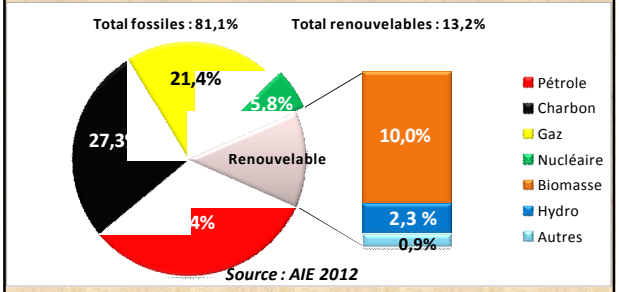
L'Énergie Nucléaire en France

Bertrand BARRÉ 2013

VILLE DE CHAVILLE

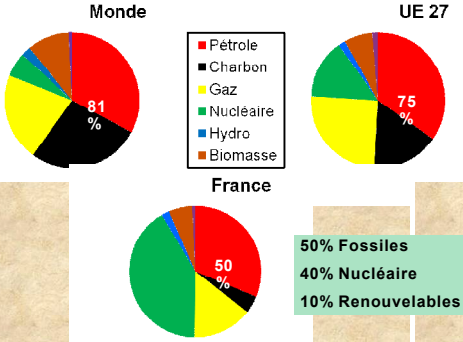
---

en 2000 : 6 milliards d'humains, 10 milliards de tep
en 2010 : 6,9 milliards d'humains, 12,7 milliards de tep



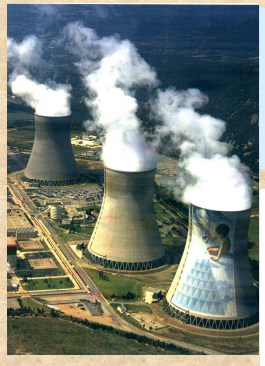
Source : AIE 2012

Consommation d'énergie primaire (Mtep) en 2010

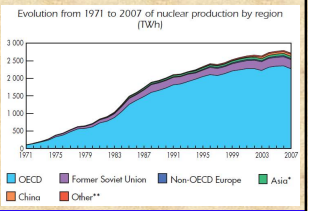


50% Fossiles
40% Nucléaire
10% Renouvelables

L'énergie nucléaire de fission



437 réacteurs dans 30 pays*
> 2500 milliards kWh/an
~ Hydraulique
> Pétrole saoudien
13,5% électricité

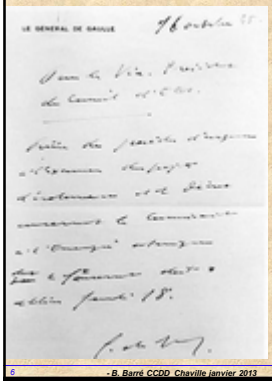


Les dates-clés du nucléaire français - 1

- 1945 Création du Commissariat à l'Énergie Atomique
- 1948 Divergence de ZOÉ – premier uranium à La Crouzille
- 1956 Première production expérimentale (G1 – 2 MWe) et démarrage UP1 à Marcoule
- 1958 Création du bureau d'ingénierie Framatome
- 1963 Premier réacteur EDF Chinon A1
- 1967 Lancement du Redoutable
- 1969 PIVER, première vitrification
- 1970 Démarrage des UNGG St Laurent - Décision de passer des UNGG aux REP à Fessenheim
- 1972 Nouvelle licence Westinghouse à Framatome – Technicatome, première filiale industrielle du CEA
- 1973 Divergence de Phénix
- 1974 Programme « Messmer », CP1

---

18 Octobre 1945



Création du CEA

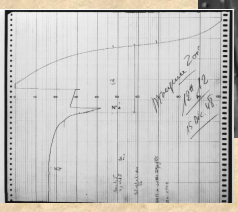
Article 1er. Il est institué sous le nom de COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE, un établissement à caractère scientifique, technique et industriel, doté de la personnalité civile ainsi que de l'autonomie administrative et financière, et placé sous l'autorité du Président du gouvernement provisoire. Le COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE poursuit les recherches scientifiques et techniques en vue de l'utilisation de l'énergie atomique dans les divers domaines de la science, de l'industrie et de la Défense nationale…

