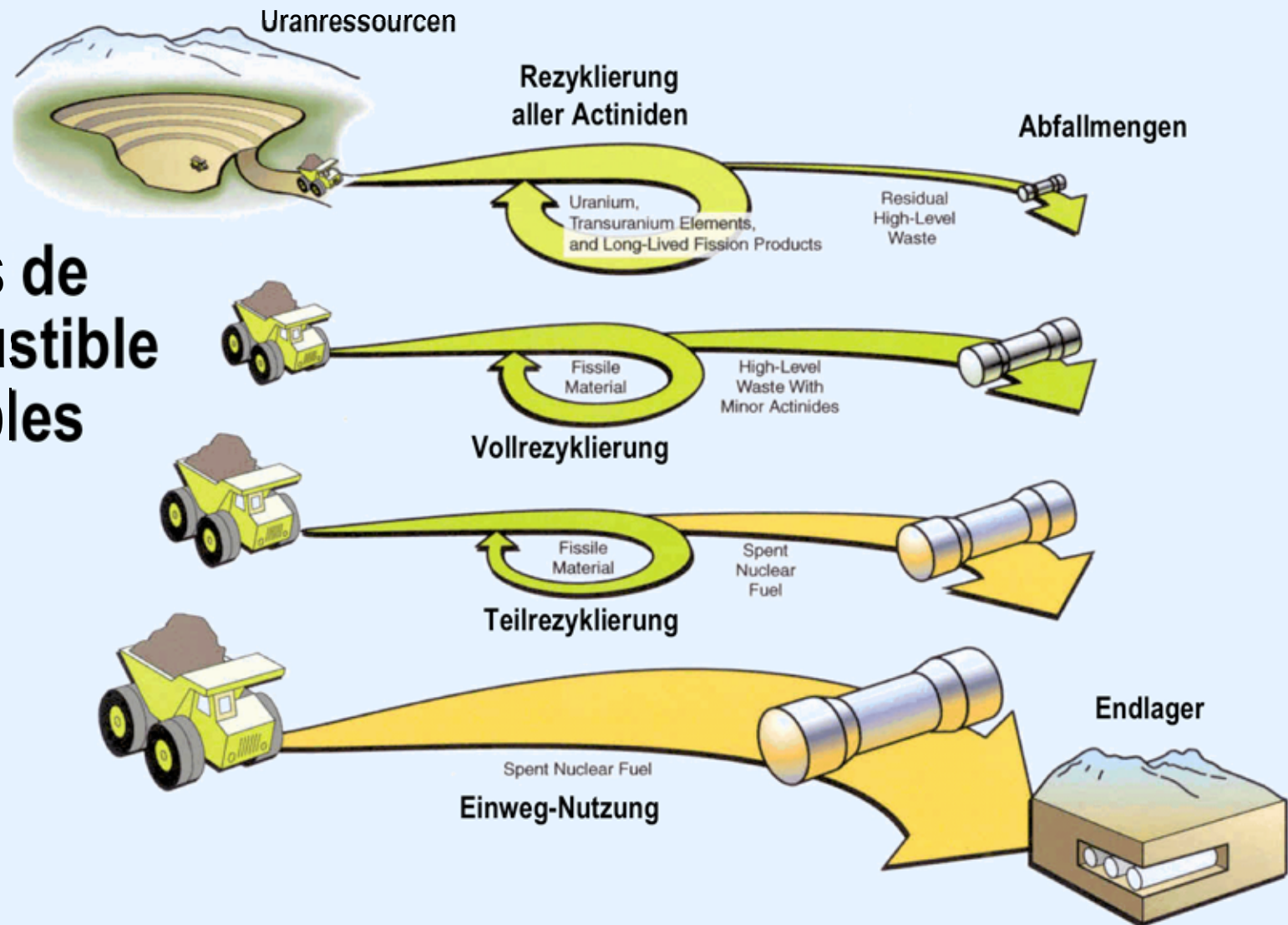
France, Japon, Russie



Le cycle de combustible



Cycles de combustible possibles



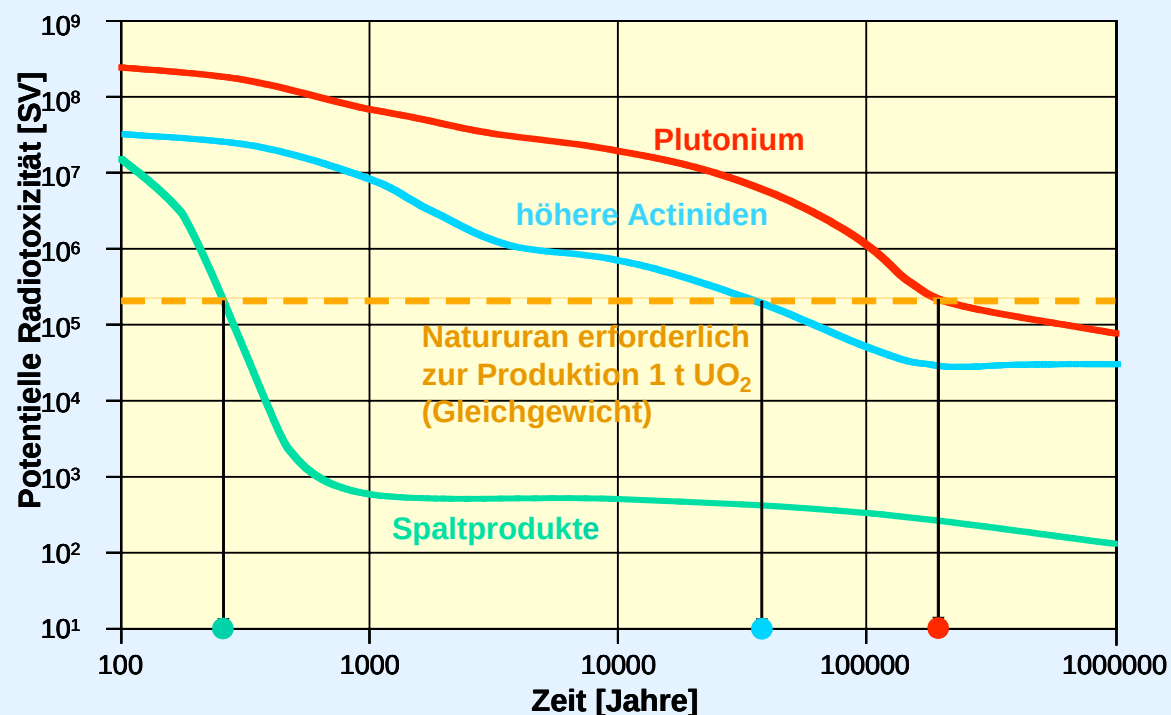
Quelle: GIF, 2003

Les ressources de combustible

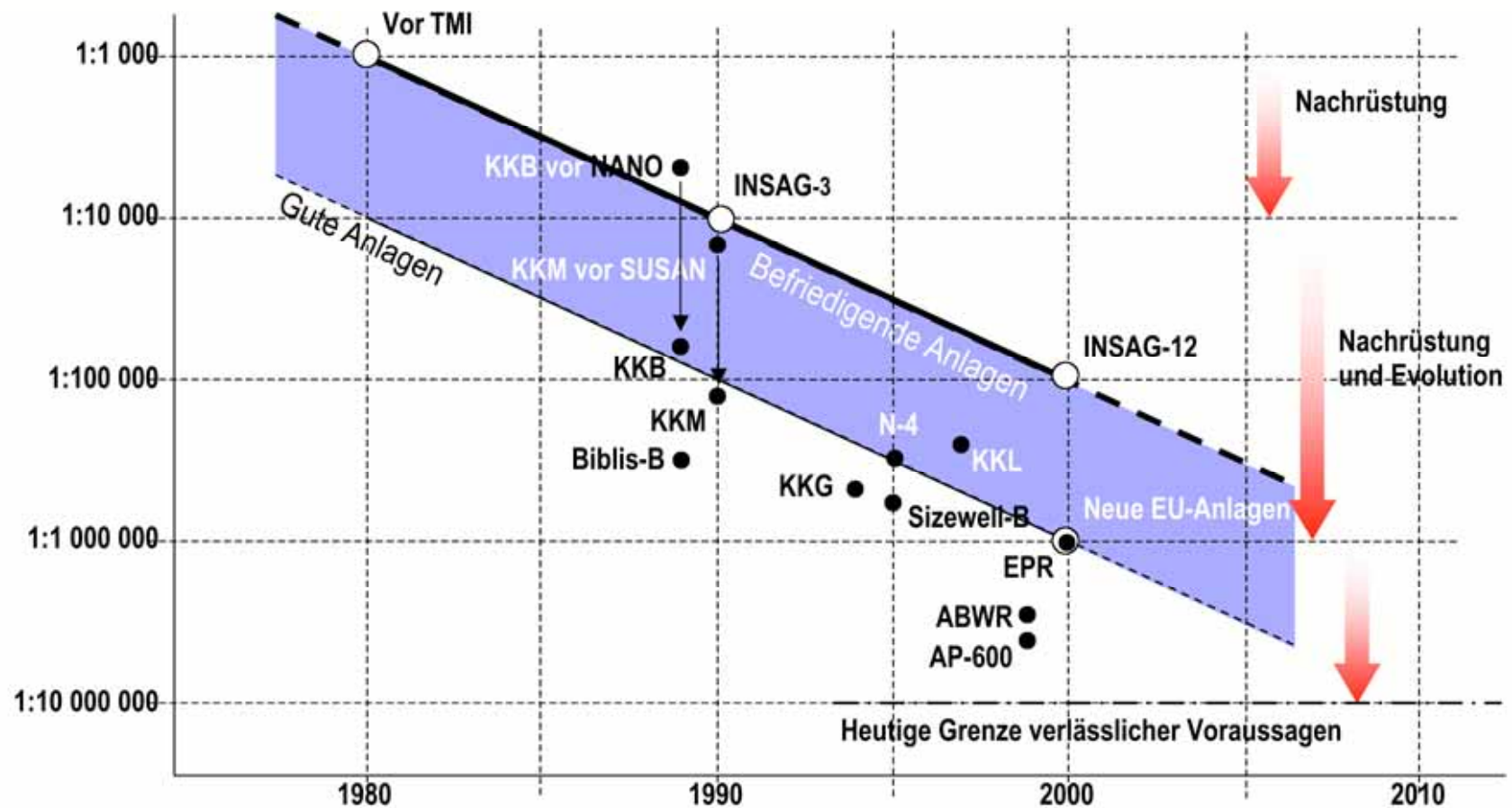
Les ressources
d'uranium
(consommation
actuelle)

Uranressourcen	1000 t U	Reichweite [y]	
Vorräte/Abrüstung	800	16	16
Bekannte konventionelle Ressourcen	4'000	80	96
Unbekannte konventionelle Ressourcen	11'500	230	326
Uran in Phosphaten	22'000	440	766
Uran in Meerwasser	4'200'000	80'000	80'766

La gestion des actinides:
Réduction du plutonium
et des actinides dans des
réacteurs avancés.



