

Energies Renouvelables et Transition Energétique

Place du Nucléaire ? Repères, Enjeux

Conférence Dîner Débat X Mines Ponts du 18 septembre 2013
Conférencier Jean-Luc SALANAVE, AEPN, salanave@yahoo.fr
Animation Jérôme LENOIR www.thermatec.fr

sommaire

- ▶ Intro par Jérôme Lenoir: nécessité de décarboner nos économies
- ▶ 2013, année du débat national sur la transition énergétique: vers quel bouquet énergétique? A quels prix ?
- ▶ Nucléaire: pourquoi en parle-t-on autant ? Fukushima, Tchernobyl, le cas de l'Allemagne
- ▶ Quelques fondamentaux du nucléaire
- ▶ Quel nucléaire demain ?
- ▶ 2013, année du débat national sur CIGEO: les déchets nucléaires
- ▶ Conclusion

ENR et Transition Energétique

► La nécessité de « décarboner » nos économies n'est plus contestée :

- **Energies fossiles importées à 100%** (> 1000 € / habitant/an en France et 55% de l'énergie primaire)
- **Raréfaction progressive pétrole et gaz** ('Pic de production' atteint inclus 'gaz de schiste'),
- **Donc augmentation inéluctable et chaotique des prix au gré des crises**
- **Charbon = solution provisoire en Chine, Allemagne...** (pollution et CO2, sauf si séquestration ?)
- **Effet de serre = non contestable dans son principe, incertain quant à son ampleur**
- **Obligation morale de tenir compte de ces risques pour garder une planète habitable par nos enfants**

► Sources : J.M. JANCOVICI – Changer le monde - <http://www.manicore.com/>

Jérôme Lenoir, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

p.3

Place du Nucléaire ?

► Les ENR sont-elles LA solution ?

- **ENR = biomasse, hydraulique, géothermie, solaire PV, solaire thermique, éolien**
- **Incertitudes sur l'évolution des coûts** (solaire, éolien)
- **Incertitudes sur la gestion de l'intermittence** (cf. Allemagne)
- **Rôle majeur de la SOBRIETE et de l'EFFICACITE énergétique**
- **Objectif 50% réduction énergies primaires est-il réaliste à l'horizon 2050 ?**
- **Problème actuel de l'impasse énergétique Allemande**

► **NUCLEAIRE = complément indispensable à Court Terme, à réduire ?**

► **Ou socle d'une politique énergétique réaliste et écologique ?**

► Sources : conf. NEGAWATT du 5/12/2012 ; AEPN 'Le Nucléaire, avenir de l'écologie' <http://www.ecolo.org/>; Centre d'Analyse Strat.

Jérôme Lenoir, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

p.4

La France championne des faibles rejets de CO2 championne de l'électricité bon marché

Le paysage électrique en France (2012, source RTE)

► **489,5 TWh consommation intérieure brute:**

◆ dont pertes: -35 TWh

► **541,4 TWh de production brute, dont:**

◆ CIB: 489,5 TWh
◆ soutirage pompage: 7,7 TWh
◆ solde export: 44,2 TWh (12% de CIB)

note: ne pas confondre puissance installée et énergie produite (nucléaire respectivement 49% et 75% !)

note (intermittence): en 2012, le parc éolien a produit en moyenne à 24% de sa capacité, le parc photovoltaïque a fonctionné à 13,3 % de sa capacité

note: le Grenelle de l'environnement a fixé comme objectif pour la France un doublement de la production d'énergies renouvelables entre 2005 et 2020, en portant notamment la puissance éolienne installée à 25 GW, et la puissance photovoltaïque à 5 GW

2012	Puissance installée	Energie produite
nucléaire	49,1% (63,1 GW)	74,8% (404,9TWh)
hydraulique	19,7% (25,4 GW)	11,8% (63,8TWh)
fossiles	21,6% (27,8 GW)	8,8% (47,9TWh)
dont gaz	8,2% (10,5)	4,3% (23,2)
dont charbon	6,2% (7,9)	3,3% (18,1)
dont fuel	7,3% (9,4)	1,2% (6,6)
éolien	5,8% (7,4 GW)	2,8% (14,9TWh)
photovoltaïque	2,7% (3,5 GW)	0,7% (4,0TWh)
therm renouvel	1,1% (1,4 GW)	1,1% (5,9TWh)
total	100% (128,7 GW)	100% (541,4TWh)

» **Assumer (mais être conscient de) l'effort national pour subventionner les ENR**

(ainsi que la co-génération, la péréquation tarifaire DOM/TOM et Corse):

la CSPE (13,5€/MWh pour chaque particulier en 2013) représente déjà plus de 10% de nos factures (et plus de 25% de la part électricité hors distribution et taxes !!) »

Ma facture d'électricité domestique

(du 23 avril 2013)

Tarif Bleu 9kW, HC/HP réparties 50/50, mars 2013		
	€/MWh	%
ENERGIE	49,90	39,2%
ACHEMINEMENT	33,62	26,4%
CSPE	13,5	10,6%
TCFE+CTA	10,56	8,3%
TVA	19,80	15,5%
total	127,38	100,0%

CSPE =
27,1%
de l'énergie !
et
10,6%
de la
facture TTC

CSPE: contribution au service public de l'électricité (financement des obligations d'achat des kWh éoliens, solaire, etc)
TCFE: taxe sur la consommation finale d'électricité (reversée aux communes, départements et à l'état)
CTA: contribution tarifaire d'acheminement (caisse nationale de retraite EDF et GDF)
TVA: taxe sur la valeur ajoutée (5,5% sur abonnement et CTA; 19,6% sur consommation, TCFE et CSPE)

nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

p.7

Prix comparés du kWh en Europe

► Statistiques européennes sur les prix de l'électricité facturée à l'utilisateur final (particulier et industriel): **avantage du consommateur français** (si on veille à ne pas le « sacrifier », cet avantage va être utile à la France dans son effort de réindustrialisation).

