

***EPR & SWR 1000 :
enjeux et perspectives***

Bernard ESTEVE

Senior Executive Vice President Framatome ANP

AREVA Technical Days

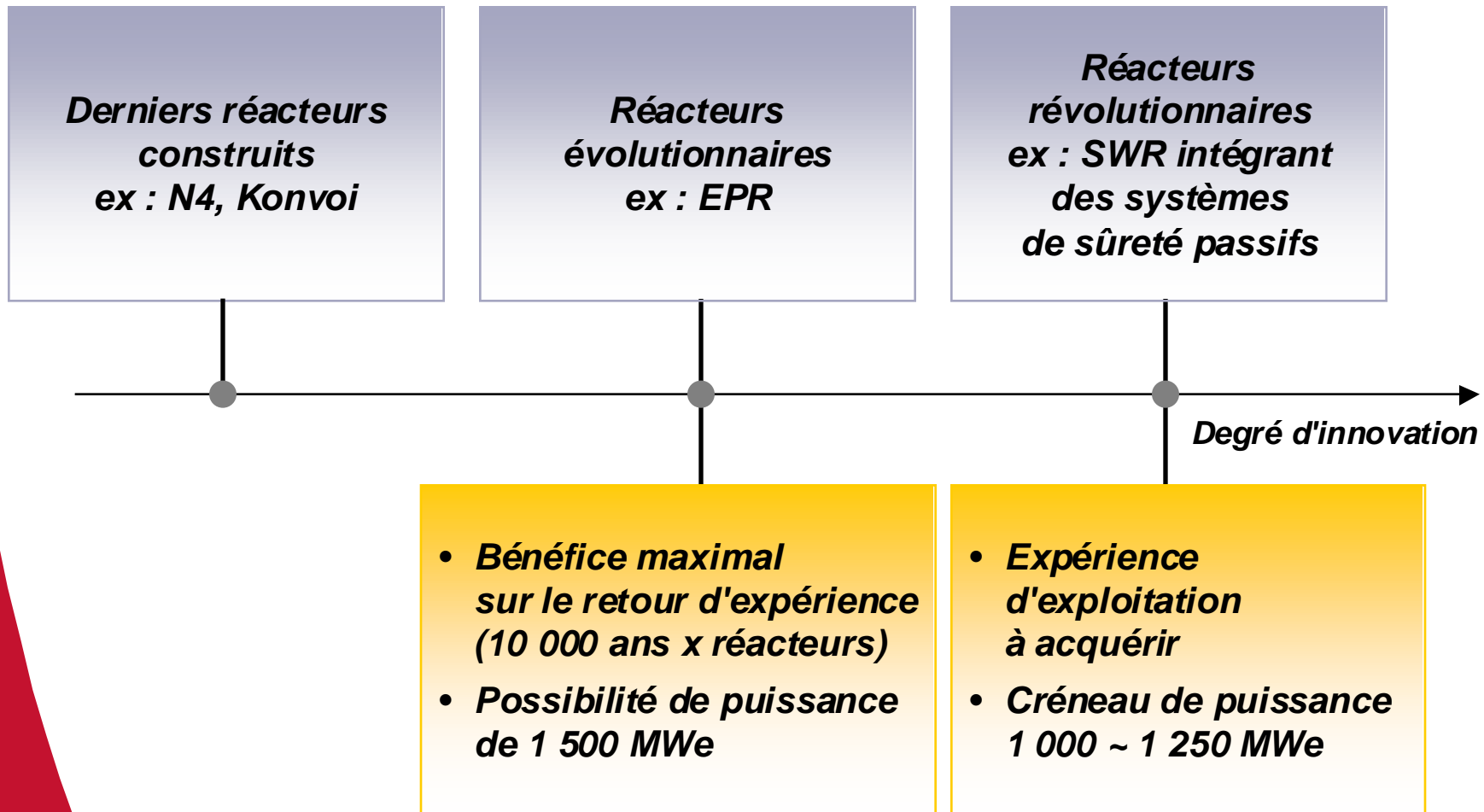
Chalon, 2 & 3 juillet 2003

- ▶ ***Evolutions et révolutions***
- ▶ ***Le SWR 1000 (Réacteur à Eau Bouillante)***
 - ◆ *Evolution de la technologie REB d'AREVA / Framatome ANP*
 - ◆ *Les avancées techniques et économiques*
 - ◆ *Les principes de sûreté*
- ▶ ***L'EPR (European Pressurized Water Reactor)***
 - ◆ *Le projet, ses objectifs et caractéristiques*
 - ◆ *Les avancées techniques et économiques*
 - ◆ *Les marchés de l'EPR*
- ▶ ***Le cas de l'EPR en France***

AREVA / Framatome ANP est présent sur l'ensemble de la filière des réacteurs à eau légère (REL)

- ▶ ***Les REL représentent 80% de la puissance mondiale installée (cf annexes 1 et 2a, b, c)***
- ▶ ***Le choix de l'électricien est guidé par :***
 - ◆ ***Ses expériences passées avec les différentes technologies***
 - ◆ ***La puissance unitaire***
 - ◆ ***L'investissement***
 - ◆ ***Le coût de production du kWh***
- ▶ ***Deux nouveaux modèles AREVA / Framatome ANP : SWR 1000 et EPR***

Les futurs réacteurs à eau légère : réacteurs "évolutionnaires" ou "révolutionnaires" ?



Les futurs réacteurs à eau légère : réacteurs "évolutionnaires" ou "révolutionnaires" ?

- ▶ ***En pratique, des technologies proches : dans les réacteurs "passifs" la partie en rupture technologique ne représente qu'une part de l'ordre de 20% de l'investissement***
- ▶ ***Les coûts de R&D et les aléas croissent avec le niveau de rupture technologique***

Qu'est-ce-qu'un système "passif" ?

- ▶ ***Système assurant les fonctions de sauvegarde***
 - ◆ ***sans intervention des opérateurs***
 - ◆ ***sans source extérieure d'énergie***

|| ***Un concept séduisant***

Les systèmes "passifs": des avantages potentiels en termes de sûreté et d'économie

- ▶ ***Des systèmes connexes plus complexes et plus compacts***
- ▶ ***Des démonstrations de sûreté par nature plus difficiles***
- ▶ ***Mais des avantages potentiels en termes de sûreté et d'économie***
- ▶ ***Aucun réacteur "passif" en construction à ce jour***
- ▶ ***Un seul modèle certifié : l'AP 600, aux Etats-Unis***

AREVA / Framatome ANP propose des réacteurs "actifs" (EPR) et des réacteurs "passifs" (SWR) pour s'adapter à toute évolution future du marché

Le développement de nouveaux modèles et la modernisation des centrales existantes sont complémentaires

- ▶ ***SWR 1000 et EPR : une réponse appropriée aux besoins de la demande mondiale, en termes de puissance unitaire***
- ▶ ***Des concepts intégrant de multiples retours d'expérience***
 - ◆ ***réacteurs PWR et BWR le plus récemment construits dans le monde***
 - ◆ ***modernisations importantes des réacteurs VVER d'Europe de l'Est***
 - ◆ ***opérations d'allongement de durée de vie et d'accroissement des capacités sur les centrales existantes, notamment aux Etats-Unis***
- ▶ ***Réciproquement, les améliorations apportées aux réacteurs existants bénéficient des études et progrès des nouveaux modèles***

La conception d'un réacteur constitue une barrière à l'entrée considérable

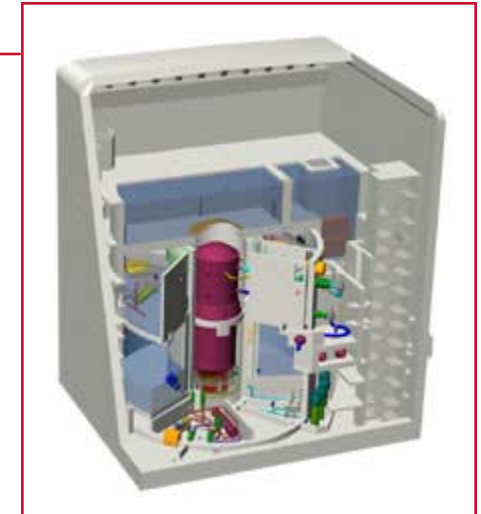
- ▶ *Un avant-projet détaillé (APD) de réacteur nucléaire c'est, à titre d'exemple :*
 - ◆ *l'accès à plusieurs décennies de R&D*
 - ◆ *10 ans d'études d'ingénierie*
 - ◆ *un coût de l'ordre de 300 M€*

- ▶ *La certification d'un modèle européen aux Etats-Unis (NRC) représente un coût de l'ordre de 100 - 150 M€*

▶ *Evolutions et révolutions*

▶ **Le SWR 1000**
(Réacteur à Eau Bouillante)

- ◆ *Evolution de la technologie REB d'AREVA / Framatome ANP*
- ◆ *Les avancées techniques et économiques*
- ◆ *Les principes de sûreté*



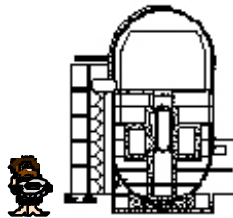
▶ *L'EPR (European Pressurized Water Reactor)*

- ◆ *Le projet, ses objectifs et caractéristiques*
- ◆ *Les avancées techniques et économiques*
- ◆ *Les marchés de l'EPR*

