

La production  
d'électricité nucléaire  
Française  
en questions

# De la radioactivité naturelle à la production d'électricité nucléaire

1896 : Henri Becquerel découvre la radioactivité naturelle de l'uranium

1898 : Pierre et Marie Curie découvrent d'autres éléments plus radioactifs

1934 : Irène Curie et Frédéric Joliot découvrent la radioactivité « artificielle »

1939 : Joliot et d'autres découvrent la réaction nucléaire en chaîne, base de l'énergie nucléaire par fission .

The background of the slide is a blurred, diagonal view of the French flag, showing the blue, white, and red stripes. The text is centered over this background.

**La France , fille aînée du Nucléaire**

# Les débuts du nucléaire en France

- 1945 : Le CEA est créé par le gouvernement provisoire du Général de Gaulle
- 1948 : Divergences de ZOE, première pile française à eau lourde. Etudes et réalisations par le CEA de piles de différentes filières : eau lourde, UNGG, rapides
- 1956 : EDF est associée pour la création de 3 réacteurs de puissance à Chinon (70 à 480 Mwe UNGG) puis des réacteurs de St Laurent 1 et 2 et Bugey 1
- 1957 : Traité Euratom pour une coopération internationale dans l'électronucléaire
- 1er Déc 1958 : Création de Framatome
- Début 1959 : Accord de licence avec Westinghouse

# Les premiers pas dans la filière REP

- 1961 : Commande par la SENA de la centrale de Chooz A, 242 Mwe, portée par paliers à 320 Mwe ultérieurement.
- 1969 : Commande par SEMO de Tihange 1 (870MWe). La commission PEON recommande la réalisation de 4 à 5 réacteurs à eau avant fin 1975. Succès de l'usine d'enrichissement de Pierrelatte.
- 1970 : Fessenheim sera une centrale à eau commandée à Framatome en oct 1970 (avec option Fessenheim 2)
- 1971 : Commande à Framatome de Bugey 2 et 3 (avec option Bugey 4 et 5 )