Fait à Paris, le 18 octobre 1945

C. de GAULLE

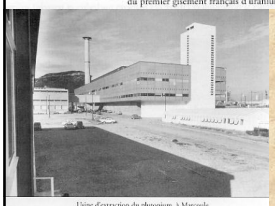
Jour J pour le Nucléaire Français

15 Décembre 1948



Divergence de «ZOÉ»

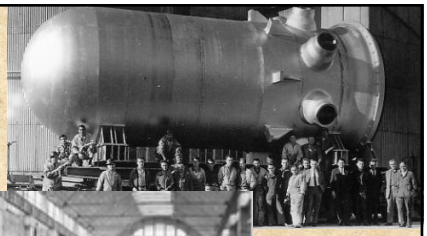
Découverte à La Crouzille du premier gisement français d'uranium



Usine d'extraction du plutonium, à Marcoule.

Les premiers réacteurs (UNGG)

La cuve de Chooz 1 à la SFAC



Lancement du Redoutable

La « Génération 1 » en France

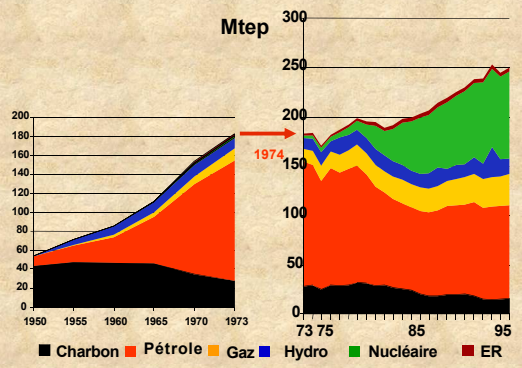
- *G1, G2, G3 Plutonigènes avec production annexe d'électricité (2, 40, 40) CEA*
- *Chinon 1A, 2A, 3A UNGG électrogènes (70, 250, 450)*
- *Brennilis (eau lourde – CO2) 70 MWe EDF-CEA*
- *St Laurent A1, A2, (+Vandellos) premier « palier » UNGG 500 MWe*
- *Bugey 1 540 MWe (combustible INCA)*
- *Chooz 1 REP 300 MWe Franco-Belge*

- *Phénix, premier surgénérateur, 250 MWe EDF-CEA*

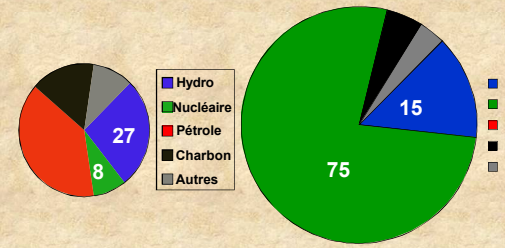
Σ 1974 : 3 GWe, 8% électricité

Des UNGG aux REP : Le Bugey

La réaction au choc pétrolier

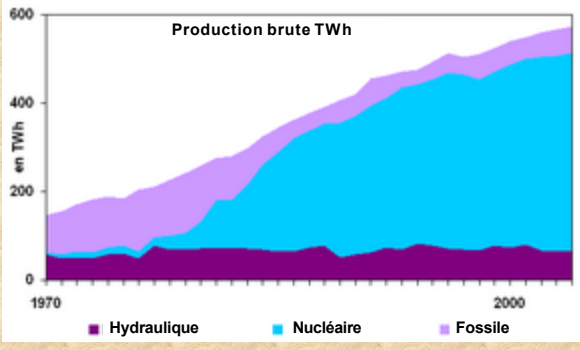


Les résultats du « Programme Messmer »



1973 : 174 TWh 1996 : 489 TWh

Production d'électricité en France 1973 - 2004



Les dates-clés du nucléaire français - 2

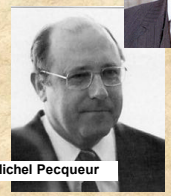
- *1974 Programme quantitatif REO « Messmer »*
- *1975 Abandon des REB, le CEA remplace W comme actionnaire de Framatome, auprès de Schneider*
- *1976 Création de COGEMA, démarrage de La Hague UP2*
- *1977 Divergence du premier REP 900 MWe à Fessenheim*
- *1978 Démarrage d'Eurodif (Georges Besse 1)*
- *1981 Sortie précoce de la licence Westinghouse : Francisation des REP sans « adhérence » politique US - NTCA*
- *1985 Divergence de Superphénix*

Après les pionniers, les ingénieurs

Georges Besse

Marcel Boiteux

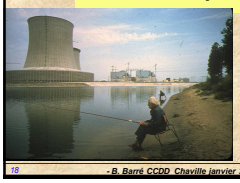
André Giraud


Michel Pecqueur

Philippe Boulin Jean-Claude Leny

« Mission Impossible » ?