Amélioration continue de la sûreté



Quelle : IAEA,
1995

Les réacteurs avancés => GEN III/III+

Améliorations évolutives

- **Sûreté:** Sûreté passive ou intrinsèque, augmentation des redondances
- **Economie:** Standardisation, simplification de l'opération, disponibilité, réduction de la durée de construction
- **Ressources:** Utilisation accrue du contenu énergétique des combustibles et réduction des déchets



Les technologies de la GEN III/III+

*Réacteurs de génération III identifiés dans la liste
'Near Term Deployment' du Forum Génération IV*

Réacteurs avancés à eau pressurisée

AP 600, AP 1000, APR1400, APWR+, EPR

Réacteurs avancés à eau bouillante

ABWR II, ESBWR, HC-BWR, SWR-1000

Réacteur à eau lourde avancé

ACR-700 (Advanced CANDU Reactor 700)

Réacteurs intégrés de petites et moyennes puissances

CAREM, IMR, IRIS, SMART

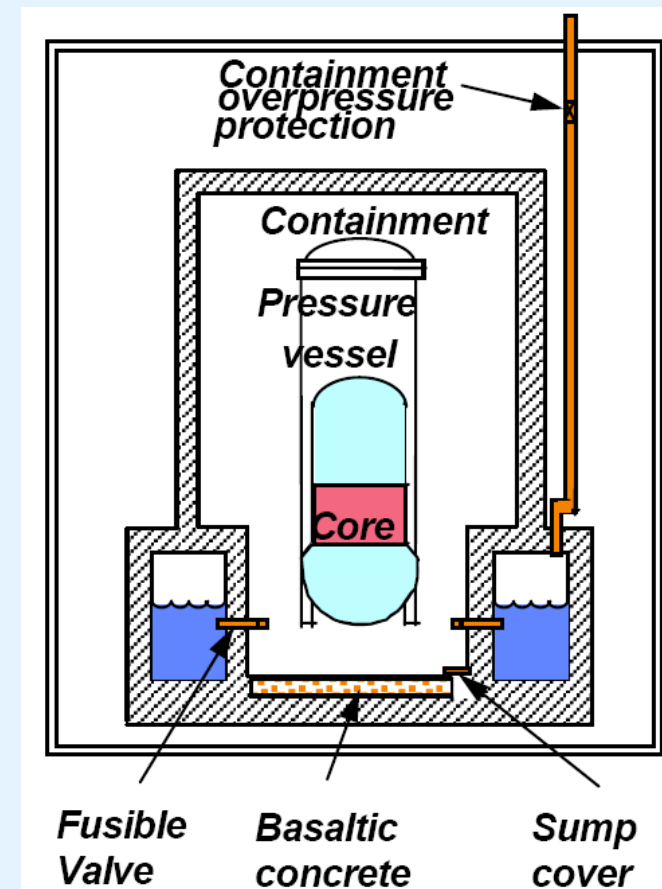
Réacteurs modulaires à gaz, haute température,

GT-MHR, PBMR

Nouveaux réacteurs déjà construits: ABWR

Trois réacteurs de la GEN III sont déjà réalisés:
ABWR (1356 MW) unités Kashiwazaki-Kariwa 6&7 (96)
et Hamaoka 5 (05) au Japon

Autres en projet/construction au Japon et Taiwan

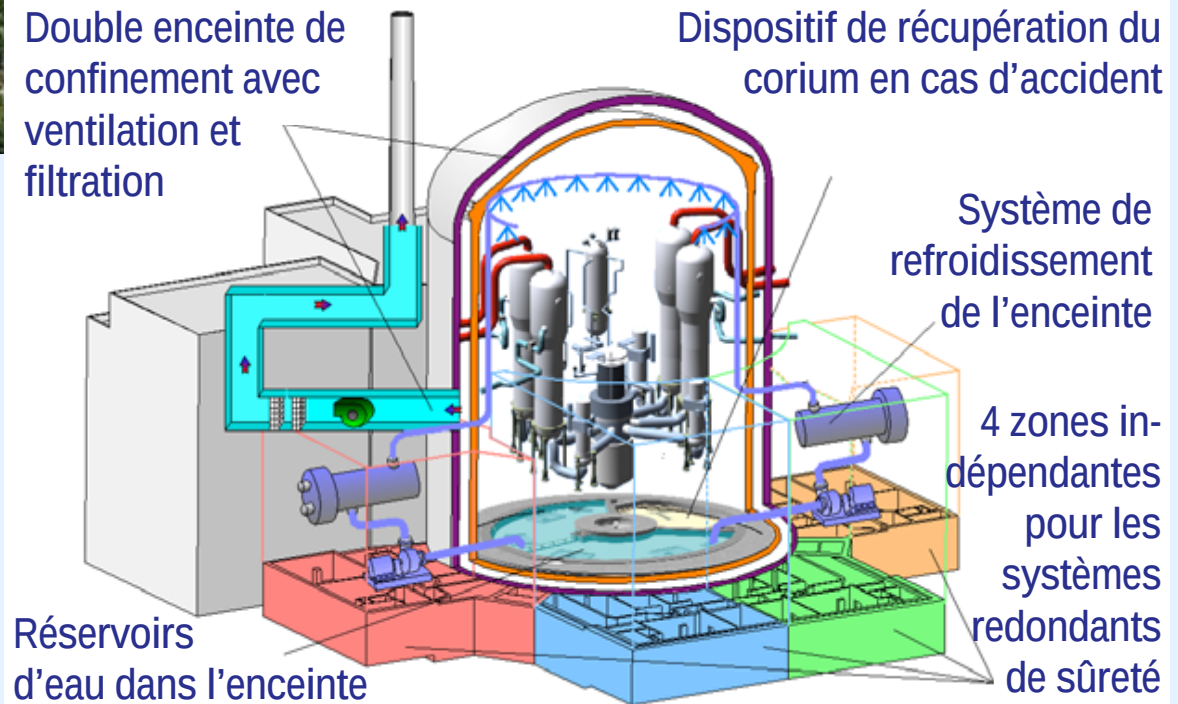


Nouveaux réacteurs en construction/projet: EPR

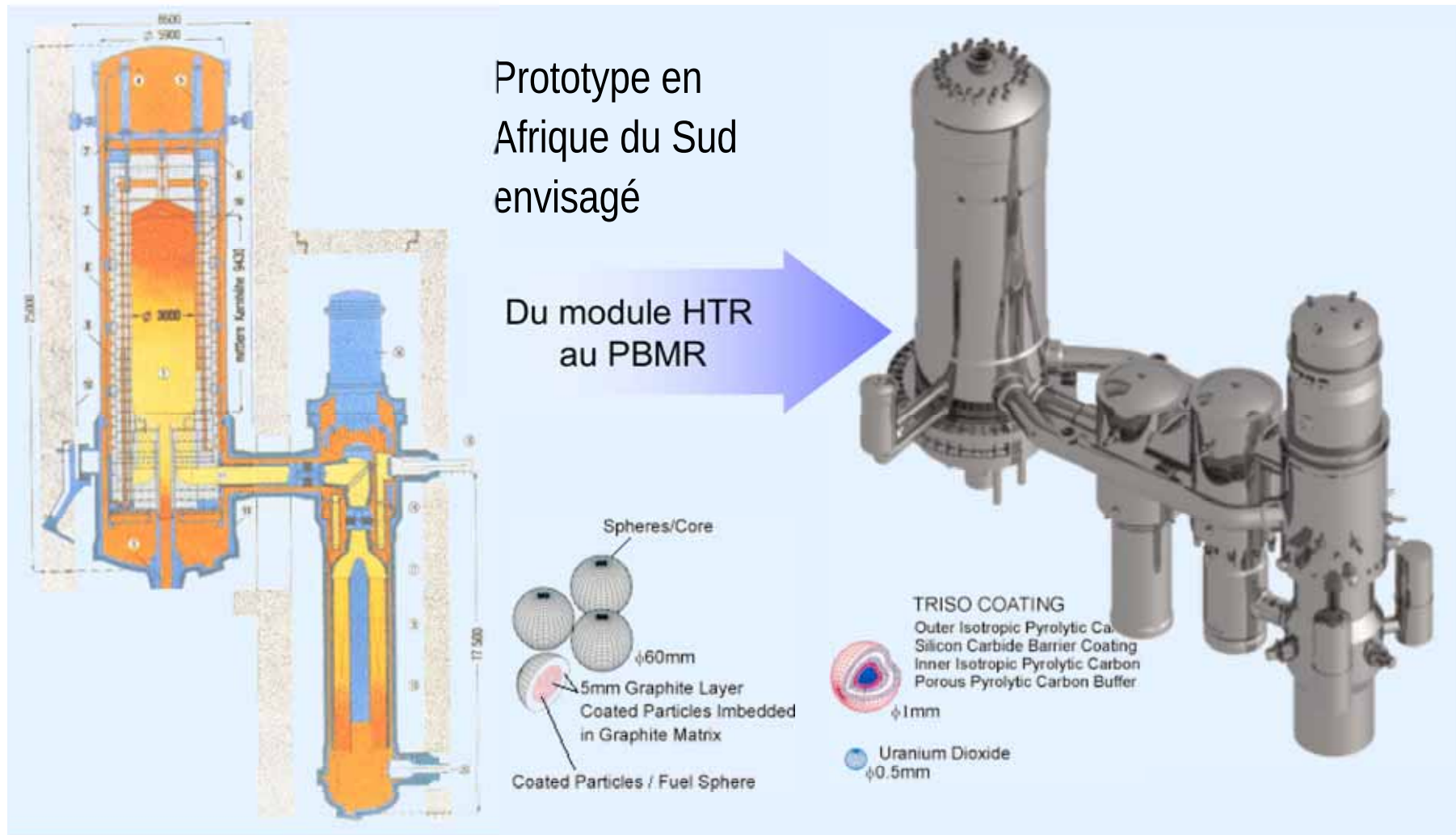


France: Flamanville III (2012)