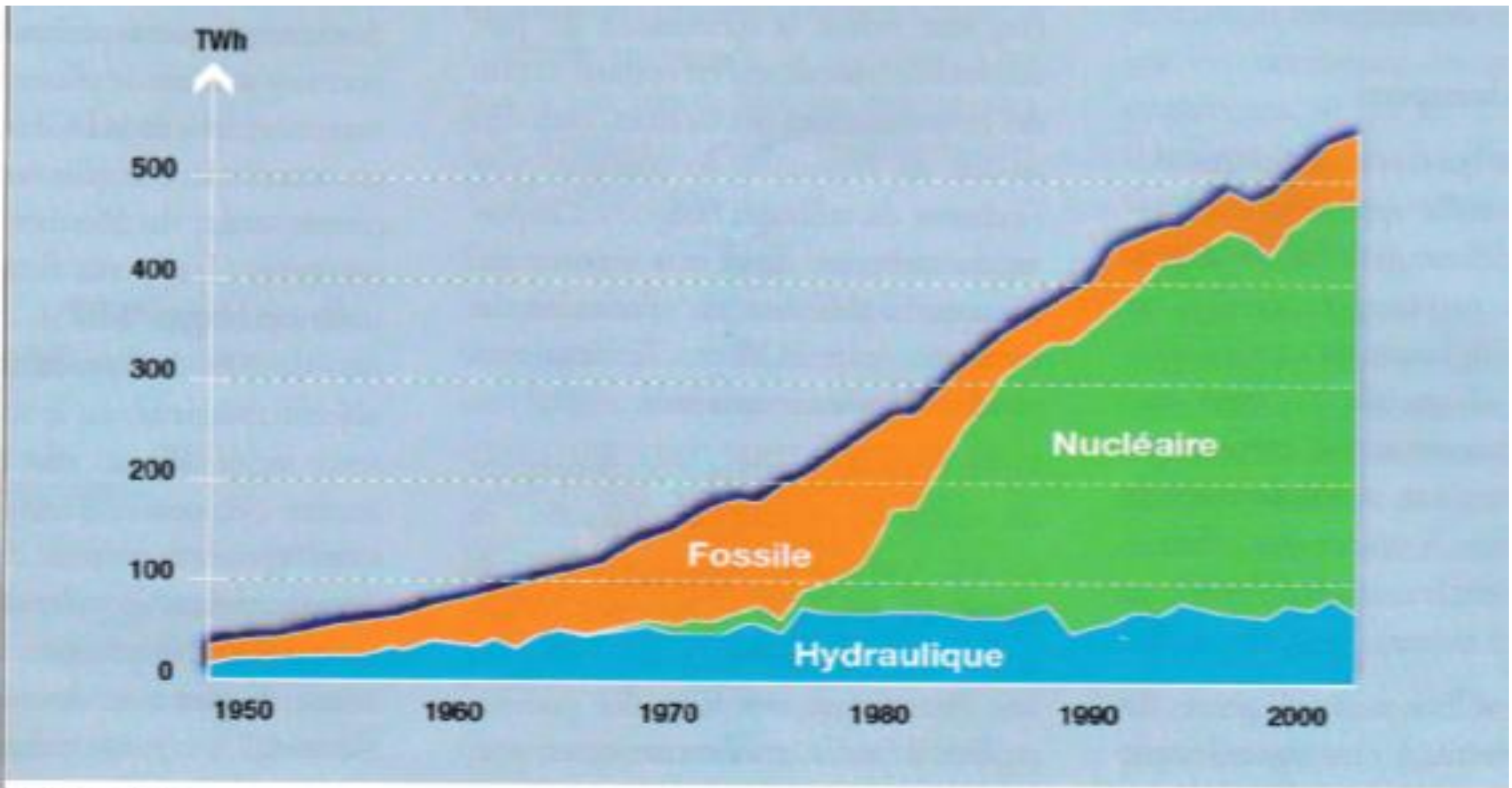
# Le parc électronucléaire français

- 1972 : Création d'Eurodif pour enrichissement de l'uranium à Tricastin
- 1973 : Le choc pétrolier pousse EDF à demander 6 tranches par an
- 1974 : Plan « Messmer » contrat pluriannuel CPI de 16 réacteurs de 900 Mwe.
- 1975 : La nuit du 4 août la filière REB est définitivement abandonnée au profit du REP
- 1976 : CP2 de 10 tranches supplémentaires
- Puis : P4 de 8 tranches de 1300 Mwe
  - P'4 de 12 tranches de 1300 Mwe
  - N4 de 4 tranches de 1450Mwe



En 15 ans de 1977 à 1992, la France à mis en service 54 réacteurs, soit 56 600 Mwe qui lui ont conféré un taux d'indépendance énergétique de 51 %

# Evolution de la production d'électricité en France



Source : EDF.





**FRAMATOME ANP**  
Mars 2001

**PROGRAMME FRANÇAIS**



Les réacteurs N4 de Oivaux.

Construction

# La maintenance des centrales

- Maintenance quotidienne comme dans toute installation industrielle
- Arrêt de tranche annuel pour rechargement de combustible (env 1 mois)
- Arrêt de tranche décennal (plusieurs mois)
- Les arrêts de tranches se font sous contrôle de l'ASN
- Les sous traitants interviennent sous la coordination de l'exploitant qui a la responsabilité de garder la tranche dans un état sûr
- Surveillance stricte de la dosimétrie du personnel d'intervention (20 mSv/homme/an)

- Centre d'entraînement (CETIC) à Chalon / Saône  
(avec maquettes, robots, procédures d'intervention, ....)
- Tous les équipements pourraient être remplacés
- Tous les résultats d'examens et de maintenance sont transmis à l'ASN pour lui permettre d'autoriser le redémarrage

***Traçabilité et retour d'expérience indispensables***

# Quand arrêter définitivement un réacteur ?

- Il n'y a pas de date de péremption
- Une durée de vie (30, 40, 60 ans) est choisie à l'origine pour :
  - Définir les équipements à utiliser et évaluer leur comportement dans le temps
  - Évaluer l'intérêt économique du projet
- A chaque arrêt de tranche, la sûreté de l'ensemble est évaluée par l'ASN avant de donner son autorisation de redémarrage
- Des améliorations peuvent être demandées : c'est l'exploitant qui juge de l'intérêt économique de les mettre en œuvre ou d'arrêter l'exploitation du réacteur
- Le comportement dans le temps des tranches les plus anciennes est important pour prévenir celui des autres et prendre en compte ce retour d'expérience pour les modèles futurs
- Les examens destructifs et non destructifs faits lors des opérations de maintenance permettent d'envisager l'extension de la durée de vie de la tranche

*Pas de réaction consumériste incompatible avec  
le développement durable*

# Démantèlement d'un réacteur

- Période de déconstruction dans un cadre strict sous contrôle de l'ASN, EDF étant maître d'ouvrage
- S'étale sur une vingtaine d'années
- 3 phases principales :
  - Mise à l'arrêt définitif. Retrait de 99 % de la radioactivité
  - Démantèlement partiel des bâtiments conventionnels
  - Démantèlement total intérieur du bâtiment réacteur puis du bâtiment lui même
- 9 réacteurs en cours de démantèlement
- Dès 2001, création par EDF d'un centre de formation aux métiers de l'environnement et de la déconstruction
- Le prix du Kwh facturé au client inclut une contribution au coût de la déconstruction
- 10 milliards d'euros sont aujourd'hui provisionnés

# Les déchets radioactifs ou nucléaires

- Toute activité industrielle produit des déchets partiellement recyclables
- En France, 2500 kg par an et par habitant de déchets industriels, dont 10 % (250 kg/an/h) sont toxiques, dont les déchets nucléaires 1kg/an/h
  - 62% proviennent de la production d'électricité
  - 38% proviennent de la recherche, défense, médecine, industrie..