- *Commander 34 REP 900 MWe presque identiques, au rythme de 6 par an, alors que :*
- *Fessenheim 1 était encore en cours de construction*
- *Le retour d'expérience de Chooz A1 était mitigé*
- *Aucun pays occidental n'avait construit de « palier »*
- *En commandant la série 1300, jamais essayée, 3 ans seulement plus tard*

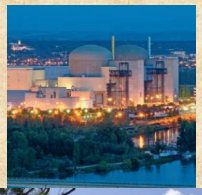


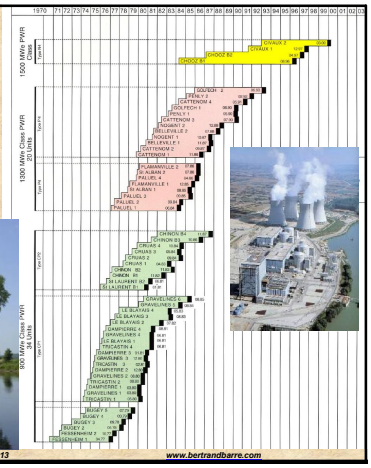
MAIS MISSION ACCOMPLIE

58 REPs en France

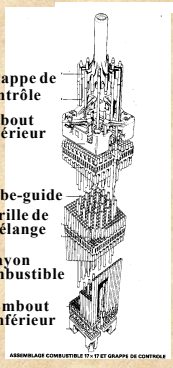
Classe	Réacteur	MWe net
900 MWe	Blayais 1-4	910
	Bugey 2-3	910
	Bugey 4-5	880
	Chinon B 1-4	905
	Cruas 1-4	915
	Dampierre 1-4	890
	Fessenheim 1-2	880
	Gravelines B 1-4	910
	Gravelines C 5-6	910
	Saint-Laurent B 1-2	915
	Tricastin 1-4	915
1300 MWe	Belleville 1 & 2	1310
	Cattenom 1-4	1300
	Flamanville 1-2	1330
	Golfech 1-2	1310
	Nogent s/Seine 1-2	1310
	Paluel 1-4	1330
	Penly 1-2	1330
	Saint-Alban 1-2	1335
N4 - 1450 MWe	Chooz B 1-2	1500
	Civaux 1-2	1495

Génération 2





Assemblage Combustible REP



La vie n'a pas été un long fleuve tranquile

- *La Standardisation est fondamentalement bonne (Séries industrielles, Coûts, Retour d'expérience, Formation des opérateurs … and régulateurs), mais elle a ses inconvénients (Modes communs: fissures sous revêtement, Inconel 600…)*
- *Acceptation publique bonne, avec des exceptions locales (Plogoff, Le Pellerin), et des problèmes frontaliers (Fessenheim, Cattenom)*
- *On a servi de cible à tous les antinucléaires d'Europe (Creys-Malville, La Hague, Bure)*
- *Perte brutale de confiance après Tchernobyl (coïncidant avec le contrechoc). Annonces de « surcapacité » = plus de sensation de besoin*
- *Mauvaise gestion des questions de déchets dans les années 80s.*

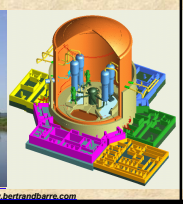
Facteurs-clés de succès

- *La perception d'un besoin par Gouvernement et Public.*
- *Un électricien puissant (EDF), doté d'une ingénierie compétente… & d'un crédit bancaire mondial grâce, notamment, aux garanties du gouvernement.*
- *Une infrastructure nucléaire complète (CEA, Industrie, Autorité de sûreté), y compris un personnel bien formé.*
- *La standardisation*
- *Un soutien sérieux du bailleur de licence (dessin éprouvé, « Lead Plants »)*
- *Une R&D en soutien (« Programme Quadripartite »)*
- *Eventail complet (Cycle du combustible, gestion des déchets, emergency planing, etc.), maintenant rassemblé dans AREVA*
- *Une vision et un engagement à long terme (Breeders, même Fusion)*
- *Continuité politique malgré l'alternance (1981)*