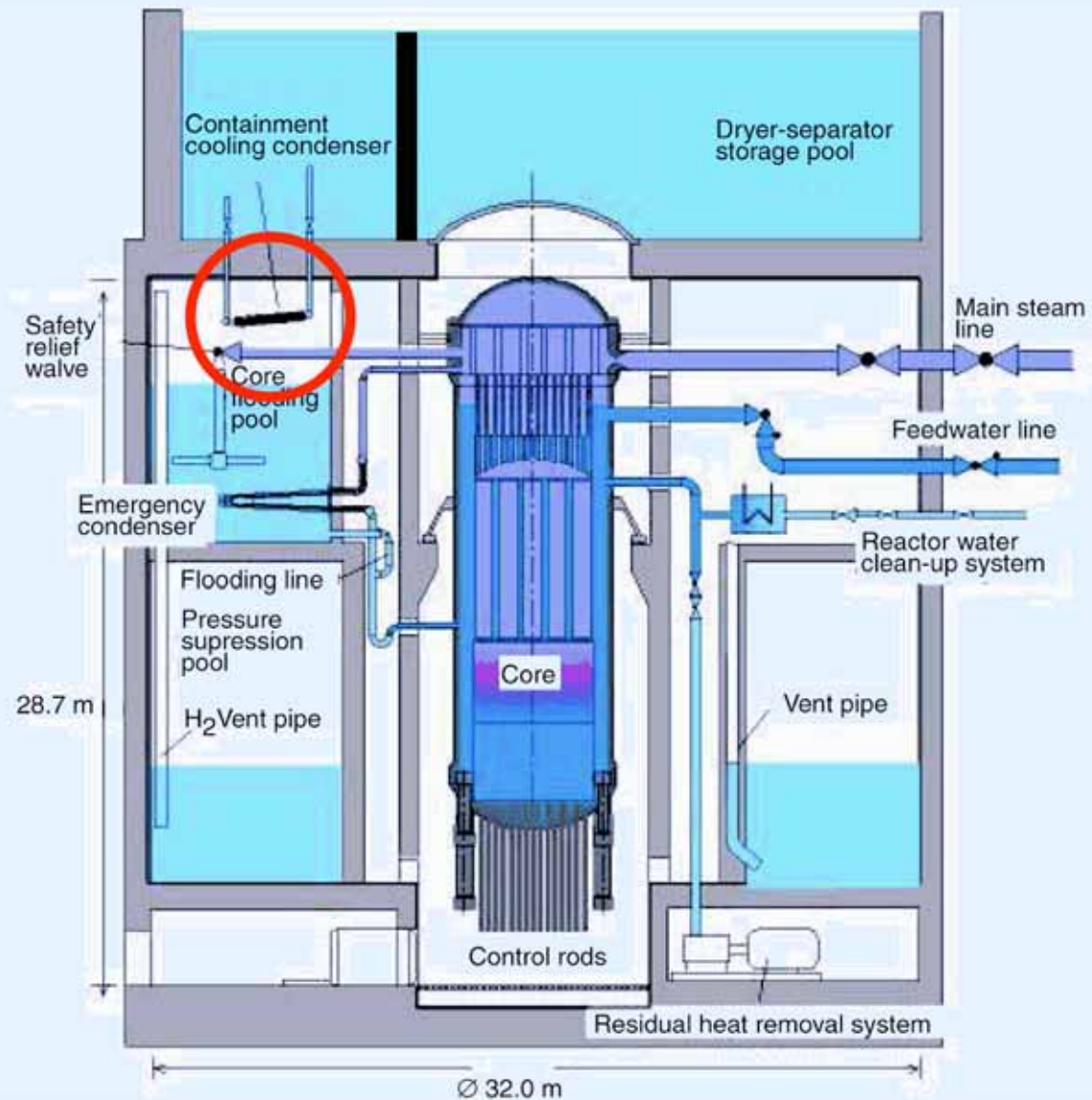
Finlande: Olkiluoto III
(2009)



Nouveaux réacteurs en construction/projet: PBMR



SWR-1000: Enceinte et Extracteur passif de chaleur



Quelle: Siemens, 2001

GEN IV: Vers le nucléaire durable

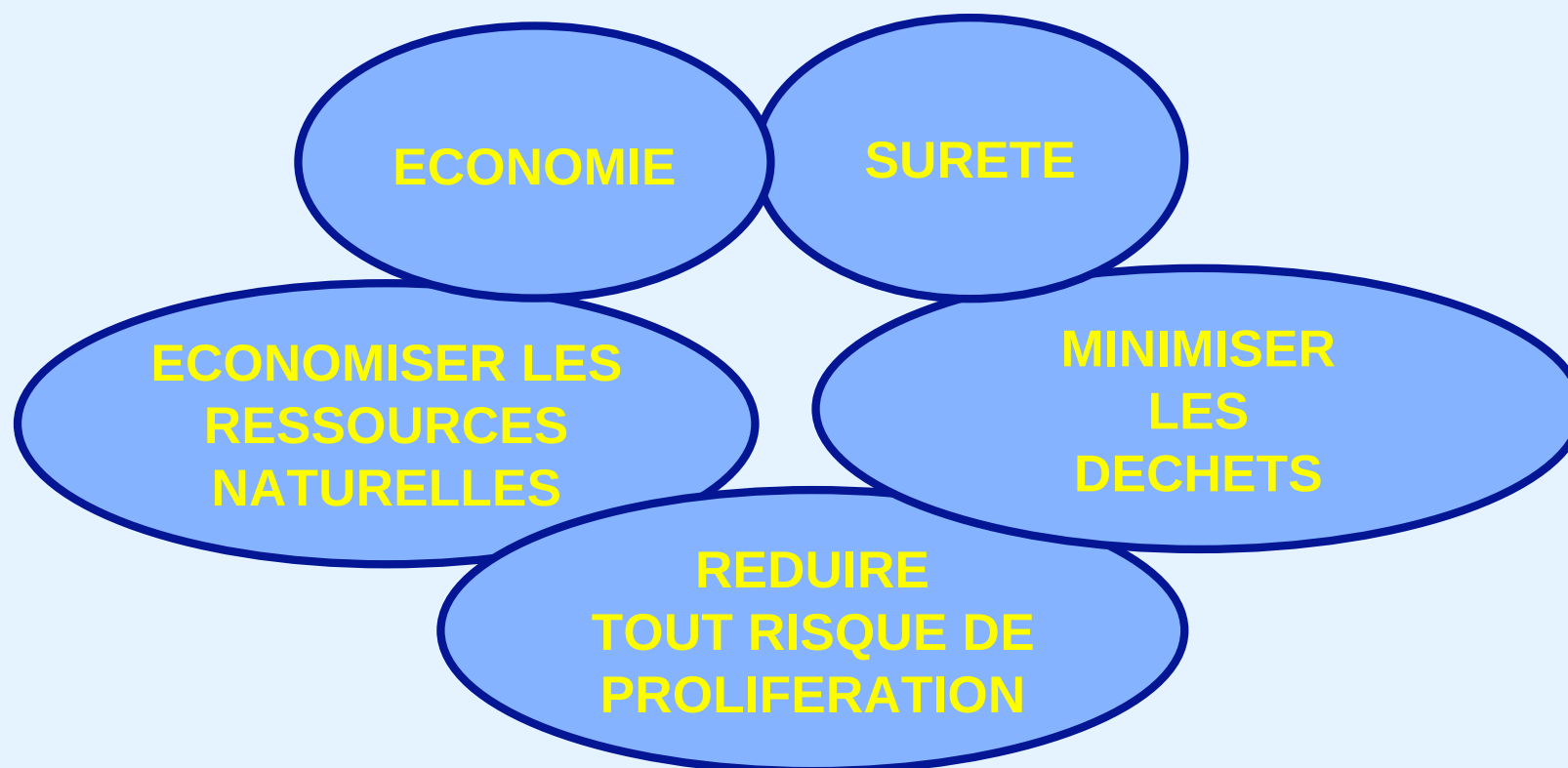
- Critère fondamental: Développement durable
- De nouvelles applications
=> Production d'hydrogène, dessalement (eau de mer)
- Six systèmes de filières sont sélectionnés
parmi 100 systèmes proposés
- Prototypes 2025-2035, Commercialisation dès 2035-2045



Type de réacteur	acronyme	spectre	type de cycle
Réacteur rapide sodium	(SFR)	rapide	fermé
Réacteur rapide au plomb.	(LFR)	rapide	fermé
Réacteur rapide à gaz	(GFR)	rapide	fermé
Réacteur à gaz, très haute temp.	(VHTR)	thermique	ouvert
Réacteur à eau supercritique	(SCWR)	ther. & rap.	les deux
Réacteur à sels fondus	(MSR)	epithermique	fermé

Initiative Génération IV: Les critères

Les critères fondamentaux: vers un DEVELOPEMENT DURABLE

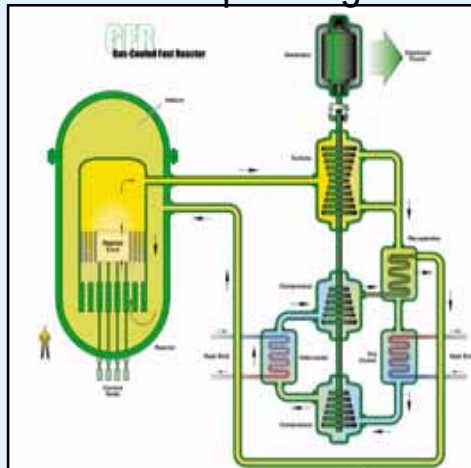


<http://gen-iv.ne.doe.gov/>

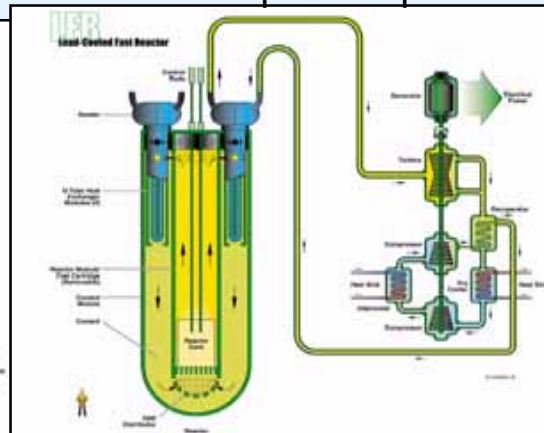
<http://gif.inel.gov/roadmap/>

Les systèmes du futur => GEN IV

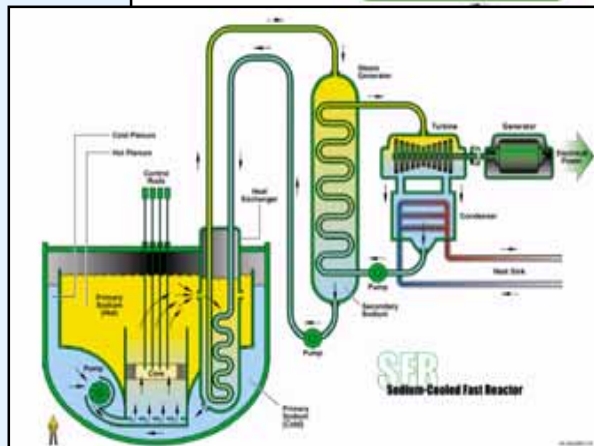
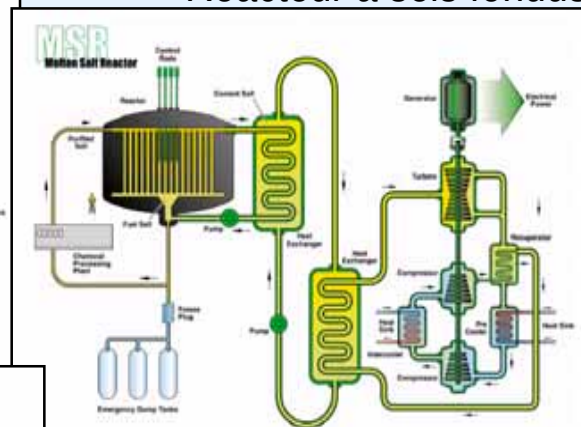
Réacteur rapide à gaz