▶ *Le cas de l'EPR en France*

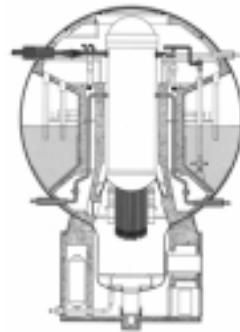
AREVA est l'héritier d'une longue expérience dans la technologie des REB

- ◆ **Kahl**
- ◆ **Gundremmingen A**
- ◆ **Lingen**



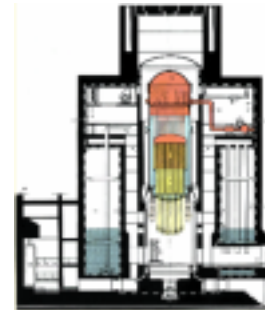
**Full pressure
containment - 1961**

- ◆ **Würgassen**
- ◆ **Brunsbüttel**
- ◆ **Philippsburg 1**
- ◆ **Isar 1**
- ◆ **Tullnerfeld**
- ◆ **Krümmel**

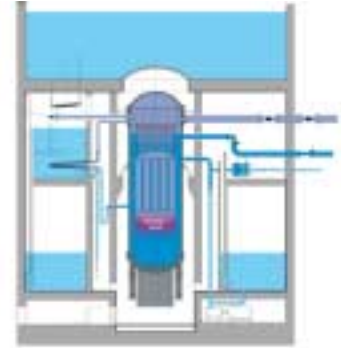


Product Line 1969

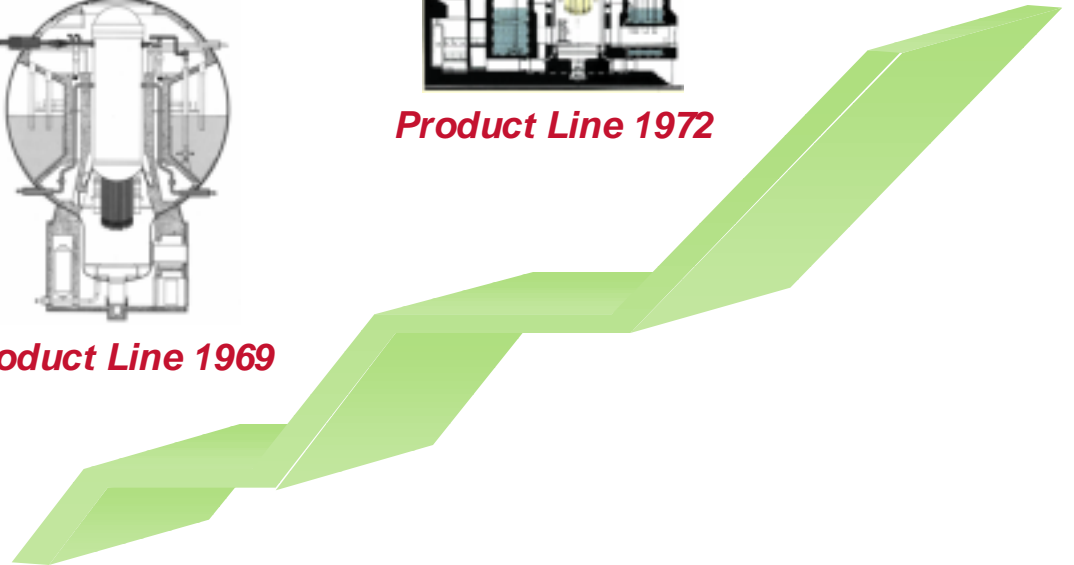
- ◆ **Gundremmingen B&C**



Product Line 1972



SWR 1000

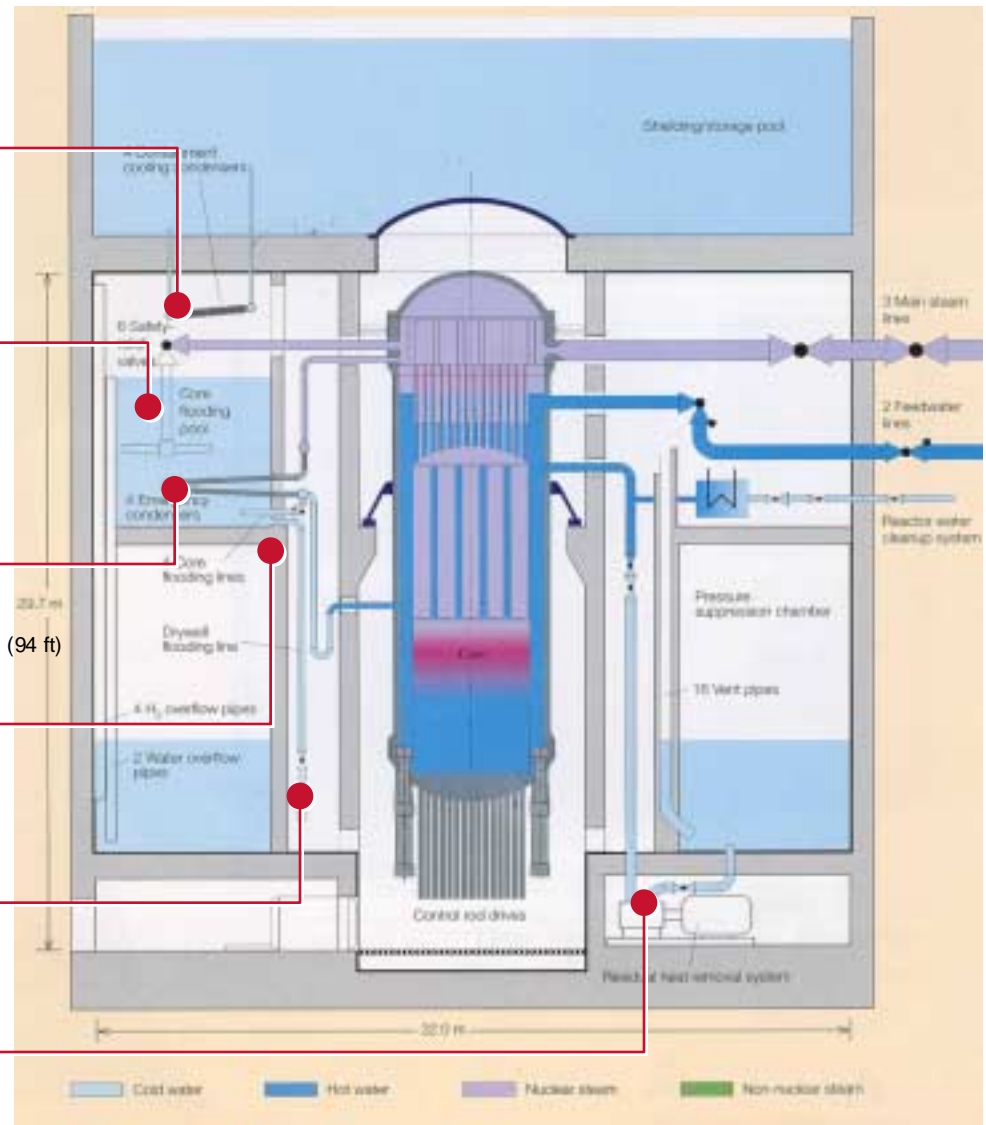


Le SWR 1000 contribuerait à une baisse de l'ordre de 10% du prix du kWh

- ▶ ***Réacteur positionné sur le créneau des moyennes puissances (1000-1250 MW électrique)***
- ▶ ***Large recours à la technologie existante***
- ▶ ***Taux de disponibilité élevé (supérieur à 90%)***
- ▶ ***Le SWR 1000 est conçu pour durer 60 ans***
- ▶ ***Maintenance simplifiée et durée de vie technique allongée***
- ▶ ***Flexibilité dans la durée des cycles de combustibles (12 à 24 mois)***
- ▶ ***Accroissement du taux de combustion du combustible (supérieur à 60 GWj/t)***
- ▶ ***Réduction de la production de déchets***
- ▶ ***Simplification des systèmes et composants***

Les grands principes de sûreté du SWR 1000

- Condenseur de refroidissement de l'enceinte**
- Vanne de dépressurisation et de protection du réacteur contre les surpressions**
- Condenseur de refroidissement d'urgence de la cuve**
- Tuyauterie de noyage passif du cœur en cas de perte de réfrigérant**
- Tuyauterie de noyage de la cavité sèche (en cas de fusion du cœur)**
- Systèmes ICBP / RRA**



Des principes de conception visant à empêcher le rejet de radioactivité à l'extérieur, en cas d'accident

- ▶ ***En cas de fusion, le cœur est confiné dans la cuve, refroidie par l'extérieur, pour dissiper la chaleur résiduelle***
- ▶ ***Enceinte calculée pour résister à une surpression résultant de l'hydrogène produit par l'interaction entre le zirconium du cœur et la vapeur d'eau du réacteur en situation accidentelle***

- ▶ *Evolutions et révolutions*
- ▶ *Le SWR 1000 (Réacteur à Eau Bouillante)*
 - ◆ *Evolution de la technologie REB d'AREVA / Framatome ANP*
 - ◆ *Les avancées techniques et économiques*
 - ◆ *Les principes de sûreté*
- ▶ **L'EPR**
(European Pressurized Water Reactor)
 - ◆ **Le projet, ses objectifs et caractéristiques**
 - ◆ **Les avancées techniques et économiques**
 - ◆ **Les marchés de l'EPR**
- ▶ *Le cas de l'EPR en France*