## 2 caractéristiques principales :

- » Niveau de la radioactivité (activité)
- » Durée de vie (période)

- 5 catégories de déchets

<i>Désignation</i>	<i>Activité Bq /g</i>	<i>Durée de vie</i>	<i>% du total</i>	<i>Entreposage / Stockage</i>
TFA FMA/ VC	< 100 < 10 <sup>6</sup>	< = 30 ans	30 60	Stockage site de l'Aube
FA /ML MA / VL HA / VL	96 % du total	> 30 ans	7 3 0,2	60000 m <sup>3</sup> entreposés à La Hague en attendant le stockage géologique en 2025

- **Pour résumer :**

- Les déchets à vie courte < 30 ans, soit 90 % sont stockés sur le site de l'Aube , rendu à l'usage public après 300 ans.
- Les déchets à vie longue (10 %) sont conditionnés et entreposés sur le site de La Hague avant stockage dans Cigeo



- La toxicité des déchets radioactifs :
  - Décroit naturellement avec le temps
  - Est d'autant plus faible que la période est grande
  - Est inversement proportionnel au volume produit
- Une agence indépendante, l'ANDRA est chargée de définir et de garantir les solutions de gestion des déchets radioactifs
  - Le site de l'Aube pour les TFA et les FMA/VC soit 90% du total
  - Le Cigeo pour le VL à partir de 2025 en application de la loi du 28 juin 2006

## **Loi du 28 juin 2006 sur la gestion durable des matières et déchets radioactifs**

- ▶ **Traitement des combustibles usés**
- ▶ **Entreposage des HA et MA-VL ...**
- ▶ **... suivi de leur Stockage **reversible** en couche géologique profonde**
- ▶ **Mise en service du Site de Stockage avant 2025, après consultations locale et nationale.**
- ▶ **Poursuivre la R&D sur P&T dans le cadre « Génération 4 »**
- ▶ **Démonstrateur en 2020 (CEA)**
- ▶ **Les producteurs de déchets financent tout.**
- ▶ **Pas de stockage en France de déchets « étrangers »**

# Cycle fermé du combustible

Depuis 1980, traitement et recyclage à 96 % des combustibles usés au centre de La Hague

- Réduction de volume par 5
- Réduction de toxicité par 10
- Fabrication de combustible Mox
- Le coût est intégré au prix du kwh
- Vente de prestations pour les clients étrangers
- Vente de technologies

**Areva** est seule à posséder cette capacité à l'échelle industrielle et **maîtrise donc l'ensemble du cycle** de l'extraction du minerai au stockage des déchets

# Dépendance vis à vis des ressources d'uranium

- Uranium largement répandu sur la croûte terrestre
- Consommation mondiale 2012 = 62000 tU  
production mondiale 2012 = 59000 tU
- Réserves identifiées 7,6 millions de tU dont 40% en OCDE, soit plus de 100 fois les besoins 2012
- Retraitement des combustibles usés
- Facilement stockable (3 à 5 ans de consommation en France)
- Avec les réacteurs surgénérateurs les ressources sont pratiquement illimitées
- Le Thorium est un matériau fertile qui devient fissile par un bombardement neutronique. Il est plus répandu que l'uranium sur terre

# Leçons tirées de Fukushima

- Une vague de 14m submerge le site des réacteurs 1, 2 et 3 protégés par une digue de 6,5 m
- Perte de l'alimentation des groupes de secours des réacteurs et des piscines de stockage des combustibles
- Percement de cuve de réacteur, multiples explosions d'hydrogène
- Mauvaise évaluation des risques naturels et prise en compte relative du retour d'expérience
- L'agence de sûreté (NISA) ne disposait pas d'une indépendance suffisante pour imposer ses exigences à l'exploitant TEPCO

## *Les réactions internationales*

- **Décident d'arrêter les centrales** = *Allemagne*
- **Décident d'arrêter les projets** = *Japon, Italie, Taïwan, Suisse*
- **Décident de continuer le nucléaire** = *Etats Unis, Russie, Chine, Inde, Royaume Uni, Finlande, France, Hongrie, République Tchèque, Slovaquie, Brésil, Afrique du Sud, Corée du Sud, Argentine, EAU, Ukraine, Belarus, ...*
- **Veulent démarrer le nucléaire** = *Pologne, Turquie, Arabie S, Jordanie, Vietnam*

- **En France**

- *Evaluation complémentaire de sûreté (ECS) sur toutes les installations nucléaires*
- *Risques liés à une catastrophe touchant tout un site, avec fusion de cœurs*
- *Identification d'un « noyau dur » organisationnel et matériel pour empêcher tout accident de devenir « grave » et d'avoir des conséquences hors du site*
- *La facture post Fukushima*
  - *Les 58 réacteurs français ont coûté environ 150 milliards d'euros pour 40 ans de production*
  - *Les améliorations demandées suite aux ECS, coûtent de l'ordre de 10 milliards d'euros*
  - *Ils s'ajoutent aux 40 milliards d'euros prévus (sur 30 ans) par EDF pour obtenir une prolongation de durée de vie de 20 ans*