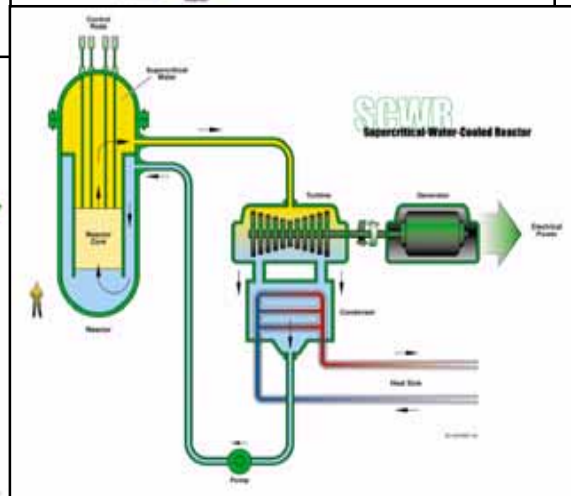
Réacteur rapide au plomb



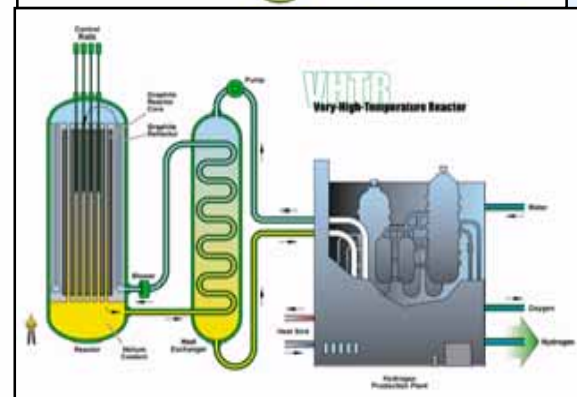
Réacteur à sels fondus



Réacteur rapide au sodium

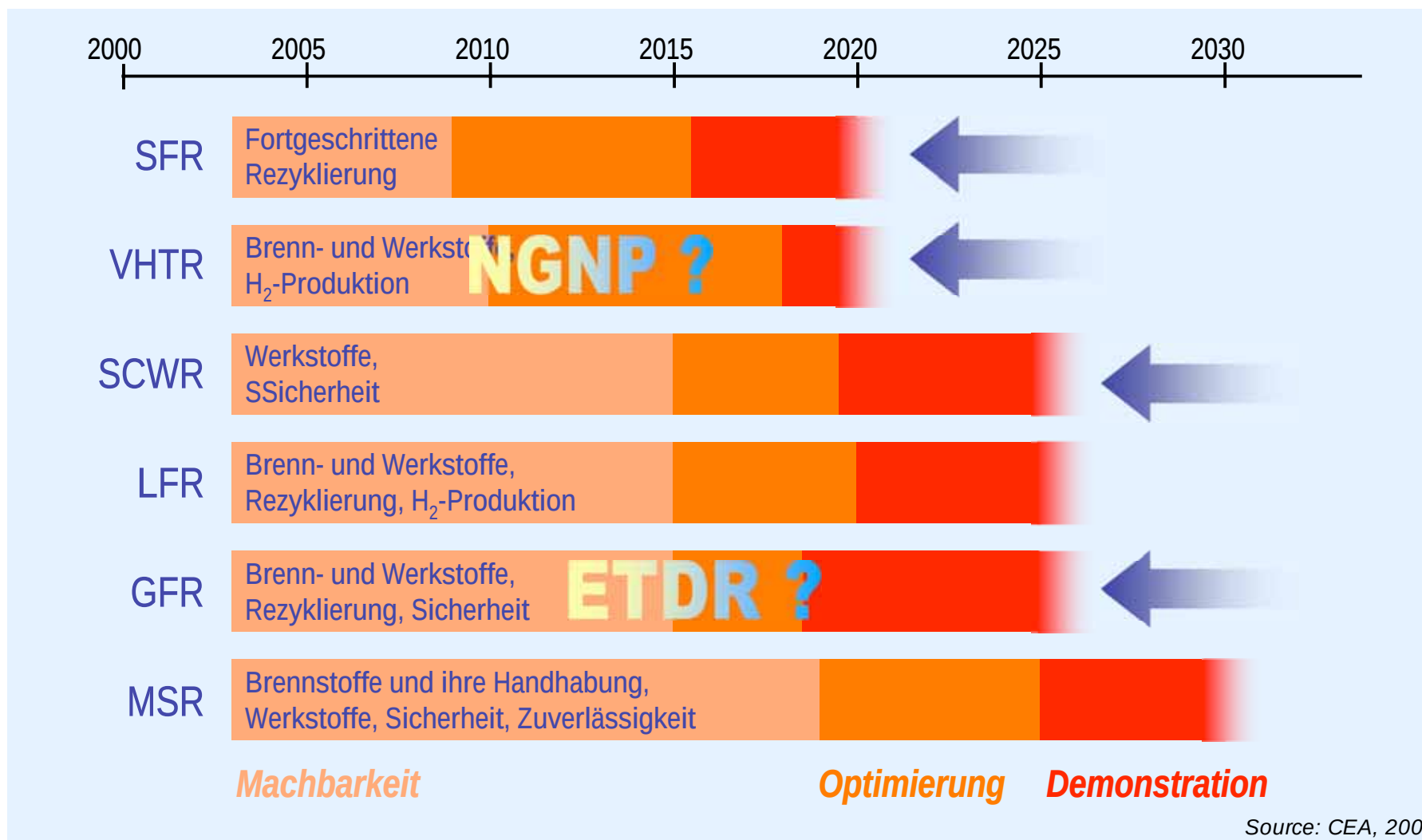


Réacteur à eau supercritique



Réacteur à gaz, très haute temp.

Les phases du développement



Réacteur rapide à gaz

Caractéristiques

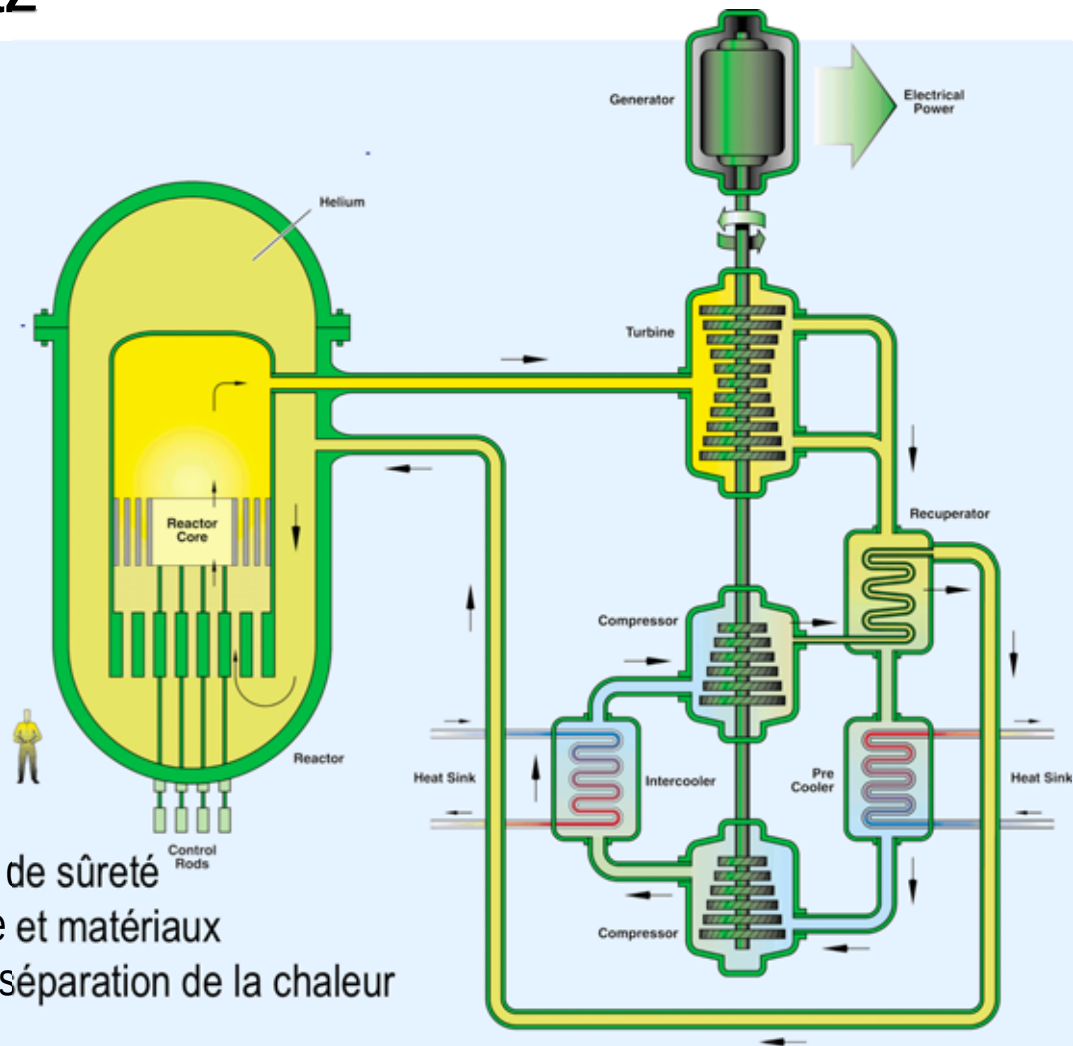
- Caloporteur: He
- Cycle de turbine à gaz directe
- T_{out} : 850 °C
- P: 300 – 600 MW_e
- Rendement: 48 %