Un beau transfert de technologie

- *Sans l'expérience de Westinghouse, même EDF n'aurait pas pris le risque.*
- *Assimiler la technologie est un gros effort*
- *Acquérir le know-how is plus dur*
- *Apprendre le Know-why est encore plus long*

1980 1990 2000



Les dates-clés du nucléaire français - 3

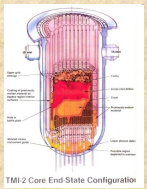
- 1985 Divergence de Superphénix
- 1990 Moratoire Rocard
- 1991 Loi Bataille
- 1993 Démarrage de UP2-800
- 1997 Arrêt de Superphénix
- 2000 Démarrage de Civaux 2, REP N4 1450 MWe, dernier de la « génération II »
- 2001 Création d'AREVA
- 2005 Loi d'orientation – débats public
- 2006 Lois TSN et gestion durable des déchets et matières
- 2007 Construction de Flamanville 3, EPR, premier de la « génération III » en France
- 2011 ECS post-Fukushima
- 2013 Débat sur la « transition énergétique »

Leçons tirées des accidents

Mars 1979 : TMI (erreur de représentation)

Interface homme/machine
Hiérarchisation des alarmes
Délai d'inaction
Approche par états, ISR, H&U

« Lessons learned » *Améliorations à la Deuxième Génération (filtres à sable, recombineurs…)*

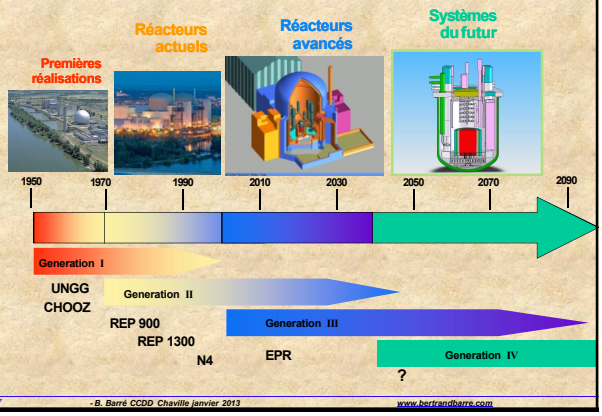


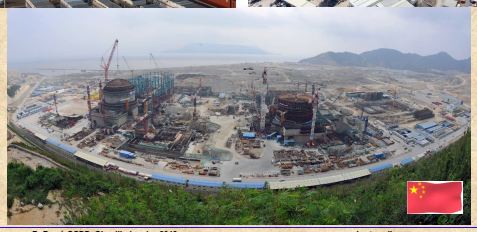
Avril 1986 : Tchernobyl (fusion de cœur)

Importance de l'enceinte
La protéger contre corium, H2
Relâchement massif inacceptable

La prévention ne suffit plus
Il faut en plus limiter les conséquences
D'où la Troisième Génération

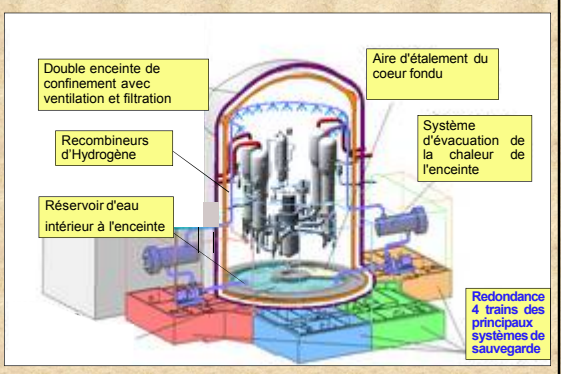
Le calendrier des générations nucléaires



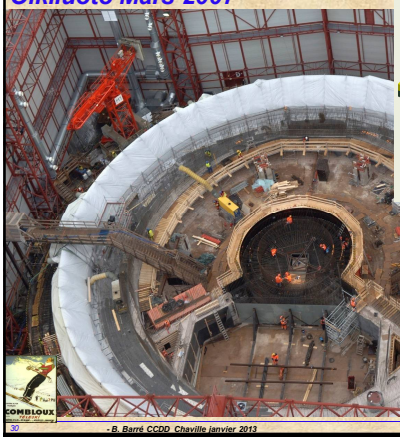


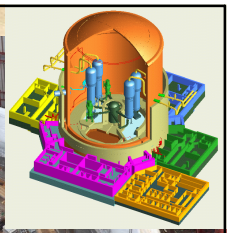
Les avancées en matière de sûreté

Les principaux systèmes de sauvegarde de l'EPR



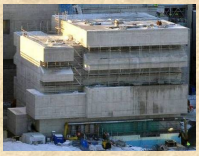
Olkiluoto Mars 2007





Les bâtiments des Diesels

Protection physique



- Les Diesels de secours et leurs réservoirs sont logés dans des bâtiments en béton armé
  - Résistants aux séismes
  - Les portes résistent aux explosions externes et aux inondations