- **Au Japon**

*Aucune centrale ne fonctionne. 7 ont plus ou moins le feu vert des autorités de sûreté (NISA) mais il faut aussi l'approbation de la Préfecture locale (très variable) et celle du gouvernement (acquise a priori). Réacteurs petits et anciens ont été définitivement arrêtés le mois dernier = restent 44*

- **En Allemagne**

*Avant 2011, le nucléaire produisait 24 % de l'électricité. Depuis la décision de sortir du nucléaire et la fermeture de 8 réacteurs sur 17, la production d'origine nucléaire est de 18%. L'Allemagne prétend remplacer le nucléaire par éolien et solaire, mais pour l'instant la part charbon + lignite augmente.*

# Industrie dangereuse pour le public ?

Les travaux sur les mécanismes de perception des risques font ressortir quelques idées fortes qui bénéficient d'être rappelées :

- La peur que suscite un risque n'est pas liée à sa réalité vérifiable mais à la fréquence avec laquelle on en parle
- Un risque nouveau ou imposé de l'extérieur est bien moins accepté qu'un risque plus grand mais consenti
- Freud a par ailleurs montré que l'insatisfaction individuelle se transforme en critique de la société et ses incarnations
- La difficulté d'assimilation d'une science trop complexe par un non spécialiste accentue la tentation de rejet
- « Une idée simple mais fausse s'impose toujours face à une idée juste mais compliquée » Tocqueville

*L'énergie nucléaire cumule tous ces facteurs de crainte et les opposants en jouent habilement\* pour alimenter la peur de leurs concitoyens et électeurs éventuels.*

(\*) ainsi que du fameux « principe de précaution » mis à toutes les sauces

# EPR compliqué, difficile à construire ?

- Evolution du N4 prenant en compte le retour d'expérience des accidents graves de Tchernobyl, puis de Fukushima :
  - Robustesse aux agressions extrêmes
  - Défense en profondeur accrue
  - Prise en compte de la fusion du cœur à la conception
  - Redondance des circuits de sauvegarde
  - Autonomie allongée
  - Possibilité de connexion de moyens mobiles
  - Bunker de repli
- Les surcoûts sûreté ont été compensés par :
  - Un effet de taille (1600 Mwe)
  - Une durée de vie de 60 ans
  - Un rendement thermique de 36 %
  - Une disponibilité de 91 %
  - Une meilleure utilisation du combustible
- Un prototype demande toujours des ajustements, souvent au prix de délais supplémentaires dans sa réalisation
- L'erreur a été de vendre ce modèle à l'étranger sans avoir de référence française

***Comme pour les têtes de série précédentes, lorsque les aléas de mise au point seront réglés, l'EPR sera le modèle de génération III répondant aux normes de sûreté les plus sévères tout en restant très compétitif.***

# Le nucléaire et l'environnement

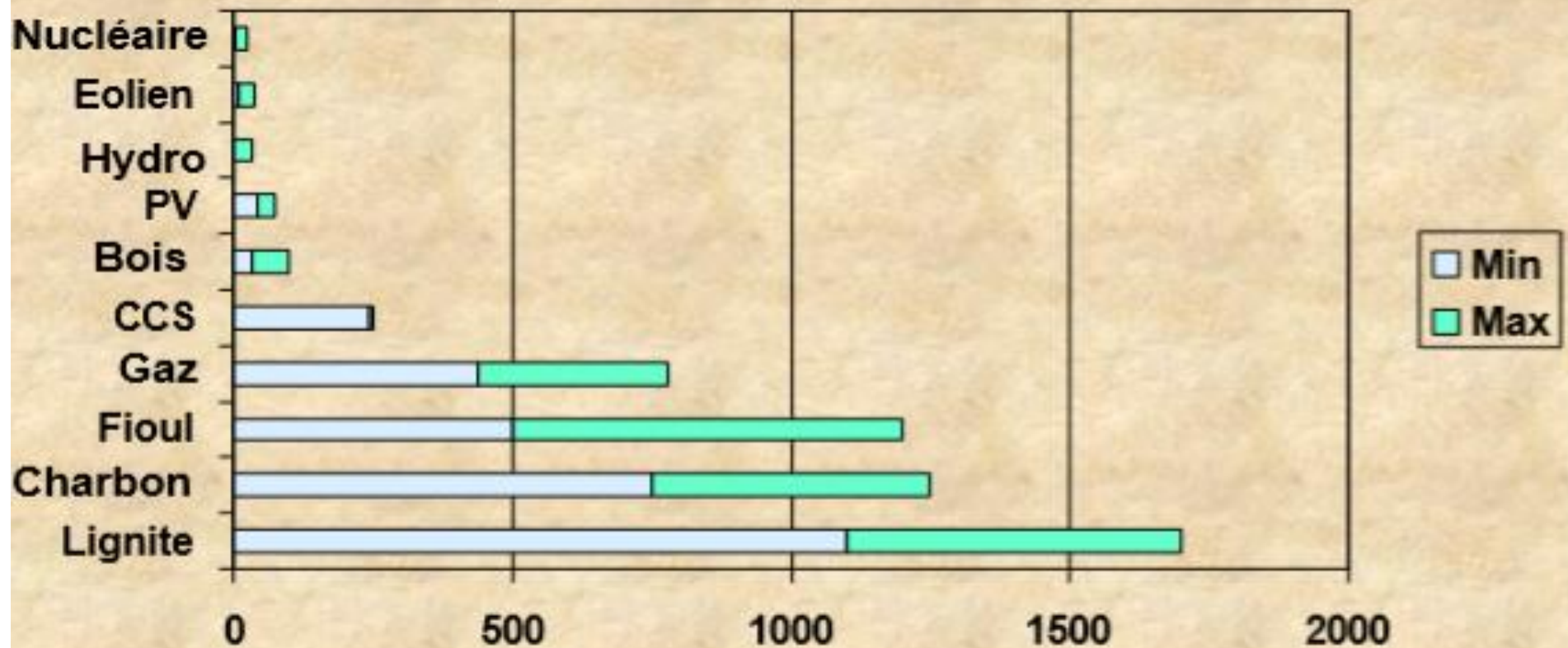
- Des dispositions réglementaires régissent les rejets de toutes les installations nucléaires du combustible et des centrales
- Par exemple chaque centrale effectue annuellement 20000 mesures de surveillance de l'environnement transmises annuellement à l'ASN
- Les rejets thermiques (eau de refroidissement) sont limités en amplitude à quelques degrés
- Les rejets chimiques utilisés pour le traitement de l'eau de refroidissement (démminéralisation et chloration)
- Les rejets radioactifs des circuits d'épuration et filtration (tritium, C14, iode, gaz rares) sont très largement inférieurs aux seuils réglementaires
- La production d'électricité nucléaire française évite annuellement les rejets de
  - 280 000 000 tonnes de CO<sup>2</sup> (effet de serre)
  - 2 500 000 tonnes de SO<sup>2</sup> (pluies acides)
  - 890 000 tonnes de NO<sup>2</sup> ( « « )
  - 55 000 tonnes de poussières diverses