Avantages

- Réduction de déchets et utilisation efficace des ressources

Défis

- Développement de combustible pour neutrons rapides
- Conception du cœur et des systèmes de sûreté
- Technologies du cycle de combustible et matériaux
- Rendement de la turbine à hélium et séparation de la chaleur



Source: GIF, 2003

Réacteur rapide au plomb

Caractéristiques

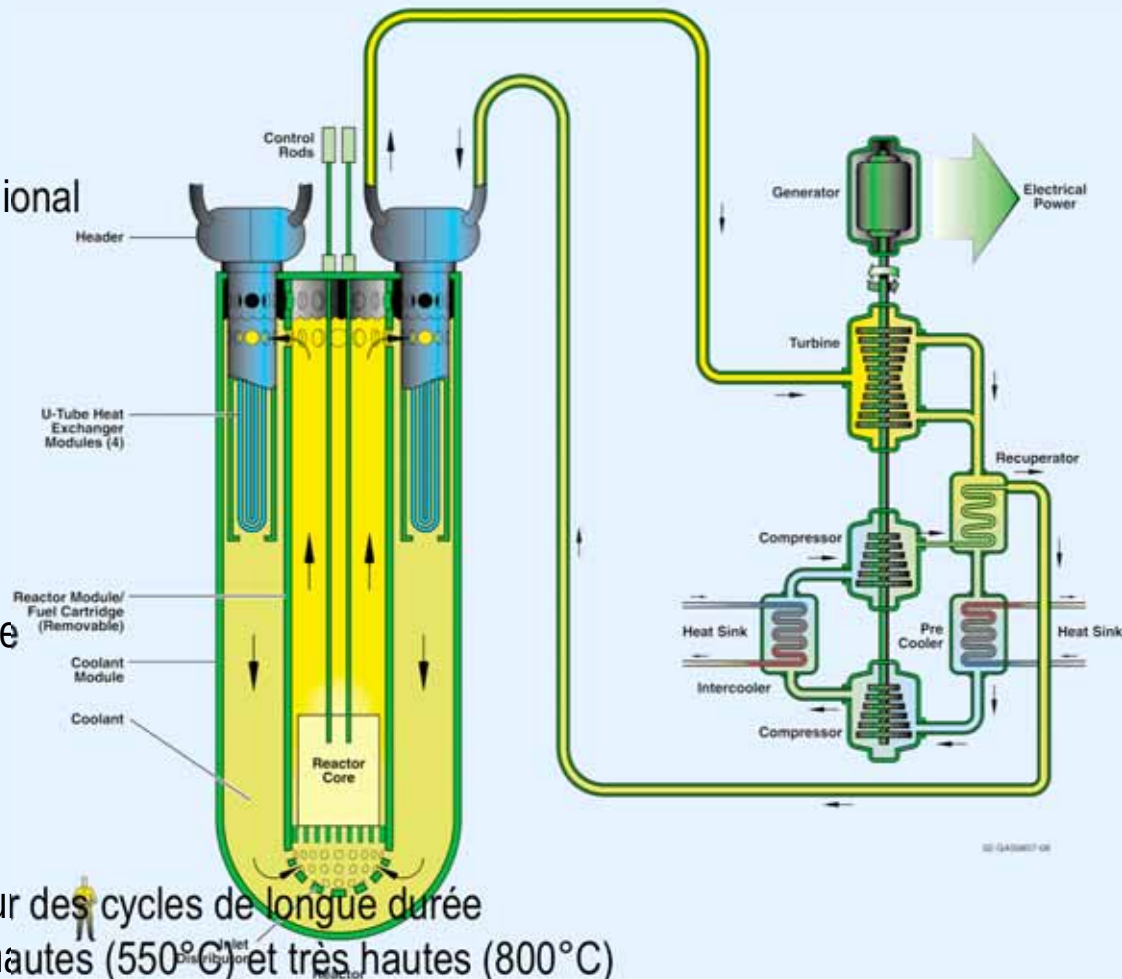
- Caloporteur: PB ou Pb/Bi
- Durée de vie 15-30 a
- Cœur modulaire pour recyclage régional
- T_{out} : 550 - 800 °C
- P: 50 – 1200 MW_e
- Rendement: 50 %

Avantages

- La cœur modulaire à longue durée de vie favorise la non prolifération
- Production d'électricité décentralisée
- Production d'hydrogène
- Sûreté passive

Défis

- Développement de combustible pour des cycles de longue durée
- Matériaux pour des températures hautes (550°C) et très hautes (800°C)
- Conception de système, rendement économique, modularisation



Source: GIF, 2003

Réacteur à sels fondus

Caractéristiques

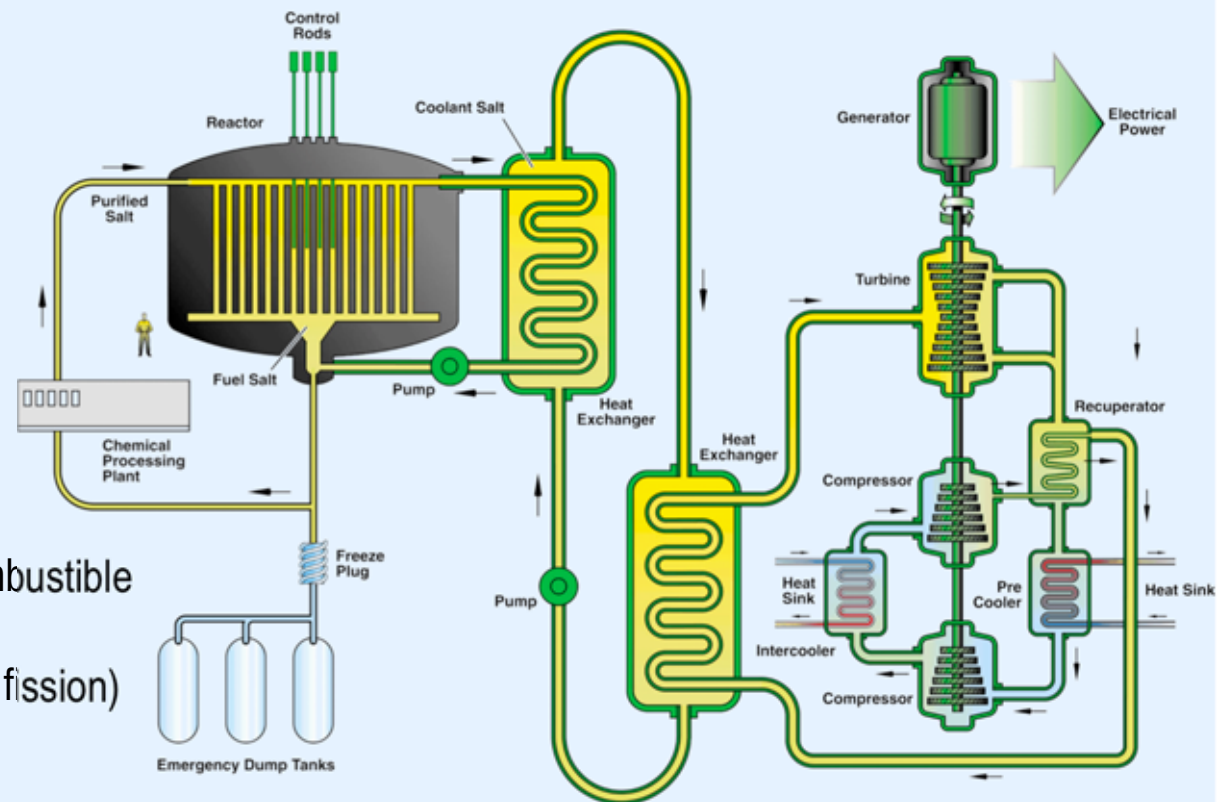
- Caloporteur: Fluorides liquides (Na, Zr, U, Pu)
- Pression basse ($< 0.5 \text{ MPa}$)
- T_{out} : 700 - 800 °C
- P: 1000 MW_e
- Rendement: 44-50 %

Avantages

- Transmutation complète
- Eviter le développement de combustible
- Favorise la non prolifération (faible inventaire en produits de fission)

Défis

- Chimie de sel liquide: Solubilité, séparation et recyclage de sel
- Développement de combustible, compatibilité des matériaux, corrosion
- Calfeutrage, conception et stabilité de système



02-GA50807-02

Source: GIF, 2003

Réacteur à eau supercritique

Caractéristiques

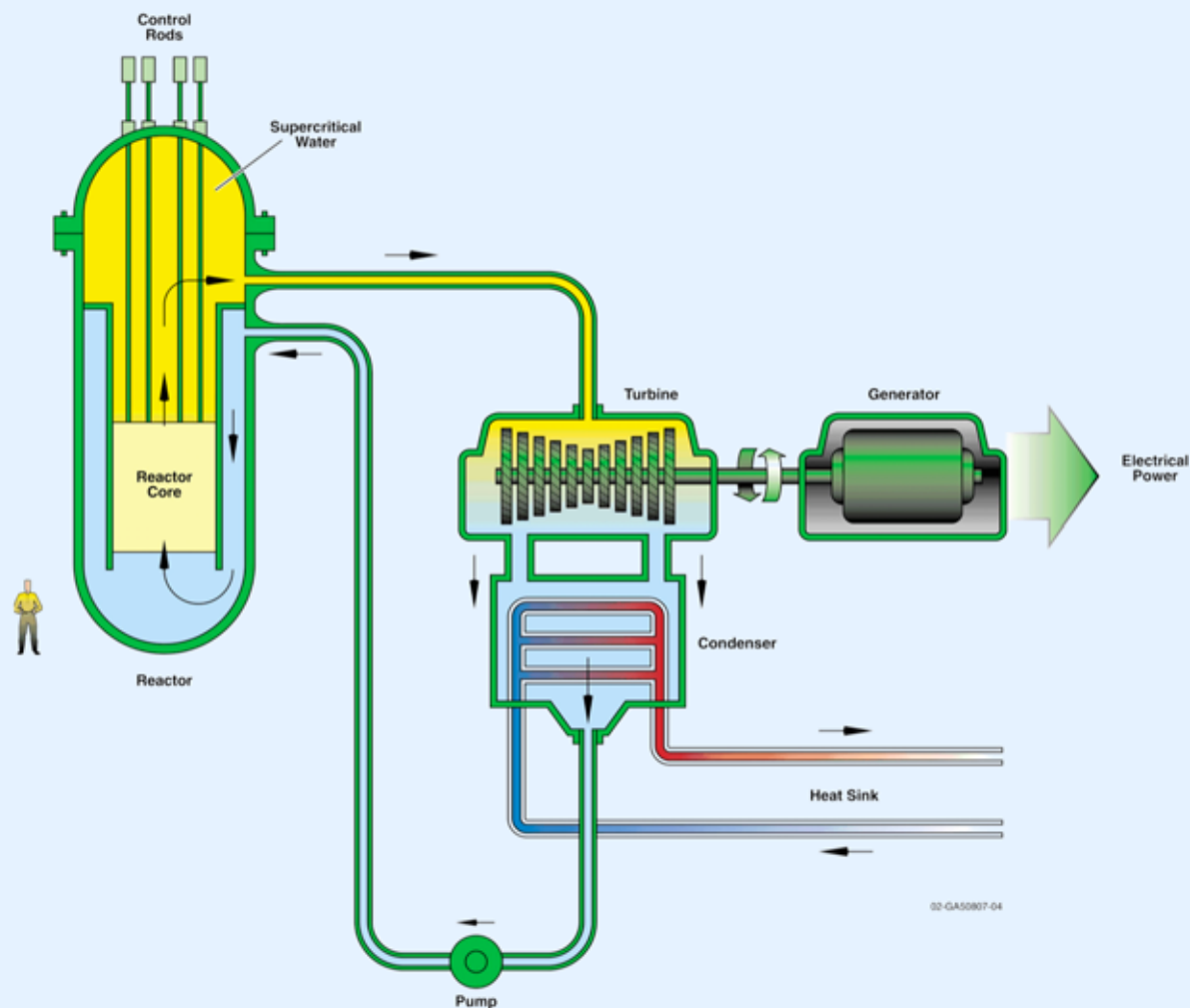
- Caloporteur: H₂O supercritique
- T_{out}: 550 °C
- P: 1700 MW_e
- Rendement: 44 %