L'EPR : fruit d'une coopération européenne

- ▶ **La coopération franco - allemande a impliqué dès le lancement du projet :**
 - ◆ **les industriels Framatome et Siemens**
 - ◆ **EDF et les principaux exploitants nucléaires allemands (E.ON, EnBW et RWE Power)**
 - ◆ **les autorités de sûreté des deux pays, avec l'objectif d'harmoniser les règles de sûreté applicables à la prochaine génération de REP**

- ▶ **L'Avant-Projet Détaillé est achevé**

|| L'EPR est prêt à être construit

L'EPR répond aux attentes des électriciens et aux exigences des autorités de sûreté

- ▶ ***Prise en compte des European Utility Requirements (EUR), intégrant l'Utility Requirements Document (URD) de l'EPRI* américain***
- ▶ ***Respecter les règles édictées par l'A.S.** française après harmonisation avec son homologue allemand***
- ▶ ***De conception "évolutionnaire", l'EPR bénéficie du retour d'expérience des installations en service et intègre les résultats des programmes de R&D, notamment français et allemands***

* ***US Electric Power Research Institute***

** ***Autorité de Sûreté***

Une puissance accrue et une durée de vie augmentée

		EPR	N4
Puissance thermique	MW	4250/4500	4250
Puissance électrique	MW	De 1500 à 1600	1450
Rendement	%	36	34
Nb boucles primaires		4	4
Nb assemblages comb.		241	205
Taux de combustion*	GWj/t	> 60	45**
Pression secondaire	bar	78	71
Durée de vie technique	années	60	40

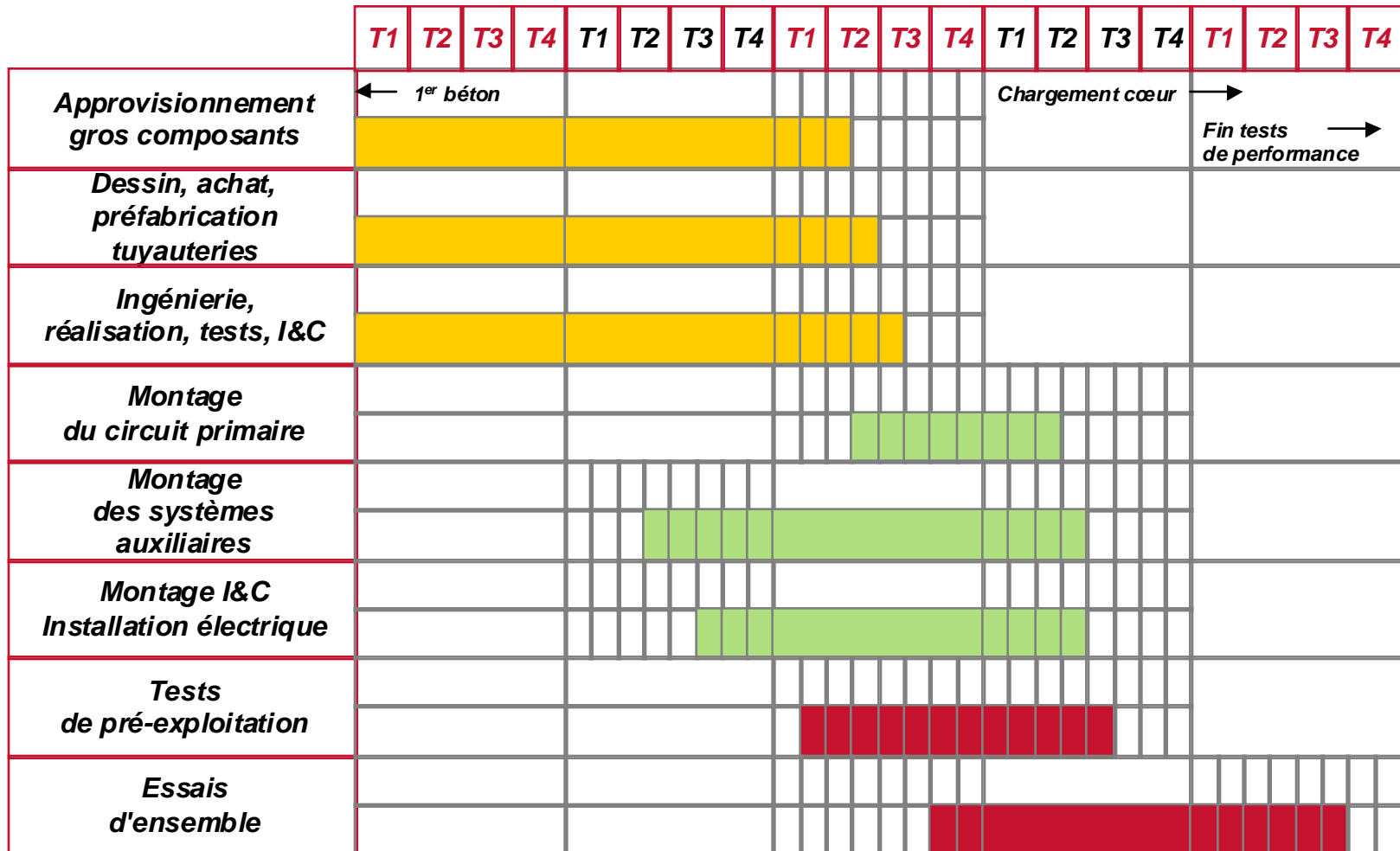
* Taux de combustion moyen des recharges

** Compte tenu du taux de combustion maximum des assemblages aujourd'hui autorisé par l'Autorité de Sûreté

Une animation commentée pour comprendre l'essentiel



L'EPR : Un planning de réalisation réduit à 57 mois après le 1^{er} béton



Un coût de production du kWh inférieur de 10% environ à celui du N4*

- ▶ ***Puissance unitaire portée à 1600 MWe***
- ▶ ***Rendement augmenté***
- ▶ ***Augmentation du taux de combustion du combustible***
- ▶ ***Simplification de la maintenance***
- ▶ ***Réduction des durées d'arrêts pour rechargement***
- ▶ ***Taux de disponibilité prévu à 92%***
- ▶ ***Augmentation de la durée de vie technique, portée à 60 ans***

**** N4 : dernier type de réacteur REP construit par AREVA / Framatome ANP***

Le coût de production est celui qui annule la Valeur Actuelle Nette du projet

$$Van = \text{Prix} \times \left(\sum_{j=1}^N \frac{\text{Production}_j}{(1+k)^j} \right) - \left(\sum_{j=1}^N \frac{\text{Coûts}_j}{(1+k)^j} \right)$$

$$0 = \text{Prix de revient} \times \left(\sum_{j=1}^N \frac{\text{Production}_j}{(1+k)^j} \right) - \left(\sum_{j=1}^N \frac{\text{Coûts}_j}{(1+k)^j} \right)$$

$$\text{Prix de revient} = \left(\sum_{j=1}^N \frac{\text{Coûts}_j}{(1+k)^j} \right) / \left(\sum_{j=1}^N \frac{\text{Production}_j}{(1+k)^j} \right)$$

k : coût de capital

j : période correspondant au cash-flow considéré

N : nombre total de périodes relatives à l'investissement (construction, exploitation, démantèlement)

L'EPR accroît la compétitivité du kWh d'origine nucléaire

Etude AREVA, base questionnaire DGEMP fin 2002

Hypothèses (fin 2002)

- ▶ Gaz à 3,3US\$ / MBUt
- ▶ Taux d'actualisation hors inflation : 8%
- ▶ 1 US\$ = 1€
- ▶ Rendement CCG : 58,5%
- ▶ Facteur de charge EPR : 90,5%

Coûts en €/ MWh

	EPR	CCG* (hors TICGN**)
Investissement	17,1	5,6
Exploitation & Maintenance	5,8	3,1
Combustible	4,2	25,2
R&D	0,6	-
Coûts externes	3	20 à 40
Total	30,7	53,9 à 73,9

Δ 10% sur uranium naturel
Δ 10% sur gaz

→ Δ 0,5%

→ Δ 6%

*Cycle Combiné au Gaz

**TICGN : taxe intérieure de consommation sur le gaz naturel

Ces calculs corroborent les études économiques finlandaises réalisées en 2001, réactualisées en avril 2002