Soit une économie annuelle de plus de 283 millions de tonnes de déchets toxiques qui se seraient trouvés dispersés dans l'atmosphère en cas de production d'électricité par des combustibles fossiles.

# Émissions de Gaz à effet de Serre, g CO<sub>2eq</sub> par kWh<sub>e</sub>

D. Weisser IAEA May 2006



*Les fourchettes reflètent des différences dans les méthodes d'évaluation, le rendement thermique, le périmètre pris en compte, etc.*

# Leadership reconnu de la France en nucléaire

- Recherche et innovation : 11 réacteurs de recherche au CEA, en pointe sur les réacteurs de 4e génération
- Extraction d'uranium et combustible nucléaire : AREVA seul acteur mondial à maîtriser ces activités
- Construction : position de leadership avec ses propres technologies
- Exploitation et maintenance : EDF premier exploitant nucléaire au monde avec 3 fois la capacité du second Rosenergoatom
- La France première exportatrice de biens et de services dans le nucléaire
- Recyclage du combustible et démantèlement : AREVA seul industriel maîtrisant le retraitement, la vitrification et la fabrication du MOX à l'échelle industrielle
- Gestion de déchets radioactifs : l'ANDRA propose des solutions de stockage durables et innovantes des déchets radioactifs
- Fédérations de PME pour l'exportation : (AIFEN, GIIN, PFCE, PFME, ....)



***L'équipe de France du nucléaire est solide***

# L'électronucléaire dans le monde

- La demande d'électricité croît de 2 % par an

- Produite par :

charbon	41%
gaz	22%
pétrole	5%

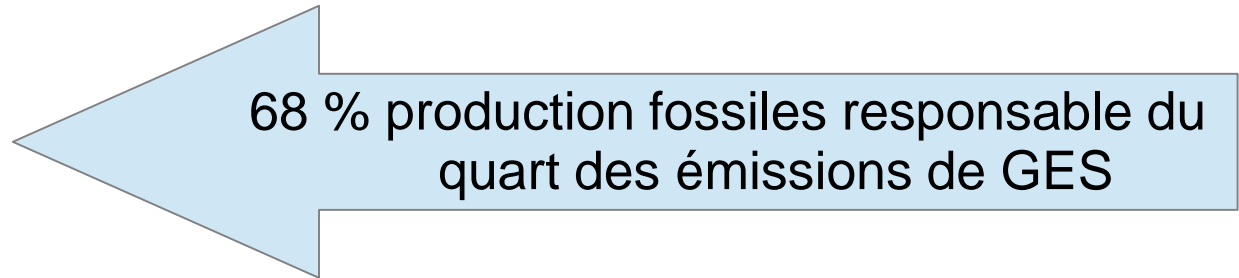
bas carbone 32%  
(dont nucléaire 12%)

- En Europe production

50% en fossile

50% en bas carbone (dont 30% en nucléaire)