Avantages

- Simplification de la partie non nucléaire
- Excellent rendement économique

Défis

- Matériaux/corrosion
- Sûreté et stabilité en service
- Conception de réacteur



Source: GIF, 2003

Réacteur rapide refroidi au sodium

Caractéristiques

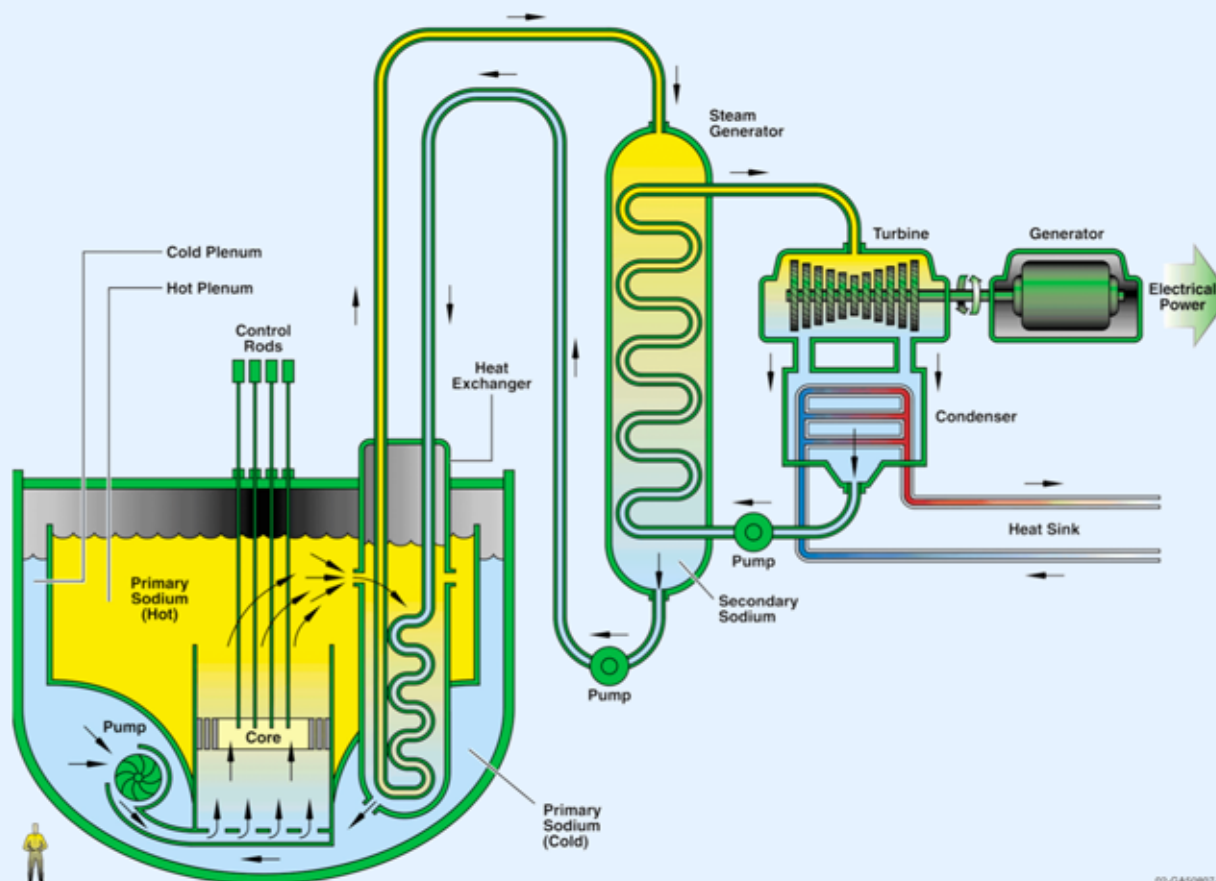
- Caloporteur: Na
- T_{out} : 550 °C
- P: 300 - 1500 MW_e
- Combustible métallique avec pyro-recyclage ou combustible MOX avec recyclage humide avancé

Avantages

- Réduction de déchets et utilisation efficace des ressources

Défis

- Gestion des actinides
- Réductions des coûts d'investissement
- Technologies de processus, le cycle sodium
- Sûreté passive, stabilité et preuve de fiabilité en cas d'incident



02-GA50857-03

Source: GIF, 2003

Réacteur à caloporteur gaz à très haute température

Caractéristiques

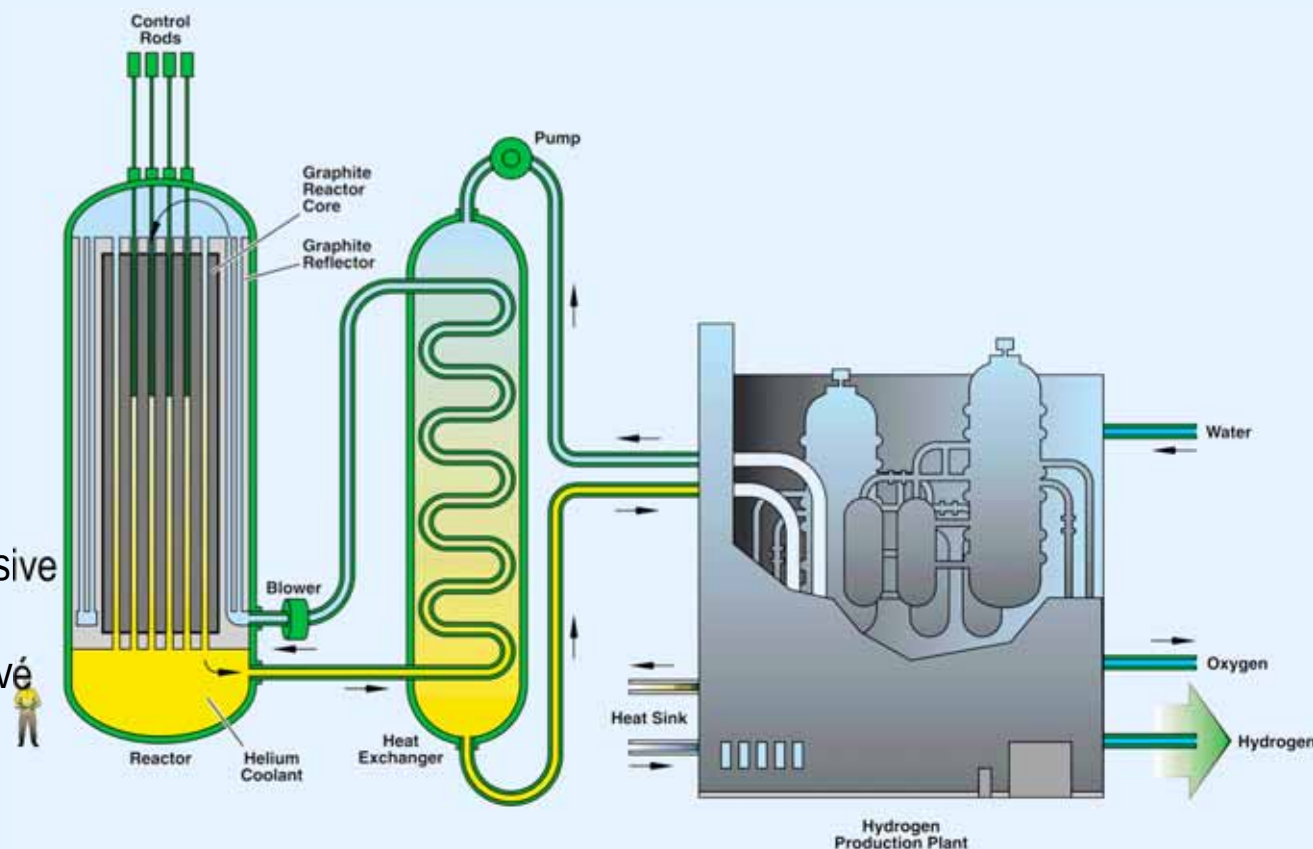
- Caloporteur: He
- $T_{out} \geq 1000\text{ °C}$
- P: 600 MW_{th}
- Rendement: 50 %

Avantages

- Production d'hydrogène
- Applications de chaleur
- Haut degré de sûreté passive
- Rendement thermique
- Taux de combustibles élevé