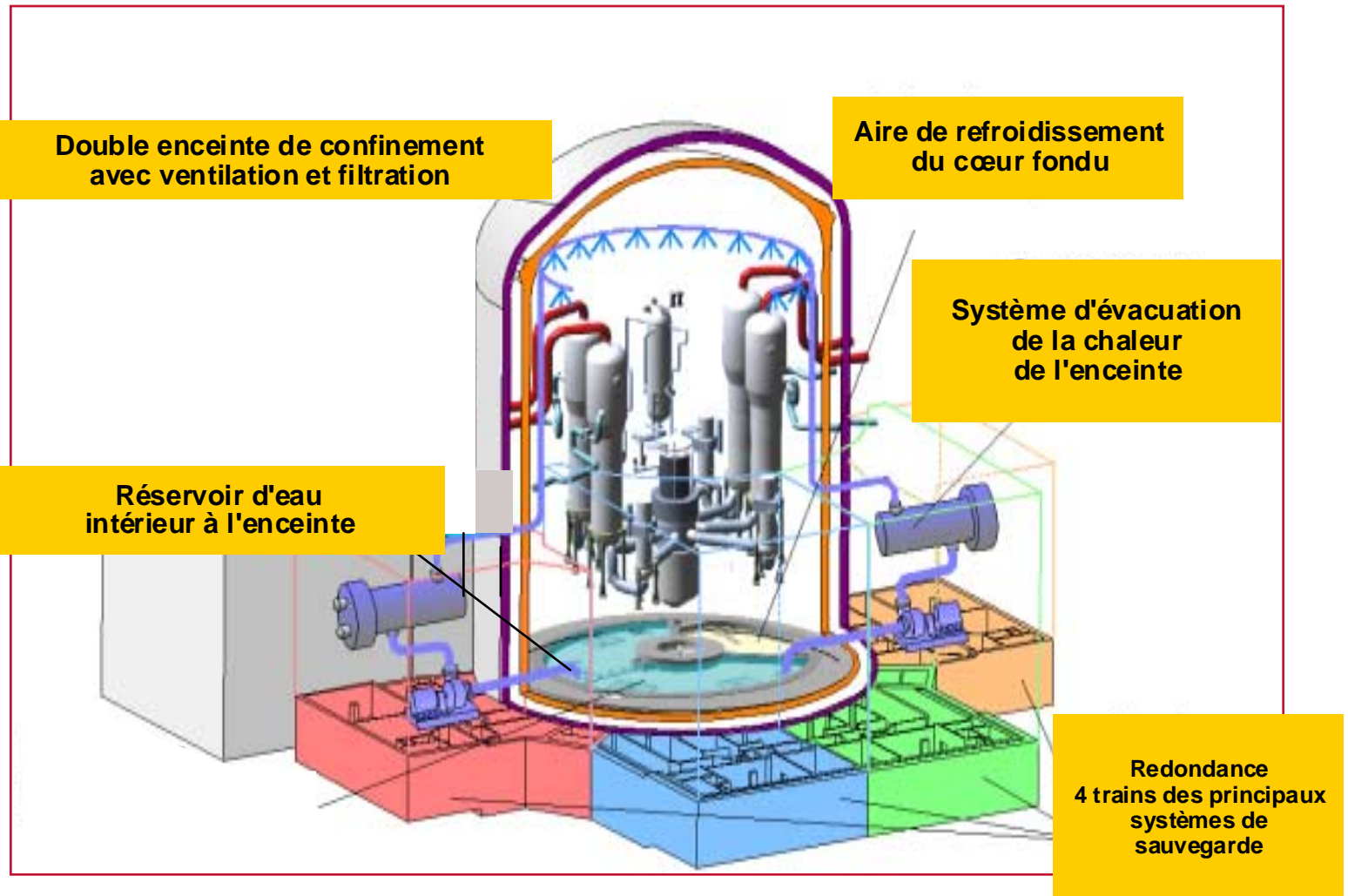
- ▶ **Hypothèses finlandaises : centrale nucléaire de 1250 MW, CCG de 400 MW (rendement 57 %) ; prix de novembre 2001**

Taux d'actualisation (hors inflation)	5,0%		6,5%		8,0%	
En €/MWh	Nucléaire	CCG	Nucléaire	CCG	Nucléaire	CCG
Investissement	13,8	5,3	16,7	6,2	19,9	7,0
Exploitation & Maintenance	7,2	1,5	7,2	1,5	7,2	1,5
Combustible	3,0	23,7	3,0	23,7	3,0	23,7
Total	24,1	30,5	26,9	31,4	30,1	32,2

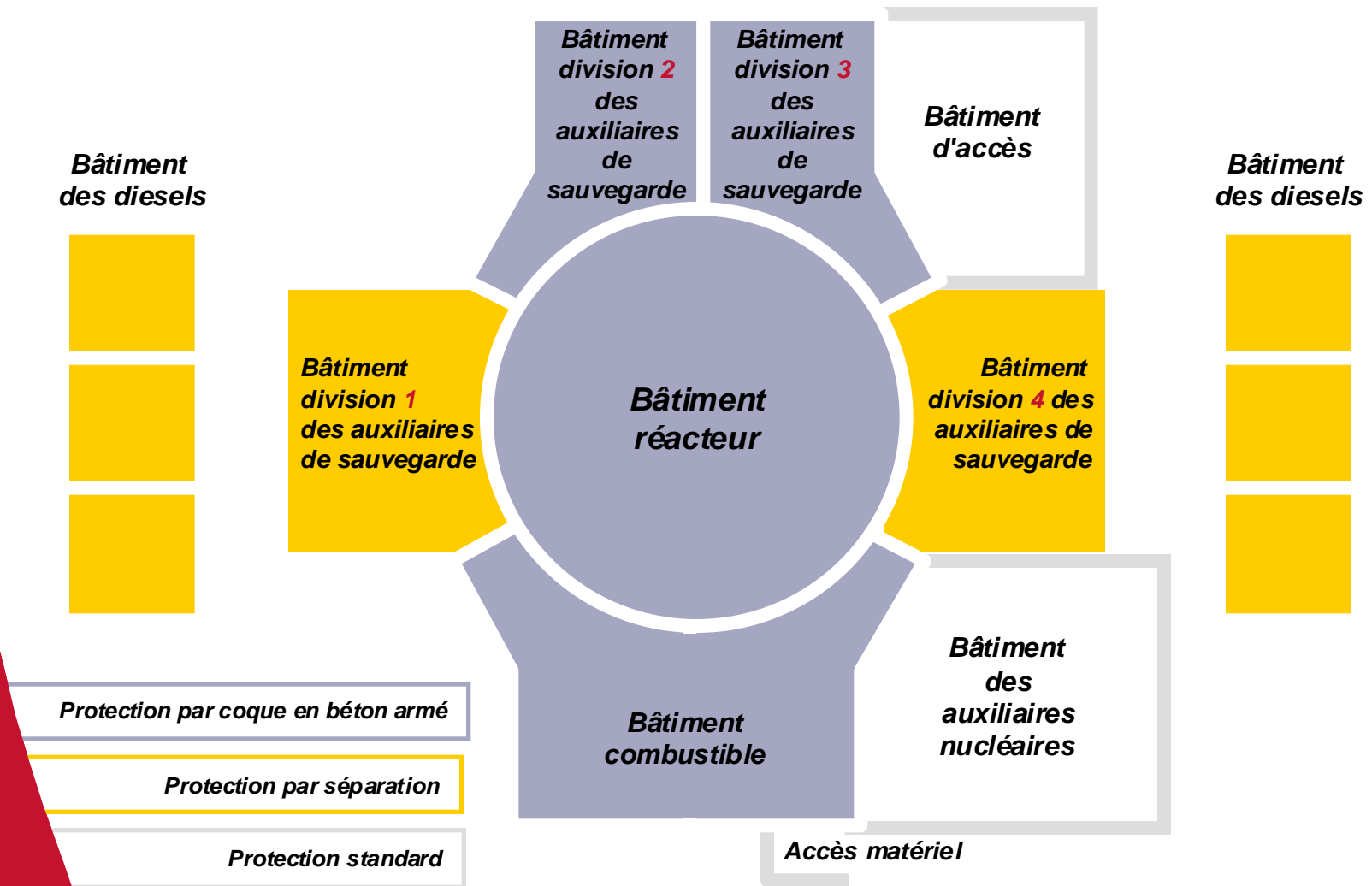
Une meilleure prévention des risques

- ▶ *Prévention accrue du risque d'erreur humaine : qualité de l'interface homme machine, simplification de la conduite, automatisation*
- ▶ *Prévention renforcée d'un facteur 10 des accidents de fusion du cœur*
 - ◆ *augmentation de l'inventaire en eau du circuit primaire*
 - ◆ *réduction de la probabilité des événements initiateurs d'origine interne*
 - ◆ *accroissement de la fiabilité des systèmes de sûreté*
 - ◆ *systèmes de sûreté redondants, diversifiés et séparés*
- ▶ *Protection contre les conséquences d'une fusion du cœur*
 - ◆ *élimination du risque de fusion du cœur dans la cuve à haute pression*
 - ◆ *rétenion du corium à l'intérieur du bâtiment réacteur*
 - ◆ *recombineurs d'hydrogène en eau, éliminant le risque de détonation*