► A titre d'exemple, prix constatés en novembre 2011 :

	Prix de l'électricité livrée à l'utilisateur final consommation domestique de 3500Kwh par an en €/Kwh	Prix de l'électricité livrée à l'utilisateur final consommation industrielle de 20Gwh par an en €/Kwh
Allemagne	0,2781	0,1195
Belgique	0,2215	0,1053
Danemark	0,3078	0,1075
France	0,1478	0,0697
Italie	0,2164	0,1409
Royaume Uni	0,1676	0,1019

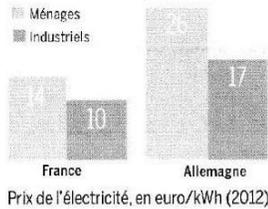
Source : Europe's energy portal : <http://www.energy.eu/>

nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

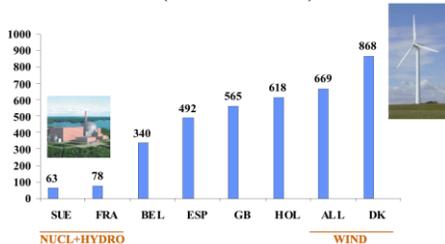
p.8

Le Monde 24 août 2013

« En Allemagne la transition énergétique se révèle coûteuse et polluante »



CO2 EMISSIONS IN EUROPE (TONS of CO2 /GWh)



nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

p.9

- Cas de Garzweiler: l'énorme mine de lignite à ciel ouvert de Rhénanie Nord-Westphalie tourne à plein régime. Son paysage lunaire s'étend déjà sur 66km². Son extension, Garzweiler II, recèle 1,3 milliards de tonnes de minerai. Elle va nécessiter de raser 12 villages et d'évacuer 7600 habitants pendant plus de 30 ans
- En 2012 un habitant allemand émettait déjà 10tCO₂/an (contre 6t par français, près de 2x moins). Sur la seule production électrique: le kWh allemand rejette 9 fois plus de CO₂ que le kWh français

Le paysage électrique en Allemagne

(source Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie)

► 617,6 TWh de production nette, dont:

- ◆ CIB: 594,7 TWh
- ◆ solde export: 22,3 TWh (6 en 2011)

► plans de sortie du nucléaire:

- ◆ 2001 (SPD + Grün): sortie entre 2008 et 2022
- ◆ 2010: assoupli, entre 2016 et 2036
- ◆ 2011: 8 arrêts, 9 autres 2015 à 2022

Note 1: en Allemagne il arrive que l'électricité éolienne excédentaire soit vendue à un "prix négatif" sur le marché spot de Leipzig (25 fois en 2009; -500€/MWh le 4/10/09)

Note 2: en Allemagne, la « EEG umlage » facturée aux consommateurs (sauf électro-intensifs) pour financer les renouvelables (équivalent de notre CSPE) est de 52,7€/MWh en 2013 (à comparer à 13,5€/MWh en France) !!

Note 3 (intermittence): en 2012, le parc éolien allemand a produit en moyenne à 18% de sa capacité, et le parc photovoltaïque à 12,8% de sa capacité

	Puissance installée 2011 (après Fukushima)	Energie produite 2012
nucléaire	7,2% (12,7 GW ; 20,5 GW en 2010)	16,1% (99,5TWh)
hydraulique	6% (10,6 GW)	4,4% (27,4TWh)
fossiles	49% (85,4 GW)	57,6% (356TWh)
dont gaz		11% (70)
dont charbon + lignite		45% (277)
dont fuel		1,5% (9)
éolien	16,6% (29,1 GW)	7,5% (46TWh)
photovoltaïque	14,2% (25 GW)	4,5% (28TWh)
Biomasse/divers	6,7% (11,8 GW)	9,8% (60,7TWh)
total	100% (174,5 GW)	100% (617,6TWh)

►► 8 réacteurs nucléaires arrêtés en mars 2011, et 9 arrêts prévus entre 2015 et 2022 ►►

nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

p.10

Coût de l'électricité par source en France hydraulique et nucléaire les champions

€/MWh (source: Cours des Comptes jan. 2012):

Centrales	Coût sortie centrale (euros 2010)	Part dans le mix électrique de la France en 2010
hydroélectricité	30 à 40	12,4%
nucléaire	33 à 50	74,1%
charbon	70 (avec tonne de CO2 à 20 euros) à 100 (avec tonne de CO2 à 50 euros)	5,0%
gaz naturel	80 (avec t de CO2 à 20 euros) à 90 (avec t de CO2 à 50 euros)	5,8%
éolien terrestre	80	1,7%
éolien off-shore	150 à 200	0%
photovoltaïque	240 à 400	1%

Quiz: combien faut-il d'éoliennes de 1MW pour remplacer un réacteur de 900MW comme Fessenheim ?

nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

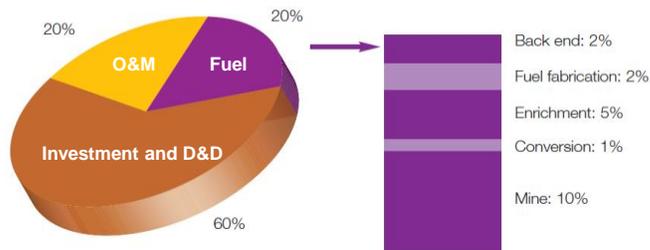
p.11

nuclear kWh cost structure (life cycle cost)

	Nuclear	Gas-fired (combined cycle)	Coal-fired
Investment	60-70% (including decommissioning)	15-20%	40-50%
M&O (maintenance & operation)	20%	5-10%	15-25%
Fuel	10-20% (including waste disposal)	70-80%	35-40%

OUI:

- le prix de l'uranium pourrait monter sans impact majeur sur le kWh nucléaire
- les coûts futurs de démantèlement et de gestion des déchets sont inclus dans le prix du kWh nucléaire



World average – Levelized power generation discounted cost structure of one kWh of nuclear electricity for light water reactors in operation, based on a 10% discount rate, in rounded figures source AREVA, October 2007 ; NEA, « Projected Costs of Electricity Generation », 2005 update

nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

p.12

France: coûts complets du kwh nucléaire

Oui, les subventions passées et les coûts futurs (démantèlement et déchets) sont inclus
(source: Cours des Comptes, 31 Janvier 2012)