- Prédiction d'une augmentation de 60% de la production mondiale de nucléaire en 2040



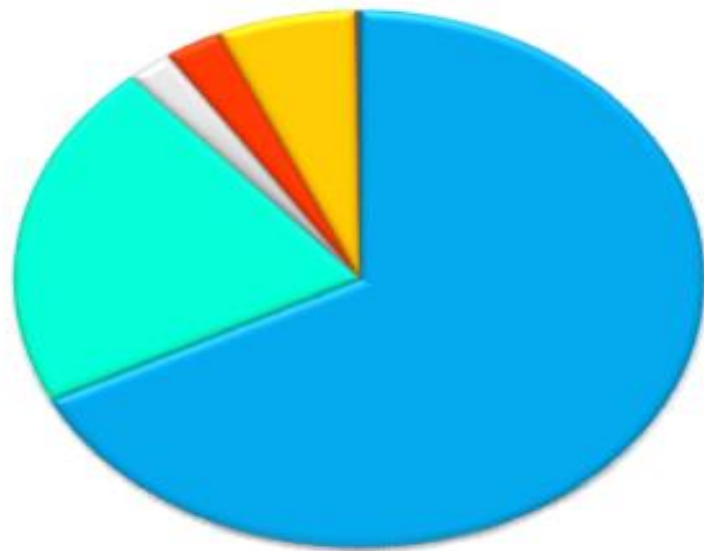
# L'électronucléaire dans le monde

WNA June 2014

## Électricité Nucléaire 2013-14

Pays	GWe	TWh	Réacteurs	%Elec
USA	100	790	100 + 5	19
France	63	406	58 + 1	73
Russie	24	162	33 + 10	18
Corée S	21	132	23 + 5	28
Chine	17	104	20 + 29	2
Canada	14	94	19	16
Allemagne	12	92	9	15
Ukraine	13	78	15	44
Royaume U	10	64	16	18
Suède	9	64	10	43
Espagne	7	54	7	20
<b>Monde</b>	<b>374</b>	<b>2 359</b>	<b>434 + 73</b>	<b>12</b>