Les principaux systèmes de sûreté de l'EPR

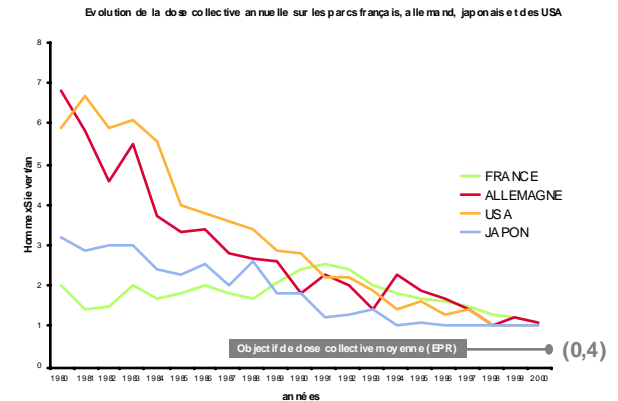


Une protection accrue contre les agressions externes



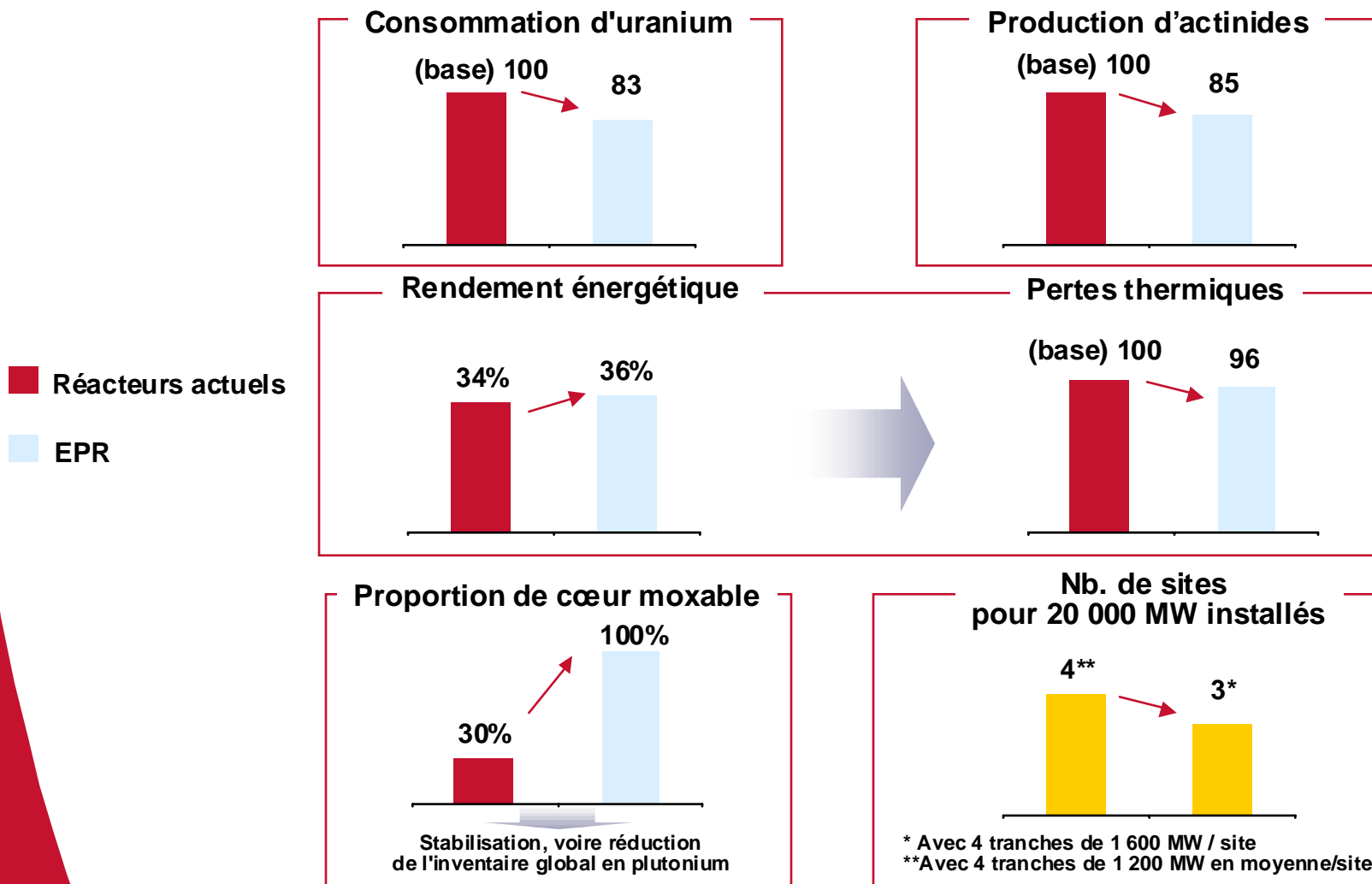
De nombreuses avancées en matière d'exploitation

- ▶ **Renforcement de la radioprotection des personnels**
- ▶ **Division par 2 des doses collectives moyennes actuellement observées en Occident (cf annexe 3)**



- ▶ **Diminution de la production de déchets**
- ▶ **40 premières années, au moins, sans opération de remplacement de composants lourds**

La prise en compte des contraintes de développement durable



Déchets ultimes de démantèlement réduits proportionnellement à la durée de vie et au nombre d'unités de production

Les marchés potentiels de l'EPR ne se limitent pas à la France

- ▶ ***France : démonstrateur EPR puis phase ultérieure de renouvellement du parc***
- ▶ ***Europe :***
 - ◆ ***Finlande (décision attendue fin 2003)***
 - ◆ ***autres pays susceptibles de construire de nouvelles centrales lorsque la conjoncture sera devenue plus favorable (Royaume-Uni, Espagne, voire Allemagne...)***
- ▶ ***Chine : conception éventuellement "sinisée", en préparation du 12^{ème} Plan (2011)***
- ▶ ***Etats-Unis : dans la perspective d'une reprise des constructions de centrales nucléaires à l'horizon 2010***

- ▶ *Evolutions et révolutions*
- ▶ *Le SWR 1000 (Réacteur à Eau Bouillante)*
 - ◆ *Evolution de la technologie REB d'AREVA/Framatome ANP*
 - ◆ *Les avancées techniques et économiques*
 - ◆ *Les principes de sûreté*
- ▶ *L'EPR (European Pressurized Water Reactor)*
 - ◆ *Le projet, ses objectifs et caractéristiques*
 - ◆ *Les avancées de l'EPR techniques et économiques*
 - ◆ *Les marchés de l'EPR*
- ▶ ***Le cas de l'EPR en France****

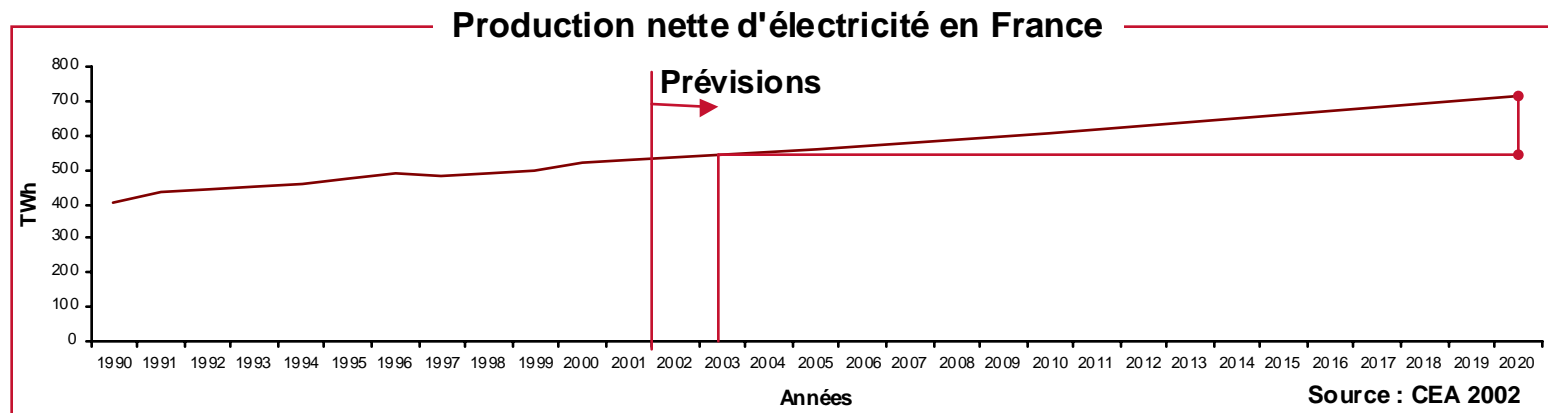
* cf annexes 4 et 5

La moitié du parc français aura atteint sa durée de vie technique dans 20 ans

- ▶ ***Les réacteurs en service (58 réacteurs - 60 000 MW) ont été conçus pour 40 ans de durée de vie technique***
- ▶ ***En 2020, 14 réacteurs, soit 13 000 MW, auront 40 ans ou plus***
- ▶ ***En 2025, 34 réacteurs, soit 31 000 MW (>50% du parc) auront 40 ans ou plus***
- ▶ ***Vraisemblablement renforcées, les exigences de sûreté d'alors rendront coûteux le maintien en service des réacteurs les plus anciens***

Le seul développement du recours aux énergies renouvelables et aux économies d'énergie ne permettra pas de faire face aux besoins

- ▶ **En 2020, la demande d'électricité aura crû de 33% comparé à 2003, en considérant une augmentation de 1,6% par an (vs plus de 2% par an depuis 10 ans)**



- ▶ **Cette différence correspond à 140 TWh/an**
- ▶ **C'est l'énergie produite annuellement par une capacité de 18 000 MW exploitée avec un taux d'utilisation de 90%**