Séparation physique

- 2 bâtiments séparés situés de chaque côté de la coque avion
  - Impossibilité d'endommager les 2 bâtiments en cas d'agression externe (explosion, chute d'avion, …)

Redondance et diversité

- 2 Diesels principaux et 1 Diesel SBO par bâtiment, avec séparation interne

Portes des bâtiments auxiliaires et des bâtiments Diesels

Portes résistant à explosions et inondations externes

11 Mars 2011

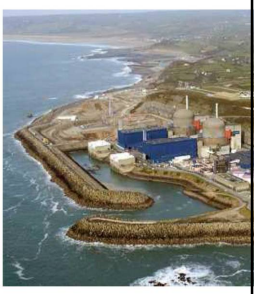
Les réactions internationales (septembre 2011)

- ***Décident d'arrêter les centrales :***
  - ***Allemagne***
- ***Décident d'arrêter les projets :***
  - ***Japon, Italie, Taiwan, Suisse ?***
- ***Décident de continuer le nucléaire :***
  - ***Etats-Unis, Russie, Chine, Inde, Royaume Uni, Finlande, Pologne, République Tchèque, Slovaquie, Hongrie, Brésil, Afrique du Sud, Corée du Sud, Argentine…***
- ***TOUS : Examens Complémentaires de Sûreté (Stress Tests)***

Les ECS : une démarche en deux étapes

1. **Réexamen approfondi des lignes de défense existantes, au-regard du <u>référentiel actuel</u> :**
   - Protections, digues, talus, ancrages, diesels, ressources en eau…
   - Maîtrise des accidents du dimensionnement
   - Tous les systèmes participant à la démonstration de sûreté
2. **Analyse nouvelle <u>au-delà du référentiel</u> :**
   - Efficacité des protections, marges, « effets falaise »
   - Maîtrise des situations extrêmes indépendamment de leur probabilité
   - « Noyau Dur » de systèmes et matériels permettant d'éviter des rejets « massifs de type Fukushima »

Si nécessaire, mise en place de moyens supplémentaires : Matériels; Hommes; Organisations locale et nationale

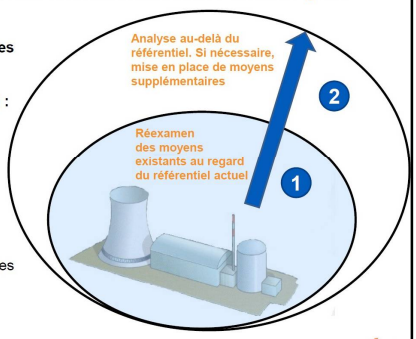


EDF

Les ECS : une démarche en deux étapes

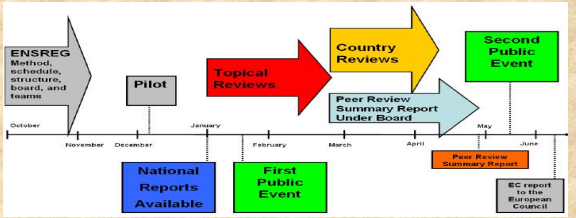
Les 6 domaines d'évaluation (cahier des charges ASN) :

- Séisme
- Inondation
- Perte d'eau
- Perte d'alimentation électrique
- Gestion des accidents graves
- Prestataires



EDF

Le Processus en UE en 2012



- *Peer reviews were launched in Jan. 2012 , they include representatives of other countries, plus the European Commission. Peer reviews aim at evaluating the country reports*
- *These reviews support the EC at getting input for further improvements and harmonizing safety level within EU*
- *Their conclusions form the basis of the EC consolidated report presented to the European Council in June 2012*

REPUBLIQUE FRANÇAISE

asn

Avis n°2012-AV-0139 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 3 janvier 2012 sur les évaluations complémentaires de la sûreté des installations nucléaires prioritaires au regard de l'accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi

A l'issue des évaluations complémentaires de sûreté des installations nucléaires prioritaires, l'ASN considère que les installations examinées présentent un niveau de sûreté suffisant pour qu'elle ne demande l'arrêt immédiat d'aucune d'entre elles. Dans le même temps, l'ASN considère que la poursuite de leur exploitation nécessite d'augmenter dans les meilleurs délais, au-delà des marges de sûreté dont elles disposent déjà, leur robustesse face à des situations extrêmes.