## Réacteurs dans le monde, Janvier 2015



**En marche : 437 tranches, 375 GWe**

### Filières

- REP\*
- REB
- GG
- RBMK
- Candi
- RNR

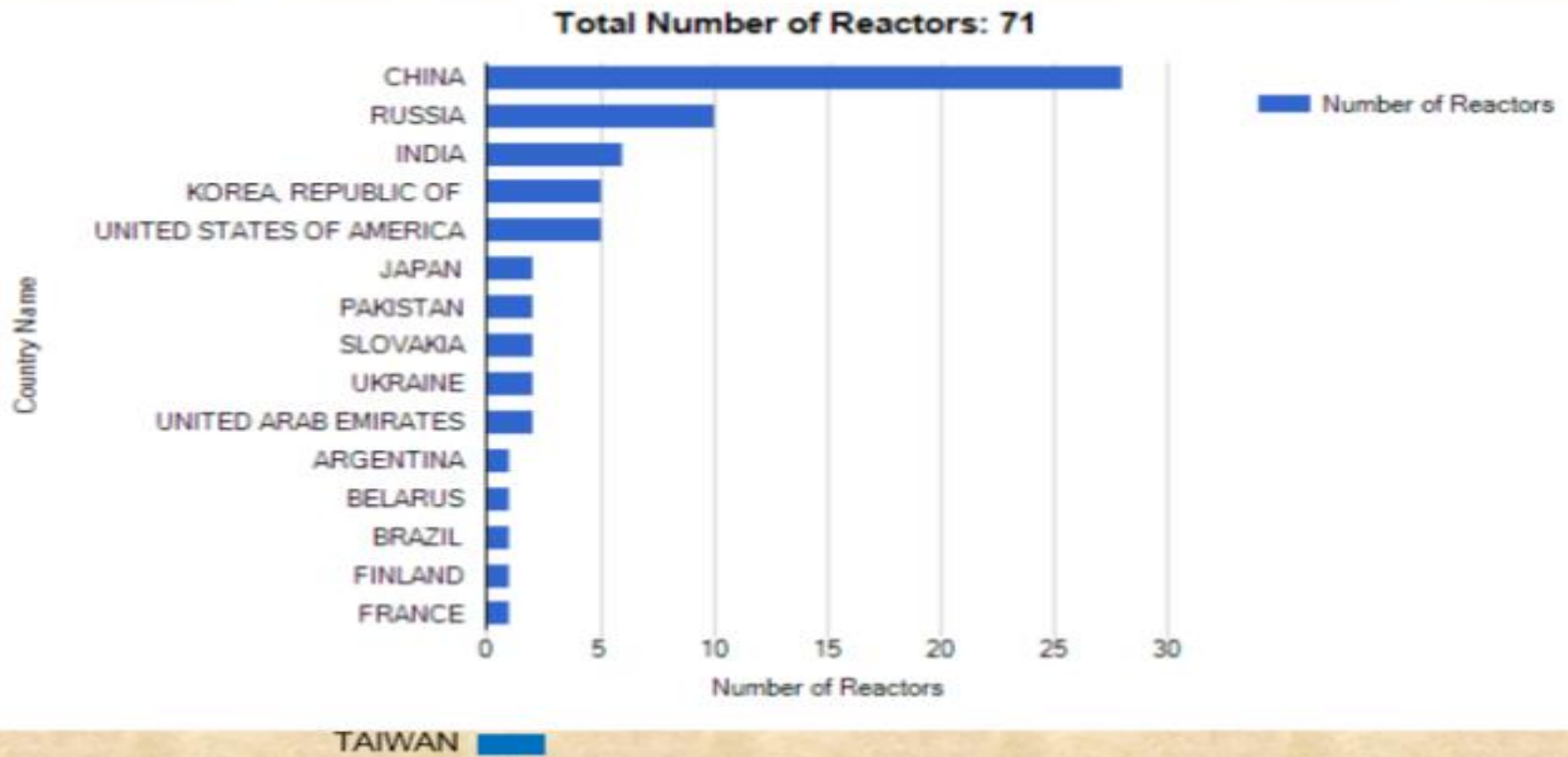
*\*VVR inclus*



**En Construction:  
71 tranches, 68 GWe  
60 REP+VVR**

*Source: IAEA PRIS*

# Réacteurs en construction





# Nucléaire et développement durable

L'électricité est un vecteur énergétique particulier :

- Sa consommation est en corrélation forte avec le développement
- On la produit avec toutes les sources primaires d'énergie
- Son transport, sa distribution et son utilisation sont propres, fiables et sûrs
- Son utilisation est souvent source d'économie d'énergie
- Elle permet de délocaliser l'utilisation par rapport au lieu de production (avec pertes en ligne)
- Elle est indispensable aux technologies de l'information et de la communication

Mais :

- On ne sait pas la stocker en grande quantité (moyennement dans le cas de l'hydraulique)
- Sa production mondiale se fait à 68% à partir d'énergies carbonées, responsable du quart des émissions de gaz à effet de serre
- L'éolien et la photovoltaïque sont des sources intermittentes ne pouvant fournir l'électricité en base.
- En outre leur insertion prioritaire sur le réseau impose une contrainte supplémentaire pour la régulation du réseau : demande = production
- Pour une pénétration des énergies intermittentes supérieure à quelque 25% du mix énergétique, il faudrait alors augmenter la part des énergies fossiles capables de variations rapides pour équilibrer le réseau

***Le nucléaire, l'hydraulique, et la biomasse seraient donc les seules sources d'électricité de base émettant peu de GES. Mais leur capacité d'ajustement reste limitée***

***La France a montré par la création de son parc nucléaire qu'il était possible de pratiquement se passer d'énergie carbonée pour sa production d'électricité à un prix très compétitif et stable.***

Ainsi en 2013 :

- 79,3% nucléaire
- 14,4 % renouvelable dont 9,3 hydraulique
- 3,3 % charbon
- 2,7 % gaz
- 1 % fuel
- 0,3 % autre

Soit seulement 6% d'énergies carbonées qui, avec l'hydraulique peuvent faire l'adaptation à la demande, le nucléaire étant gardé en base car d'un coût de production inférieur.

Mais en 2013,

La France a encore dépensé 66 milliards d'€ pour l'achat de gaz et de pétrole pour les secteurs comme le logement et les transports.

- Réduire la dépendance aux énergies fossiles à des prix et sécurité d'approvisionnement aléatoires
- Favoriser la pénétration de l'électricité dans les secteurs du logement, des transports, cogénération, chaleur carbonée, hydrogène, ....
- Une progression de 30% serait un objectif réaliste

En conséquence, en l'absence de nouveaux sites potentiels pour l'hydraulique, ***il faudrait faire une extension du parc nucléaire actuel***, en prenant en compte une augmentation des exportations d'électricité, notamment vers l'Allemagne.

# Conditions d'une renaissance durable du nucléaire

- Pas d'incident grave
- Une volonté politique
- Acceptation du public
  - Organisation de contrôle indépendante
  - Déchets longue vie
  - Prolifération contrôlée
- Compétitivité
  - Filière industrielle forte et intégrée
  - Modèles économiques et surs
  - Formation des exploitants
- Approvisionnement en uranium
- Développement d'un modèle de 4<sup>ème</sup> génération à l'échéance 2040

L'AIE prévoit un accroissement de 60% de la capacité mondiale nucléaire d'ici 2040

*La majorité des pays européens sont prêts à engager ou à poursuivre le développement de leur production d'électricité nucléaire.*