Coût complet incluant tous les coûts passés, présents et futurs, dont les futurs
démantèlements et traitement des combustibles usés et déchets (escalés à 5%/an)

Life-cycle full cost accounting method

Exploitant	Montant Md€ 2010
Construction du parc de 1 ^{re} génération	EDF 6
Construction du parc de 2 ^e génération (58 réacteurs)	EDF 96
Cycle du combustible	AREVA 19
Recherche	EDF AREVA CEA Autres 55
Superphénix	EDF essentiellement 12
TOTAL	188

Montant Md€ 2010	
Combustible	2,13
Personnel d'EDF	2,68
Consommations externes (EDF)	2,01
Impôts et taxes (EDF)	1,12
Fonctions centrales (EDF)	0,87
TOTAL	8,95

En Md€ de 2010	Charges brutes	Provisions
Démantèlement	EDF AREVA CEA 20,1* 7,1 3,4	11,0 3,4 2,9
	Total 31,3	17,3
Dernier cycle	EDF 3,8	1,9
Gestion du combustible usé	EDF AREVA CEA 14,4 0,4 0,3	8,8 0,3 0,3
	Total 14,8	9,1
Gestion des déchets ultimes	EDF AREVA CEA ANDRA 2,1 2,9 2,4 0,8	4,5 1,8 1,2 0,04
	Total 28,4	9,8
Autres	Total 0,05	0,03
TOTAL	79,4	38,4

* Y compris les réacteurs de première génération

Results of the various calculations of generating cost per MWh according to objective

- Cost using the full cost accounting method, which takes into account the depreciation of the fleet but not the return on capital
- Cost using the Champsaur commission approach, which takes into account the depreciation of the fleet and return on the capital that is not amortized (with the objective of calculating a tariff)
- Current economic cost (CEC), which does not take into account fleet depreciation and which pays the capital originally invested, allowing for inflation (with the objective of calculating an average generating cost with no historical reference).

In €2010

€33,4/MWh

€33,1/MWh

€49,5/MWh

En Md€ de 2010	Coût comptable	Coût courant économique
Dépenses d'investissement de maintenance	1 747	1 747
Dépenses d'exploitation	10 084	10 084
Coût du capital	1 813	8 341
TOTAL	13 444	20 172
Coût au MWh produit	33,4€	49,5€

nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

p.13

Cours des Comptes, rapport du 31 Janvier 2012 « les coûts de la filière électronucléaire française »

► Dépenses passées: 188 Md€₂₀₁₀

◆ Investissement initial

- Construction des 58 réacteurs actuels: 96 Md€₂₀₁₀
- Réacteurs 1^{er} génération: 6 Md€₂₀₁₀
- Installations du cycle (dont retraitement): 19 Md€₂₀₁₀

◆ Coût de construction au MW

- 1,07 M€₂₀₁₀/MW en 1978 (Fessenheim) à 2,06 M€₂₀₁₀/MW en 2000 (Chooz)

◆ Dépenses de recherche cumulées depuis 1957

- 55 Md€₂₀₁₀ (1 Md/an: Etat 414M€, AREVA 339M€, EDF 295M€, autres 8M€)
- Superphénix 12 Md€₂₀₁₀

photovoltaïque
6M€₂₀₁₀/MWh (hors
onduleur, hors
installation, hors
démantèlement)*

à titre de comparaison
la CSPE 2013
subventionne déjà les
ENR à plus de 56€/an

► Charges d'exploitation: 8,9 Md€₂₀₁₀ pour 408TWh

► Charges futures incertaines par nature: 79,4 Md€₂₀₁₀ (provision 38,4 Md€₂₀₁₀)

- Démolition des 58 réacteurs: 18,4 Md€₂₀₁₀ (20,9 Md€₂₀₁₀ avec réacteurs GEN 1)
- Démantèlements AREVA: 7,1 Md€₂₀₁₀, CEA: 3,4 Md€₂₀₁₀
- Gestion long terme des déchets et combustibles usés (EDF, AREVA, CEA, ANDRA): 47 Md€₂₀₁₀

*note: photovoltaïque 6M€₂₀₁₀/MWh, 1000kWh/an (984 à Lyon), soit la valeur de 120 ans d'électricité à 50€/MWh; nucléaire 2,06 M€₂₀₁₀/MW, 6570kWh/an, soit 6 ans d'électricité à 50€/MWh

nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

p.14

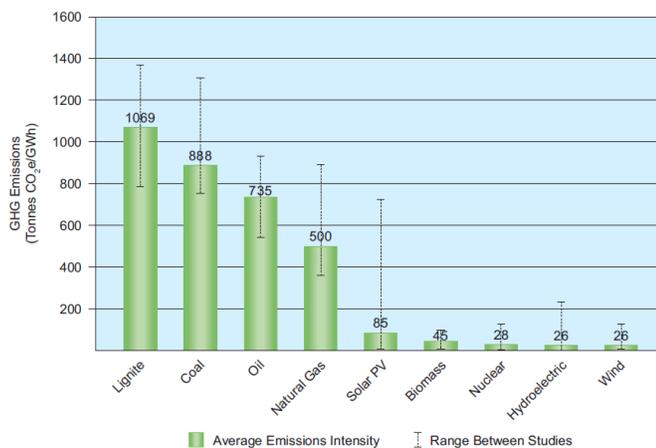
Photovoltaïque: analyse du cycle de vie temps de retour énergétique

► Il faut entre 7 et 13 ans pour qu'un capteur photovoltaïque produise en énergie électrique l'équivalent de l'énergie primaire qui a été nécessaire à sa fabrication:

Energy Pay Back Time (for an installation with a lifetime of 30 years and receiving an annual irradiation of 1440 kWh/m ²)	a-Si (6.5%)*	Mc-Si (13.2%)*	Sc-Si (14.0%)*	CdTe (7.6%)*	CIS (10.7%)*
	Years				
→ Primary	6.9-8.2	7.7-11.3	8.3-13.0	6.6-7.8	6.7-7.4
Of electric substitution (for France)	1.8-2.2	2.0-3.0	2.2-3.5	1.8-2.1	1.8-2.0

Source <http://www.espace-pv.org/> et http://www.espace-pv.org/documents/7a_armines30_espace_results.pdf
 (projet ESPACE financé par l'ADEME: Eco-conception of a photovoltaic system by its life cycle assessment and environmental impact European Workshop - Lyon, 30 October 2009)

CO2 emissions from various electricity generation sources

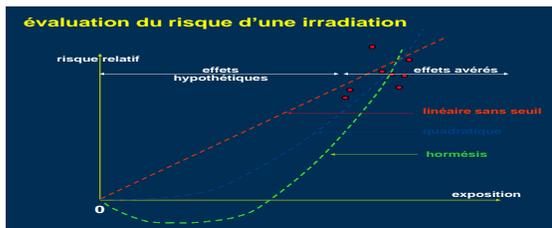


Source WNA 2011 (http://www.world-nuclear.org/uploadedFiles/org/reference/pdf/comparison_of_lifecycle.pdf):
 compilation of 21 international « credible sources. Studies published by governments and universities were sought out, and industry publications used when independently verified »

Le nucléaire, pourquoi en parle-t-on autant ?

d'après vous ?

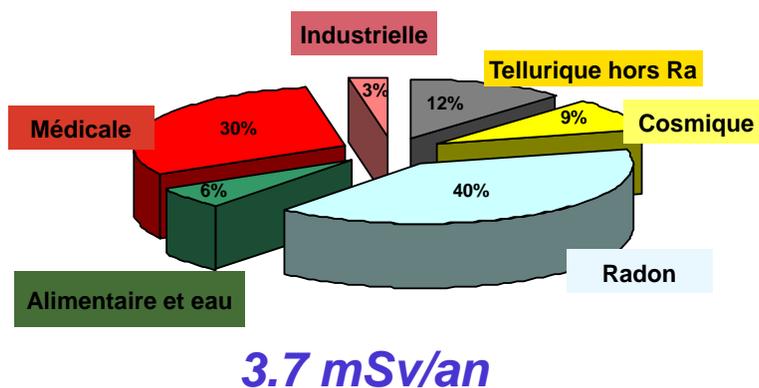
- Tchernobyl ? Fukushima ?
- Radioactivité ?
- Déchets ?
- Energie sans CO2 ?
- Électricité bon marché ?
- Débat public en France en 2013 ?
- 67 nouveaux réacteurs en construction sur la planète ?
- Autres ?



doses et effets

10 Sieverts (Sv)	Dose mortelle (6 Sv dose « létale 50% »)
100 milliSievert (mSv)	pas d'effet cancérigène jamais observé au dessous cette dose Risque de cancer accru de +1% à 250mSv/an (source CIPR)
20 milliSievert (mSv)	maxi autorisé par an pour les travailleurs du nucléaire 1 scanner médical = 15 à 20 mSv
2.5 milliSievert (mSv)	irradiation naturelle annuelle (France)
1 milliSievert (mSv)	Impact annuel maxi autorisé sur le public pour l'industrie nucléaire

Exposition à la radioactivité en France



dont 2.5mSv/an d'exposition naturelle (tellurique, cosmique, alimentaire)

Rapport Fukushima 2 ans après

sources: IRSN http://www.irsn.fr/Fuku2ans/Documents/IRSN_Dossier-Fukushima-2-ans_synthese.pdf
et OMS http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/78218/1/9789241505130_eng.pdf

- ▶ Le séisme du 11 mars 2011 de magnitude 9 est le plus important jamais survenu au Japon. Il a provoqué un déplacement du pays de 2,40 m et a décalé de plus de 10 cm l'axe de rotation de la Terre. Avec le tsunami qui a suivi, il a provoqué la mort de plus de 18500 personnes
- ▶ La radioactivité totale relâchée à partir du 12 mars ($\sim 10^{17}$ Bq d'Iode 131, $\sim 10^{16}$ Bq de Césium 137) a été environ 10% de celle de Tchernobyl
- ▶ Dès le 11 mars l'évacuation des populations est lancée (rayon de 20 km). La réintégration progressive des 110000 personnes déplacées a démarré fin 2011
- ▶ En Europe et en France, seules des traces de radioactivité sans conséquences ont été détectées lors du passage du nuage les 24 et 25 mars 2011 (~ 1 milliBq/m³ Iode131, \sim centième de milliBq/m³ Césium 137). Note: à titre de comparaison, c'est 100000 à 1 million de fois plus faible que l'exposition naturelle domestique de 400 Bq/m³ admise dans nos caves et due au Radon
- ▶ Au Japon 2 millions de personnes de la zone évacuée et de la préfecture de Fukushima font l'objet d'un suivi épidémiologique qui va durer 30 ans:
 - ◆ Lorsque le 15 mars 2011 les doses sont devenues significatives l'évacuation des 80000 personnes de la zone des 20 km était heureusement déjà achevée
 - ◆ L'accident nucléaire n'a fait aucune victime liée aux radiations (parmi les travailleurs de Tepco, 7 décès pour autres causes en 2 ans dont 2 noyés le 11/3/2011)
 - ◆ Après 2 ans l'OMS a évalué que les effets des radiations sur la santé des populations resteront au dessous des seuils détectables; même en faisant l'hypothèse très pessimiste du modèle « linear no-threshold » seuls quelques enfants parmi les 95000 faisant l'objet d'un suivi thyroïdien pourraient présenter un risque accru de cancer de 1% (le risque de cancers « naturels » des pays industrialisés est déjà d'environ 30%)
 - ◆ Concernant les 25000 travailleurs et liquidateurs: seuls 6 ont subi des doses > à 250mSv

Le Césium 137, principal vecteur de la pollution radioactive à distance

Éléments radioactifs	Période radioactive (demi-vie)
Iode 131	8 jours
Tellure 132	78 heures
Tellure 129m	33 jours
Ruthénium 103	39 jours
Césium 137	30 ans
Césium 134	2 ans
Baryum 140	13 jours

Le ^{137}Cs est facilement mesuré par spectrométrie gamma à partir de la rate d'émission de son fils, le $^{137\text{m}}\text{Ba}$, émetteur gamma et X.