Défis

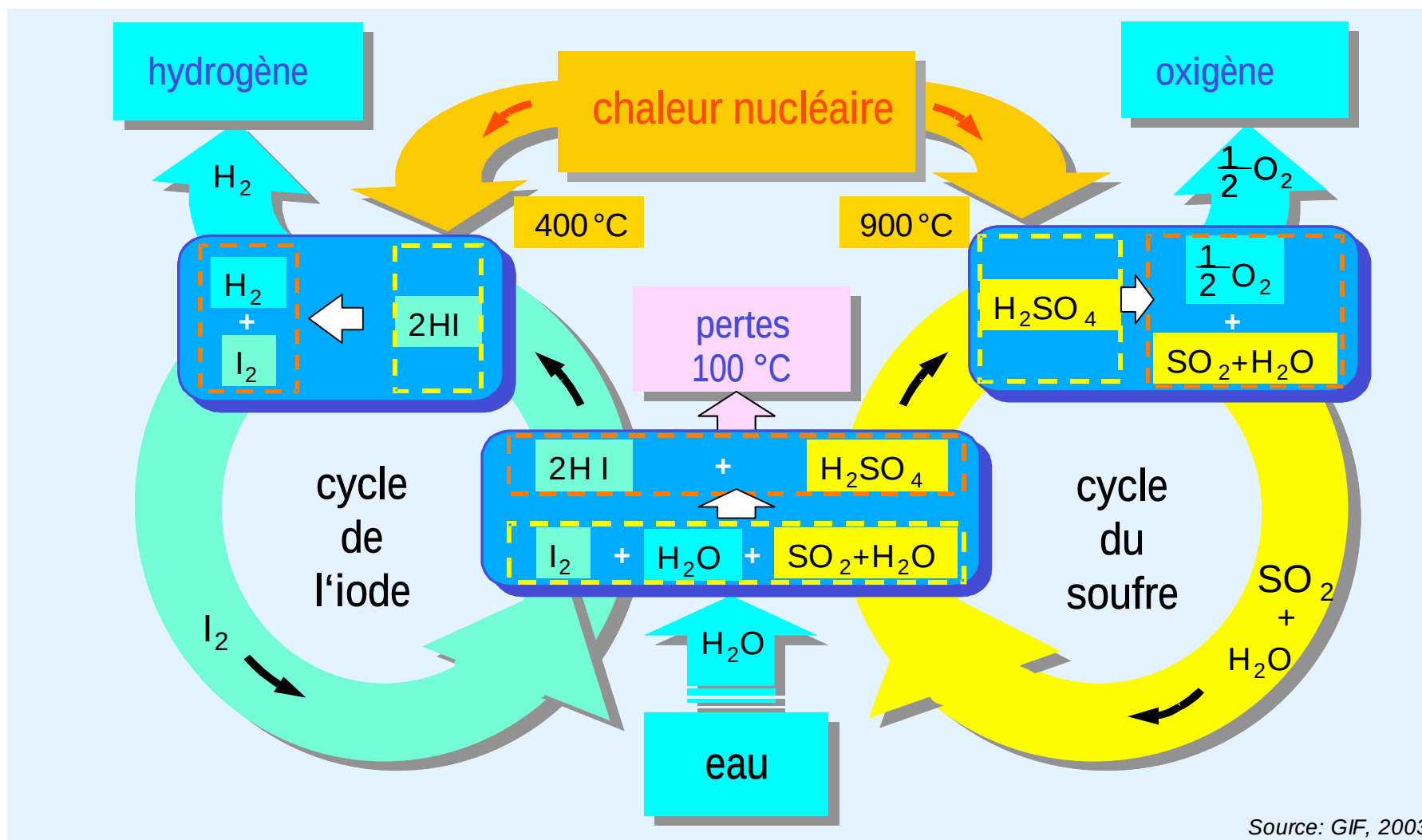
- Turbine à hélium efficace
- Intégration de l'utilisation de chaleur/production d'hydrogène; modularisation
- Matériaux à haute température et développement de combustible (bis 1800°C)
- Conception de cœur et réglage du réacteur: Eviter des gradients thermique dans la cœur et le gaz



02-GA00807-01

Source: GIF, 2003

Production d'hydrogène: le procédé soufre-iode

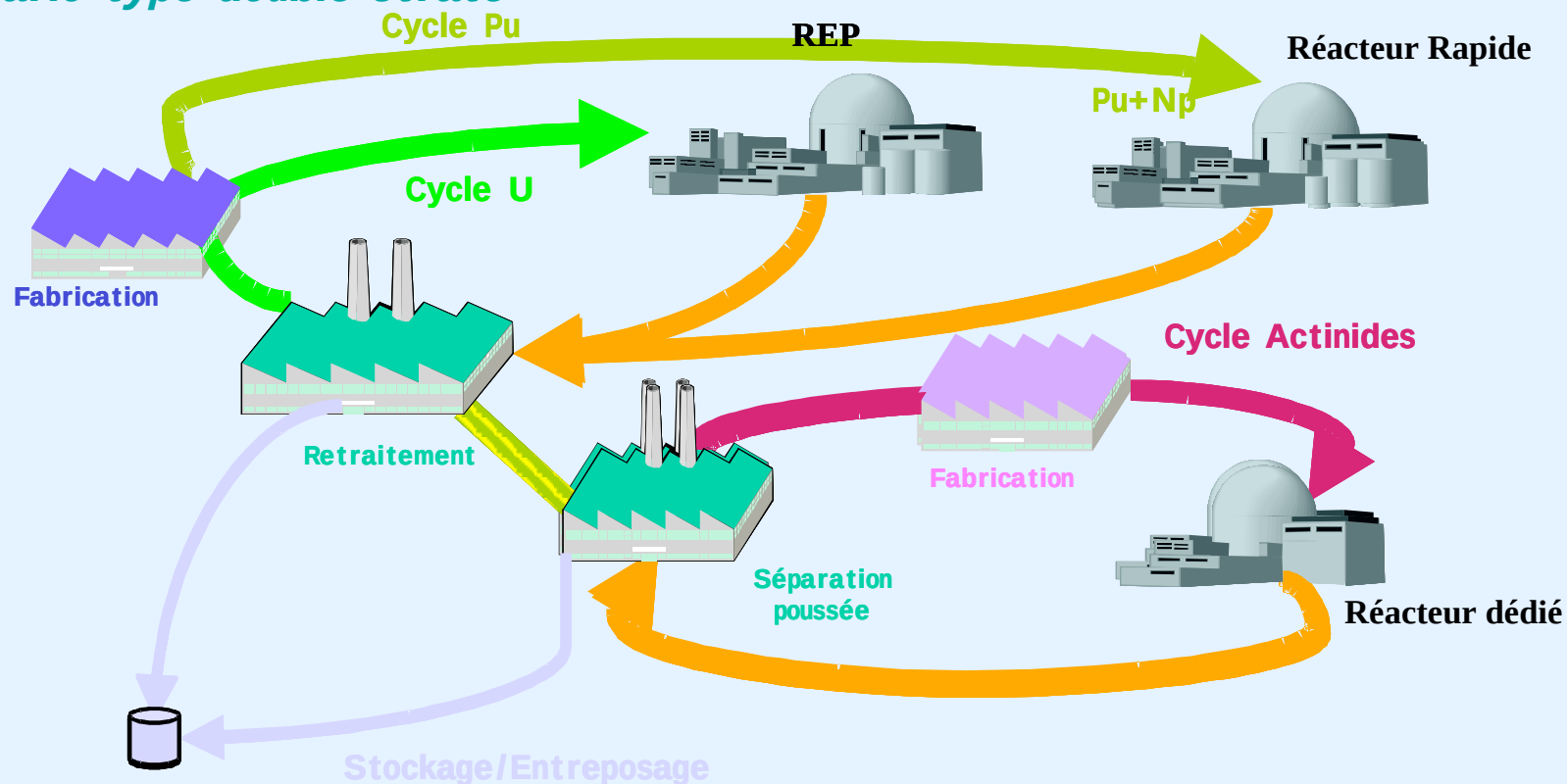


Scénario de parc nucléaire avec transmutation

Evaluation globale de cycles du combustible:

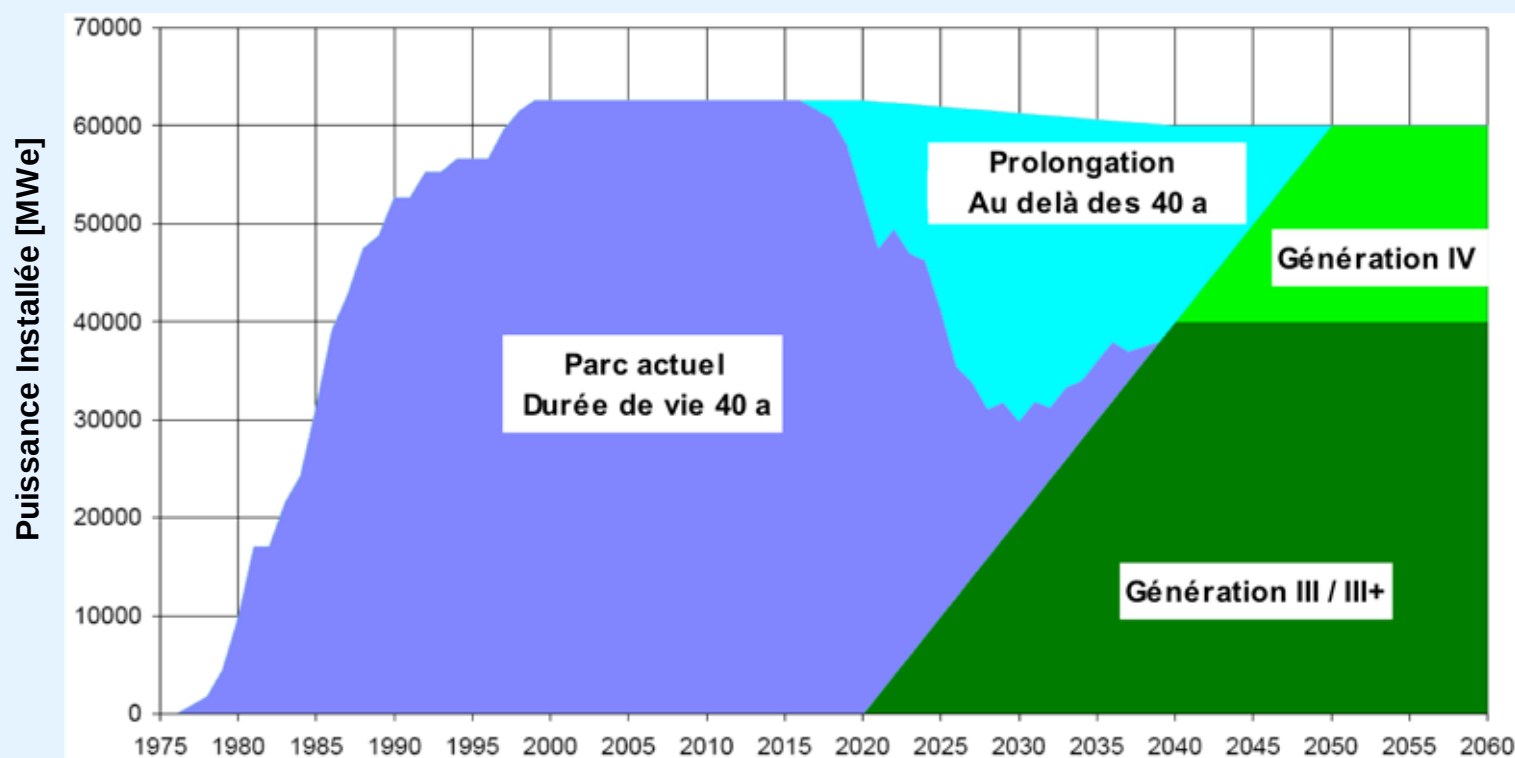
réacteurs $\Leftrightarrow$ usines de fabrication $\Leftrightarrow$ traitement des combustibles