***La France est qualifiée pour prendre une part active à ces développements***

# L'Europe du nucléaire

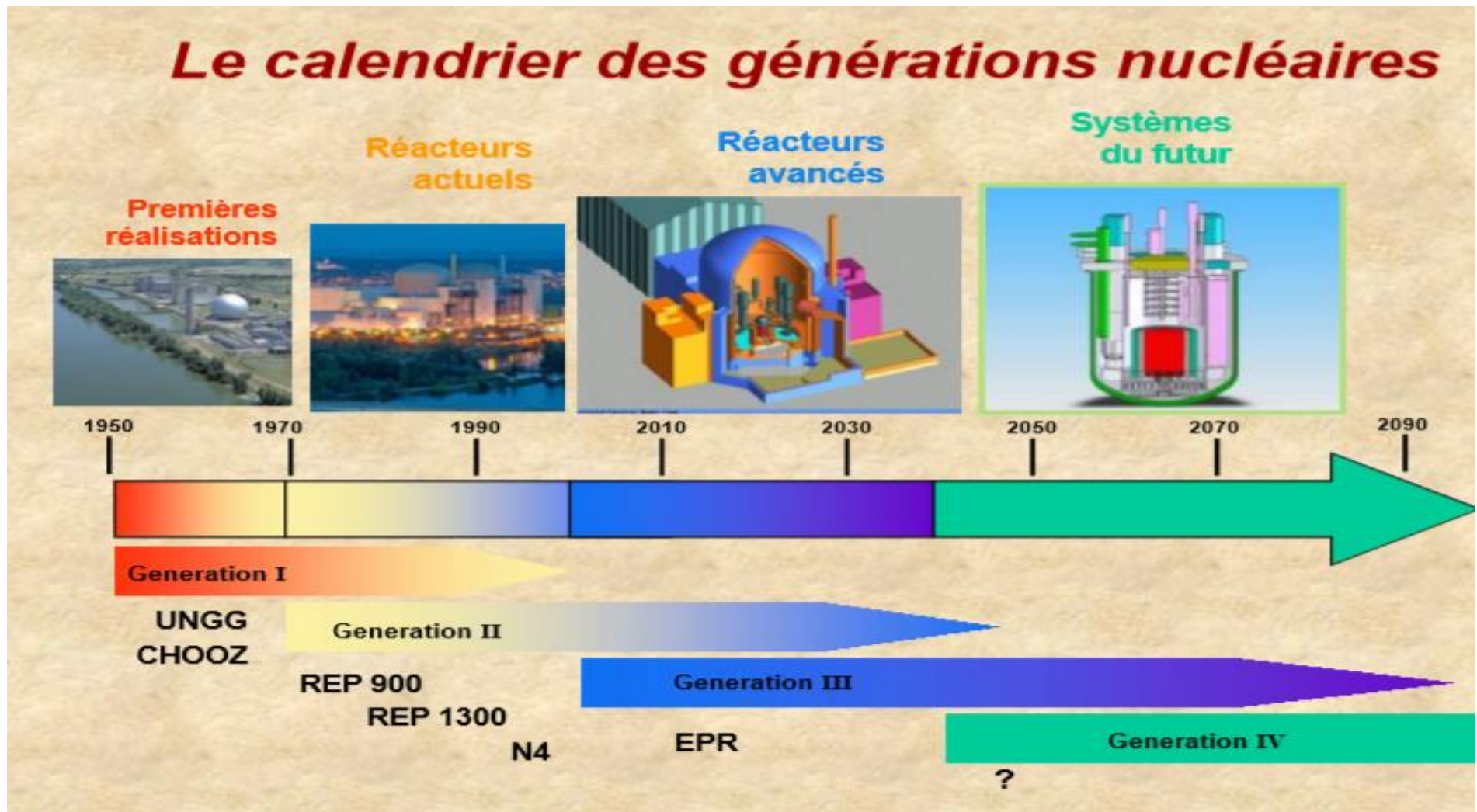
Les réseaux électriques des pays européens sont interconnectés depuis longtemps.

Ne serait il pas temps de connecter les politiques énergétiques de ces pays pour **définir une politique énergétique européenne**, non pas uniforme mais tenant compte des compétences, capacités et ressources de chacun dans un esprit de solidarité ? Disons « pensons globalement, agissons localement ».

Ce serait sans doute le meilleur exemple que l'Europe puisse donner pour obtenir un consensus mondial dans le combat à livrer contre les causes du réchauffement climatique.

# annexe

## *Le calendrier des générations nucléaires*





# Pour en savoir plus .....

AEPN	Association des écologistes pour le nucléaire	<a href="http://ecolo.org">ecolo.org</a>
AIEA	Agence internationale pour l'énergie atomique	<a href="http://aiea.org/worldatom">aiea.org/worldatom</a>
ANDRA	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs	<a href="http://andra.fr">andra.fr</a>
AREVA		<a href="http://arevagroup.com">arevagroup.com</a>
ASN	Agence de sûreté nucléaire	<a href="http://asn.gouv.fr">asn.gouv.fr</a>
CEA	Commissariat à l'énergie atomique	<a href="http://cea.fr">cea.fr</a>
EDF	Electricité de France	<a href="http://edf.com">edf.com</a>
SFEN	Société française de l'énergie nucléaire	<a href="http://sfen.org">sfen.org</a>