Les 4 actions retenues suite aux évaluations

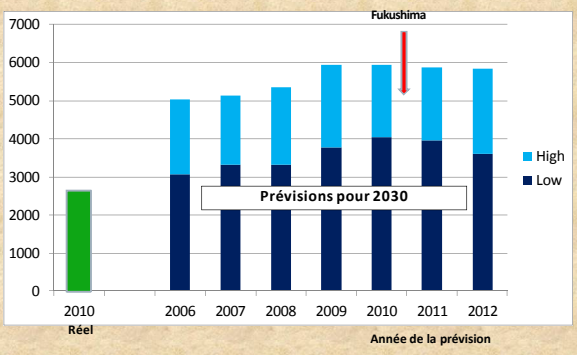
- **Renforcer** les protections des centrales contre les agressions externes (séisme, inondation…).
- **Renforcer** les appoints en eau et électricité.
- **Limiter** au maximum les rejets en cas d'accident grave (pas de contamination importante et durable des territoires).
- **Renforcer** l'organisation de crise sur les sites et au niveau national (moyens humains et matériels).

Moyens supplémentaires principaux :

- **« Noyau Dur »** de systèmes, structures et composants, permettant, dans les situations extrêmes considérées dans les ECS, d'éviter les rejets massifs de radioactivité dans l'environnement.
  - Protection de ce « Noyau Dur » à des niveaux d'agression au-delà du dimensionnement actuel.
- **Force d'Action Rapide Nucléaire (FARN)** capable d'être opérationnelle sur n'importe quel site à partir de 24 h .

- **Les principes de sûreté de l'EPR sont confortés après Fukushima :**
  - robustesse aux agressions externes
  - défense en profondeur accrue
  - prise en compte des accidents graves dès la conception
- **Des ajustements sont apportés :**
  - étanchéité renforcée
  - autonomie allongée
  - possibilité de connecter des moyens mobiles
- **La démarche d'analyse et de retour d'expérience sera poursuivie**

Production mondiale d'électricité nucléaire (TWh) AIEA 2012



Déchets/an/habitant en France

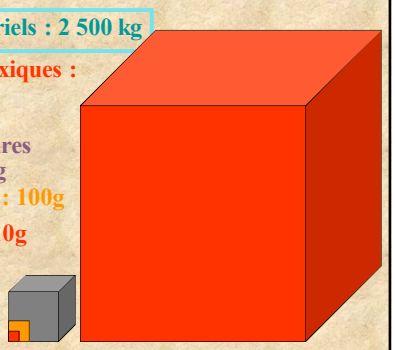
Déchets industriels : 2 500 kg

dont déchets toxiques : 100 kg

Déchets nucléaires moins de 2 kg

dont vie longue : 100g

dont HA : 10g



Comme il y en a peu, on les gère en totalité

Les déchets nucléaires, on s'en occupe !

- Ils ne sont ni orphelins, ni dispersés à tous vents
- Les déchets FA sont stockés définitivement
- Les déchets MAVL & HA sont concentrés, confinés *entreposés* et surveillés.

Là où ils sont, ils ne créent aucune nuisance à qui que ce soit

La solution définitive est programmée:

Loi du 28 Juin 2006

Loi du 28 Juin 2006

- *Plan national exhaustif*
- *Traitement des combustibles usés pour recyclage*
- *Entreposage puis Stockage géologique réversible en couche profonde des déchets de longue durée de vie*
- *Site choisi en 2015, Stockage opérationnel avant 2025*
- *Poursuite des recherches sur la transmutation dans le cadre des systèmes « Génération 4 » (Prototype CEA 2020)*
- *Pas de stockage des déchets étrangers*
- *Les producteurs de déchets paient tout*

Oklo, Gabon, la préhistoire du nucléaire

Ressources en Uranium naturel

Millions t U naturel	Red Book 2009	Red Book 2011
Ressources identifiées <260$/kgU	6,3	7,1
Ressources à découvrir	10,4	10,4
Consommation Dont production des mines	59000 t/an 75%	64000 t/an 85%

Les Ressources assurées d'uranium "classique" sont plus de 100 fois la consommation mondiale 2011

Avec les surgénérateurs, les ressources sont pratiquement illimitées

Un débat en 2013

Je veux faire de la France la nation de l'excellence environnementale.