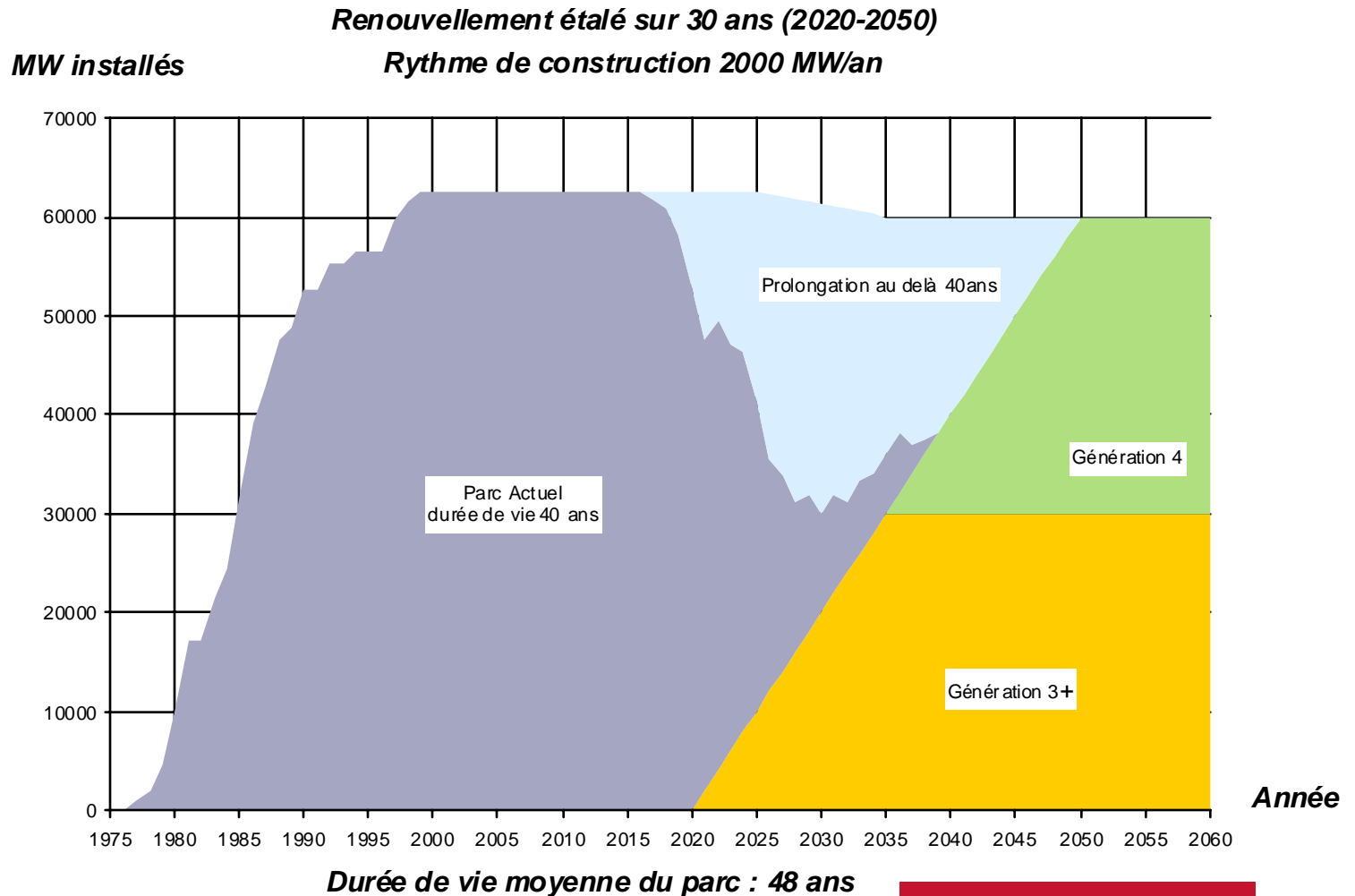
Les réacteurs à eau constitueront l'essentiel du parc installé au moins jusqu'en 2050

- ▶ ***Scénarios privilégiés par EDF pour le renouvellement du parc nucléaire***
 - ◆ ***60 000 MW de puissance installée : environ 60% de la production électrique, contre 70% aujourd'hui***
 - ◆ ***mise en service des premières unités entre 2020 et 2025***
 - ◆ ***renouvellement lissé sur 30 ans****

- ▶ ***Les modèles envisagés pour la génération suivante (IV) nécessiteront une longue période de R&D tant pour le réacteur que pour l'ensemble de la filière***

** Ce qui suppose une durée de vie moyenne des unités du parc actuel de l'ordre de 50 ans*

Scénario EDF avec renouvellement du parc à partir de 2020



Source EDF

Génération 3+ : EPR

Un calendrier cohérent avec les échéances

- ▶ **2021...** *Début du renouvellement du parc*
- ▶ **2020** *Mise en service du premier réacteur de la série*
- ▶ **2015** *Décision de construction d'une série d'EPR (nombre et rythme à définir)*
- ▶ **2012-14** *Acquisition du retour d'expérience d'exploitation (minimum 3 ans)*
- ▶ **2007-11** *Construction et mise en service du démonstrateur EPR*
- ▶ **2003-6** *Processus d'autorisation réglementaire et préparation de la réalisation*
- ▶ **2003** *Décision d'un démonstrateur EPR*

|| Dans ce schéma, la décision est à prendre sans tarder

La question du nucléaire se pose dans le cadre global de la loi d'orientation sur l'énergie prévue à l'automne 2003

- ▶ ***Le débat national sur les énergies s'est déroulé en France de mars à mai 2003***
- ▶ ***En novembre 2002, la Commission des affaires économiques, de l'environnement et du territoire de l'Assemblée Nationale a commandé à l'Office parlementaire des choix scientifiques et technologiques une étude sur le vieillissement et la durée de vie des centrales et sur les nouveaux réacteurs***
- ▶ ***L'Office a rendu son rapport et ses recommandations en mai 2003 (cf annexe 6)***

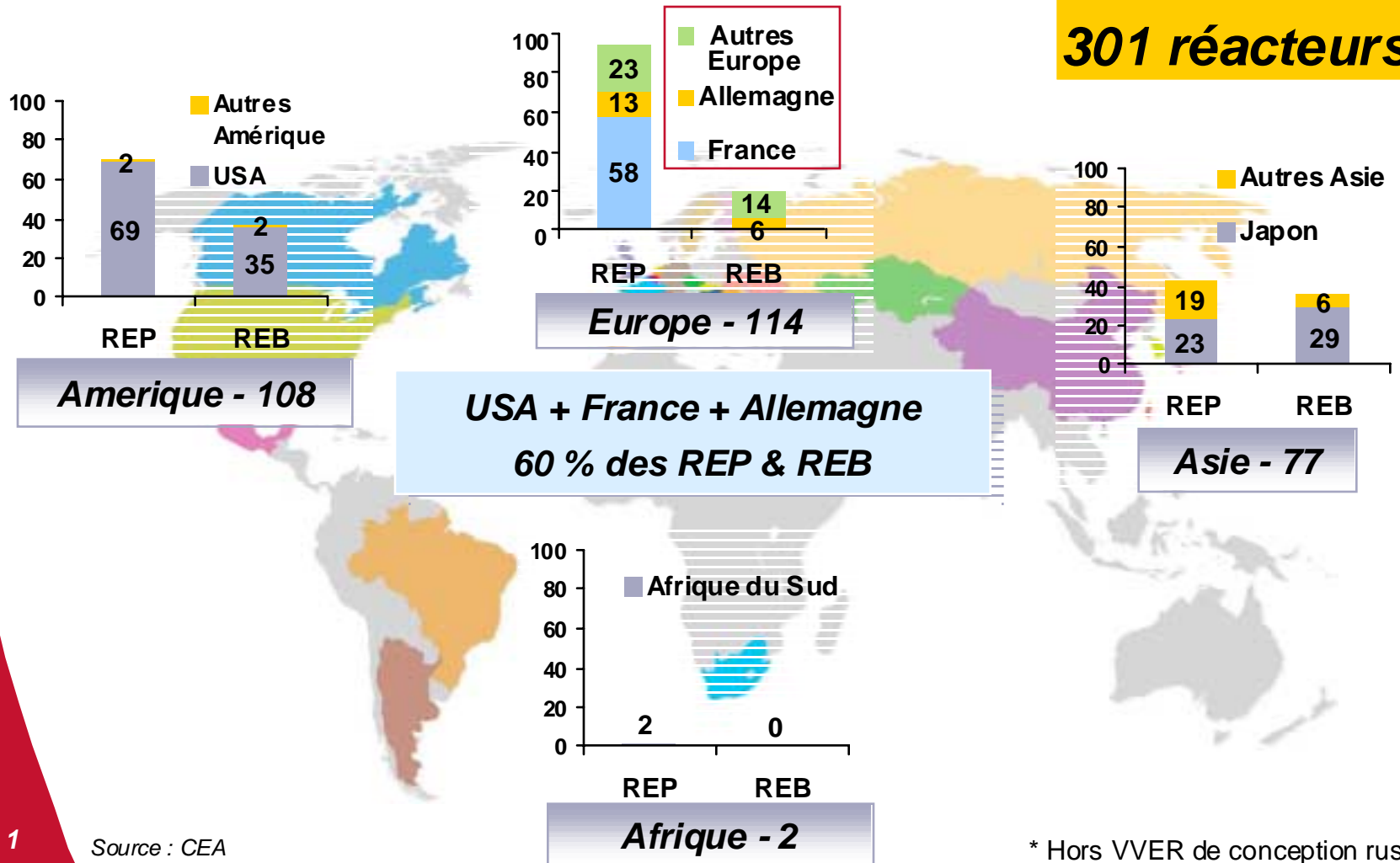
- ▶ ***L'EPR et le SWR 1000 d'AREVA / Framatome ANP sont de nouveaux moyens de produire de façon sûre une électricité moins chère, en respectant les principes du développement durable***
- ▶ ***L'EPR et, dans une moindre mesure, le SWR 1000, bénéficient pleinement du retour d'expérience des générations précédentes de réacteurs***
- ▶ ***L'EPR est le modèle le plus récent et avancé, sans aléa technologique, de la filière REP choisie il y a près de trois décennies***
- ▶ ***Au delà, AREVA / Framatome ANP sera prêt à participer au marché futur des réacteurs à gaz à très haute température (cf. ATD-3 / Les réacteurs du futur)***