Source IRSN

^{137}Cs					
Période radioactive	30 ans				
Activité massique	$3,2 \cdot 10^{12} \text{ Bq.g}^{-1}$				
Emission(s) principale(s)	Désintégration β^- $E_{\text{max}} = 514 \text{ keV}$ (94,6 %) $E_{\text{max}} = 1176 \text{ keV}$ (5,4 %)				
Frendement d'émission pour 100 désintégrations	<table border="0"> <tr> <td>$^{137\text{m}}\text{Ba}$</td> <td>Emission γ E = 662 keV (85%)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Emission X Couche K : $E_{\text{max}} = 33 \text{ keV}$ (7%)</td> </tr> </table>	$^{137\text{m}}\text{Ba}$	Emission γ E = 662 keV (85%)		Emission X Couche K : $E_{\text{max}} = 33 \text{ keV}$ (7%)
$^{137\text{m}}\text{Ba}$	Emission γ E = 662 keV (85%)				
	Emission X Couche K : $E_{\text{max}} = 33 \text{ keV}$ (7%)				

[ICRP, 1983 - Browne et Firestone, 1986]

nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

p.21



Le « mensonge » et la fausse accusation de Libé

1986



TCHERNOBYL: LE CHOC DU NUAGE
 Pierre Pellerin, le directeur du service central de protection contre les radiations ionisantes (SCPRI) a annoncé hier que l'augmentation de radioactivité était enregistrée sur l'ensemble du territoire, sans aucun danger pour la santé.

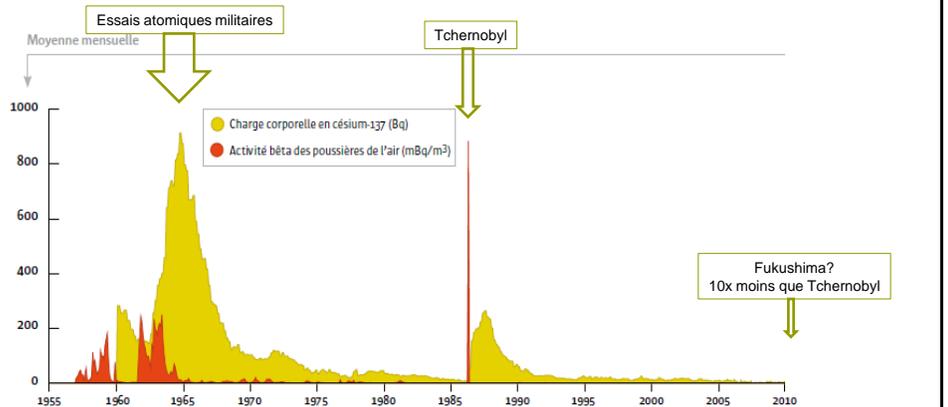


LE MENSONGE RADIODACTIF
 Le nuage radioactif de Tchernobyl a bien survolé une partie de l'Hexagone
 Les pouvoirs publics en France ont menti, le nuage radioactif de Tchernobyl a bien survolé une partie de l'Hexagone: le professeur Pellerin en a fait l'aveu deux semaines après l'accident nucléaire.

nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

p.22

Césium-137 corporel dans la population Belge (idem France) (radioactive period 30.15 years, biological period 100 days)



► Fig. 12 - Evolution des moyennes de la charge corporelle en césium-137 dans la population belge et de l'activité bêta des poussières de l'air en Belgique.

Source: « Tchernobyl 25 ans après », SCK-CEN, Centre d'Etudes de l'Energie Nucléaire, Belgique

Note: à comparer à la radioactivité « naturelle » corporelle (7000 à 10000 Bq)

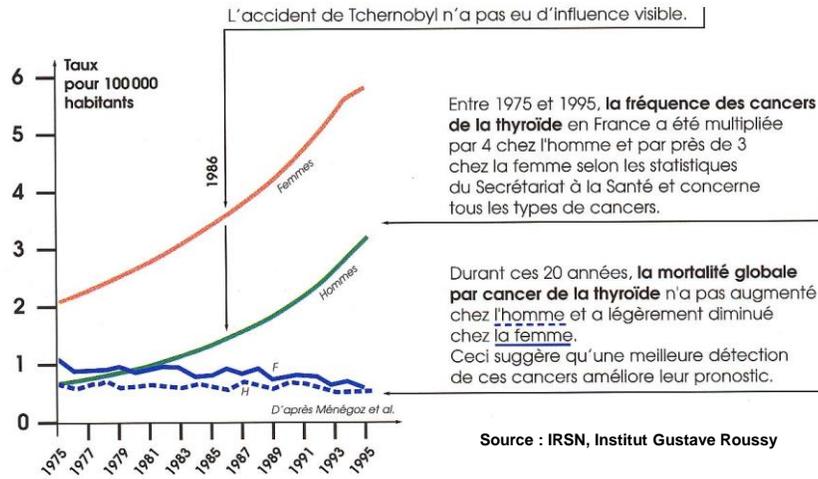
Impact sanitaire de Tchernobyl

(Sources IRSN_Livret_Tchernobyl_2011 et UNSCEAR rapport 2011)