31 Je préserverai l'indépendance de la France tout en diversifiant nos sources d'énergie. J'engagerai la réduction de la part du nucléaire dans la production d'électricité de 75% à 50% à l'horizon 2025, en garantissant la sûreté maximale des installations et en poursuivant la modernisation de notre industrie nucléaire. Je favoriserai la montée en puissance des énergies renouvelables en soutenant la création et le développement de filières industrielles dans ce secteur. La France respectera ses engagements internationaux pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Dans ce contexte, je fermerai la centrale de Fessenheim et je poursuivrai l'achèvement du chantier de Flamanville (EPR).

32 Je ferai adopter une nouvelle tarification progressive de l'eau, de l'électricité et du gaz afin de garantir l'accès de tous à ces biens essentiels et d'inciter à une consommation

28

La Cour des comptes conclut en 2012 que les coûts du nucléaire en France sont cernés et que la filière est durablement compétitive

Les coûts du nucléaire sont cernés

Les coûts du nucléaire sont correctement estimés : le mythe des "coûts cachés" s'effondre

Les incertitudes sur les coûts futurs sont limitées

Les coûts pour démantèlement et gestion des combustibles usés sont provisionnés tout au long de la durée de vie des centrales :

- *La Cour conclut à la fiabilité des provisions pour la gestion des combustibles usés*
- *La Cour souligne certaines limites dans l'estimation du coût de démantèlement des installations nucléaires en France, mais ne remet pas fondamentalement en cause les estimations*

La compétitivité du nucléaire est confirmée et robuste vis-à-vis des incertitudes liées aux coûts futurs

La Cour confirme que les coûts de production du parc nucléaire historique sont juste un peu inférieurs inférieurs à 50€/MWh

- Ainsi, le nucléaire – hors hydraulique – est la technologie de production la plus compétitive face aux renouvelables et aux fossiles

L'incertitude sur les coûts futurs n'a qu'un impact limité sur les coûts de production, même en prenant des hypothèses conservatrices :

- Si le devis du projet de stockage de Bure venait à doubler, l'impact sur le coût de production de l'électricité ne serait que de 1%
- Si le coût de démantèlement des réacteurs venait à doubler, l'impact sur le coût de production de l'électricité ne serait que de 5%

La commission Energie 2050 (Percebois-Mandil) a procédé à une analyse de différents scénarios

Pour l'électricité, sur la base des hypothèses suivantes des coûts en 2030, calculés en base 2010 :

Centrales	Coût kWh sortie centrale (euros 2010)
hydroélectricité	55
nucléaire	43 à 75 (selon type de centrale)
charbon	70 à 100 (selon prix du CO_2)
gaz naturel	57 à 90 (selon prix du CO_2 et le prix du spot)
éolien terrestre	70
éolien off-shore	110
photovoltaïque	160

Prix de l'électricité dans l'UE en 2010 c€/kWh

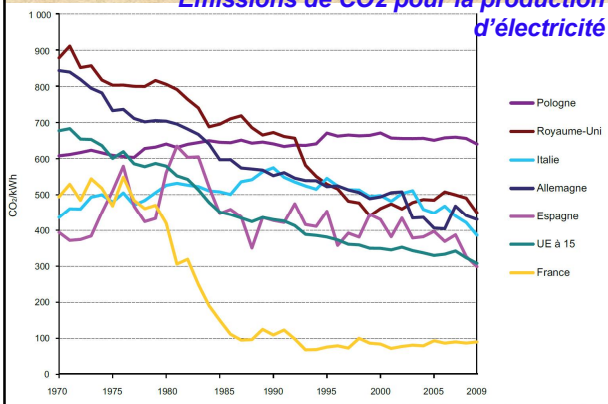
Pays	Industrie (hors TVA)	Ménagess
Italie	14.40	23.95
Allemagne	10.50	23.60
Royaume Uni	10.41	12.96
France	8.01	11.91