ANNEXES

Une activité équilibrée géographiquement

► Répartition des REP et REB dans le monde à fin 2001*

301 réacteurs



AREVA / Framatome ANP leader mondial pour la construction de centrales nucléaires

MWe installés

120 000

100 000

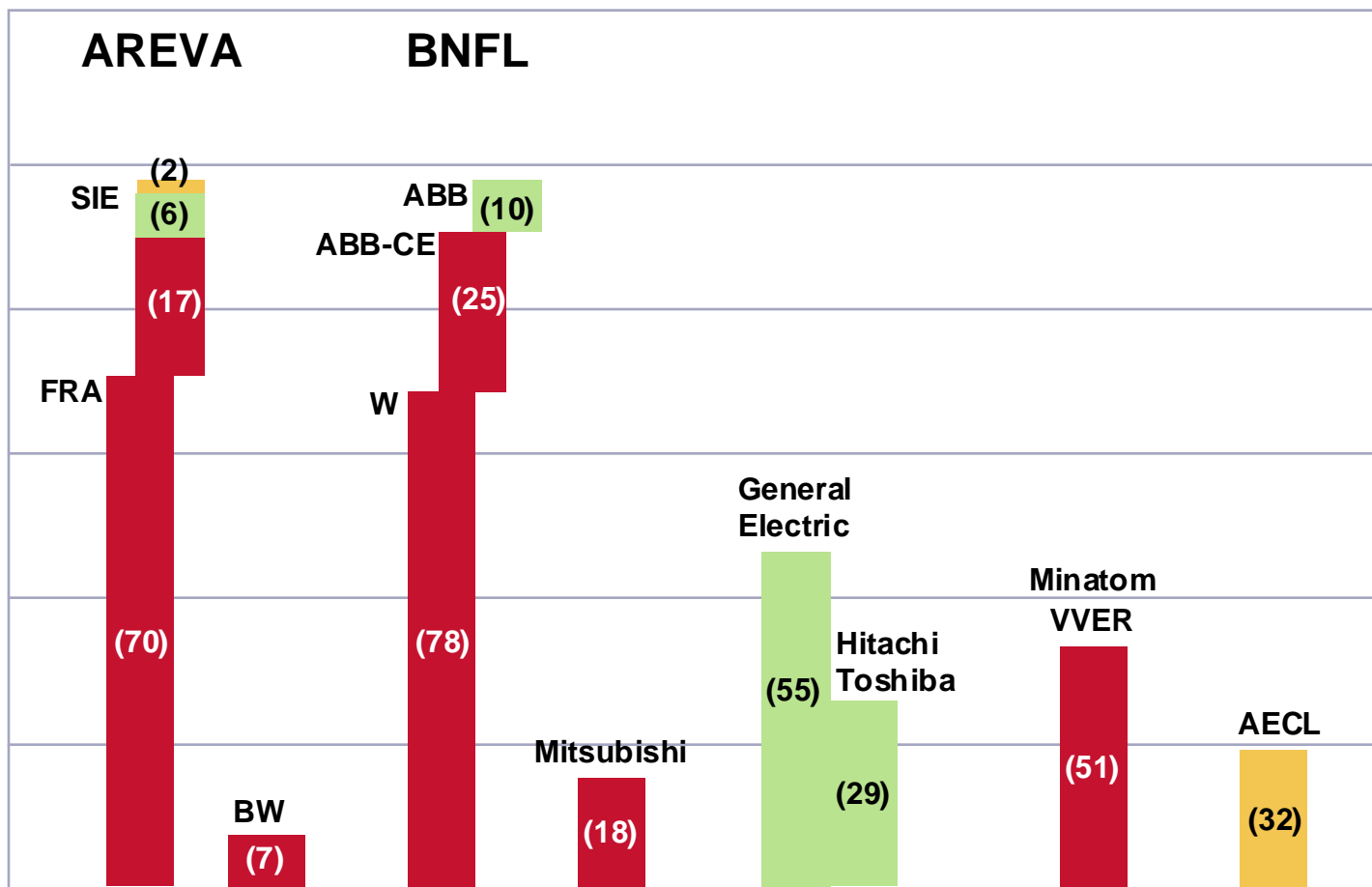
80 000

60 000

40 000

20 000

0

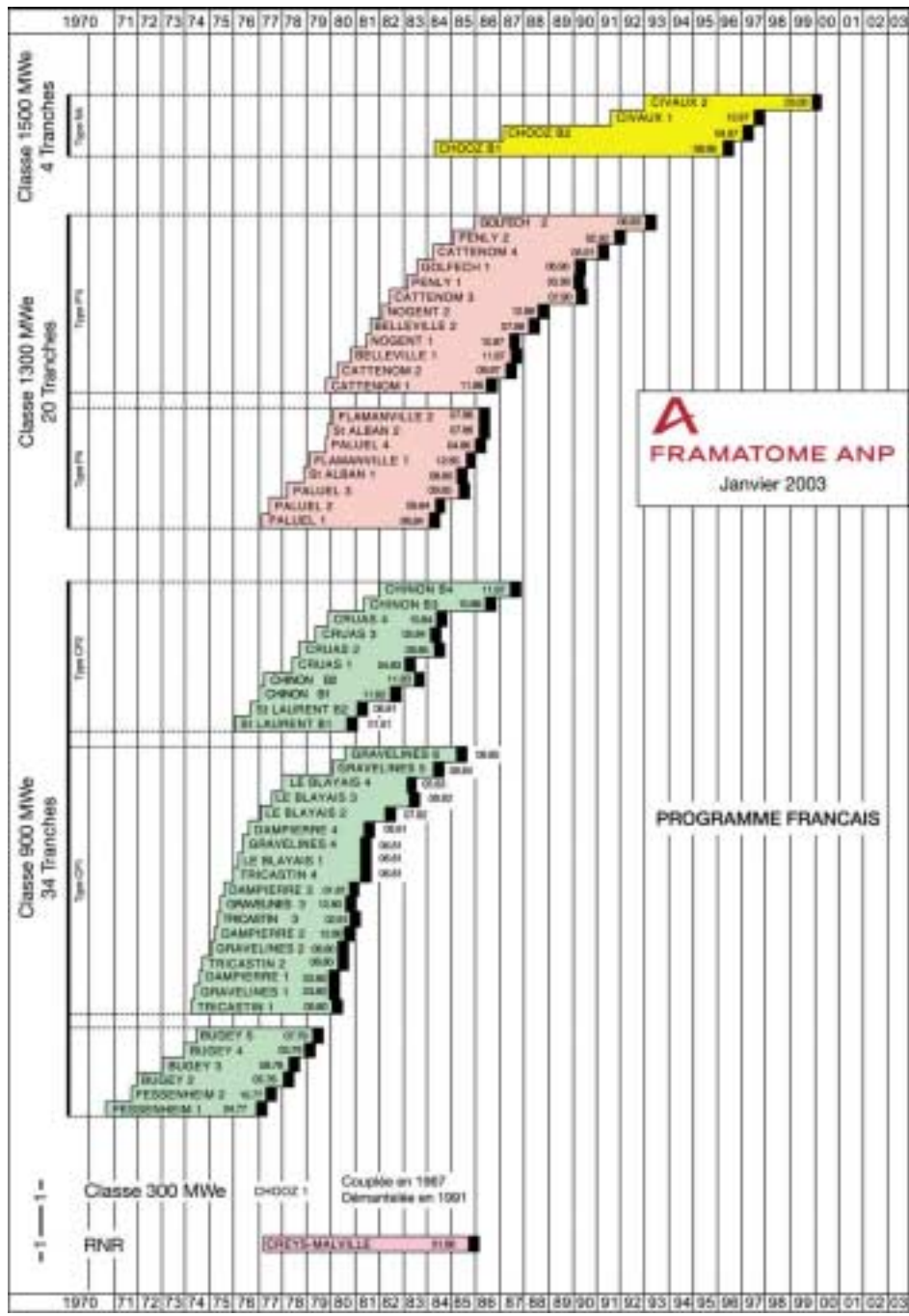


REP

REB

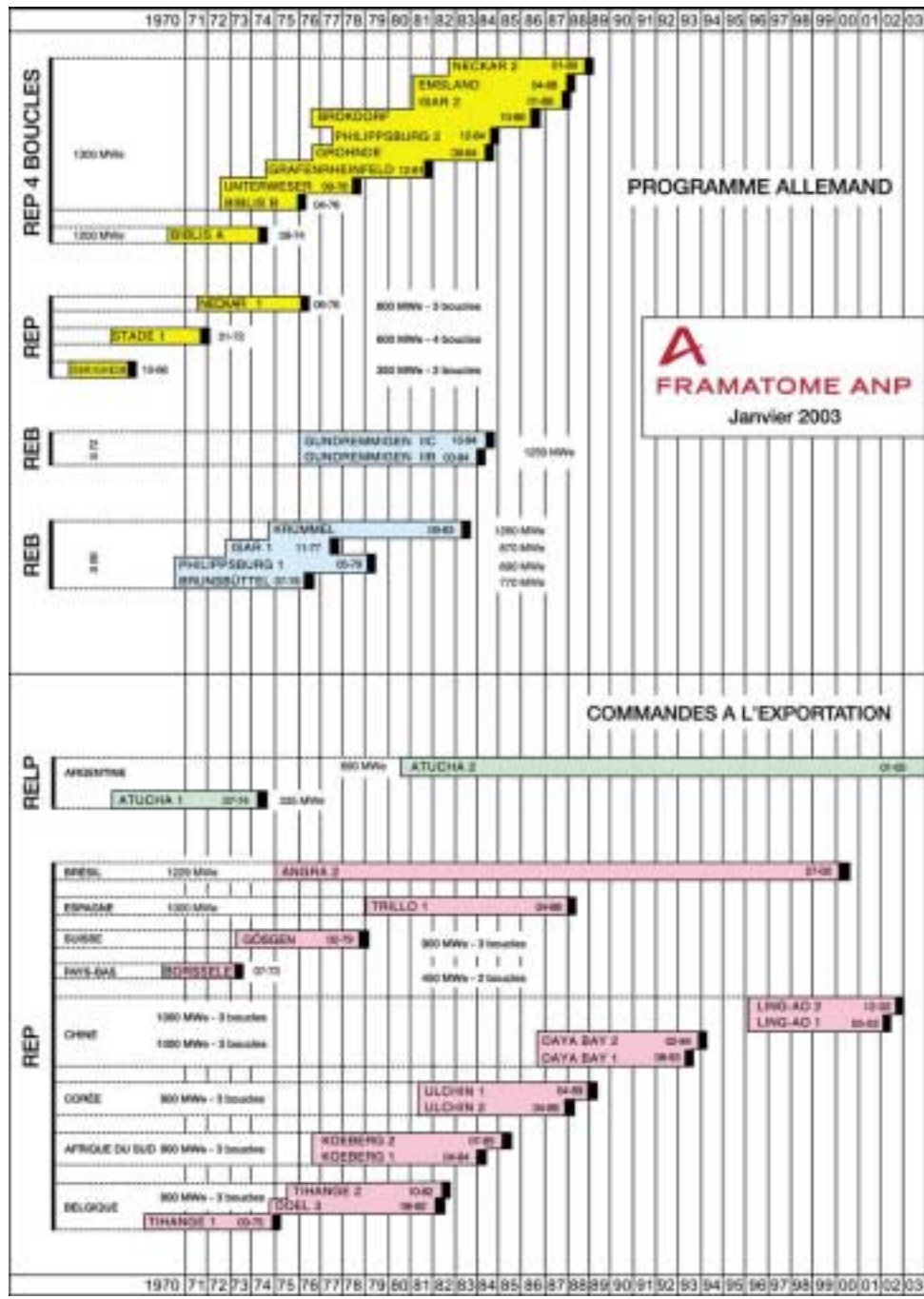
Réacteurs à Eau Lourde

(xx) Nombre de tranches



FRAMATOME ANP
Janvier 2003

PROGRAMME FRANCAIS



La radioprotection des personnels d'exploitation et de maintenance est renforcée, avec l'application systématique du principe ALARA*

- ▶ ***Objectif d'une dose collective annuelle en dessous de 0,4 homme x Sievert par réacteur, sur l'EPR***
- ▶ ***En 2000, après deux décennies d'effort constant de réduction, elles se situent au niveau de 1 homme x Sievert par réacteur. Avec ce niveau de dose collective moyenne annuelle de l'ordre de 1 homme x Sievert par réacteur, il est observé sur le parc français des doses individuelles en moyenne de l'ordre de 5 milliSievert (5mSv) pour les travailleurs. Les limites maximales réglementaires sont, en France, actuellement en cours de révision :***
 - ◆ ***limite pour les travailleurs : de 100 mSv sur 5 ans, avec maximum annuel de 50 mSv, elle devient 20 mSv par an,***
 - ◆ ***limite pour le public : de 5 mSv par an pour l'irradiation industrielle et médicale, elle devient 1 mSv par an. Il faut rappeler qu'en France, les doses naturelles se situent environ entre 1 et 6 mSv par an, en fonction de l'environnement naturel (en moyenne : 2,5 mSv/an)***

Le bilan énergétique en 2000*

► Consommation d'énergie finale (en millions de tep)



Electricité	33,1	(22%)	191,6	(20%)
Fossile	107,6	(72%)	708,4	(76%)
Renouvelables (inc. Hydro)	9,3	(6%)	39,4	(4%)
Total	150		939,4	

► Production d'électricité (en TWh)



Thermique classique	50	(9,3 %)	1322,4	(50,9%)
Thermique nucléaire	415	(76,7 %)	863,9	(33,2%)
Hydraulique	72,3	(13,4 %)	345,7	(13,3%)
Autres renouvelables	3,4	(0,6%)	66,8	(2,6%)
Total	540,7		2598,8	

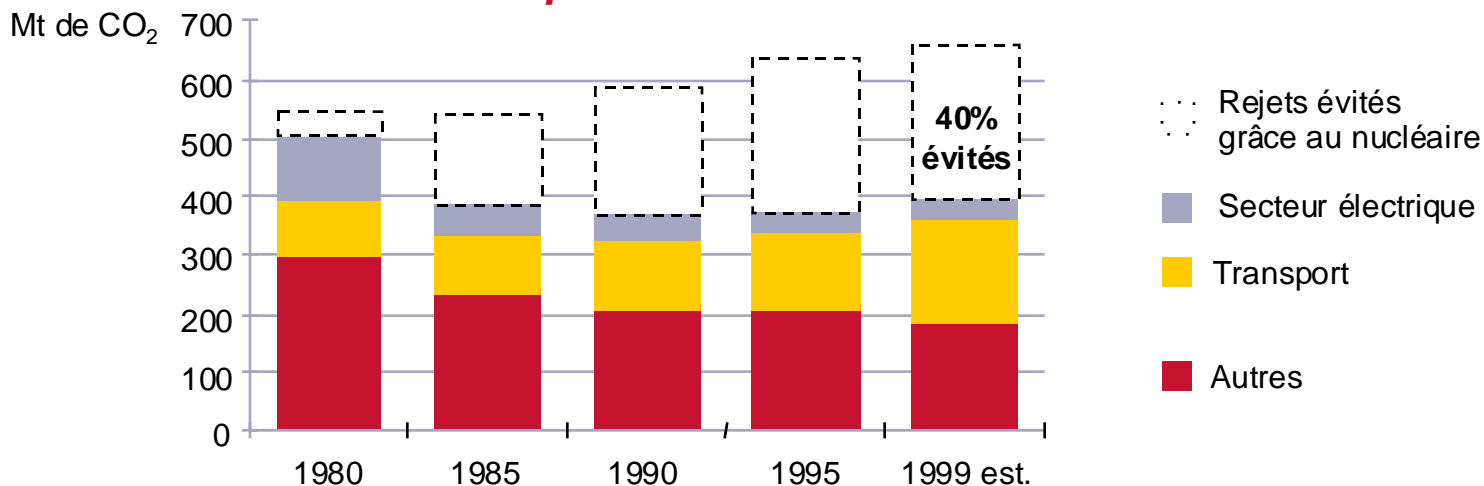
* Bilan Communauté européenne

Les émissions de CO₂ en 2000*

Emission de CO₂ (en Mt)	370	815	3127