- **pompiers, personnels de la centrale:** sur 600, 30 sont décédés dans les 4 mois des suites de l'irradiation, plus 19 de causes diverses dans les 20 ans qui ont suivi
- **530000 liquidateurs:** 25 ans après, certaines maladies semblent corrélées aux doses absorbées (120mSv en moyenne, plus de 1 Sv pour certains), notamment cancers de la thyroïde, leucémies, cataractes, maladies cardio et cérébrovasculaires, mais les écarts semblent peu importants par rapport aux taux de mortalité de ces maladies chez des populations non-exposées aux rayonnements (des études font même état d'un phénomène d'hormèse)
- **6,4 millions d'habitants des zones contaminées dans les trois républiques (>37000 Bq/m²):** de 1991 à 2005, 6 848 cancers de la thyroïde ont été constatés pour les enfants âgés de moins de 18 ans en 1986. Ces cancers, s'ils ont été quasiment tous curables (15 décès observés en 20 ans), représentent la conséquence sanitaire la plus visible et anxiogène de l'accident
- **France:** les doses reçues par la population sont faibles (<1mSv/an en 86, <0,01mSv/an aujourd'hui, à comparer à 2,5mSv/an d'exposition naturelle)

Cancers de la thyroïde en France: aucun effet Tchernobyl en 1986

note: iode 131 période 8,07 jours



7 sept 2011: la cour d'appel de Paris clôt sur un non-lieu l'enquête contre le Pr Pierre Pellerin en concluant qu'aucun lien n'existe en France entre Tchernobyl et les maladies de la thyroïde

nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

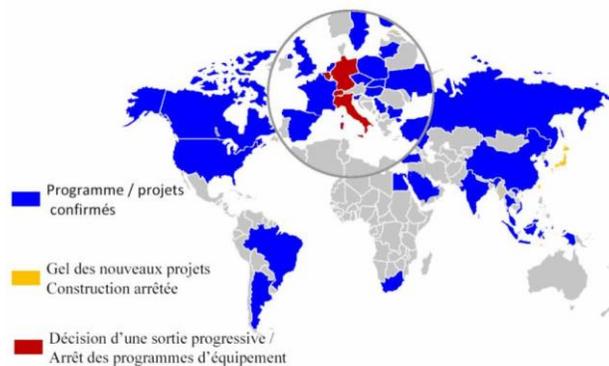
p.25

le nucléaire mondial après Fukushima

(Sources: rapport Birraux 15 déc 2011 et AIEA juin 2013 http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/rds2-33_web.pdf)

Énergie nucléaire : la plupart des pays s'inscrivent dans la continuité

Les gouvernements mondiaux ont adopté une approche pragmatique concernant les programmes de constructions de nouvelles centrales nucléaires. La plupart des pays ont **confirmé** leurs programmes de nouvelles constructions mais en ont **reportés**, le temps de réaliser des **tests de résistance** et **évaluations de sûreté**. En Europe, le gouvernement **italien a annulé** son programme de nouvelles constructions, **l'Allemagne et la Suisse ont décidé d'arrêter** progressivement leur production d'énergie nucléaire, ainsi que la **Belgique** à condition de disposer de solutions alternatives viables.



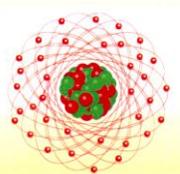
» 2 ans après Fukushima, 67 réacteurs nucléaires sont en construction dans le monde et plus de 160 en projet »

nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

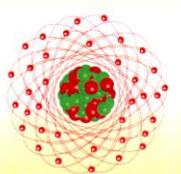
p.26

quelques fondamentaux du nucléaire

l'uranium: combustible naturel, abondant, bon marché



Atome d'uranium 238
92 protons
146 neutrons
92 électrons



Atome d'uranium 235
92 protons
143 neutrons
92 électrons



comparaison des contenus énergétiques des combustibles

Pour produire ↓	Il faut consommer (quantités arrondies) ↓	
<p>1 GWhe*</p> <p>↑</p> <p>(besoin en électricité pour la vie entière d'un américain moyen)</p>	CHARBON	300 000 000 grammes
	PETROLE	200 000 000 grammes
	NUCLEAIRE d'aujourd'hui (et EPR)	20 000 grammes d'uranium naturel
	NUCLEAIRE de demain (réacteurs surgénérateurs)	500 g d'uranium naturel (en recyclant le Plutonium)
	FUSION ...après demain	10g de deuterium + 15g de tritium (ou 30 g ⁶Lithium)

} Dont seulement 100 grammes qui fissionnent (U235 ou Pu)

* 1 Gwhe (gigawatheure électrique) = 1 million de kilowatt.heure d'électricité source: info sur l'énergie, CEA.

nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

p.29

comparaison des réserves mondiales de combustibles

	Réserves mondiales prouvées (années aux rythmes de consommations actuelles)
Pétrole	41 ans*
Gaz	61 ans*
Charbon	129 ans*
Uranium / fission actuelle (Réacteurs de générations II & III)	111 ans**
Uranium / fission future (Réacteurs surgénérateurs, GEN IV)	> 3500 ans
Lithium pour la fusion (1 st génération fusion Deutérium-Tritium)	> 5000 ans

Le besoin de réacteurs de génération IV QUAND ?

* Source: CEA, Energy Handbook, 2010

** Source OECD/IAEA Redbook 2011: 7.097MMU reasonably assured and inferred resources <260USD/kgU including 5.3MtU <130USD/kgU (plus 10.4MMU prognosticated and speculative) – world demand 63875tU, 440 reactors, 375GW – world production 54670tU (2010)

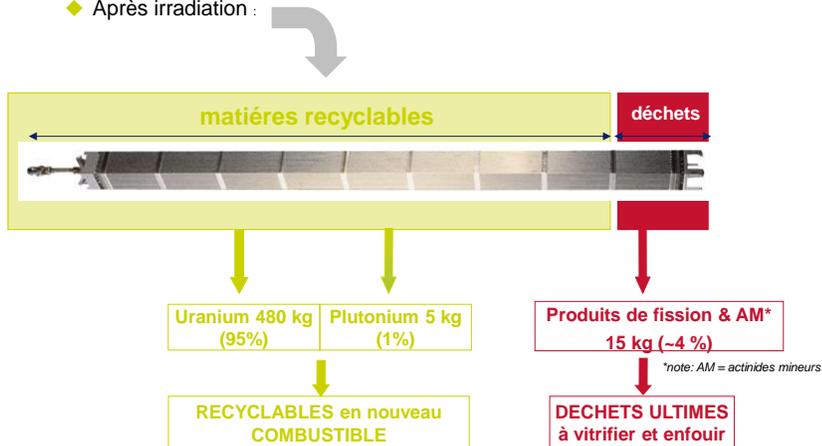
nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

p.30

96% du combustible utilisé est recyclable

► Réacteur de fission à eau légère (type EDF):