Source : Eurostat 2011

Emissions de CO_2 liées à l'énergie en 2009

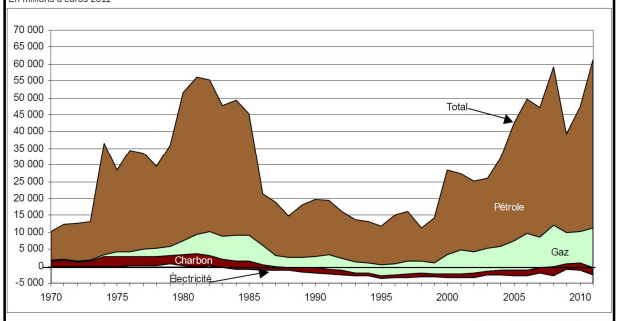
Pays	t CO_2/ha	Kg CO_2/2000$ (ppa)	t CO_2/tep
USA	16.90	0.46	2.40
Canada	15.43	0.51	2.05
Russie	10.80	1.00	2.37
Allemagne	9.16	0.33	2.36
Japon	8.58	0.32	2.32
Royaume Uni	7.54	0.27	2.37
Union Européenne à 27	*7.15*	*0.30*	*2.16*
Italie	6.47	0.26	2.36
France	5.49	0.21	1.38

Emissions de CO2 pour la production d'électricité



Source : Agence internationale de l'énergie, octobre 2011.

La facture énergétique déclinée par type d'énergie
En millions d'euros 2011



Source : SOeS d'après Douanes

La facture énergétique de la France a battu son record en atteignant 61,4 milliards d'euros en 2011, près de quatre fois plus qu'il y a vingt ans, selon un rapport du ministère de l'écologie présenté jeudi 19 juillet 2012. *"À elle seule, la facture énergétique représente 88 % du déficit commercial de la France".*

Qui fait Quoi dans le Nucléaire en France ?

- ***EDF : Opérateur, Ingénierie, R&D***
- ***AREVA : Réacteurs & Cycle, R&D***
- ***Alstom : Turbo-alternateurs***
- ***Bouygues, Vinci : Génie civil***
- ***CEA : R&D***
- ***ANDRA : Gestion finale des déchets radioactifs***
- ***ASN : Autorité de Sûreté Nucléaire***
- ***IRSN : Support technique à l'ASN, R&D***
- ***CNRS (IN2P3), Sous-traitants divers, etc.***

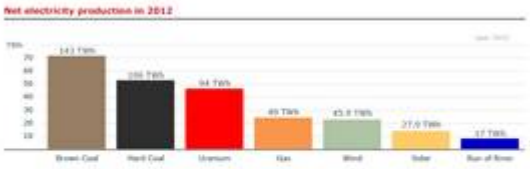
Le Nucléaire français en quelques chiffres

- 442 TWh en 2011
- 125 000 emplois directs
- 400 000 emplois indirects et induits
- 20 milliards €/an économisés en importation (gaz)
- 7 milliards €/an d'exportations

Le cas allemand

- 1998-2001 : Négociations aboutissant à la loi de sortie du nucléaire en 2021.
- Septembre 2010 : A. Merkel obtient un sursis de 8 à 14 ans pour l'arrêt des centrales
- 14 Mars 2011 : Arrêt « temporaire » de 7 tranches. Perte des élections au Bade Wurtenberg
- 30 Mai 2011 : Arrêt définitif de 8 tranches et retour à la sortie du nucléaire en 2022.
- 42% de l'électricité venant de Charbon et lignite (20% renouvelable). Lancement de nouvelles centrales au charbon. Gazoduc direct avec la Russie (Nordstream). Fin du bilan exportateur annuel.
- 4 500 km de lignes à très haute tension à construire avant 2020, en particulier pour acheminer l'énergie des parcs éoliens de la mer du Nord vers le sud du pays : 20 Mds €, auxquels il convient d'ajouter 25 Mds € pour les réseaux de distribution (MT et BT).
- Coût de la sortie : > 250 Mds€ ?
- Bilan CO2 de l'Union Européenne ?

Shares in net electricity production in 2012



	2010	2012
Charbon et lignite	42,2%	51,6%
Nucléaire	22,6%	19,4%

Graph: B. Burger, Fraunhofer ISE; data: EEX Transparency Platform, Statistisches Bundesamt (DESTATIS)

Fraunhofer

Merci de votre attention !

www.bertrandbarre.com

VILLE DE CHAVILLE