Scénario type double strate



Scénario de remplacement (France, EDF)

- Les REP (GEN II): prolongation de vie pour une partie du parc
- GEN III/III+: Remplacement des REP dès 2020, en opération jusqu'à la fin du 21^{ème} siècle
- GEN IV: Remplacement des REP dès 2035



Durée de vie
moyenne:
48 ans

Rythme de
construction:
2 GW_e/an

Source: EDF, 2005

Histoire du nucléaire en Suisse

Le début – 1955 Conférence de Genève – 1957 SAPHIR
– 1955 Reaktor AG – 1959 loi sur l'énergie atomique

Développement commercial

Kraftwerk	Typ/ Hersteller	Inbetrieb- nahme	Stilllegung/ Ersatz	Leistung Betriebsbeginn	Leistung 2003 [MW]	Produktion 2003 [Mio MWh]
Beznau I	PWR/WH	1969	2019	350	365	2.9
Beznau II	PWR/WH	1971	2021	350	365	3.0
Mühleberg	BWR/GE	1972	2022	320	355	2.8
Gösgen	PWR/KWU	1978	2038	920	970	7.9
Leibstadt	BWR/GE	1984	2044	990	1165	9.2
			Total	2930	3220	25.8

Opposition 1970 locale, dès 1975 nationale => Kaiseraugst 1989 non construit

Votations 1990 => moratoire 1990-2000

Votations 2003 (moratoire/abandon du nucléaire) => 2x non

Nouvelle loi sur l'énergie atomique 2005=> référendum facultatif

Traitement des déchets / stockage définitif

Situation Suisse

- Cycle ouvert/fermé => Moratoire de retraitement 2006-2016
- Preuve de faisabilité de stockage définitif => Déposée
- Stockage définitif Suisse => Sites potentiels existent
- Contributions actives dans des projets de recherche Européens

Stockage définitif dans le monde

- Déchets de faible activité: dépôt de surface en service: CDN, ES, FR, J, UK, USA
- Déchets de faible et de moyenne activité: dépôt géologique en service : S, FI
- Déchets de moyenne activité à vie longue: dépôt géologique en service : USA
- Déchets de haute activité: décision de site (géologique)/début de construction: USA, FI

Potentiel du nucléaire en Suisse: Scénarios

Scénario sans remplacement

- Arrêt des centrales après 50/60 ans

Scénario remplacement à puissance constante

- Remplacement des centrales par puissance égale, réunissant Beznau et Mühleberg

Scénario remplacement exploitant les sites

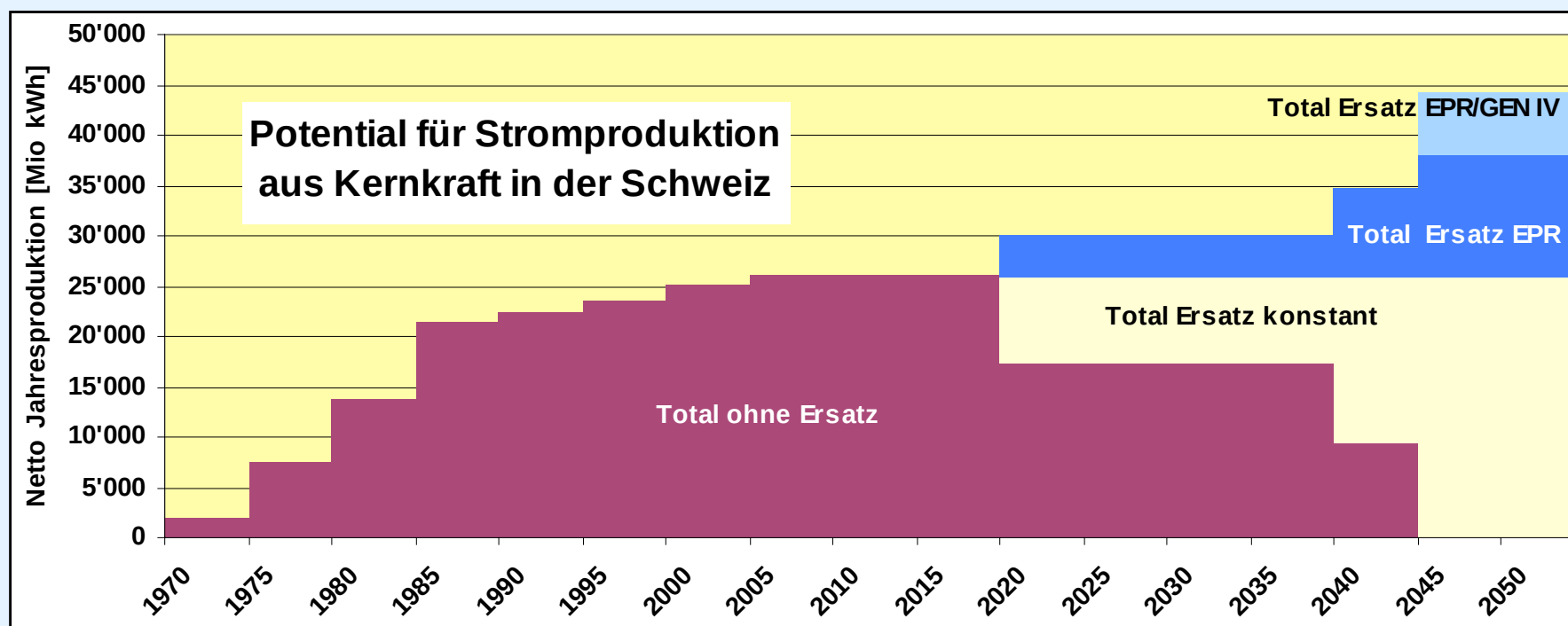
- Scénario remplacement avec EPR 1600
- Scénario remplacement avec EPR 1600/GEN IV

Scénario augmentation (nouveaux sites, pas considéré)

- Nouveaux sites ne sont politiquement guère faisables.
- L'exploitation des sites actuels couvre la demande (Moyenne Vorschau 95) jusqu'à 2050.

Potentiel du nucléaire en Suisse: Résultats

	2002				2035				2050			
	Kapazität [MW]	Produktion total [TWh]	Produktion [TWh]	Anteil [%]	Kapazität [MW]	Verbrauch VS 95 [TWh]	Produktion [TWh]	Anteil [%]	Kapazität [MW]	Verbrauch VS 95 [TWh]	Produktion [TWh]	Anteil [%]
ohne Ersatz	3220	65	25.7	40%	2135	78	17.3	22%	0	87	0.0	0%
Ersatz Konstant	3220	65	25.7	40%	3220	78	25.8	33%	3285	87	25.9	30%
Ersatz EPR	3220	65	25.7	40%	3735	78	29.9	38%	4800	87	37.8	43%
Ersatz EPR/GEN IV	3220	65	25.7	40%	3735	78	29.9	38%	5600	87	44.2	51%



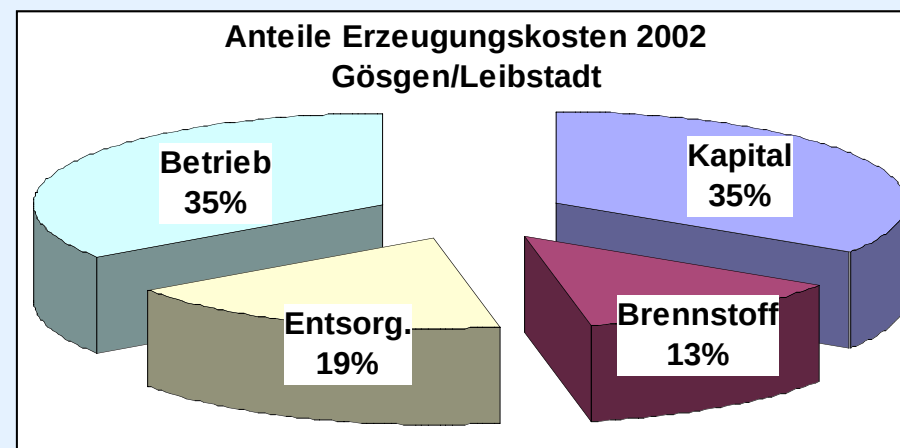
Economie

Coûts de production aujourd'hui/historique

- Suisse: 4-6 Rp./kWh
- Monde: US NEI* 2.2 Rp./kWh
- US+Inv. 3.8 Rp./kWh
- FIN hist. 2.8 Rp./kWh
- OECD 4.5 Rp./kWh

Coûts de production GEN III

- EPR Finlande: 3.5 Rp./kWh
- EPR Suisse: 4-5 Rp./kWh
(traitement de déchets plus cher)



Coûts de production GEN IV (cibles)

- Production sans inv. 1.7-2.0 Rp./kWh (10-20% réduction)
- Investissement 1300-2600 CHF/kW_e (20-30% réduction)
- Production totale 2.5-3.5 Rp./kWh

* US NEI: combustible/stockage et service

Facteurs d'influence

- Acceptation
- Preuve du besoin, démonstration de faisabilité du stockage géologique
 - Référendum, concession générale
 - => Sûreté, déchets, alternatives
 - Situation économique

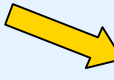
Date du choix de la technologie

- Au moins 10 ans avant la mise en service
- Changement de technologie après la concession générale improbable
- Beznau/Mühleberg 2009, Gösgen 2028, Leibstadt 2034

Rendement économique

- Sûreté
- Synergies de construction/service/stockage
- Intégration dans un programme plus grand (p.e. FR)

Conclusions pour la Suisse

Potentiel	- Conservation de contribution de 40% (EPR), augmentation à 50% (GEN IV) - Augmentation de la production au sites actuels: 2035: + 20% (EPR) 2050: +50% (EPR)/+75% (GEN IV)
Coûts	- Aujourd'hui compétitif (GEN II/GEN III) - Projets actuels (FI/FR) petite réduction (GEN III) - GEN IV: - réduction opération 10-20% - réduction construction 10-30%
Position compétitive	  - Prix montants du gaz et du pétrole; taxes CO₂ - taux d'intérêts montants
Conséquences d'un remplacement EPR (GEN III)	- Conservation du mixe énergétique (neutre quant au CO₂) - Emission de radioactivité impossible - Réduction des déchets