Population	60,6	82,2	378
Ratio (t/pers./an)	6,1	9,9	8,3



Historique France 1980 - 1999



Rapport de l'Office Parlementaire des Choix Scientifiques et Techniques

M. Christian Bataille, député du Nord
M. Claude Birraux, député de Haute-Savoie
 Verbatim (1/2)

- ▶ **"Afin de disposer d'une garantie pour sa production d'électricité à l'horizon 2010-2015, la France doit engager sans délai la construction d'un démonstrateur - tête de série EPR..."**
- ▶ **"Prenant acte du fait que des pays comme les Etats-Unis étudient la mise en place d'aides de l'Etat fédéral à la construction d'un premier réacteur de nouvelle génération, la puissance publique ne doit pas craindre en France de soutenir concrètement la préparation de l'avenir à long terme de la production électrique française que constitue la construction d'un démonstrateur EPR"**
- ▶ **"En faisant clairement connaître ses intentions, EDF a pris ses responsabilités d'industriel et d'exploitant"**
- ▶ **"L'Etat actionnaire devrait d'autant moins s'y opposer que les raisons de l'exploitant sont convaincantes et, qu'à l'inverse, aucun argument consistant n'a été avancé pour les réfuter"**

Rapport de l'Office Parlementaire des Choix Scientifiques et Techniques

M. Christian Bataille, député du Nord
M. Claude Birraux, député de Haute-Savoie
 Verbatim (2/2)

- ▶ ***"En tout état de cause, la décision de construire rapidement un démonstrateur-tête de série EPR est d'autant plus importante que la France disposera d'un avantage concurrentiel important avec un EPR en fonctionnement, jouant le rôle de vitrine technologique lorsque les marchés du nucléaire redémarreront... »***
- ▶ ***"La complémentarité est en définitive le maître mot de l'énergie et tout spécialement de l'énergie nucléaire"***
- ▶ ***"...Il faut lancer avec hardiesse la recherche sur les pistes de l'avenir à trente, quarante ans, afin de mettre au point les réacteurs qui permettront de transmuter les déchets radioactifs produits par notre parc électronucléaire actuel et qui fourniront de nouvelles solutions compétitives pour la production d'électricité et d'hydrogène, un carburant peut-être promis à un grand avenir dans les transports"***