- ◆ Assemblage combustible neuf: ~ 500 kg d'uranium
- ◆ Après irradiation :



nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

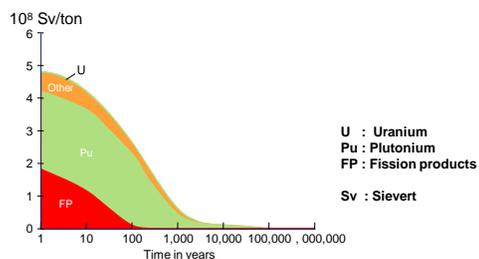
p.31

Radiotoxicité du combustible utilisé la radioactivité, ça décroît

Spent fuel assembly
(~500kgU per LWR fuel assembly)



Spent fuel radiotoxicity over time



Note: percentages may vary with burn-up rate

nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

p.32

Le nucléaire: **petites** quantités de combustible (et de déchets) et parfois **grandes** inquiétudes sociétales

A la différence de nos autres déchets (domestiques, industriels, transports...) notre "empreinte nucléaire" individuelle, en tant que consommateurs d'électricité, est ... **radioactive** certes, mais **petite** et **gérable**

Le cas français en témoigne, si nucléarisé soit-il (75% d'électricité nucléaire):

- ◆ ~ 1100 tonnes/an de combustible utilisé en France:
 - 1050t/an recyclables Uranium/Plutonium
 - 50t/an de déchets ultimes de haute activité
- ◆ ~ 63 millions d'habitants
- ◆ soit ~ **0.8g de déchets ultimes non-recyclables/pers.an** →
(le poids d'une pièce jaune + qqes grammes de verre d'emballage)



Note: ML = métal lourd, U = uranium, Pu = plutonium, AM = actinides mineurs, PF = produits de fission, HA = haute activité, t = tonne, g = gramme

nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

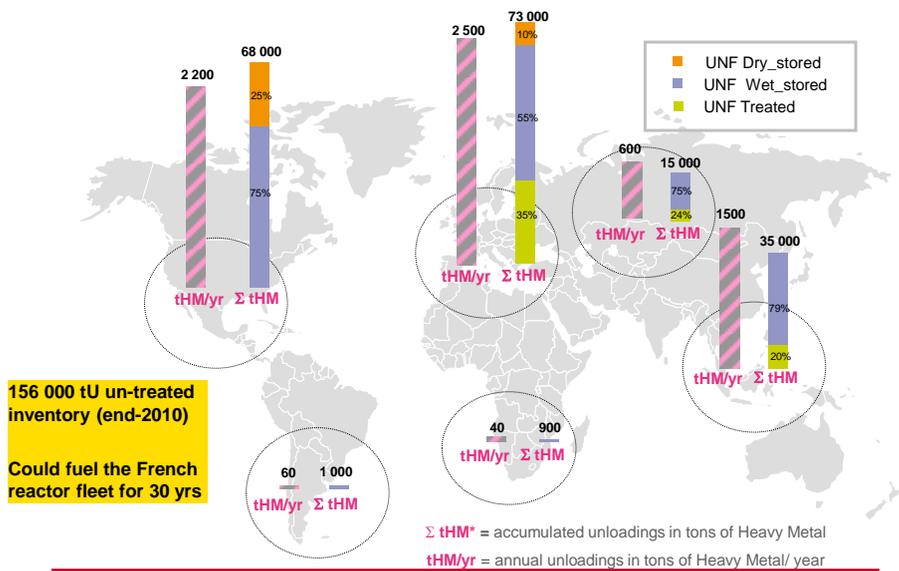
p.33

Quels développements futurs ? Quel nucléaire demain ?

nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

p.34

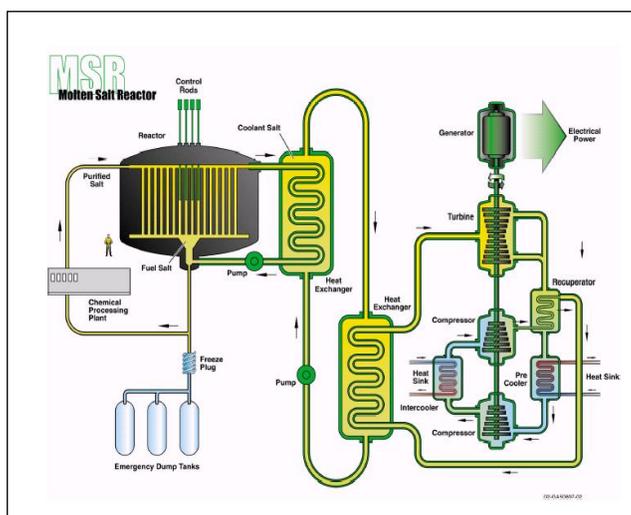
LWR used fuel unloadings - 2010



nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

p.35

Les réacteurs de génération 4: en France ASTRID (neutrons rapides, refroidi au sodium, 2020) autre exemple ci-dessous: le réacteur à sel combustible fondu



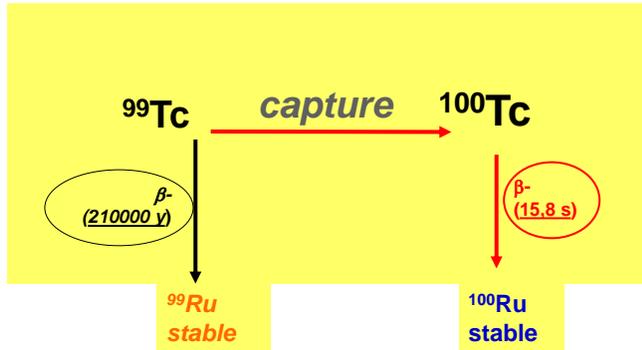
features:

- thermal or fast neutrons
- on-line re-processing
- continuous fuel renewal
- safety: molten fuel, passive emptying, no pressure
- breeding possible thanks to low core inventory (in particular Thorium fluoride)
- no fuel fabrication
- high T° (700°C) and higher efficiency
- electricity and/or H2 production
- actinide burning
- no spent fuel
- R&D needed: salt chemistry, corrosion
- proliferation-resistant

nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

p.36

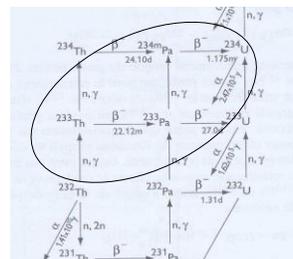
demain: transmutation des déchets de fission ? exemple: transmutation du Technetium



*IODINE : idem but 2 isotops
CAESIUM: numerous isotops*

Une alternative à l'uranium: le Thorium des réacteurs à $^{232}\text{Th} / ^{233}\text{U}$?

- ▶ ^{233}U fissile, but not natural
- ▶ ^{232}Th « fertile » : ^{233}Pa , decay: ^{233}U
- ▶ ^{232}Th reserves: 3 times uranium ones
- ▶ ^{233}U : high multiplication factor



Nuclide	Fast neutrons	Thermal neutrons
Uranium 233	2.27	2.29
Uranium 235	1.88	2.07
Plutonium 239	2.33	2.11

← thermal breeding feasible

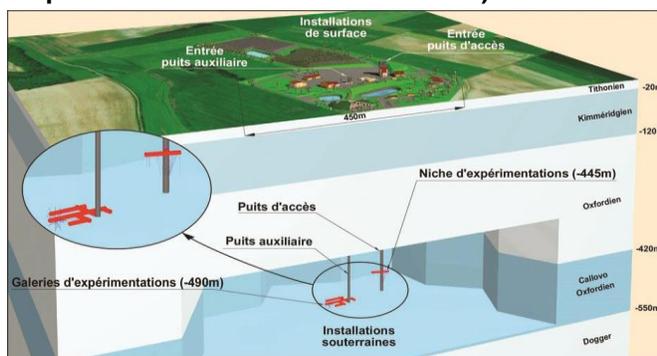
Necessity of a prior cycle with another fissile nucleus to fertilize ^{232}Th

2013 aussi l'année d'un 2^{ème} débat public: CIGEO, stockage des déchets nucléaires de haute activité

<http://www.debatpublic-cigeo.org/>

CIGEO: Centre Industriel de stockage GEOlogique des déchets hautement radioactifs 2013 année du débat public en France

- CIGEO (décision 2014): argilite du Callovo-Oxfordien, à 500m de profondeur, étanche à l'eau (une goutte d'eau s'y déplace de 10 mètre en 1 million d'année), zone non sismique, stable depuis 160 millions d'années (alors que 10000 ans « suffiront » pour que les déchets perdent leur excès de radioactivité)



Conclusion: avons nous le choix ?

énergie nucléaire ? oui, nous avons le choix

- ▶ **Elle existe depuis toujours et n'est pas une invention de l'homme**
- ▶ **Que l'on s'en serve ou pas pour produire de l'électricité elle continuera d'exister car elle n'est pas moins que 2 des 4 forces fondamentales qui façonnent la nature**
- ▶ **Comme pour les autres forces de la nature, l'homme a le choix de la domestiquer (électricité, médical, militaire, industrie, ...) ou de la subir (radioactivité, volcanisme, séismes, rayons cosmiques, fusion et fission dans les étoiles, ...)**
- ▶ **Depuis 60 ans elle sert principalement à produire de l'électricité grâce à des outils qui ne cessent de s'améliorer**

Les autres sources d'énergie?

Oui, plusieurs nous font rêver; oui, nous avons le choix

- ▶ Le feu (le bois, la biomasse)
- ▶ Le vent (les voiles, les moulins à vent, les éoliennes)
- ▶ L'eau et l'énergie hydraulique (les moulins à eau, les barrages, les marées, les vagues, les hydrauliques)
- ▶ Le charbon
- ▶ Le pétrole
- ▶ Le gaz
- ▶ L'énergie solaire (photovoltaïque, thermique)
- ▶ La géothermie
- ▶ L'énergie nucléaire de fission
- ▶ L'énergie nucléaire de fusion (celle du soleil et des étoiles)

» Toute substitution du nucléaire trop volontariste ou irraisonnée prendrait le risque de l'incohérence climatique et de l'impasse économique
Source: OPECST, 15 décembre 2011 »

nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

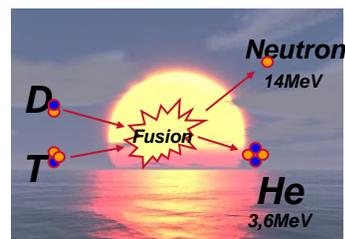
p.43

Conclusion/conviction

une transition énergétique durable et équitable doit:

1. **ECONOMISER** l'énergie
2. Faire une place croissante à toutes les **ENERGIES DURABLES** et **RECYCLABLES**
3. Faire une place significative à l'**ENERGIE NUCLEAIRE propre et respectueuse de l'environnement**, celle qui recycle les combustibles nucléaires usés (dans les réacteurs actuels et demain dans des **SURGENERATEURS**), celle qui assume ses déchets et met enfin en œuvre leur **STOCKAGE GEOLOGIQUE**
4. Fournir l'énergie abondante, bon marché, durable et respectueuse de la planète, base d'un développement **équitable et fraternel des pays riches et des pays en développement** (sinon l'énergie sera source de conflits, de tensions, d'inégalités, de danger pour la planète)

... avant que la fusion ne vienne en renfort
... vers la 2^{ème} moitié du 21^{ème} siècle



nucléaire repères et enjeux, Jean-Luc Salanave, GLAX, Lyon le 18 Septembre 2013

p.44